

Interaction des ondes de chocs coniques des écoulements axisymétriques supersoniques

Hamza Goudmi ^{1,2*}, Abdelhadi Beghidja ³, Razik Benderradji ³,
Nabila Ihaddadène ³ et Elhadj Raouache ¹

¹ Laboratoire des Energies Renouvelables et du Développement Durable, LERDD
Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et de Technologie
Université des Frères Mentouri, B.P. 325, Route de Ain El Bey, 05000, Constantine, Algérie

² Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi
El-Anasser, 34030 Bordj Bou Arreridj, Algérie

³ Université Mohamed Boudiaf
Siège de la wilaya de M'Sila, 28000 M'Sila, Algérie

(reçu le 10 Septembre 2016 - accepté le 26 Septembre 2016)

Résumé - *Le phénomène d'interaction de chocs coniques de familles différentes constitue un axe de recherche récent, destiné à résoudre les problèmes aérodynamiques et aéronautiques. Dans cette étude, on a simulé ce phénomène par le code de calcul Fluent. Cette simulation est réalisée pour une configuration composée de deux cônes, l'un droit et l'autre curviligne. Les phénomènes de transition des réflexions de chocs sont bien observés, ils sont suivis par des phénomènes d'hystérésis qui sont aussi captés. La transition de $RR \rightarrow MR$, de $MR \rightarrow RR$, est observée pour le calcul non-visqueux et de $RI \rightarrow DMR$, de $DMR \rightarrow RI$ et de $DMR \rightarrow VMI$, pour le calcul visqueux.*

Abstract - *The different types of conical collision interaction phenomena constitute a recent research focus that are intended to solve aerodynamics and aeronautics problems. In this paper, we simulated this phenomenon using the fluent calculation code. This simulation was carried out for a configuration composed of two cones, one straight and the other curvilinear. The phenomena of transition of the shock are well observed, they are followed by phenomena hysteresis that are likewise captured. The transitions from $RR \rightarrow MR$, from $MR \rightarrow RR$ are observed for the non viscous calculation, and from $RI \rightarrow DMR$, $DMR \rightarrow RI$ and from $DMR \rightarrow VMI$ for the viscous calculation.*

Keywords: Interaction de Mach (MR) - Interaction régulière (RR) - Phénomène d'hystérésis - Onde de choc conique.

1. INTRODUCTION

Les expériences réalisées dans la soufflerie hypersonique SH2 à Mach local $Mo=4.96$ au niveau du laboratoire d'aérothermique du CNRS à Meudon par Chpoun *et al.*, [1, 2, 8], Ben Dor *et al.*, [3, 8-10], concernant l'écoulement axisymétrique (sans effet de bord), issue de l'interaction de deux ondes de chocs coniques plans, l'un généré par un dièdre d'une tuyère et l'autre par un cône curviligne, ont conduit à trois types de configurations d'ondes de chocs, à savoir; l'interaction régulière (RI), l'interaction de double Mach (DMR) et l'interaction de type (VMI), celle-ci a été découverte pour la première fois par Chpoun [1].

La figure 1 représente ces trois types de configurations. Les deux premiers types d'interaction sont bien déterminés, expérimentalement, numériquement et analytiquement, tandis que le dernier type (VMI) est nouveau. Un phénomène d'hystérésis contenant ce nouveau type de réflexion VMI a été aperçu, (figure 1).

* goudmi@yahoo.fr

Ces études réalisées au niveau du laboratoire d'aérothermique du CNRS ont ouvert un domaine de recherche très important. Les calculs numériques de Burtschell *et al.*, [4-7] basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes, ont conduit à la détermination de la configuration de type VMI pour la première fois, suivie aussi par le phénomène d'hystérésis.

Chpoun *et al.*, [1, 2] ont trouvé cette configuration d'interaction expérimentalement, Burtschell [4], Tenaud l'ont trouvée numériquement en résolvant les équations Navier-Stokes. Tenaud avec son équipe de recherche ont développé un code de calcul de Navier-Stokes au laboratoire LIMS à Orsay France. Un nombre limité d'études numériques a utilisé la géométrie du cône curviligne de Chpoun, mais la majorité s'est basée sur les calculs eulériens (où la viscosité est absente).

