

Etude numérique des interférences des ondes de choc asymétrique: transitions (RR-MR) et phénomène hystérésis

Razik Benderradji *, Abdelhadi Beghidja † et Hamza Gouidmi

Laboratoire des Energies Renouvelables et Développement Durable, LERDD
Université des Frères Mentouri, Constantine1, Algérie

(reçu le 04 avril 2015 – accepté le 30 Juin 2015)

Résumé – L'étude analytique et la recherche expérimentale sur la réflexion des ondes de choc asymétriques (interférences RR - MR), dans les écoulements supersoniques stationnaires a été rapporté pour la première fois par, Li et al. [1]. Le but de ce travail de recherche est d'effectuer des simulations numériques (CFD), sur les interférences des ondes de choc dans les écoulements supersoniques stationnaires et plus particulièrement à l'étude de la transition réflexion régulier (RR) vers réflexion de Mach (MR) et vice versa - phénomène hystérésis. Ce dernier procédé a été largement étudié numériquement dans le cas des réflexions symétrique au cours des ces dernières années. L'analyse des résultats obtenus a été basée sur des résultats expérimentaux de Li et al. [1], et comparés analytiquement par la théorie du triple choc (polaire de choc). L'étude théorique a permis l'identification des critères de transition, et montre clairement l'existence d'un phénomène hystérésis dans la transition (RR) - (MR) des ondes de choc asymétriques analogue à celui existant en interaction de choc symétrique.

Abstract - The analytical study and experimental research on reflection asymmetric shock waves (RR-MR interference), in stationary supersonic flows been reported for the first time by Li et al. [1]. The purpose of this research is to perform numerical simulations (CFD) Interference shock waves in steady supersonic flows and particularly to the study of the transition regular reflection (RR) to Mach reflection (MR) and vice versa - phenomenon hysteresis. The latter method has been extensively studied in the case of numerically symmetrical reflections over the recent years. The analysis of the results was based on experimental results Li et al. [1], and compared analytically by the theory of tripled shock (shock polar). The theoretical study allowed the identification of transition criteria, and clearly shows the existence of a hysteresis phenomenon in the transition (RR) - (MR) asymmetric shock waves similar to that existing in symmetrical shock waves interaction.

Mot clés: Onde de choc - Interférences de choc - Réflexion régulière - Réflexion de Mach - Polaire de choc.

1. INTRODUCTION

On rencontre la réflexion et l'interaction d'ondes de choc dans un grand nombre de situations pratiques, par exemple, l'interaction de chocs issus des différentes composantes d'un lanceur ou encore l'interaction de chocs induits par le fuselage et les surfaces portantes d'un véhicule de rentrée. D'autre part, la conception d'un système propulsif constitue un problème technologique majeur dans la définition des futurs engins hypersoniques. A ce sujet, l'entrée d'air, servant à ralentir l'écoulement pénétrant dans la chambre de combustion supersonique au travers d'une série d'ondes de choc, joue un rôle crucial. Il faut en effet que l'écoulement arrive dans cette dernière avec une efficacité maximale et donc une perte minimale de la pression d'arrêt de l'écoulement. Un facteur déterminant de l'état de l'écoulement à l'entrée la chambre de

