

INVESTIGATION NUMERIQUE TRIDIMENSIONNELLE SUR L'EFFET DU CONTROLE ACTIF PAR SOUFLAGE SUR LE DECOLLEMENT DANS UNE CASCADE LINEAIRE D'UN COMPRESSEUR AXIAL

DJEDAI Hayette¹, AOUISSI Mokhtar²

¹ U.A.T/LM, Route de Ghardaia, BP. 37G, 3000 Laghouat -Algérie, djedai.hayette@gmail.com

² U.A.T/LM, Route de Ghardaia, BP. 37G, 3000 Laghouat -Algérie, m.aouissi@mail.lagh-univ.dz

RÉSUMÉ

Les performances aérodynamiques dans les cascades d'un compresseur axial en 3D sont principalement influencées par les écoulements secondaires tels que l'écoulement transversal sur la paroi latérale et le décollement de coin développé entre la paroi latérale et l'extrados. Souvent, les écoulements secondaires peuvent produire un blocage et des pertes dans le passage du conduit. Par conséquent, l'objectif de ce travail est d'effectuer une investigation numérique pour contrôler ce phénomène indésirable par l'implémentation d'un soufflage sur l'extrados ou sur la paroi latérale. Plusieurs configurations avec contrôle ont été étudiées. Une analyse topologique détaillée conduit à une connaissance de la structure d'écoulement et le comportement des zones de séparation. En se basant sur cette méthode topologique qui donne une bonne amélioration au niveau de la pression statique et les pertes total est possible, la fente de contrôle efficace doit être localisée au point particulier de nature duale -qui représente un nœud de séparation et un col en même temps -perpendiculairement à l'extrados-.

Mots Clés: *compresseur axial, décollement tridimensionnel, contrôle de l'écoulement, soufflage de la couche limite, topologie de l'écoulement.*

NOMENCLATURE

Symboles:

ca longueur de la corde axiale
c corde, m
Cp coefficient de pression statique
cq débit relatif du jet
e largeur de la fente, m
M nombre de Mach
Ḣ débit massique, kgs⁻¹
P pression statique, Pa
Pt pression totale, Pa
Re nombre de Reynolds
Tu intensité de turbulence
v vitesse, ms⁻¹
w vitesse rapportée à la cascade, ms⁻¹
x direction axiale, m
y+ distance adimensionnelle

Lettres grecs :

ρ Masse volumique, kgm⁻³
ω Coefficient des pertes de pression totale
ωs pertes de pressions totales avec contrôle
βi l'angle d'entrée à la cascade, °
σ Solidité
ψ l'angle formé entre l'axe de la fente et la ligne de cambrure moyenne, °
ε largeur relative de la fente

Indices :

1 entrée de la cascade
f entrée de la fente
j jet

Abréviations :

NACA National Advisory Committee
of Aeronautics

1. INTRODUCTION

Dans le but de réduire le poids des moteurs d'avions ainsi que la consommation de carburant ; les industriels essaient toujours de rendre plus compact le système de compression de leurs moteurs, qui représente environ 40% de la masse totale. La diminution du poids du compresseur se fait en réduisant le nombre de roues pour une augmentation de pression désirée à l'entrée du diffuseur annulaire en amont de la chambre de combustion ; ainsi à taux de compression global égal, la réduction du nombre d'étages implique une charge aérodynamique plus élevée par étage, ce qui provoque une augmentation considérable de la diffusion de l'écoulement, donc des aubes fortement chargées, ce qui provoque le décollement de la couche limite développée sur les aubages.[1] En effet, ces décollements sont responsables, d'une part, de la génération des instabilités tels que le décrochage tournant et le pompage, qui causent la réduction de la marge d'opérabilité des machines, et d'autre part de la dégradation de leurs efficacités en produisant de grandes pertes de charge.

Le traitement du décollement par soufflage continu est réalisé par l'injection d'une nouvelle couche fluide ayant une quantité de mouvement élevée au niveau proche de la paroi, afin d'augmenter l'énergie des filets usés. Ils existent deux types de soufflage continu : Un soufflage tangentiel à la paroi, qui nécessite souvent des vitesses d'injection très importantes pour alimenter la zone dégradée énergétiquement ; et un soufflage normal à la paroi, qui produit deux tourbillons contre-rotatifs; l'un qui disparaîtra sous l'effet des écoulements incidents et l'autre se développe pour donner la possibilité de prélever l'énergie à partir des régions des grandes vitesses et de la réinjecter à proximité de la paroi [2].

