

Écoulement torrentiel autour d'un obstacle émergé

E. MIGNOT^a, N. RIVIERE^a, N. GONIMA^a

a. LMFA, Bat. Joseph Jacquard, INSA, 20 avenue A. Einstein, 69621 Villeurbanne, FRANCE

Résumé :

Les travaux présentés ici traitent de l'effet d'un obstacle émergé placé au sein d'un écoulement à surface libre en régime torrentiel. A l'amont de l'obstacle, deux structures d'écoulement principales sont observées : i) un ressaut hydraulique en surface et ii) un tourbillon en fer à cheval (TFC) sur le fond. Ces deux structures sont détachées à l'amont de l'obstacle. Deux types d'écoulement principaux sont observés. L'analyse dimensionnelle révèle que trois paramètres influent sur ces distances de détachement : les nombres de Froude et de Reynolds de l'écoulement amont, ainsi que le rapport entre la hauteur d'eau de l'écoulement amont et la taille caractéristique de l'obstacle. Pour des écoulements à fort nombres de Froude et de Reynolds, la distance de détachement du ressaut hydraulique est supérieure à celle du TFC alors que pour des écoulements à nombre de Froude plus faible, le détachement du TFC est supérieur. Nous montrons leurs influences en nous basant sur des mesures expérimentales obtenues dans une cuve à onde inclinable.

Abstract :

The objective of the present paper is to characterize the interaction of a supercritical open channel flow with an emerging obstacle. Upstream from the obstacle, two main flow structures are observed: i) a hydraulic jump in the near-surface region and ii) a horseshoe vortex in the near-bed region. Both flow structures are detached upstream from the obstacle and the relative detachment lengths induce two main flow types. For uniform upstream flows with high Froude and Reynolds numbers, the detachment length of the hydraulic jump exceeds the one of the horseshoe vortex, this flow type is named "breaking type". Oppositely, for upstream flows with lower Froude numbers, the detachment length of the horseshoe vortex exceeds the one of the hydraulic jump and the flow type is named "separation type". The dimensional analysis reveals that three parameters can influence these detachment lengths: the upstream Froude and Reynolds numbers and the obstacle thickness normalized by the upstream water depth. The influence of these parameters is investigated theoretically and experimentally on a water table. We show that increasing the Froude or Reynolds number of the incoming flow or reducing the relative thickness of the obstacle tends to reduce both detachment lengths.

Mots clefs : Écoulement torrentiel, Obstacle, Ressaut hydraulique, Tourbillon en fer à cheval

1 Introduction

Les travaux les plus aboutis visant à caractériser les formes d'écoulement qui apparaissent lors des interactions entre un fluide en mouvement et un obstacle émergeant concernent les écoulements d'air en souffleries. Les mesures ont mis en évidence l'apparition de vortex au pied de l'obstacle sur sa face amont du fait d'un décollement de couche limite lié au gradient de pression inverse. Afin de caractériser la distance entre le point de décollement de la couche limite et l'obstacle, notée λ , adimensionnée par l'épaisseur de l'obstacle R , Baker [1] a obtenu l'analyse dimensionnelle suivante (avec Re_{δ^*} le nombre de Reynolds basé sur l'épaisseur de déplacement de la couche limite notée δ^*) :

$$\frac{\lambda}{R} = f\left(Re_{\delta^*}, \frac{\delta^*}{R}\right) \quad (1)$$

Ballio et al. [2] ont alors assemblé les données expérimentales disponibles dans la littérature afin d'évaluer les relations entre ces paramètres. Ils concluent notamment que lorsque Re_{δ^*} augmente : λ/R augmente dans le cas d'un écoulement laminaire et diminue dans le cas d'un écoulement turbulent.

Pour ce qui concerne les écoulements en eau à surface libre sur fond plat, les principaux travaux se sont attachés à caractériser les formes d'écoulement en régime fluvial en pied d'obstacle en vue d'applications concernant l'affouillement à l'amont des piles de ponts. Les travaux de Dargahi [3], Graf et Yulistiyanto [4], Roulund et al. [5], ou encore Sahin et al. [6] ont permis de caractériser les champs de vitesse, de contrainte turbulente au sein du tourbillon en fer à cheval lié au décollement de la couche limite à l'amont de l'obstacle. Cependant, peu de données relatives à la distance de détachement du tourbillon en fer à cheval sont disponibles dans la littérature. Finalement, très peu de travaux ont été entrepris afin de caractériser interactions entre un écoulement en régime torrentiel et un obstacle. Defina et Susin [7] décrivent de manière sommaire la forme d'écoulement qui a lieu à l'amont de l'obstacle et révèlent la présence d'un ressaut hydraulique détaché.