Les résultats tirés de l'étude de Burtschell *et al.*, [4] (calcul visqueux) montrent que l'origine physique de ce type d'interaction est probablement liée à la viscosité d'écoulement.

Cet article tombe dans le même contexte, il présente une étude numérique de l'interaction de chocs coniques de calcul d'Euler et de calcul turbulent, en utilisant le modèle $k-\omega$ SST de Menter comme modèle de turbulence. Cette investigation est effectuée par le code de calcul Fluent.

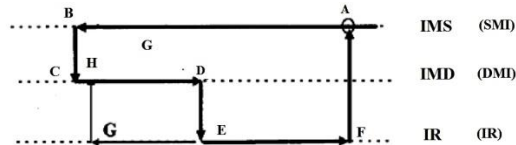


Fig. 1: Boucles d'hystérésis découvertes par l'expérience de Chpoun *et al.*, [2]

Comme indiqué ci-dessus, trois types de configuration de chocs sont possibles (figure 2),

- La réflexion de type A (figure 2-a), est une zone de recirculation qui se forme près de la surface du cône curviligne, provenant d'un choc fort divergent attaché au nez du cône curviligne et un choc incident convergent généré par la bague droite i_1 et i_2 respectivement; r_1 et r_2 sont les chocs réfléchis de i_1 et i_2 ; s.f. représente la zone de recirculation; t.d. est une ligne de glissement. L'interaction de t.d. avec r_2 forme une détente qui va alors interagir avec r_1 .

- La réflexion de Mach (figure 2-b): cette réflexion est issue de deux ondes de choc incidentes ; l'une convergente et l'autre divergente, i_1 et i_2 respectivement; r_1 et r_2 sont les deux chocs réfléchis; s_1 et s_2 sont les deux lignes de glissement issues des deux réflexions de Mach. Il est utile de noter que dans ce cas, il y a la présence de deux points triples (T1 et T2) qui ont un disque de Mach commun.

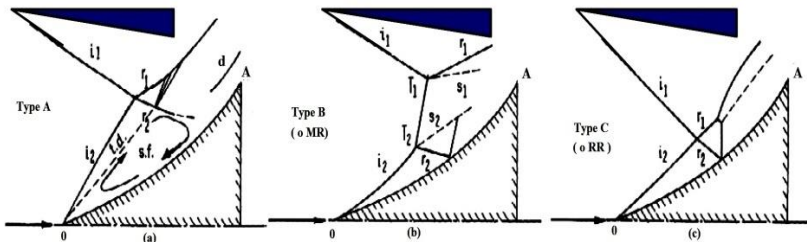


Fig. 2: Représentation schématique des trois configurations des réflexions de chocs coniques; type A, type B (oMR) et type C (oRR)

• La réflexion régulière (figure 2-c): cette réflexion comporte deux ondes de choc ; une incidente convergente générée par la tuyère et une incidente divergente faible générée par le cône curviligne **i1** et **i2** respectivement; **r1** et **r2** sont les deux chocs réfléchis. on notera que dans ce cas, le choc réfléchi **r2** vient interagir avec la surface du cône curviligne en une réflexion régulière.

2. PROCEDURE DE CALCUL

Le but de cette partie est d'établir une étude comparative entre notre calcul et celui de Ben-Dor *et al.*, [3]. Dans ce qui suit, on va simuler les phénomènes de transition de réflexions d'ondes de chocs et les phénomènes d'hystérésis qui les suivent. Les deux transitions à simuler sont;

La transition de la réflexion régulière notée (RR) vers la réflexion de Mach notée (MR), et la transition inverse, c'est-à-dire de la réflexion de Mach vers la réflexion régulière. Cette étude vise à étudier l'effet du nombre de Mach amont sur l'écoulement supersonique de chocs coniques en régime stationnaire. Cette investigation a été faite en 2D (bidimensionnels), sur la moitié de la géométrie (axisymétrique) (figure 3), afin de réduire le temps de calcul.