Dans le but d'augmenter le pas entre les aubes, Fischer et al [3] montrent par une investigation numérique la possibilité de réduire le nombre des aubes du stator dans une cascade d'un compresseur axial à haute vitesse ($M=0.65$, $Re=5.105$) par un contrôle actif, le moyen utilisé dans cette étude, étant un soufflage tangentiel à travers une fente implantée au voisinage du bord de fuite. En se basant sur la première rangée de stators avec une solidité de référence $\sigma=0.81$, l'interaction entre le jet et l'écoulement en amont de la fente conduit à la suppression du décollement de la couche limite; l'effet de soufflage tangentiel sur le coefficient de pression statique (C_p) est positif, une augmentation du coefficient (C_p) atteint les 9%. Pour un angle d'entrée $\beta_i=46^\circ$, l'évolution des pertes de pression totale (ϖ) en fonction de débit injecté relatif (\dot{M}_j / \dot{M}_1), indique une valeur optimale du débit injecté ($\dot{M}_j / \dot{M}_1=1$) pour laquelle les pertes sont minimales ($\varpi_{min}=0.03$). L'analyse des résultats [3] montre le potentiel de ce type de contrôle et une augmentation du pas de 20% est remarquée.

2. PROCEDURE NUMERIQUE

A. Détermination du Domaine Géométrique de Calcul et la Génération de Maillage

La géométrie et le maillage sont développés par le mailleur GAMBIT.[4] Le domaine d'écoulement est limité d'une part dans la direction axiale par une surface d'entrée située à 2.16 de la corde axiale de l'aube en amont du bord d'attaque, et une surface de sortie située à 1.36 de la corde axiale de l'aube en aval du bord de fuite; et dans la direction circonférentielle par deux périodiques identifiées par la solidité $\sigma=1.12$, et d'autre part dans la direction radiale par les parois solides. Entre ces six limites, on peut produire une aube NACA65009. Les paramètres géométriques définissant notre cascade en 3D ainsi que le nombre de Reynolds sont résumés dans le tableau I. La génération du maillage représente la subdivision du champ d'écoulement en volumes de contrôle discret. Un maillage HOH multi bloc de type structuré est appliqué. En outre, étant donné que les moitiés inférieure et supérieure de la cascade sont symétriques par rapport au plan radial situé à mi-hauteur de l'aube; Seule une moitié du volume de celle-ci est maillée afin de limiter le temps de calcul. Dans le modèle de paroi la condition $y^+ \leq 5$ doit être respectée, afin d'ajuster l'épaisseur des cellules adjacentes aux parois solides, où y^+ représente la distance caractéristique adimensionnelle à partir de la paroi.[5] Le nombre total des cellules pour une configuration cascade typique est d'environ 870000. L'indépendance maillage-solution est obtenue après plusieurs tests.

Paramètre	valeur
Corde, mm	150
Hauteur d'aube, mm	370
Le pas de grille, mm	134
Angle de calage, °	42.7

Angle d'incidence, °	4
Angle d'écoulement entrant, °	54.31
Nombre de Reynolds	382 000

TABLEAU .1 Paramètres utilisés dans la cascade 3D

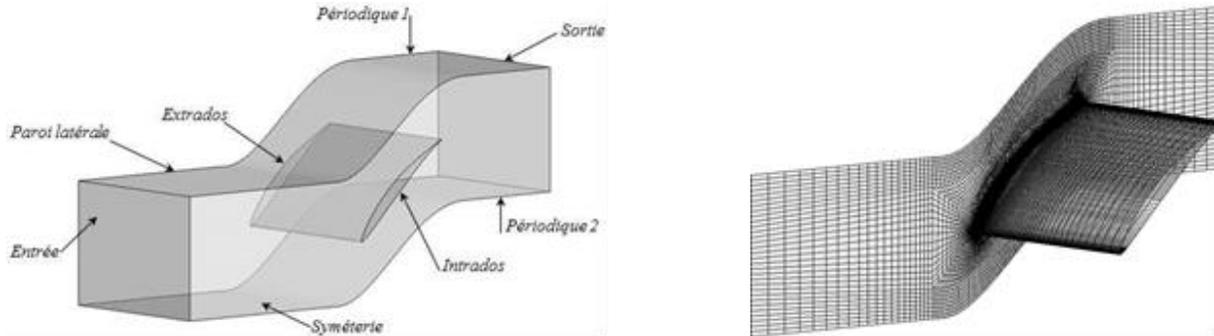


FIGURE 1. Cascade linéaire en 3D sans contrôle (à gauche) , Maillage du domaine de calcul(à droite)