Une étude expérimentale précise a alors été initiée au LMFA (Lyon, France) afin d'étudier plus finement l'interaction entre un écoulement et un obstacle émergeant lorsque l'écoulement amont est en régime torrentiel. Le premier objectif de cet article est de décrire les différentes formes d'écoulement qui peuvent être observées expérimentalement à l'amont de l'obstacle et le deuxième objectif est de définir l'influence des paramètres de l'écoulement et de l'obstacle sur les caractéristiques de ces écoulements.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental présenté en Fig. 1 est composé d'une cuve à onde à fond vitré transparent et à pente réglable de 118 cm de long et 74.5 cm de large. L'eau est acheminée dans le réservoir amont de tranquillisation à travers un débitmètre électromagnétique (Promag 50 de Endress Hauser, de précision ± 0.02 L/s). L'eau passe librement du réservoir à la cuve où un écoulement uniforme s'établit.

L'obstacle émergeant de section rectangulaire est positionné face à l'écoulement à une distance d'environ 90 cm de l'amont de la cuve. Cet obstacle est composé de lamelles carrées de PVC maintenues les unes aux autres à l'aide d'une tige filetée, ce qui permet de modifier aisément l'épaisseur de l'obstacle R . Pour chaque écoulement, le débit dans la cuve est mesuré par le débitmètre électromagnétique et la hauteur d'eau du régime uniforme h_1 est mesurée à l'aide d'un limnimètre digital à une distance d'environ 50 cm de l'amont de la cuve (i.e. $50 h_1$ au minimum).

Deux méthodes de mesure de la localisation des éléments caractéristiques des écoulements sont utilisées ici : des mesures de distance à l'aide d'un pied à coulisse et des mesures obtenues par analyse d'images photographiques. La précision des mesures de distance est de l'ordre du millimètre pour ce qui concerne l'analyse d'image et de l'ordre du demi-centimètre avec le pied à coulisse. Cependant, ce degré d'incertitude est de l'ordre de grandeur de l'oscillation de la localisation du pied du ressaut et du tourbillon en fer à cheval.

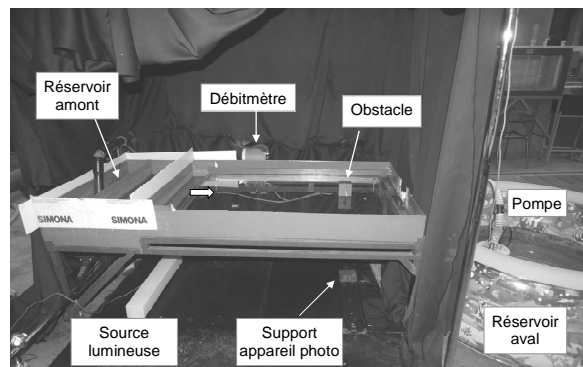


FIG. 1 – Photographie de la cuve à onde sous sa tente opaque.

3 Description des écoulements

Lorsqu'un écoulement torrentiel rencontre un obstacle posé au fond et émergeant, deux structures d'écoulement principales se développent. Tout d'abord, à l'amont dans le plan de symétrie de l'obstacle, l'écoulement ralentit pour passer en régime fluvial à travers un ressaut hydraulique et continue à ralentir jusqu'à s'arrêter sur la face amont de l'obstacle au point d'arrêt. Ce ralentissement donne lieu à une augmentation de la hauteur d'eau discontinue dans le ressaut et continue du ressaut à l'obstacle. Le gradient de hauteur d'eau est alors positif dans le sens du courant, ce qui donne naissance à un décollement de la couche limite pariétale. Enfin, le gradient de hauteur d'eau transverse est négatif, la hauteur d'eau étant plus

grande face à l'obstacle que sur le côté, ce qui permet à l'écoulement de contourner l'obstacle.