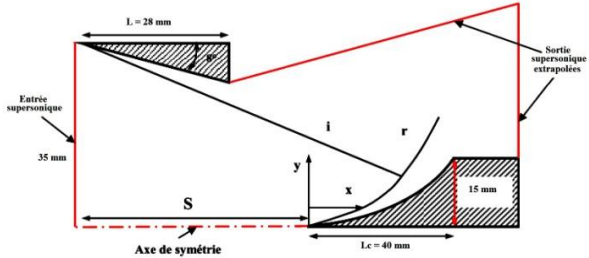


Fig. 3: Géométrie du domaine de calcul

2.1 Géométrie, maillage et méthode numériques

Sur la figure 3, on représente la géométrie du domaine de calcul qui est assimilé à une tuyère. L'écoulement à l'entrée et à la sortie de cette tuyère est supposé supersonique. Les conditions aux limites sont définies comme suit: à l'entrée, on impose une condition au limite de type pressure-inlet, une condition au limite de type pressure-outlet est imposée à la sortie de cette tuyère.

Les parois de la tuyère sont considérées comme adiabatiques. Le maillage utilisé est composé d'environ 217001 cellules, correspondant à 220004 nœuds. Il est de type structuré, (figure 4). Les équations de Navier-Stokes sont résolues à l'aide du solveur density-based, en utilisant le schéma *Upwind* du second ordre basé sur le flux de Roe-FDS.

Les paramètres de l'écoulement à l'entrée sont présentés sur le **Tableau 1**.

Table 1: Paramètres physiques de l'écoulement à l'entrée

Fluide de travail	Air considéré comme gaz parfait
Nombre de Mach	Variable
Température amont	76.5 K
Pression amont	1683 Pa
θ	8.5 ° du cône droit
$X = S/L$	-0.1 (distance entre le nez du cône curviligne et l'entré du cône droit (ou de la bague)

A noter qu'afin d'assurer la convergence et la stabilité des calculs, les simulations sont conduites en diminuant, puis en augmentant le nombre de Mach amont de l'écoulement d'entrée infini.

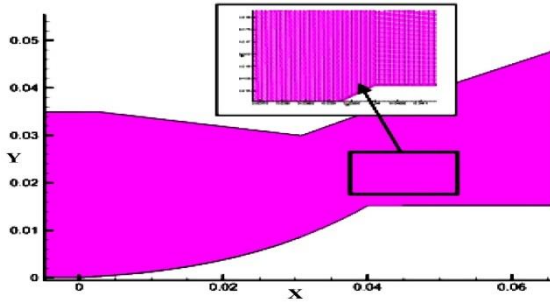


Fig. 4: Maillage du domaine de calcul

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Calcul d'écoulement non-visqueux (calcul d'Euler)

Le phénomène d'interactions de chocs coniques en régime stationnaire est simulé (étudié numériquement). Dans ce qui suit, on présente la topologie de l'écoulement ainsi qu'une comparaison entre les résultats obtenus et ceux issus des simulations numériques de Ben-Dor *et al.*, [3]. En plus on apporte des explications aux résultats trouvés.

Effet du nombre de Mach sur le phénomène d'hystérésis de chocs coniques-

i. Validation des résultats-

Les expériences réalisées par Ben-Dor *et al.*, [3], ont bien montré l'influence du nombre de Mach sur les deux phénomènes de transition à savoir ; la transition de la réflexion régulière vers la réflexion de Mach (RR→MR), et la transition inverse, c'est-à-dire de la réflexion de Mach vers la réflexion régulière (MR→RR).

Pour valider nos résultats issus de la simulation numérique, on a fait quelques comparaisons qualitatives avec ceux de Ben-Dor *et al.*, [3]. En effet, la validation de nos résultats concerne l'évolution de la pression pariétale pour un nombre de Mach égal à 3.43 ($Mo=3.43$), où la réflexion régulière (RR) et la réflexion de Mach (MR) sont observées (figure 5). Effectivement, on remarque que nos calculs sont proches de ceux de Ben-Dor *et al.*, [3]. Donc, notre simulation est valable ou approuvée.