B. Méthode Numérique et Conditions aux Limites

Toutes les simulations numériques présentées dans ce travail ont été réalisées avec la version 6.3.26 du logiciel Fluent®.[6] La résolution des équations de Navier-Stokes est effectuée en adoptant une approche de type RANS. L'intégration spatiale est réalisée à l'aide d'une méthode de volumes finis, en utilisant un schéma décentré. Les calculs de l'écoulement turbulent stationnaire ont été effectués par le modèle de turbulence k-epsilon réalisable ; en raison du fort gradient de pression défavorable, dans la cascade du compresseur, l'option « enhanced wall treatment » a été choisie pour modéliser la couche limite. Le critère de convergence des résidus retenu est de l'ordre de 10^{-4} . [7] Comme l'écoulement est supposé périodique dans la direction circumférentielle, la condition aux limites périodiques est appliquée. En outre, l'aubage et les parois latérales sont modélisées comme des surfaces en contact d'un écoulement visqueux et par conséquent les conditions d'adhérence et d'imperméabilité sont prises en considération. Un profil de vitesse est imposé à l'entrée de la cascade au moyen d'un UDF, avec une intensité de turbulence égale à ($Tu=0.8\%$). À la sortie, les composantes de vitesse et les paramètres de turbulence sont extrapolés à partir des nœuds intérieurs voisins. Il est convenable d'utiliser un seul passage limité par des interfaces pour simuler l'écoulement dans une cascade linéaire qui représente, en fait, un stator d'un compresseur avec un nombre infini d'aubes.

La stratégie de contrôle actif d'écoulement tridimensionnel dans une grille d'aubes repose sur l'analyse topologique du champ du vecteur frottement. La topologie est donc un moyen de représentation compacte d'un champ de vecteurs continus, à partir d'un ensemble fini de points et de courbes, sans avoir à faire une étude locale en chaque point de celui-ci. La topologie du champ de vecteurs frottements, forme alors un véritable squelette sur lequel vient s'appuyer l'écoulement proche des parois [1,8]. En effet, en partant de la topologie, il est possible de déduire la forme des lignes de frottement au voisinage des points critiques. En offrant la possibilité de modifier ce squelette, le soufflage permet ainsi de contrôler l'origine et donc le développement des décollements survenant dans la grille d'aubes. Plus précisément, le soufflage aux parois permet de modifier les points critiques et les lignes frontières de frottement de l'architecture topologique. C'est donc la manière d'altérer la topologie, qui constitue le cœur de la stratégie de contrôle tridimensionnel. Dans l'optique de minimiser les pertes de pression totale, l'objectif de cette transformation est de tendre vers une topologie correspondant à un écoulement qui suivrait le contour des parois de la grille sans se décoller. Ainsi, en ne traçant que les lignes de frottement particulières reliant les différents points critiques entre eux, on obtient un réseau fini de points et de courbes qui constitue la topologie du champ du vecteur frottement de notre cascade; figure 2 (à gauche). La zone de décollement est illustrée dans la figure 2 (à droite).

L'étape essentielle dans ce processus est de localiser la ligne séparatrice principale pour répondre à la question cruciale de savoir où placer les dispositifs de contrôle (fentes dans notre cas) pour supprimer les décollements et les tourbillons. La ligne séparatrice principale soumise au contrôle est celle qui relie le point (NS2 ,C2) au nœud

NA3, donc c'est elle qui fera l'objet du contrôle par différentes configurations de soufflage sur l'extrados ou sur la paroi latérale. Il faut noter que le point particulier (NS2, C2) de nature duale est situé à l'intersection de l'aubage avec la paroi latérale à l'endroit de 9.2% de la corde axiale en aval du bord d'attaque; c'est en réalité un nœud de décollement pour la paroi latérale mais un col pour l'extrados de l'aube.