* benderradjirazik@gmail.com , gouidmi@yahoo.fr

† abeghidja@yahoo.fr

combustion est les interactions successives de chocs qui se produisent dans le diffuseur de l'entrée d'air. Ceci conduit à poser le problème fondamental de l'interaction de deux chocs obliques. Par sa formulation théorique, le cas de l'interaction de deux chocs d'égale intensité, mais de familles différentes est équivalent au cas de la réflexion d'un choc sur une surface solide en l'absence de la couche limite. En effet, les deux chocs symétriques se réfléchissent sur un plan de symétrie. Le phénomène de réflexion de choc a été rapporté pour la première fois par l'illustre savant E. Mach en 1878. Il avait alors distingué deux types de réflexions: une réflexion dite régulière faisant intervenir un choc incident et un choc réfléchi et une réflexion appelée à titre posthume réflexion de Mach. Par la suite, ce problème a fait l'objet de nombreuses études expérimentales et théoriques. Une étude analytique élaborée par Neumann [2], (la théorie du triple choc) a mis en lumière deux critères possibles pour la transition réflexion régulière => réflexion de Mach. Un critère consiste en l'inexistence de la réflexion régulière au-delà de l'angle de détachement du choc réfléchi, l'autre stipule que le passage d'une configuration à l'autre se fait sans discontinuité de pression pour l'angle de Neumann. Entre ces deux critères qui sont d'autant plus distincts que le nombre de Mach est élevé, il existe une zone duale où les deux types de réflexion sont possibles. Cette zone duale a conduit H. Hornung à suggérer l'existence d'un phénomène d'hystérésis lors de la transition réflexion régulière => réflexion de Mach. Cependant, les différentes tentatives dans les années 70 et 80, 'Hornung, Henderson' n'ont pas pu confirmer l'hypothèse de Hornung. Par la suite, l'étude expérimentale de ce phénomène a été reprise au Laboratoire d'Aérodynamique du CNRS à Meudon dans une soufflerie (SH2) du type continu et à veine libre [1]. Au cours de ces études, le phénomène d'hystérésis suggéré par Hornung [3], a été observé aussi bien dans le cas de la réflexion d'un choc sur un plan de symétrie que dans le cas de l'interaction de deux chocs asymétriques qui est l'objet de cette présentation.

2. INTERACTION DE CHOCS ASYMETRIQUES

La réflexion d'une onde de choc sur une surface plane est altérée par la présence de la couche limite sur la paroi. L'onde de choc peut causer le décollement de la couche limite et la configuration réelle est éloignée de la configuration prédite par la théorie des fluides parfaits. De même l'interaction de chocs parfaitement symétriques est moins probable. En revanche, les écoulements réels (entrée d'air, écoulement externe) sont souvent le siège d'interaction de chocs d'intensités et de familles différentes et la portée de leur étude est considérable. Les travaux expérimentaux dans ce domaine sont peu nombreux, voire inexistant. Comme dans le cas de l'interaction de deux chocs symétriques, il existe deux configurations d'interaction: l'interaction de Mach (MR) et l'interaction régulière (RR). Les configurations d'interaction (MR) et (RR) et les notations géométriques correspondantes sont présentées sur la figure 1. L'interaction régulière est constituée de deux chocs incidents (i_1) et (i_2) et de deux chocs réfléchis (r_1) et (r_2). Les conditions aux limites pour la configuration (RR) sont [1],

$$\theta_1 - \theta_3 = \theta_2 \quad \text{et} \quad \theta_4 = \delta \quad (1)$$

$\delta = 0$ lorsque $\theta_1 = \theta_2$, c'est-à-dire l'interaction est symétrique.

L'interaction de Mach comporte en plus de chocs incidents et des chocs réfléchis, un choc fort quasi normal reliant les points triples (T_1) et (T_2). Deux lignes de glissement (s_1) et (s_2) complètent le système de chocs. Les conditions aux limites pour une interaction de Mach sont les suivantes [4].

$$\theta_1 - \theta_3 = \delta_1 \quad \text{et} \quad \theta_2 - \theta_4 = \delta_2 \quad (2)$$

$\delta_1 = \delta_2$ lorsque $\theta_1 = \theta_2$.