3.1.1 Critère des transitions

Cette étude est effectuée pour un nombre Mach variable (de 5.2 à 3). Les résultats obtenus d'après le calcul, permettent de marquer les deux transitions: la transition de la réflexion régulière (RR) vers la réflexion de Mach (MR), et vice versa.

Les deux types de réflexion étant visibles en état stationnaire, une série de calculs a été menée afin de simuler le passage d'une configuration à l'autre et de mettre en évidence le phénomène d'hystérésis. Il est à noter que la transition, entre les deux types de réflexions, est obtenue pour un angle d'inclinaison du cône droit constant, $\theta_1=8.5^\circ$, tout en variant le nombre de Mach amont pendant le calcul.

Dans un premier temps, une réflexion régulière (RR) est obtenue, pour une valeur du nombre de Mach égale à 5.2, valeur proche de celle du critère de Von Neumann ($M_o^T(\theta_2)=5$). Cette configuration est obtenue en partant d'un champ uniforme, où la position du point d'interférence est en-dessus et en aval du bord de fuite du cône

curviligne. On réduit, ensuite, le nombre de Mach et à chaque fois une solution stationnaire stable est atteinte, à partir du champ initial convergé du nombre de Mach précédent.

On poursuit les calculs jusqu'à l'obtention d'une réflexion de Mach (MR), puis on les répète, mais en sens inverse, c'est-à-dire en augmentant à nouveau le nombre de Mach. En effet, en comparant les champs d'iso-densités obtenus pour un même nombre de Mach, (figure 6), on remarque que l'on obtient, suivant le sens de parcours, soit une réflexion régulière (RR), soit une réflexion de Mach (MR).

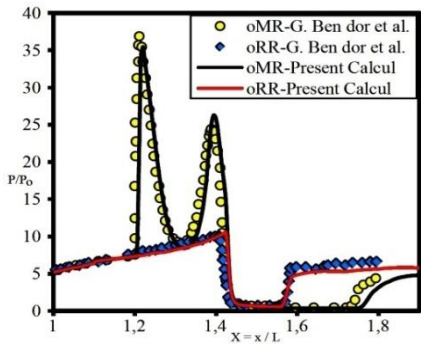


Fig. 5: Comparaison entre nos calculs et ceux de Ben Dor [3]
Evolutions des profils de la pression pariétale à Mo=3.4

La transition vers la réflexion de Mach s'est produite pour une valeur de Mach égale à 3. Cette valeur, proche du milieu de la zone duale, (figure 7), est éloignée légèrement du critère de détachement ($M_o^E(\theta_2) = 3.655$), qui correspond à une hauteur du disque de Mach adimensionnée égale à 0.326 ($h_m = 9.11 \times 10^{-3} \text{ m}$).

Les séquences présentées sur la figure 6, montrent clairement que pour le premier passage, une apparition brutale d'un choc quasi-normal (disque de Mach) a lieu à $M_o=3$. Une diminution supplémentaire du nombre de Mach ne ferait qu'accroître progressivement la hauteur du disque de Mach.

En parcours inverse (deuxième passage), lorsque le nombre de Mach augmente, la réflexion régulière (RR) est atteinte pour un nombre de Mach d'environ 5, qui correspond à la valeur théorique d'angle de critère de détachement (θ_{zzk}). Cette valeur est proche du milieu de la zone duale. Finalement, les deux transitions s'effectuent pour des valeurs approximativement égales, proches du milieu de la zone duale.

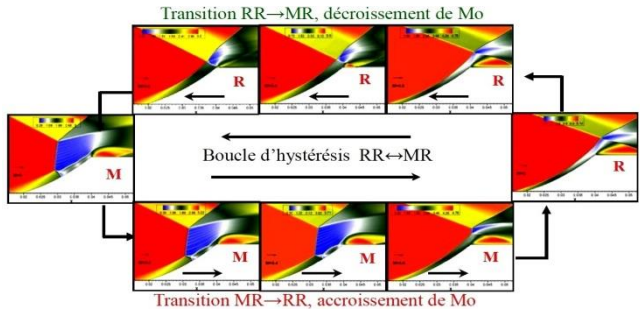


Fig. 6: Les contours d'iso-Mach, les configurations d'ondes de choc associées pour la boucle d'hystérésis A à $X = S/L = -0.1$

Pour plus de détail, la figure 7, représente les différents domaines d'existence des diverses configurations d'interactions, dans le plan (M_0, θ_2) pour un angle de déflexion $\theta_1 = 8.5^\circ$ constant.