Ainsi, à l'amont de l'obstacle, deux structures d'écoulement ont lieu : un ressaut hydraulique en surface et un décollement de couche limite au fond analogue à celui observé au pied des piles de pont sur fond plat en régime fluvial. Ce décollement a une forme de fer à cheval étant donné qu'il tend à contourner l'obstacle et sera nommé tourbillon en fer à cheval (TFC) dans la suite de cet article. Il apparaît que le ressaut et le TFC sont tous deux détachés à l'amont de l'obstacle, avec une distance de détachement qui dépend des caractéristiques de l'écoulement et de l'obstacle : plus l'écoulement est rapide ou plus l'obstacle est étroit et plus le détachement diminue. Deux types d'écoulement principaux peuvent alors être définis en fonction des distances de détachement du pied de ces deux structures.

* Pour un écoulement torrentiel à faible nombre de Froude et de Reynolds, le pied du TFC est détaché plus à l'amont que le pied du ressaut. En conséquence, l'écoulement uniforme est d'abord confronté à la marche montante que représente le pied du TFC (Fig. 2a). L'écoulement reste en régime torrentiel et sa hauteur d'eau est légèrement supérieure à la hauteur normale amont. En continuant vers l'aval, l'écoulement atteint le pied du ressaut hydraulique, passe en régime fluvial avec une soudaine augmentation de la hauteur d'eau. Les lignes de courant se déforment alors pour contourner l'obstacle et le niveau d'eau augmente pour atteindre le niveau du point d'arrêt face à l'obstacle. Ce type d'écoulement est nommé « décollement ».

* Pour un écoulement torrentiel à fort nombre de Froude et de Reynolds, le pied du ressaut est détaché plus à l'amont que le pied du TFC. Dans ce cas, l'écoulement torrentiel uniforme passe d'abord en régime fluvial à travers le ressaut (Fig. 2b). Les lignes de courant peuvent alors se déformer pour contourner l'obstacle. Dès qu'apparaît le pied du TFC, l'écoulement fluvial est soumis à une marche montante. Ce type d'écoulement est nommé « déferlement ».

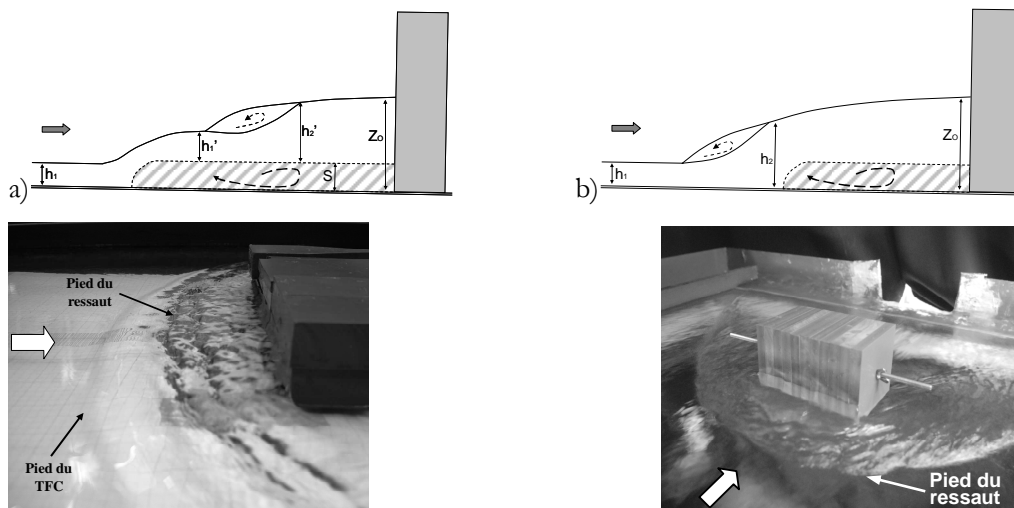


FIG. 2 – Schéma et photos vus de côté d'un écoulement de type décollement (a) et déferlement (b) à l'amont de l'obstacle dans le plan de symétrie

