



**HAL**  
open science

## Caractérisation d'un convergent axisymétrique destiné à la validation expérimentale de production de parole

Yo Fujiso, Bo Wu, Xavier Grandchamp, Annemie van Hirtum

### ► To cite this version:

Yo Fujiso, Bo Wu, Xavier Grandchamp, Annemie van Hirtum. Caractérisation d'un convergent axisymétrique destiné à la validation expérimentale de production de parole. RJCP 2011 - 9ème Rencontres des Jeunes Chercheurs en Parole, May 2011, Grenoble, France. pp.47. hal-00596991

**HAL Id: hal-00596991**

**<https://hal.science/hal-00596991>**

Submitted on 30 May 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Caractérisation d'un convergent axisymétrique destiné à la validation expérimentale de production de parole

Y. Fujiso, B. Wu, X. Grandchamp, A. Van Hirtum

GIPSA-Lab, UMR 5216 CNRS, INPG  
961 rue de la Houille Blanche BP 46 - 38402 Grenoble Cedex, FRANCE  
+33 (0)4 76 57 48 48 / yo.fujiso@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

## ABSTRACT

Flow through a contraction nozzle used as an inflow geometry for *in-vitro* vocal tract replicas mounted in an experimental flow facility is studied for low to moderate Reynolds numbers. The flow is characterised experimentally by hot-wire anemometry at the nozzle exit. The estimated boundary layer characteristics are used to validate Thwaites boundary layer solutions with the aid of universal functions for the shape and skin friction parameters.

**Keywords:** boundary layer, contraction nozzle flow, instrumentation, speech production

## 1. Introduction

En aéronautique, de nombreuses études concernant la conception de soufflerie soulignent l'importance de la géométrie amont sur les caractéristiques d'écoulement à l'entrée de la section de travail de la soufflerie [6]. Dans le cas de la validation expérimentale de production de parole, les conditions amont de l'écoulement sont rarement prises en compte. La plupart des études concernent en effet des répliques *in vitro* de plis vocaux [1] et leur auto-oscillation durant la phonation ou la production de parole voisée, si bien que les conditions amont d'écoulement importent peu. Cependant, dans le cas où l'on s'intéresse à d'autres sons de parole impliquant par exemple le bruit dû à la tubulence ou à des interactions tourbillonnaires [10], il est nécessaire d'avoir une arrivée d'air laminaire dont les caractéristiques de couche limite sont connues afin de limiter l'influence des conditions amont sur l'écoulement aval et sur la production de bruit au travers de la réplique *in vitro* étudiée. Dans cette optique, il est choisi ici d'étudier une géométrie de convergent axisymétrique de longueur 6cm inspirée par la géométrie exposée dans [6, 3], ce convergent étant utilisé comme géométrie d'entrée dans un dispositif d'écoulement destiné à la validation expérimentale de production de parole.

## 2. Modélisation de l'écoulement

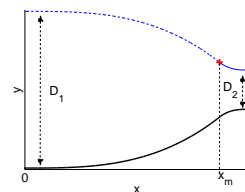
### 2.1. Géométrie du convergent

Le rayon  $R(x)$  d'un convergent axisymétrique est défini comme l'intersection de deux cubiques [3, 6] :

$$R(x) = \left( \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} \right) \left( 1 - \frac{(x/L)^3}{(x_m/L)^2} \right) + \frac{D_2}{2}, \quad x \leq x_m \quad (1)$$

$$R(x) = \left( \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} \right) \frac{(1 - x/L)^3}{(1 - x_m/L)^2} + \frac{D_2}{2}, \quad x > x_m \quad (2)$$

avec  $x$  la direction longitudinale, au point d'intersection  $x = x_m$ ,  $D_1$  le diamètre d'entrée,  $D_2$  le diamètre de sortie et  $L$  la longueur du convergent. Ainsi, la géométrie du convergent (figure 1) de diamètre variable  $D(x)$  est définie par l'ensemble de paramètres  $(D_1, D_2, L, x_m)$  ou  $(D_{1,2}, CR, L, x_m)$  où  $CR = (D_2/D_1)^2$  est le rapport de sections.