Sur cette figure, la ligne θ_2^T représente le critère de Von Neumann étendu au cas dissymétrique. La ligne θ_2^E représente le critère de détachement étendu au cas dissymétrique. Le critère de Von Neumann, dans le cas symétrique, est représenté par la petite ligne noire θ_2^N .

La ligne θ_2^D indique la valeur limite supérieure au-delà de laquelle une onde de choc attachée ne peut plus être obtenue. Ces quatre courbes délimitent cinq zones caractérisées par des topologies d'interactions différentes. Pour un nombre de Mach donné, et en faisant varier θ_2 , il est clairement possible d'obtenir différentes configurations de réflexions.

Les courbes de transition (traits discontinus en couleur verte et rouge) relatives aux critères de détachement et de Von Neumann notées θ_2^E et θ_2^T respectivement délimitent la zone duale où les deux types d'interactions sont théoriquement possibles.

Dans la zone en dessous de la ligne θ_2^T , seule l'interaction régulière (RR) est possible à observer. La zone duale présentée entre les deux courbes θ_2^E et θ_2^T se comporte, soit comme une réflexion régulière (RR), soit comme une réflexion de Mach inverse (InMR). Dans ce cas, l'interaction de Mach est composée d'une réflexion de Mach directe et d'une réflexion de Mach inverse, et les lignes de courant issues des points triples forment un tube de courant divergent, cette remarque est bien observée dans le deuxième passage de transition $MR \rightarrow RR$ où la réflexion de Mach reste bien apparue.

Dans l'intervalle de θ_2 entre θ_2^E et θ_2^D , on obtient soit une réflexion de Mach inverse (InMR), soit une réflexion de Mach directe (DiMR).

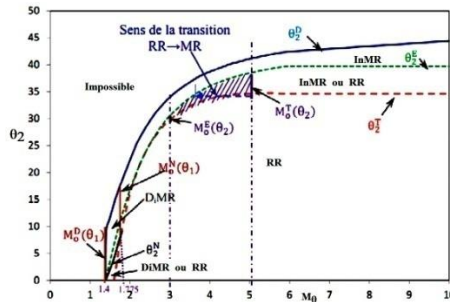


Fig. 7: Domaines de différentes réflexions théoriquement possibles dans le plan (M_0, θ_2) pour un angle $\theta_1 = 8.5^\circ$; le cône curviligne est fixé à $X=S/L=-0.1$

3.1.2 Phénomène d'hystérésis

Le phénomène d'hystérésis, induit par la variation du nombre de Mach, a ainsi clairement été reproduit par le calcul numérique et présenté par des séquences des contours d'iso-Mach (figure 6). En effet, pour un même nombre de Mach, on observe que l'on obtient, suivant le sens de passage, soit une réflexion régulière, soit une réflexion de Mach.

Ce phénomène est traduit par une diminution, puis par une augmentation du nombre de Mach qui définit l'ensemble des deux passages de transition, d'une réflexion régulière à une réflexion de Mach (RR→MR) et d'une réflexion de Mach à une réflexion régulière (MR→RR). Les deux parcours de ce phénomène sont proches de la zone duale, ils sont présentés sur la figure 7 par la couleur violet hachurée. Ce phénomène d'hystérésis est reproduit dans les travaux de Ben-Dor *et al.*, [3], qui ont trouvés les mêmes parcours.