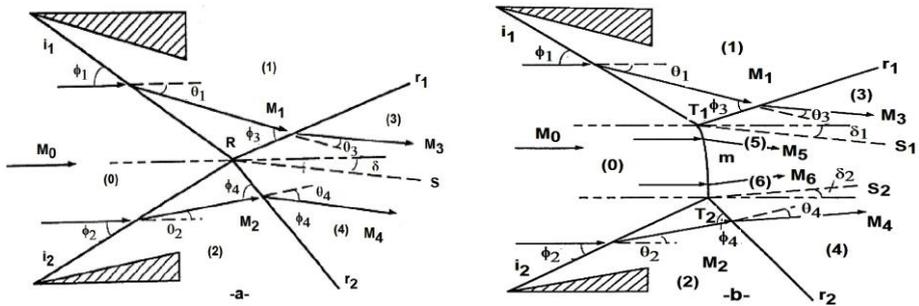


Fig. 1: **a-**Schéma d'une interaction régulière, **b-** Schéma d'une interaction de Mach

L'intérêt principal dans les études d'interaction de choc réside dans la détermination des critères de transition. Il s'avère que la théorie du triple choc donne des résultats satisfaisants concernant les critères de transition dans le cas de l'interaction de deux chocs symétriques. Nous allons employer cette théorie pour la détermination des critères de transition dans le cas asymétrique. Les conditions aux limites des configurations (RR) et (MR) dans le cas asymétrique étant différentes de celles du cas symétrique, certaines particularités inhérentes à la configuration asymétrique seront discutées. L'utilisation des polaires de choc est très commode pour analyser les différentes configurations possibles d'interactions de chocs [5]. Suivant la position de l'intersection des polaires du choc incident (P-I) et du choc réfléchi (P-R), on peut distinguer trois types d'interaction de Mach (Fig. 2). Une interaction de Mach directe (DiMR) définie par l'intersection (point **a** sur la figure) de la polaire (P-R₁) avec la partie droite de la polaire (P-I). L'interaction de Mach inverse (InMR) résulte de l'intersection de la polaire (P-R₃) avec la partie gauche de la polaire (P-I) (le point **c** sur la figure). Lorsque le point d'intersection se situe sur l'axe des pressions (le point **b** de la figure), on dit que l'interaction de Mach est stationnaire (StMR). Dans le cas de l'interaction de Mach directe, l'écoulement forme un tube de courant convergent (Fig. 3), alors que dans le cas d'une interaction de Mach inverse, il forme un tube de courant divergent. Dans le cas d'une interaction de Mach stationnaire les lignes de courant sont parallèles derrière le choc fort. Pour un écoulement uniforme caractérisé par un nombre de Mach M , les rapports de pression à travers un choc oblique en fonction de l'angle de déflexion de l'écoulement représentent la polaire de choc dont l'expression est donnée par Han *et al.* [6].

$$\theta = \pm f(\gamma, M\zeta) \quad (3)$$

avec

$$f(\gamma, M\zeta) = \arctan \left(\frac{(\zeta-1)^2 \left[2\gamma(M^2-1) - (\gamma+1)(\zeta-1) \right]}{\left[\gamma M^2 - (\zeta-1) \right]^2 \left[2\gamma + (\gamma+1)(\zeta-1) \right]} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Où γ , ζ et θ sont respectivement le rapport des chaleurs spécifiques, le rapport des pressions à travers les chocs et l'angle de déflexion de l'écoulement. Finalement la pente locale de la polaire de choc est obtenue par dérivation de la fonction ci-dessus, c'est-à-dire,

$$\frac{d\theta}{d\zeta} = \pm g(\gamma, M, \zeta) \tag{5}$$

$$g(\gamma, M, \zeta) = \frac{4\gamma(M^2-1)-(y+1)(4-M^2)(\zeta-1)-(\gamma+1)(\zeta-1)^2}{\left[2\gamma(M^2-1)-(y+1)(\zeta-1)\right]^{1/2} \left[2\lambda+(\gamma+1)(\zeta-1)\right]^{1/2}} \tag{6}$$

$$\times \left\{2\gamma M^2 - \left[4 - (\gamma + 1)M^2\right] (\xi - 1) - 2(\xi - 1)^2\right\}^{-1}$$