**Figure 1:** Géométrie du convergent ( $D_1=100\text{mm}$ ,  $D_2=25\text{mm}$ ,  $L=60\text{mm}$ ,  $x_m=52\text{mm}$ )

### 2.2. Solution de couche limite laminaire

Pour des nombres de Reynolds modérés la région dans laquelle les forces de viscosité sont importantes est confinée à une fine couche limite adjacente à la paroi. La couche limite résultante en présence d'un gradient de pression est décrite par l'équation intégrale de quantité de mouvement de Von Kármán pour des écoulements stationnaires [11, 7]. Le développement de la couche limite laminaire sur les parois du convergent défini dans la section 2.1 est estimé par la méthode de Thwaites pour résoudre l'équation intégrale de quantité de mouvement pour des couches limites laminaires, incompressibles et axisymétriques [8, 9]. En dehors de la couche limite, l'écoulement est décrit par celui d'un fluide idéal non visqueux irrotationnel dans un canal. L'écoulement dans le convergent est modélisé en calculant l'épaisseur de quantité de mouvement de la couche limite laminaire,

$$\delta_2(x) = \int_0^\infty \frac{u(x, y)}{U(x)} \left( 1 - \frac{u(x, y)}{U(x)} \right) dy, \quad (3)$$

comme fonction de la distance aval  $x$  avec l'équation de Thwaites [9] sous des hypothèses de quasi-similarité [9, 11] :

$$\delta_2^2(x) = \frac{0.45\nu}{R^2(x)U^6(x)} \int_0^x R^2(x)U^5(x)dx \quad (4)$$

Le paramètre de frottement pariétal  $S(\lambda)$ ,

$$S(\lambda) = \frac{\delta_2}{U(x)} \frac{\partial U}{\partial y}, \quad (5)$$

s'annule à la séparation de l'écoulement et dépend uniquement du paramètre de Thwaites  $\lambda$  :

$$\lambda = -\frac{\delta_2}{\nu} \frac{\partial U(x)}{\partial x}. \quad (6)$$

Également, un paramètre de forme  $H(\lambda)$  caractérisant la couche limite est introduit :

$$H(\lambda) = \frac{\delta_1(x)}{\delta_2(x)}, \quad (7)$$

où  $\delta_1$  représente l'épaisseur de déplacement,

$$\delta_1(x) = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u(x,y)}{U(x)}\right) dy. \quad (8)$$

Les paramètres de frottement pariétal  $S(\lambda)$  et de forme  $H(\lambda)$  sont obtenus à partir des données expérimentales décrites par les fonctions universelles modifiées de Thwaites [2] :

$$S(\lambda) = 1.8\lambda^2 + 1.57\lambda + 0.22 + c_S, \quad 0 \leq \lambda \leq 0.1 \quad (9)$$

$$H(\lambda) = 5.24\lambda^2 - 3.75\lambda + 2.61 + c_H, \quad (10)$$

$$S(\lambda) = \frac{0.018\lambda}{0.107 + \lambda} + 1.402\lambda + 0.22 + c_S, \quad -0.1 \leq \lambda \leq 0 \quad (11)$$

$$H(\lambda) = \frac{0.0731}{0.14 + \lambda} + 2.088 + c_H, \quad (12)$$

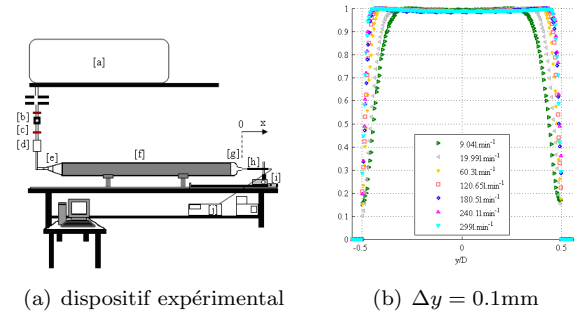
pour lesquelles les valeurs des constantes  $c_{S,H}$  dépendent de l'écoulement et de la géométrie.