4 Analyse dimensionnelle

De la même façon que Baker [1], nous présentons dans cette partie l'analyse dimensionnelle destinée à définir les paramètres influant sur la distance de détachement notée λ des deux structures principales : le TFC et le ressaut. Les paramètres influant sur la valeur de λ sont les caractéristiques du fluide (eau) : sa masse volumique ρ et sa viscosité dynamique μ , l'accélération de gravité g , la tension de surface à l'interface eau-air σ , les caractéristiques de l'écoulement amont : sa vitesse débitante U et sa hauteur d'eau h_1 et enfin l'épaisseur de l'obstacle R :

$$\lambda = f(\rho, \mu, g, \sigma, U, h_1, R) \quad (2)$$

L'équation (2) peut être réécrite sous la forme adimensionnelle suivante

$$\frac{\lambda}{h_1} = f\left(Fr, \frac{R}{h_1}, Re, Mo\right) \quad (3)$$

où $Fr = U / (gh_1)^{1/2}$ est le nombre de Froude de l'écoulement, $Re = 4\rho U h_1 / \mu$ et $Mo = g\mu^4 / (\rho\sigma^3)$ sont le nombre de Reynolds et de Morton associés au fluide respectivement. Si l'on considère un écoulement d'eau pure présentant une surface libre avec l'air, la valeur du nombre de Morton est fixée et sera identique quel que soit le changement d'échelle considéré. Dans ce cas, il est possible d'écrire :

$$\frac{\lambda}{h_1} = f\left(Fr, \frac{R}{h_1}, Re\right) \quad (4)$$

Les distances de détachement du ressaut et du TFC à l'amont de l'obstacle adimensionnalisés par la hauteur d'eau normale sont donc fonction de trois paramètres. La suite de cet article a pour objectif d'étudier l'influence de ces paramètres sur les valeurs des détachements.

5 Evolution des distances de détachement

5.1 Influence du nombre de Froude

La Fig. 3 révèle que pour chacun des deux types d'écoulement, une augmentation du nombre de Froude de l'écoulement amont tend à réduire les distances de détachement du ressaut et du tourbillon en fer à cheval.

* Dans le cas des écoulements de type *déferlement*, la hauteur d'eau h_2 à l'aval du ressaut est égale à la hauteur conjuguée de la hauteur amont h_1 (voir Fig. 2b). En négligeant les variations de cote du fond, il apparaît que la charge spécifique H_{s2} de l'écoulement est réduite par rapport à la charge spécifique amont H_{s1} du fait de la perte de charge dans le ressaut. Lorsque l'écoulement fluvial passe sur le TFC, sa hauteur d'eau augmente et atteint enfin l'obstacle avec un niveau d'eau Z_o . Ainsi, plus $Z_o - h_2 (=H_{s2} - h_2)$ augmente et plus le ressaut est détaché. Or on peut écrire :

$$Z_o - h_2 \approx H_{s2} - h_2 \approx H_{s1} - \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} - h_2 \quad (5)$$

Alors avec h_1 constant, si Fr_1 augmente, H_{s1} et h_2 augmentent mais Z_o augmente aussi et il apparaît que $Z_o - h_2$ diminue. En conséquence, la distance de détachement du ressaut nécessaire pour passer de la section aval du ressaut à l'obstacle diminue.

* Dans le cas des écoulements de type *décollement*, en conservant les mêmes hypothèses que dans le cas précédent, lorsque l'écoulement torrentiel passe sur le TFC, son niveau de fond ainsi que sa hauteur d'eau h_1' augmentent (voir Fig. 2a). A l'aval du ressaut, la hauteur d'eau est notée h_2' (hauteur conjuguée à h_1') et le niveau d'eau augmente progressivement pour atteindre Z_o à l'obstacle. Si l'on note S la hauteur de marche correspondant au TFC et qu'on la considère constante pour toute configuration d'écoulement, la différence de niveau qui gouverne le détachement du ressaut est ici $Z_o - (h_2' + S)$. En négligeant les pertes de charge associée à la montée de la marche, on peut écrire :

$$Z_o - (h_2' + S) \approx H_{s2}' - (h_2' + S) \approx H_{s1}' - \frac{(h_2' - h_1')^3}{4h_1' h_2'} - h_2' - S \quad (6)$$

où h_1' peut être calculé par conservation de charge et de débit entre les sections 1 et 1' (voir Fig. 2a). Pour h_1 fixé, si Fr augmente, H_{s1} augmente mais h_1' diminue et h_2' augmente. Il apparaît alors que $Z_o - (h_2' + S)$ diminue et la distance de détachement du ressaut nécessaire pour passer de la section aval du ressaut à l'obstacle diminue.