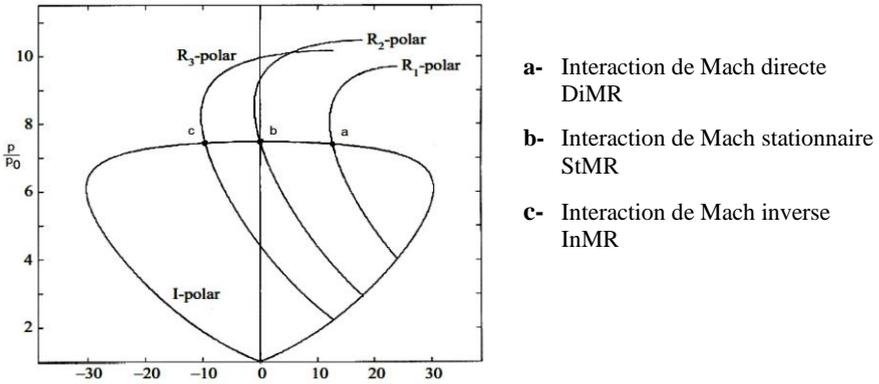


Fig. 2: Les différentes combinaisons des polaires de choc montrant les différents types d'interaction de Mach [7]

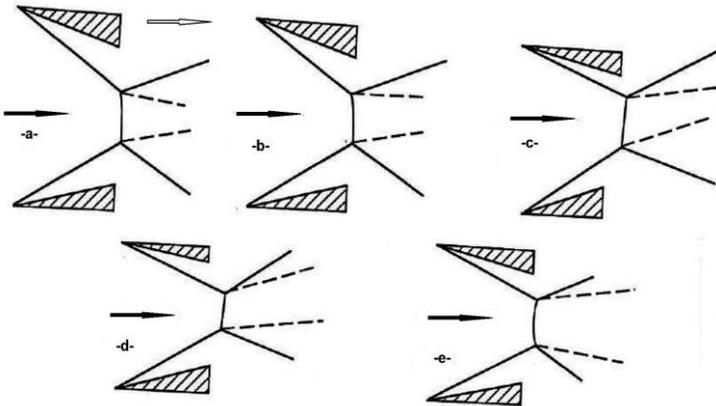


Fig. 3: Différentes configurations d'écoulement en aval du disque de Mach [7]

3. ETUDE NUMERIQUE

3.1 Géométrie et paramètres de l'écoulement

La géométrie utilisée (Fig. 4), pour reproduire l'hypothèse de l'hystérésis est similaire à celle utilisée expérimentalement dans la soufflerie SH2 du laboratoire d'Aérodynamique du CNRS, Li *et al.* [1]. C'est une configuration qui contient deux dièdres (générateur de choc) de sections droites sous forme d'une tuyère convergente, de 60 mm de longueur (l), la distance (h) entre les deux bords d'attaque des générateurs a été maintenue à 70 mm. Il est noter que ces dimensions conduisent à un rapport de forme (h/l) = 1.16 [8], ce rapport est suffisamment important pour éviter que les effets

de bord puissent affecter l'écoulement dans la partie centrale des plaques. Le générateur de choc supérieur est en mouvement de rotation par rapport à l'axe de rotation 'O₁', en utilisant la technique du maillage mobile, par contre le générateur de choc inférieur est fixe.

La réalisation d'un maillage approprié au problème traité est l'une des étapes les plus importantes dans les simulations numériques. L'adaptation du maillage aux conditions aux limites du problème est primordiale dans ce type de calcul. Un maillage structuré est utilisé dans les calculs réalisés. Ce type de maillage permet de contrôler de façon rigoureuse l'épaisseur des mailles dans des endroits précis (au voisinage des parois par exemple). Le seul problème que l'on rencontre dans ce type de maillage par rapport au maillage non structuré est l'augmentation du nombre de mailles lors de son raffinement dans les zones sensibles à étudier. Le domaine total de calcul est subdivisé en plusieurs blocs, le raffinement de chaque bloc dépend de l'importance des zones étudiées. Dans notre étude, on s'intéresse à l'écoulement dans la partie où les interférences des ondes de chocs seront localisées (les réflexions RR et MR).