### 3. Protocole et mesures de vitesse

Un schéma du dispositif expérimental est donné sur la figure 2(a). Le convergent (g) est celui décrit dans la section 2.1 et sa sortie possède une section  $S = 0.00036\text{m}^2$ , imposant sur l'écoulement d'air un rapport de sections  $CR = 21.8$ . Le film chaud (h) (TSI 1201-20, diamètre  $50.8\mu\text{m}$  et longueur de travail  $1.02\text{mm}$ ) est placé à une distance  $x < 0.04D$  en aval de la sortie du convergent. Afin de mesurer le profil de vitesse de sortie, la sonde est montée sur un système de positionnement bidimensionnel de précision  $2\mu\text{m}$  (i). À chaque acquisition, le signal est collecté durant  $4\text{s}$  à  $40\text{kHz}$  par un système d'anémométrie à température constante (j) (TSI IFA 300) et enregistré sur ordinateur. À l'exception du compresseur d'air, le dispositif complet est installé dans une salle confinée afin d'éviter toute perturbation de l'écoulement. Au début de chaque mesure de profil de vitesse, la température de la salle est contrôlée grâce à un système de conditionnement d'air afin de minimiser les variations de température. Pour prendre en compte la dérive thermique de la température de salle  $T_a$  par rapport à la température ambiante de référence,  $T_{a,r} = 21.5^\circ\text{C}$ , les tensions de sortie du film chaud mesurées  $E_{meas}$  sont corrigées par  $E_{corr}$  [5], avec  $T_f$  la température de l'écoulement d'air :

$$E_{corr} = E_{meas} \left( \frac{T_f - T_a}{T_f - T_{a,r}} \right)^{-1/2}. \quad (13)$$

La vitesse est obtenue à partir des tensions  $E_{corr}$  en suivant la procédure de calibration décrite dans [4].



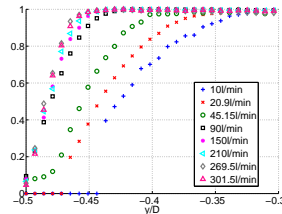
**Figure 2:** a) Schéma du dispositif : (a) alimentation en air, (b) régulateur de pression, (c) valve, (d) débitmètre, (e) divergent, (f) tuyau uniforme, (g) convergent, (h) film chaud, (i) système de positionnement, (j) IFA 300. b) profils de vitesse normalisée [4].

Les caractéristiques de l'écoulement sont vérifiées en déplaçant la sonde à travers la ligne médiane horizontale du jet à une distance  $x < 0.04D$  avec un pas transversal  $\Delta y = 0.1\text{m}$ . Les profils de vitesse moyenne normalisée de sortie,  $U(y)/U_c$  avec  $U_c$  la vitesse de sortie de noyau, sont présentés sur la figure 2(b). Pour les vitesses volumiques,  $U_0 = Q_{meas}/S$ , au-delà de  $1\text{m/s}$  la variation dans les profils de vitesse moyenne est inférieure à  $0.5\%$  dans la partie centrale du jet  $|y| < 0.25D$ , et ne dépasse pas  $2\%$ . L'intensité de turbulence de ligne médiane  $T_U$  est définie par  $T_U = \frac{\sigma}{U}$ , où  $\sigma$  représente la moyenne quadratique obtenue par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_{tot}} \sum_{p=1}^{N_{tot}} (U_p - U)^2}, \quad (14)$$

avec  $N_{tot}$  le nombre total d'échantillons,  $U_p$  le  $p$ ème échantillon instantané et  $U$  la vitesse moyenne; elle est inférieure à  $1\%$  pour toutes les vitesses. Par conséquent, l'écoulement en sortie du convergent est laminaire et la couche limite est confinée au voisinage de la paroi pour tous les nombres de Reynolds évalués  $300 < Re < 21000$  avec  $Re = U_0 D / \nu$  le nombre de Reynolds basé sur la vitesse volumique correspondant aux débits volumiques dans la gamme  $5 < Q_{meas} < 320\text{L}/\text{min}$ .

Afin de caractériser précisément le développement de vitesse dans la couche limite, les profils de vitesse proches de la paroi sont mesurés avec un pas transversal  $\Delta y = 10^{-6}\text{m}$ . Les profils de vitesse de couche limite en sortie,  $U(y)/U_c$ , sont représentés sur la figure 3.