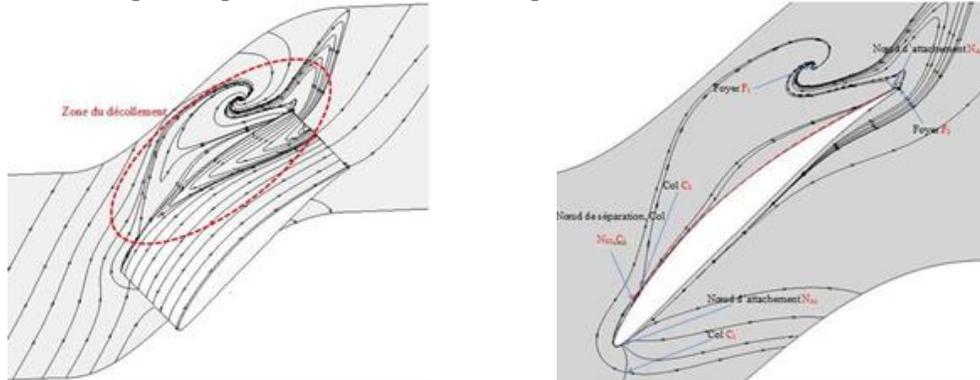


FIGURE 2. Zone de décollement de coin (à gauche), Lignes de courant frontières sur la paroi latérale (à droite)

Une étude numérique 3D est effectuée sur la base d'une configuration sans contrôle ; trois fentes de soufflage «A », « B » et « C » sont appliquées afin d'identifier la meilleure configuration de contrôle, en fixant la largeur relative des fentes et le débit relatif du jet rapporté au débit d'entrée de la cascade ; par les valeurs suivantes : $\varepsilon=e/c=0.01$ et $cq=M_{jet}/M=0.5$, respectivement.

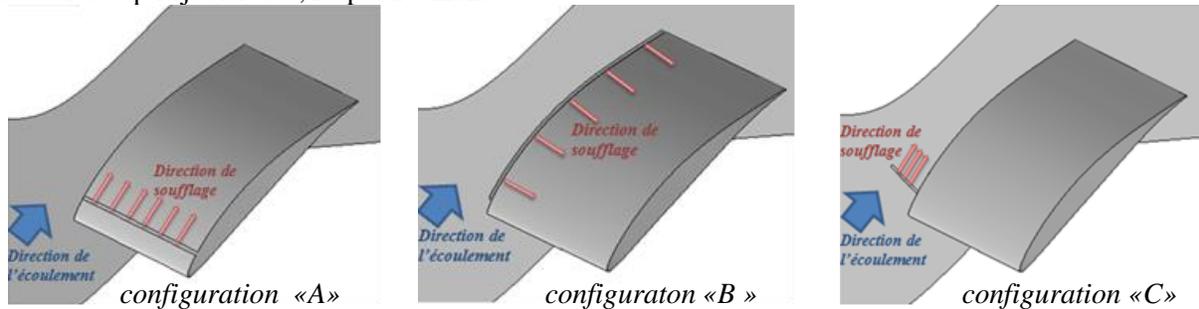


FIGURE 3. Fentes de soufflage pour les trois configurations

Selon la configuration « A » Une fente de soufflage sur l'aubage située au point (NS2, C2) a été appliquée le long de l'envergure d'aube avec l'angle d'inclinaison par rapport à la corde axiale $\psi=45^\circ$.

La configuration « B » permet d'appliquer une fente de soufflage sur la paroi latérale et parallèle à l'extrados. La fente selon cette configuration est perpendiculaire à la paroi latérale ($\psi=90^\circ$) et s'étend de (NS2, C2) jusqu'à 99% de la corde axiale en aval de bord d'attaque.

Une autre fente de soufflage ; selon la configuration «C», a été appliquée sur la paroi latérale perpendiculaire à l'extrados. La fente est située au point (NS2, C2). Cette configuration permet de souffler l'air d'une façon tangentielle avec le sens de l'écoulement. L'angle d'inclinaison de la fente par rapport à la paroi latérale $\psi=45^\circ$.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Validation des Resultats

Pour valider le modèle numérique, une comparaison est effectuée entre les résultats numériques obtenus et les données expérimentales de Ma Wei [9]. Une première comparaison est illustrée sur la figure4 par la distribution du coefficient de pression relative $C_p=2(P-P_1)/\rho w_1^2$.