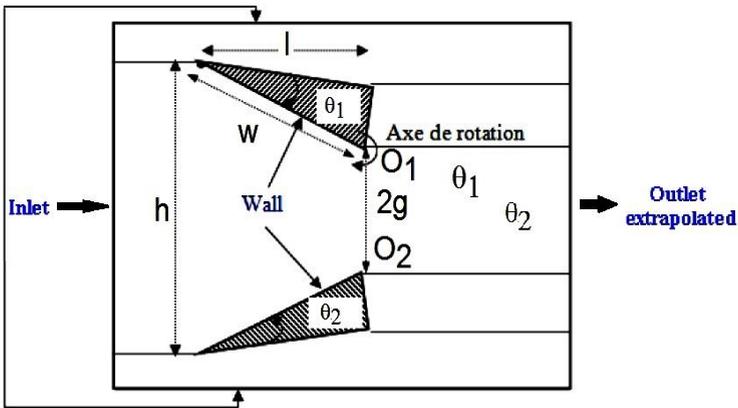


Fig. 4: Géométrie et paramètres de l'écoulement du problème

3.2 Modélisation et solution numérique

Pour la solution numérique, deux codes de recherche ont été utilisés, CFD-Geom (Générateur de maille), et CFD-Fastran (solveur), tous deux fournis par ESI CFD Groupe. L'approche numérique du code CFD-Fastran est basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes par la méthode des volumes finis. Le champ d'écoulement est subdivisé en petits volumes de contrôle. Les équations de conservation sont appliquées à chaque volume en prenant en compte les flux des variables à travers chaque face du volume de contrôle. Chaque variable est calculée au centre de chaque cellule et supposée constante dans tout le volume de contrôle. Dans notre cas, le fluide utilisé est l'air, considéré comme gaz parfait (chaleur spécifique $\gamma = 1.4$). Les conditions d'admission (condition aux limites de l'écoulement) sont représentées dans le **Tableau 1**. Le schéma de Roe-FDS, moins dissipatif a été choisie, associé au limiteur Minmod basé sur le calcul de la pente minimale des gradients associés aux grandeurs physiques de l'écoulement prises sur les faces du volume de contrôle. Le schéma implicite a été par ailleurs utilisé pour l'intégration en temps. Le pas de temps est contrôlé par le nombre de CFL (Courant-Fredrichs-Lewy). L'accélération de la convergence est obtenue en faisant varier ce nombre de CFL linéairement de sa valeur initiale généralement faible à une valeur finale, sur un nombre de pas de temps spécifié. La convergence des calculs itératifs est obtenue (solution quasi stationnaire) lorsque la valeur spécifiée des grandeurs résiduelles est atteinte.

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

Conditions de travail		
Fluide de travail	Air	
Nombre de Mach	4.96	
Température	76.5 K	
Pression	1683 Pa	
CFL	0.01	
θ (deg)	θ_1 (deg)	variable
	θ_2 (deg)	25°

4. VALIDATION DES RESULTATS

La figure 5, représente les iso-contours des densités. Elle montre un cas de validation de notre calcul avec les résultats de Li *et al.*, [1]. On constate que les deux configurations presque sont les mêmes, en particulier les hauteurs des disques de Mach, et aussi la réflexion de Mach directe est bien marquée