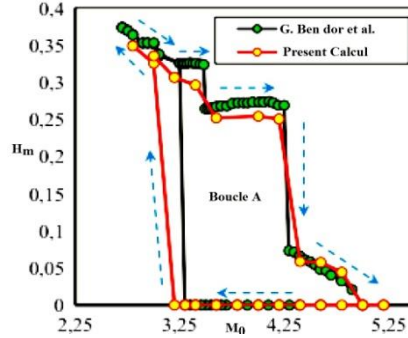


Fig. 8: Hauteurs du disque de Mach h_m normalisée par la longueur du cône droit L - Calcul s d'Euler. Comparaison entre nos résultats et ceux de Ben-Dor *et al.*, [3] à $X = S/L = -1$

La figure 8 représente la hauteur du disque de Mach (rapportée à la longueur du cône droit, $L=28\text{mm}$) en fonction du nombre de Mach amont de l'écoulement infini. Elle représente aussi indiquant la boucle du phénomène d'hystérésis. On constate que globalement la boucle A trouvée par nos calcul est presque proche de celle obtenue par Ben-Dor *et al.*, [3]. Elle a la même allure que celle de Ben-Dor *et al.*, [3]. Même remarque concernant la hauteur du disque de Mach. Cette petite différence peut être liée à l'effet du schéma numérique utilisé ou au raffinement du maillage.

3.2 Calcul d'écoulement stationnaire visqueux

De nombreuses méthodes de prévision des écoulements aérodynamiques sont fondées sur le modèle du fluide non visqueux et non conducteur de chaleur -ou fluide parfait- dont le mouvement est régi par les équations d'Euler. Or, le fait de négliger la viscosité peut conduire à des résultats irréalistes, notamment dans le cas où se forme un décollement.

Par ailleurs, on a vu que le fait d'omettre les termes visqueux des équations de Navier-Stokes entraînait une indétermination du problème, une infinité de solutions étant admissibles. La majorité des études citées précédemment sont effectuées dans le cas d'écoulements supersoniques eulériens, pour lesquels la viscosité n'est pas prise en compte. Parmi les études expérimentales et numériques menées dans ces cas de phénomènes d'interactions, on cite les travaux de Chpoun *et al.*, [1, 2], Ben-Dor *et al.*, [3] et Burtschell *et al.*, [4].

On a utilisé dans cette partie, la même configuration géométrique que celle de l'écoulement stationnaire non visqueux où $X = S/L = -0.1$, et les mêmes conditions de simulation, tels que le maillage, les conditions aux limites et le schéma numérique. Dans ce qui suit, on s'intéresse à l'étude de l'effet de la viscosité qui est incluse dans le calcul turbulent, en utilisant le modèle $k - \omega$ SST.

Les calculs faits dans ce cas sont obtenus pour des nombres de Mach amont différents. Il est à noter qu'on s'intéresse au phénomène d'interaction de chocs coniques axisymétriques d'un écoulement supersonique bidimensionnel, turbulent et compressible

dans un régime stationnaire. Ce travail a permis d'étudier le phénomène d'hystérésis en variant le nombre de Mach amont.

3.2.1 Effet du nombre de Mach sur les critères de transition

Les critères de transition dans le cas d'écoulement visqueux de la réflexion régulière (RI) vers la réflexion (DMR) et vice versa, c'est-à-dire de (DMR) vers (RI) sont obtenues en diminuant, puis en augmentant le nombre de Mach respectivement. En partant d'un nombre de Mach égal à 4.96, une configuration de type (RI) est observée.

Puis une série de calcul est effectuée en diminuant le nombre de Mach jusqu'à l'obtention de la configuration DMR (premier parcours). Le deuxième parcours est obtenu par l'augmentation du nombre de Mach, jusqu'à ce que la transition vers la réflexion régulière (RI) soit captée, (figure 9).

La réflexion régulière (RI) est observée pour un nombre de Mach égal à 4.9 (presque même point de départ). Cependant, lorsqu'on continue à diminuer le nombre de Mach, un phénomène de transition de (DMR) vers (VMI) est observé à un nombre de Mach égal à 3, (figure 10). La figure 10 représente la transition de la configuration de type (DMR) vers la configuration de type (VMI), mais la transition inverse n'est pas observée, c'est-à-dire la transition de (VMI)→DMR).