**Figure 3:** Profil mesuré de vitesse normalisée  $U(y)/U_c$  pour  $\Delta y = 0.01\text{mm}$

## 4. Résultats et discussion

À l'aide des équations de la section 2.2 implémentées dans un algorithme, la vitesse de ligne médiane  $U_c$  et les caractéristiques de couche limite  $\delta_{1,2}$  sont obtenues pour un débit volumique  $Q$  connu et une géométrie de convergent de section  $A(x)$ . Les influences des paramètres géométriques et de simulation sur l'écoulement sont étudiées dans la section 4.1. Une validation expérimentale en sortie du convergent est présentée dans la section 4.2.

### 4.1. Écoulement dans le convergent

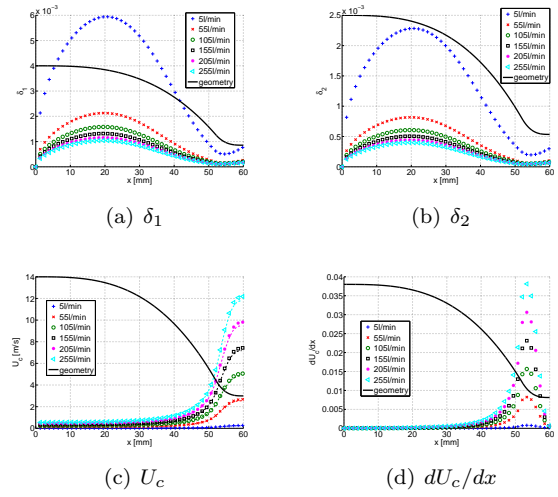
L'écoulement dans le convergent est modélisé pour différents débits volumiques et paramètres géométriques résumés dans la table 1. La longueur du convergent  $L = 60\text{mm}$  et le point d'intersection  $x_m = 52\text{mm}$  sont fixés tandis que les valeurs de  $D_1$ ,  $D_2$  et  $CR$  varient de telle sorte que l'influence individuelle de chaque paramètre sur l'écoulement modélisé peut être évaluée.

**Table 1:** Paramètres de convergents avec un point d'intersection  $x_m = 52\text{mm}$  et une longueur  $L = 60\text{mm}$  fixés : I) diamètre d'entrée  $D_1$  constant, II) diamètre de sortie  $D_2$  constant, III) rapport de contraction  $CR$  constant et IV) paramètres utilisés pour la validation expérimentale.

	$D_1$ [mm]	$D_2$ [mm]	$CR$ [-]
I ( $D_1$ )	100	21.2	22.2
	100	21.4	21.8
	100	21.6	21.4
II ( $D_2$ )	100	25	16
	50	25	4
III ( $CR$ )	45.4	21.4	4.5
	45.8	21.6	4.5
IV (Exp)	100	21.4	21.8

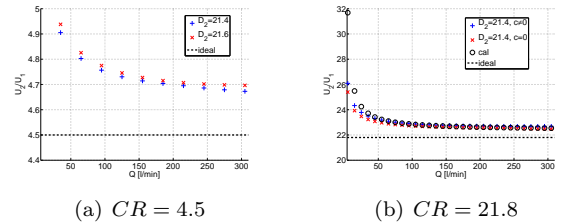
Les quantités de l'écoulement longitudinal modélisé pour différents débits ( $5 \leq Q \leq 255\text{L/min}$ ) sont présentées sur la figure 4. La géométrie du convergent est caractérisée par l'ensemble de paramètres  $D_1 = 100\text{mm}$ ,  $D_2 = 21.4\text{mm}$ ,  $L = 60\text{mm}$  et  $x_m = 52\text{mm}$ . Les résultats du modèle présentés sont obtenus avec les paramètres de modèle  $c_H = 0$  et  $c_S = 0$ .

Au début la couche limite se développe dans une section d'entrée quasi-uniforme ce qui résulte en une augmentation de  $\delta_{1,2}$ . Plus loin en aval,  $\delta_{1,2}$  diminue en raison de l'accélération de l'écoulement dans la direction longitudinale vers le point d'intersection  $x_m$  des deux cubiques imposant une vitesse d'écoulement plus élevée qui réduit les effets visqueux et ainsi la croissance de la couche limite. En aval du point d'intersection ( $x \geq x_m$ ), l'écoulement ralentit vers la sortie en raison du taux de variation de section réduit. Ainsi, comme une diminution de la vitesse entraîne une augmentation des effets visqueux et donc un épaissement de la couche limite, on observe que les valeurs de  $\delta_{1,2}$  augmentent. L'écoulement atteint sa vitesse de ligne médiane maximale en sortie du convergent.