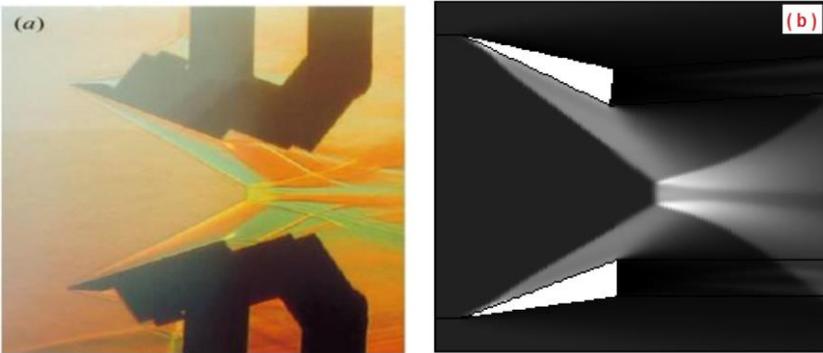


Fig. 5: Comparaison de notre résultats ($\theta_1=28.44^\circ$, $\theta_2=24,14^\circ$) (a) avec les travaux [1] ($\theta_1=28^\circ$, $\theta_2=24^\circ$), (b), dans les mêmes conditions. $M_0 = 4.96$

5. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour reproduire les séquences d'hystérésis, un angle θ_2 fixé, l'angle θ_1 a été diminué à partir d'une configuration de Mach jusqu'à l'obtention d'une configuration régulière. Cette opération a été reproduite en sens inverse, c'est-à-dire de la configuration régulière jusqu'à la configuration de Mach. Les séquences d'hystérésis ont été reproduites pour six valeurs de θ_1 égales à 12.5°, 15°, 20°, 26°, 30° et 36°. La séquence de la figure 6, présente les courbes d'iso-densités des résultats numériques obtenus. La figure montre une séquence complète d'hystérésis, les angles de transition, les différents domaines d'existence des interactions RR et MR ainsi que la zone duale. L'angle θ_2 est fixé à 25° pendant que l'angle θ_1 augmente de 12.5° à 36° puis diminue. On voit que la transition RR vers, MR (critère de détachement) a lieu d'une manière brutale entre 30° et 36° et qu'en revanche la transition MR vers, RR (critère de Von Neumann) s'effectue entre 15° et 12.5°. En d'autres termes, dans la zone duale, pour une même géométrie des plaques $\theta_1=26^\circ$, les deux configurations d'interaction sont obtenues. D'autre part l'étude analytique suggère l'existence d'une réflexion de Mach inverse en écoulement supersonique stationnaire. Cette configuration de chocs a

été observée numériquement au cours de cette étude pour la première fois (Fig. 6-e). Cette configuration a suscité un regain d'intérêt pour ce problème et les recherches sur les différents aspects de ce phénomène sont en cours de par le monde.