Les tendances obtenues en Fig. 3 pour les deux types d'écoulement de diminution du détachement du ressaut lorsque Fr augmente confirment la validité de l'analyse précédente.

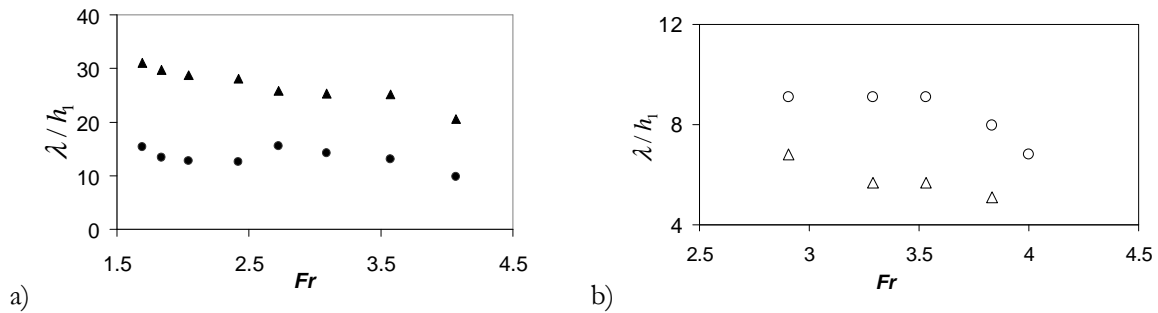


FIG. 3 – Mesure des distances normalisées de détachement du pied du ressaut (ronds) et du pied du TFC (triangles) en fonction du nombre de Froude pour a) des décollements (noir) avec $R/h_1 = 30$ et $Re = 4200$ et b) des déferlements (blanc) avec $R/h_1 = 4.5$ et Re varie de 11000 à 14000.

5.2 Influence de l'épaisseur de l'obstacle

Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur de l'obstacle sur les distances de détachement, la méthode consiste à travailler avec un écoulement fixé et à modifier exclusivement l'épaisseur de l'obstacle R . La Fig. 4b présente l'évolution de distances de détachement du ressaut et du TFC en configuration de décollement. Il apparaît que plus R augmente et plus le détachement vers l'amont du TFC et du ressaut augmentent. De plus il apparaît que cette distance de détachement augmente linéairement avec l'épaisseur de l'obstacle.

Par analogie avec les travaux de Moeckel (cités par Shapiro [8]), nous pouvons écrire la tendance générale suivante : plus R augmente et plus le débit qui traverse le ressaut pour passer en régime fluvial et qui doit être dévié pour contourner l'obstacle augmente. Or à la section de contrôle à travers laquelle tout ce débit va transiter pour contourner l'obstacle, l'écoulement est critique, avec $Fr = 1$. Par conservation de la masse, on a

$h_1 U y_s = h_c U_c D$ soit $D = \frac{h_1 U}{h_c U_c} y_s$ (voir Fig. 4a). Ainsi, plus R augmente et plus y_s augmente et donc plus D

doit de même augmenter. Cette analyse confirme la tendance d'augmentation du détachement du ressaut lorsque R augmente observée en Fig. 4b.