**Figure 4:** Modélisation de l'écoulement longitudinal dans le convergent pour différents débits.

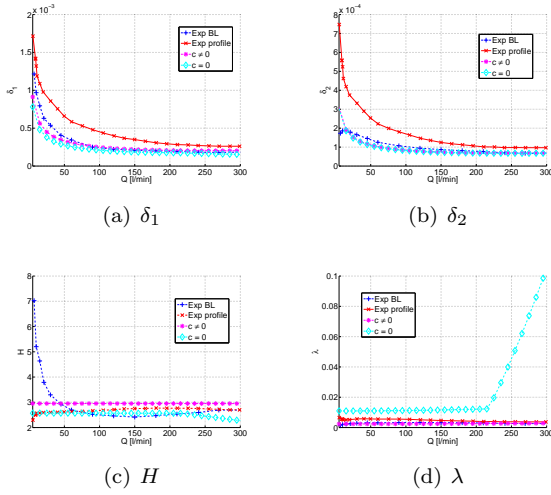
L'influence de la géométrie du convergent sur la vitesse de ligne médiane modélisée en sortie du convergent est ensuite évaluée pour les géométries données dans la table 1. La figure 5(a) montre que pour un  $CR$  constant ( $CR = 4.5$ ), une variation de 1% du diamètre de sortie résulte en une variation de 3% de  $U_2/U_1$ . La figure 5(b) montre l'influence des paramètres de modèle  $c_{S,H}$  pour les valeurs de référence  $D_1 = 21.4\text{mm}$  et  $CR = 21.8$ . Comme attendu, les valeurs prédites sont plus élevées comparées au  $CR$  correspondant à un fluide idéal. De plus, les valeurs prédites coïncident avec les vitesses de ligne médiane en sortie expérimentalement observées pour les débits élevés. En revanche, pour les débits les plus faibles, l'influence de la viscosité est plus importante si bien que les valeurs prédites sous-estiment la vitesse mesurée. Les valeurs de  $c_{H,S} \neq 0$  réduisent les divergences observées entre les valeurs mesurées et modélisées. Ainsi, en se basant sur la vitesse de ligne médiane mesurée, il est suggéré d'employer des paramètres de modèle  $c_{H,S}$  non nuls. Les différences entre valeurs prédites et mesurées sont davantage discutées dans la section suivante.



**Figure 5:** Vitesse de ligne médiane  $U_2/U_1$  modélisée et mesurée en sortie du convergent normalisée par la vitesse d'entrée de ligne médiane pour a) un rapport de sections  $CR = 4.5$  et b)  $CR = 21.8$ .  $CR$  est déduit à partir du rapport  $U_2/U_1$  correspondant à un fluide idéal (ligne pointillée). La vitesse de ligne médiane expérimentalement mesurée est indiquée comme valeur de référence.

## 4.2. Validation expérimentale en sortie du convergent

Les quantités prédites  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $H$  et  $\lambda$  en sortie du convergent sont expérimentalement validées à partir des profils de vitesse comme exposé dans la section 3. Elles sont calculées par intégration des profils mesurés comme exposé dans la section 2.2. La figure 6 présente les caractéristiques de couche limite expérimentales et modélisées en sortie du convergent avec  $D_1 = 100\text{mm}$ ,  $D_2 = 21.4\text{mm}$ ,  $L = 60\text{mm}$ ,  $x_m = 52\text{mm}$ .



**Figure 6:** Comparaison des caractéristiques mesurées et modélisées en sortie du convergent.

Pour tous les débits, les estimations des caractéristiques de couche limite  $\delta_1$  et  $\delta_2$  basées sur les profils de couche limite précis sont très proches des valeurs modélisées. Les profils en sortie obtenus avec un pas spatial plus grossier permettent d'estimer le bon ordre de grandeur, mais résultent en une surestimation de  $\delta_1$  et  $\delta_2$  (de 40%). La valeur utilisée de  $c_{S,H}$  n'a pas d'influence sur les valeurs modélisées de  $\delta_2$ . Les valeurs de  $\delta_1$  modélisées avec  $c_{S,H} = 0$  sont 10% plus basses que les valeurs obtenues pour  $c_{S,H} \neq 0$ . Néanmoins pour la vitesse de ligne médiane  $U_c$ , les divergences entre les valeurs modélisées et expérimentalement estimées augmentent quand le débit diminue.