La représentation du coefficient de pression présente la confrontation des résultats numériques et les données expérimentales à mi- envergure, mais on remarque que le solveur n'a pas réussi à reproduire l'écoulement proche la paroi solide à cause de l'existence des phénomènes d'instabilité dans cette zone.

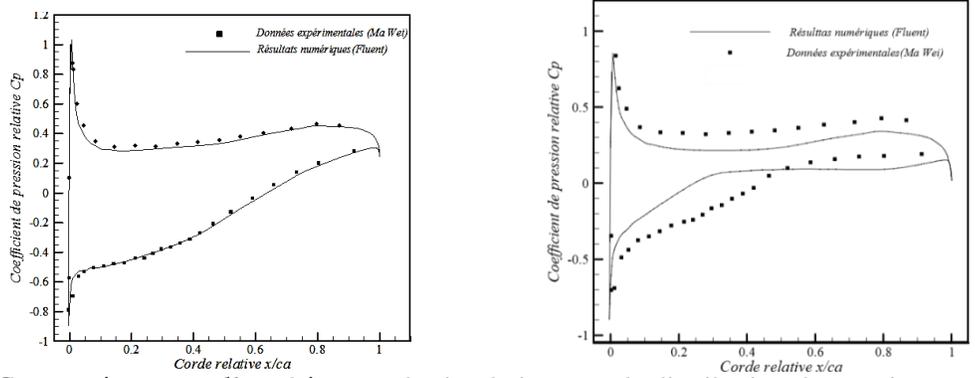


FIGURE 4. Comparaison entre l’expérience et la simulation pour la distribution de pression coefficient de pression relative sur les surfaces d’aubage sans contrôle à mi envergure (z=50%h) (à gauche) et proche de la paroi latérale (z=4.5%h) (à droite)

Une deuxième comparaison est illustrée sur la figure 5 par les cartographies du coefficient des pertes totales $\varpi = 2(P_{t1} - P) / \rho v_1^2$ sur le plan localisé dans la station axiale $x = 36,3\% ca$ en aval du bord de fuite.

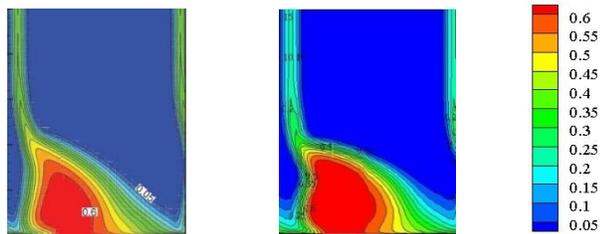


FIGURE 5. Comparaison entre l’expérience et la simulation pour les cartographies des pertes totales ;(à gauche) données expérimentales, (à droites) résultats numériques

La comparaison nous montre une bonne concordance entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux de Ma Wei, donc par conséquent les résultats sont satisfaisants.

B. Effets des Fentes de Soufflage sur les Performances Aérodynamiques de la Cascade

Les résultats de la résolution numérique des trois configurations ; des cartographies des pertes de pressions totales avec contrôle $\varpi_s = (P_{t1} + c_q P_{t1} - (1 + c_q) P_t) / (1/2 \rho (v_1^2 + c_q v_1^2))$ [10], sont illustrés dans la figure 6.

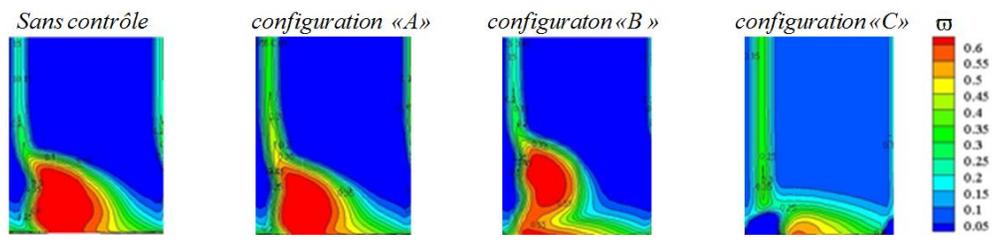


FIGURE 6. Cartographies des pertes totales pour les configurations sans et avec contrôle, à la station $x = 0.363ca$ en aval de bord de fuite

configuration	sans contrôle	A	B	C
Pertes totales	0.1394	0.1291	0.1259	0.1188
Ratio des pertes (%)	—	7.39	9.68	14.78

TABLEAU 2. Comparaison des pertes de pressions totales à la station $x = 0.363ca$ sans et avec contrôle

D'après la figure 7 qui représente les lignes de courant sur les parois des cascades sans et avec contrôle ; on constate que l'effet de contrôle par soufflage selon la configuration «C» apparaît clairement, où la zone de décollement de coin a été supprimé et les lignes de courant suivent la même direction de l'écoulement principale. Alors que dans les deux autres configurations «A» et «B» les écoulements secondaires subsistent encore.