Cette configuration contient d'un seul bulbe occupant toute la surface du cône curviligne. La taille de ce bulbe augmente de plus en plus avec la diminution du nombre de Mach. En ce qui concerne la nouvelle configuration (VMI) découvert par Chpoun *et al.*, [1], Ben-Dor *et al.*, [3] ainsi que par Burtschell *et al.*, [4]. Elle est observée aussi par nos calculs (présente étude).

La différence entre le premier calcul (écoulement non-visqueux) et celui-ci (écoulement visqueux) réside dans le phénomène de décollement. Dans le premier cas, le phénomène de décollement de l'écoulement n'existe pas, tandis qu'il est observé dans le second cas, où, il se manifeste par des bulles de zones de recirculation observées sur la surface du cône curviligne, et où la forme Lambda de l'ensemble des chocs, est claire dans le cas de la réflexion de Mach, (figure 9). Ces critères de transition obtenus, sont provoqués par la présence de la viscosité, qui joue un rôle important dans les zones proches des parois, où les dissipations visqueuses sont importantes.

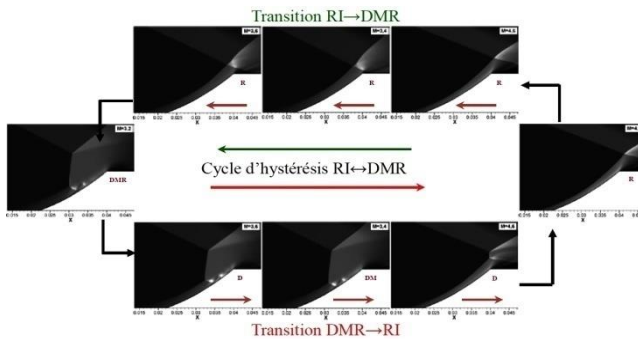


Fig. 9: Contours des iso-densités, représentent une séquence de 10 images pour les deux types de configuration de transitions de chocs $RR \rightarrow MR$ et $MR \rightarrow RR$ à $X=S/L=-0.1$

3.2.2 Effet du nombre de Mach sur le phénomène d'hystérésis (calcul visqueux)

Le phénomène d'hystérésis, pour les deux types de transition est observé $RI \leftrightarrow DMR$, (figure 9). Dans un premier temps, une configuration de type (RI) est obtenue en partant d'un champ uniforme à Mach égal à 5. Ensuite, on réduit le nombre de Mach et toujours

à chaque fois, on conserve la solution stationnaire précédente qui converge, pour le nombre de Mach correspondant, puis on relance le calcul suivant (reprise du calcul).

Les calculs se poursuivent jusqu'à l'obtention d'une configuration de type (DMR). Cette dernière est captée à un nombre de Mach égal à 3.2. Ensuite, on répète les calculs, mais cette fois-ci, en sens inverse, c'est-à-dire en augmentant de nouveau le nombre de Mach. La configuration initiale de type (RI) est obtenue pour une valeur de Mach égal à 4.9. Dans ce cas, les deux valeurs de transition du nombre de Mach sont proches du milieu de la zone duale qui est bien captée où les deux types de configuration sont théoriquement possibles, (figure 7).

Le phénomène d'hystérésis, induit par la variation du nombre de Mach, est bien observé par ce calcul numérique. Ce phénomène est présenté par des séquences des contours des iso-Mach (figure 9).

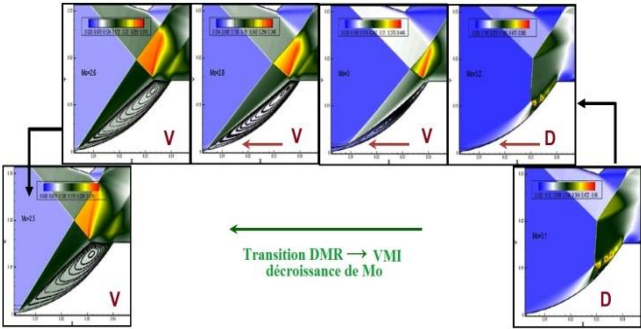


Fig. 10: Contours des iso-densités, représentent une séquence de 7 images pour les deux types de configuration de chocs de type A et de type B à $X=S/L=-0.1$, globalement visibles.