Les valeurs expérimentalement estimées de  $\delta_1$  et  $\delta_2$  sont utilisées pour obtenir une estimation expérimentale de  $H$  et  $\lambda$  (figures 6(c) et 6(d)). Les valeurs de  $H$  expérimentales et modélisées qui en résultent sont supérieures à 2.4, ce qui confirme la nature laminaire de l'écoulement. Les valeurs de  $H$  modélisées pour  $c_{S,H} = 0$  sont inférieures aux valeurs obtenues pour  $c_{S,H} \neq 0$ , ce qui est la tendance inverse de celle observée pour les valeurs de  $\lambda$  modélisées. L'ordre de grandeur des valeurs expérimentalement estimées de  $H$  coïncide avec celui des valeurs modélisées, sauf pour les bas débits, où l'estimation expérimentale de couche limite montre une forte augmentation due à la diminution du nombre de Reynolds. Les valeurs de  $H$  expérimentalement estimées sont très proches des valeurs obtenues avec  $c_{S,H} = 0$ . L'estimation expérimentale de  $\lambda$  est en accord avec les valeurs modélisées avec  $c_{S,H} \neq 0$  pour tous les débits.

## 5. Conclusion

Cette étude a porté sur une modélisation d'écoulement caractérisé par des nombres de Reynolds faibles à modérés à travers une géométrie de convergent. Une solution de couche limite laminaire axisymétrique utilisant des fonctions universelles modifiées pour décrire le facteur de forme de la couche limite et le facteur de frottement pariétal ont été expérimentalement validées en sortie du convergent. On observe que bien que l'effet sur les vitesses prédites peut être négligé, des constantes doivent être ajoutées afin d'améliorer la prédiction des paramètres de la couche limite dans le cas de faibles débits. Concernant la validation expérimentale de production de parole, une réplique *in-vitro* peut être attachée à ce convergent pour lequel les caractéristiques du profil de vitesse en sortie sont connues. En outre, il est d'intérêt d'étendre cette approche de géométries courbées paramétrisées pour modéliser certaines parties du conduit vocal telles que la voûte palatine.

## Références

- [1] J. Cisonni, A. Van Hirtum, X. Pelorson, and J. Willems. Theoretical simulation and experimental validation of inverse quasi one-dimensional steady and unsteady glottal flow models. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124 :535–545, 2008.
- [2] N. Curle. *The laminar boundary layer equations*. Clarendon Press, 1962.
- [3] F. Fang. A design method for contractions with square end sections. *Journal of Fluids Engineering*, 119 :454–458, 1997.
- [4] X. Grandchamp, A. Van Hirtum, and X. Pelorson. Hot film/wire calibration for low to moderate flow velocities. *Measurement Science and Technology*, 21 :115402, 2010.
- [5] G. Kavence and S. Oka. Correcting hot-wire readings for influence of fluid temperature variations. *DISA Info*, 15 :21–24, 1973.
- [6] T. Morel. Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contractions. *Journal of Fluids Engineering*, 97 :225–233, 1975.
- [7] H. Schlichting and K. Gersten. *Boundary layer theory*. Springer Verlag, Berlin, 2000.
- [8] B. Thwaites. On the momentum equation in laminar boundary-layer flow. a new method of uni-parametric calculation. Technical Report 2587, Reports and Memoranda of Aeronautical Research Council, London, 1947.
- [9] B. Thwaites. Approximate calculations of laminar boundary layers. *Aeronautical Quarterly*, 1 :245–280, 1949.
- [10] A. Van Hirtum, X. Grandchamp, X. Pelorson, K. Nozaki, and S. Shimojo. LES and 'in vitro' experimental validation of flow around a teeth-shaped obstacle. *International Journal of Applied Mechanics*, 2(2) :265–279, 2010.
- [11] F. White. *Viscous fluid flow*. McGraw-Hill, New York, 1991.