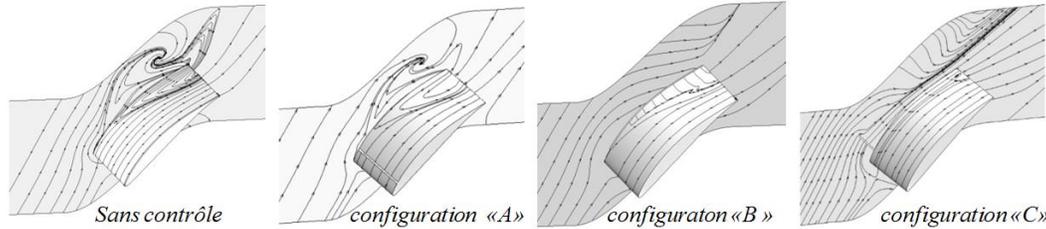


FIGURE 7. Lignes de courant frontières sur les parois des cascades, sans contrôle et avec contrôle

4. CONCLUSIONS

Dans cette investigation, un contrôle actif est appliqué sur un aubage NACA65009 dans une cascade linéaire d'un compresseur axial afin de manipuler le décollement tridimensionnel de la couche limite développée sur l'extrados et la paroi solide. Les résultats trouvés nous mènent à savoir une règle liée à la topologie de l'écoulement dans la configuration sans contrôle pour un meilleur contrôle. En ce qui concerne la règle de la position, on doit placer la fente juste à proximité du point de séparation (NS2, C2). La fente est orientée avec le sens d'écoulement principal et leur inclinaison soit la moins raide possible. Finalement, on peut citer que cette règles est exploitables dans les études de contrôle par soufflage dans les cascade où se manifeste le phénomène de décollement du coin sous l'influence des gradients longitudinaux défavorables et les écoulements secondaires.

REFERENCES

- [1] Godard, A., 2010, Etude numérique et expérimentale d'un compresseur aspiré, Thèse de doctorat, Université de Lyon.
- [2] Mdouki Ramzi, « Investigation pour le Retardement du Phénomène de Décolage dans les Compresseurs par une Méthode Passive Originale », Thèse de doctorat Université de Hadj Lakhdar – Batna, algérie, 2014.
- [3] Fischer, S., Saathoff, H., and Radaspiel, R., 2008, Two Dimensional RANS Simulations of the Flow through a Compressor Cascade with Jet Flaps. *Aerospace Science and Technology* 12(2008)618-626.J.
- [4] Gambit, User's Manual.
- [5] Chassaing, P., 2000, Turbulence en Mécanique des Fluides, Analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur, Cépaduès-Editions, ISBN 2-85428-509-3. en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur, Cépaduès-Editions, ISBN 2-85428-509-3.
- [6] Fluent, Fluent 6 User's Manual, 1998, Fluent Inc
- [7] Chen, F., Song, Y., Chen, H., Wang, Z., 2006, Effects of Boundary Layer Suction on the Performance of Compressor Cascades. *Proceedings of GT2006, ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, May 8-11, 2006, Barcelona. Fluent, Fluent 6 User's Manual, 1998, Fluent Inc..
- [8] Détery, J., 1999, Topologie des écoulements tridimensionnels décollés stationnaires points singuliers, séparatrices et structures tourbillonnaires. Rapport technique ONERA, RT121/7078DAFE.
- [9] MA Wei, « Experimental Investigation of Corner Stall in a Linear Compressor Cascade ». Thèse de doctorat École de centrale de Lyon, France, 2012. R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.
- [10] Weidong Xing, Junyue Zhang, Xinqian Zheng, Yangjun Zhang, « Separation Control of Axial Compressor Cascade by Fluidic-Based Excitations », *Journal of Turbomachinery* Copyright © 2011 by ASME OCTOBER 2011, Vol. 133 / 041016-1.