4. CONCLUSION

Dans cette étude, on a effectué des calculs numériques par le code Fluent du phénomène d'interaction de chocs coniques de deux familles différentes d'écoulement axisymétrique bi-dimensionnel compressible visqueux et non-visqueux, en utilisant le modèle de turbulence $k-\omega$ SST pour le calcul visqueux.

Cette simulation est réalisée pour une configuration composée de deux cônes, l'un droit et l'autre curviligne. Les phénomènes de transition des réflexions de chocs sont bien observés, ils sont suivis par des phénomènes d'hystérésis qui sont aussi captés.

La transition de $RR \rightarrow MR$, de $MR \rightarrow RR$, est observée pour le calcul non-visqueux et de $RI \rightarrow DMR$, de $DMR \rightarrow RI$ et de $DMR \rightarrow VMI$, pour le calcul visqueux. Nos résultats sont comparables avec ceux trouvées théoriquement et numériquement en littérature.

NOMENCLATURE

DMI : Interaction de double Mach	oMR : Réflexion de Mach locale
RI : Interaction régulière	oRR : Réflexion régulière locale
VMI : Interaction de Mach simple	Mo : nombre de Mach amont
DiMR : réflexion de Mach directe	InMR : réflexion de Mach inverse
θ_i^D : Angle de détachement (°)	θ_i^N : Angle de Von Neumann (°)
θ_1 : Angle du cône droit (°)	θ_2 : Angle variable du cône curviligne (°)

REFERENCES

- [1] A. Chpoun et J.C. Lengrand, '*Confirmation Expérimentale d'un Phénomène d'Hystérésis lors de l'Interaction de deux Chocs Obliques de Familles Différentes*', Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Séries IIB, Vol 24, N°6, pp. 1-8, 1997.
- [2] A. Chpoun, F. Chauveau, L. Zombas and G. Ben-Dor, "*Les interactions des ondes de chocs coniques*", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série IIB Vol. 327, N°1, pp. 85 - 90, 1999.
- [3] G. Ben-Dor, E. Vasiliev, T. Elperin and A. Chpoun, "*Hysteresis Phenomena in the Interaction Process of Conical Shock Waves: Experimental and Numerical Investigations*", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 448, pp. 147 - 174, 2001
- [4] Y. Burtschell and D.E. Zeitoun, "*Hysteresis Effect of Oblique Shock Interactions in a Axisymmetric Steady Flow*", Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves Beijing, China July 11–16, pp 517 - 522. 2004.
- [5] Y. Burtschell and D.E. Zeitoun, "*Numerical Investigation of H₂ Injection in Mach 5 Air Flow With a Strong Shock/Boundary Layer Interaction*", Shock Waves, Vol. 13, pp 465 – 472, 2004.
- [6] Y. Burtschell, D.E. Zeitoun, A. Chpoun and G. Ben-Dor, "*Conical Shock Interactions in A Steady Flow. Numerical Study*", presented at the 23rd International Symposium on Shock Waves, Fort Worth, Texas, 2001.
- [7] Y. Burtschell and D.E. Zeitoun, "*Shock/Shock and Shock/Boundary Layer Interactions in an Axisymmetric Steady Laminar Flow*", Shock Waves 12: 487–495. 2003.
- [8] A. Chpoun, D. Passerel, H. Li and G. Ben-Dor, "*Reconsideration of Oblique Shock Wave Reflection in Steady Flows. Part 1: Experimental Investigation*", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 301, pp. 19 - 35, 1995.
- [9] G. Ben-Dor, M. Ivanovb, E.I. Vasilevc and T. Elperina, "*Hysteresis Processes in the Regular Reflection↔Mach Reflection Transition in Steady Flows*", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 38, pp. 347 – 387. 2002.
- [10] G. Ben-Dor, T. Elperin, and E. I. Vasiliev, "*Flow-Mach-Number-Induced Hysteresis Phenomena in the Interaction of Conical Shock Waves – A Numerical Investigation*", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 496, pp. 335 - 354, 2003.