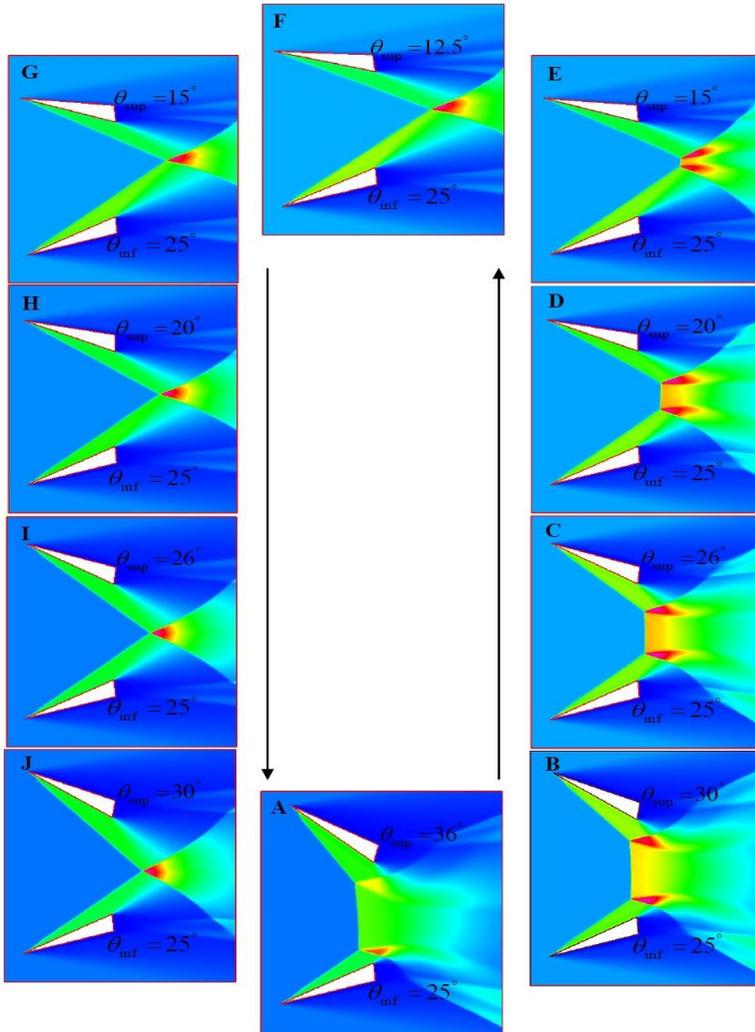


Fig. 6: Phénomène d'hystérésis induit par variation de l'angle d'incidence de dièdre générateurs de chocs

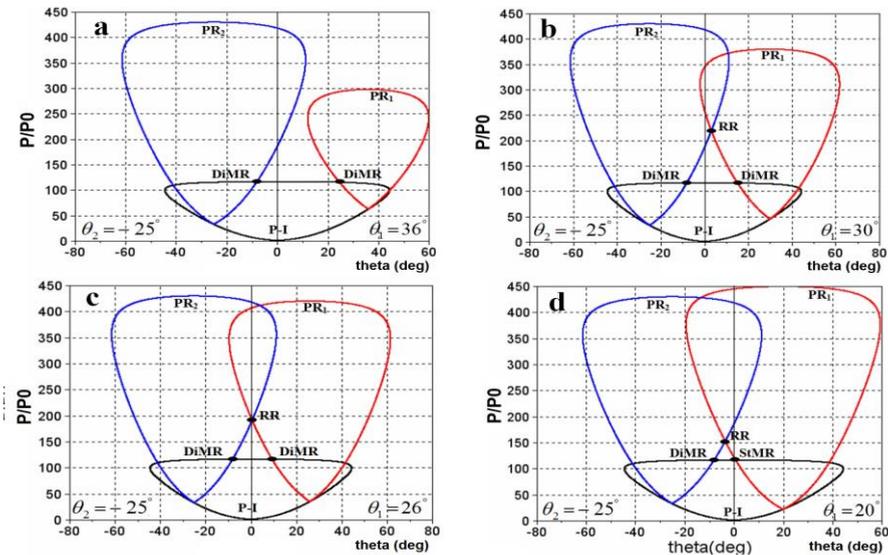
La figure 7, présente les différentes combinaisons des polaires de choc montrant le phénomène d'hystérésis induit par variation de l'angle d'incidence de dièdre générateurs de chocs: cas où des interférences asymétrique. Les figures 7a- à 7f- représentent six combinaisons possibles de polaire de choc. Pour l'ensemble le nombre de Mach est de $M_0 = 4.96$, et la polaire (P-I) est la même. De plus en fixant la déflexion $\theta_2 = -25^\circ$, les polaires (P-R2), sont identiques. Il est à noter que les intersections de la polaire (P-I) et les (P-R2) prédisent une réflexion de Mach directe (DiMR) comme le montre les figures 7, 7a- à 7f-.

La figure 7a-, montre la combinaison des polaires de choc pour une déflexion $\theta_2 = 36^\circ$. Comme l'on peut voir, l'intersection des polaires (P-I) et (P-R1) définit encore une réflexion de Mach directe. En conséquence la configuration globale de l'interaction consiste en deux réflexions de Mach directes. Cette configuration de chocs est illustrée sur la figure 6a-. Les lignes de glissement issues des points triples forment alors une tuyère convergente à travers laquelle l'écoulement est accéléré jusqu'aux conditions supersoniques.