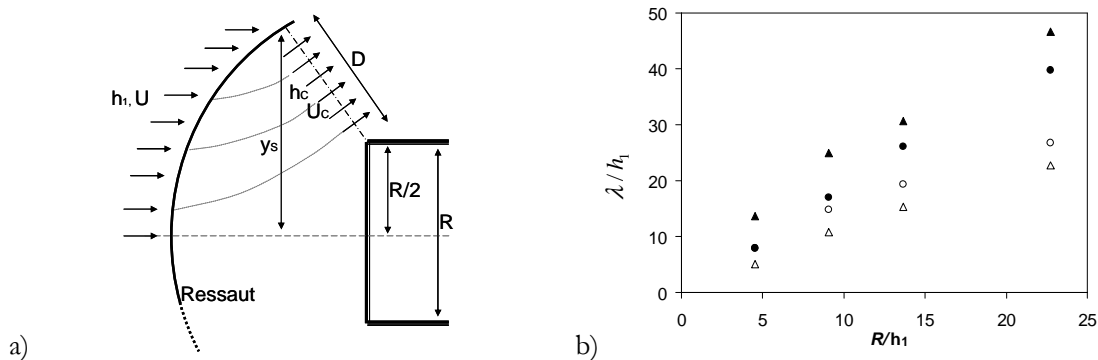


FIG. 4 – Schéma vu de dessus (a) et mesure des distances normalisées de détachement du pied du ressaut (ronds) et du pied du TFC (triangles) en fonction du de la taille de l'obstacle normalisée (b) pour des configurations de décollement (noir) avec $h_1 = 4.4$ mm, $Fr = 1.65$ et $Re = 6000$ et des configurations de déferlement (blanc) avec $h_1 = 4.4$ mm, $Fr = 3.83$ et $Re = 14000$.

5.3 Influence du nombre de Reynolds

Selon l'équation (4), le troisième paramètre susceptible d'influencer les distances de détachement est le nombre de Reynolds Re de l'écoulement uniforme amont. Il apparaît sur la Fig. 5 pour des configurations de décollement exclusivement que l'augmentation de Re tend à légèrement réduire les distances de détachement du ressaut et du TFC. Aucune explication théorique ne nous a permis, à ce jour, de mettre en lumière l'origine de cette influence.

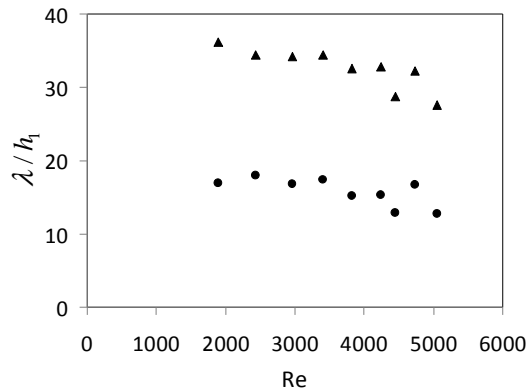


FIG. 5 – Mesure des distances normalisées de détachement du pied du ressaut (ronds) et du pied du TFC (triangles) en fonction du nombre de Reynolds pour des configurations de décollement avec $R/h_1=30.6$ et $Fr=2.04$.

6 Conclusions

Deux types d'écoulement ont été observés à l'amont d'un obstacle placé dans un écoulement torrentiel à surface libre. Le premier type, dit déferlement, correspond à un détachement du pied du ressaut hydraulique supérieur au détachement du pied du TFC et est obtenu pour des nombres de Froude et de Reynolds de l'écoulement amont élevés. Le deuxième type, dit décollement, correspond à un détachement du pied du TFC supérieur au pied du ressaut. L'influence des trois paramètres mis en évidence par l'analyse dimensionnelle sur la distance de détachement de ces deux structures d'écoulement a été étudiée analytiquement et expérimentalement. Il est apparu qu'une augmentation du nombre de Froude ou du nombre de Reynolds de l'écoulement amont ou une diminution de la taille de l'obstacle tend à réduire les distances de détachement.

References

- [1] Baker C.J., The turbulent horseshoe vortex, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 6, 9-23, 1980.
- [2] Ballio F., Bettoni, C., Franzetti S., A survey of time-averaged characteristics of laminar and turbulent horseshoe vortices, *Journal of Fluids Engineering*, 120, 233-242, 1998.
- [3] Dargahi B., The turbulent flow field around a circular cylinder, *Experiments in Fluids*, 8, 1-12, 1989.
- [4] Graf W.H., Yulistiyanto, B., Experiments of flow around a cylinder; the velocity and vorticity fields, *Journal of Hydraulic Research*, 36 (4), 637-653, 1998.
- [5] Roulund A., Sumer M., Fredsoe J., Michelsen J., Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401, 2005.
- [6] Sahin B., Ozturk N.A., Akilli H., Horseshoe vortex system in the vicinity of the vertical cylinder mounted on a flat plate, *Flow Measurement and Instrumentation*, 18, 57-68, 2007.
- [7] Defina A., Susin F.M., Multiple states in open channel flow, In *Vorticity and turbulence effects in fluid structures interactions - Advances in Fluid Mechanics*, vol. 45, pp. 105-130, 2006.
- [8] Shapiro A.H., *The dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Ronald Press New-York, Vol. 2, p. 881-888, 1953