Pour un angle $\theta_1 = 26^\circ$, la configuration de choc est représentée par les polaires de choc de la Fig 7c-. Cette situation comporte également une interaction régulière et une interaction de Mach formée de deux réflexions de Mach directes. Cette configuration de chocs est illustrée sur les figures 6c- et 6i-. Lorsque la déflexion θ_1 atteint 20° , la polaire (P-R1) croise (P-I) sur l'axe des pressions (Fig. 7d-). Il en résulte alors un point triple définissant une réflexion de Mach stationnaire (StMR), alors que le deuxième point triple définit toujours une réflexion de Mach directe (DiMR). Le schéma correspondant à ce type d'interaction est représenté sur la figure 6d-. La ligne de glissement issue de la réflexion (StMR) est alors parallèle à la direction initiale de l'écoulement. Les deux lignes de glissement formant alors un tube de courant convergent.

Pour un angle θ_1 plus faible, par exemple $\theta_1 = 15^\circ$, on obtient une situation limite où les trois polaires se croisent en un même point (Fig. 7 e-). Dans cette situation, les deux solutions, c'est-à-dire, l'interaction régulière et l'interaction de Mach sont confondues. Cette situation est équivalente au critère de Von Neumann. Cependant, l'interaction de Mach est formée maintenant d'une réflexion de Mach inverse (InMR) et d'une réflexion de Mach directe (DiMR). Le schéma de ce type d'interaction est représenté sur la figure 6 e-. On notera que la ligne de glissement issue de la réflexion (InMR) est orientée positivement par rapport à la direction de l'écoulement et le tube de courant en aval du choc fort reste convergent.

Pour des angles de déflexion plus faibles, par exemple 12.5° , on obtient une combinaison de polaires représentée sur la figure 7g-, dont le schéma de l'interaction est donné sur la figure 6f-. Ici, l'interaction est une interaction régulière.



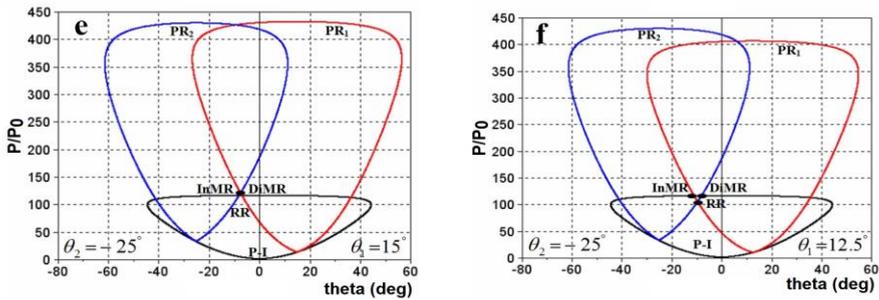


Fig. 7: Différentes combinaisons des polaires de choc montrant le phénomène d’hystérésis induit par variation de l’angle d’incidence de dièdre générateurs de chocs: Le cas asymétrique. $M_0 = 4.96$

- a- Combinaison des polaires de choc correspondant à une interaction de Mach formée de deux réflexions de Mach directes (DiMR).
- b- Combinaison des polaires de choc correspondant à une interaction de Mach formée de deux réflexions de Mach directes (DiMR) et une interaction régulière (R) (situation illustrant la zone duale)
- c- Combinaison des polaires de choc correspondant à une interaction de Mach formée de deux réflexions de Mach directes (DiMR) et une interaction régulière (RR) (situation illustrant la zone duale).
- d- Combinaison des polaires de choc correspondant à une interaction régulière (RR) et à une interaction de Mach formée de deux réflexions de Mach directes (DiMR) et d’une réflexion de Mach stationnaire (StMR).
- e- Combinaison des polaires de choc illustrant la superposition d’une interaction régulière et d’une interaction de Mach formée d’une réflexion de Mach directes (DiMR) et d’une réflexion de Mach inverse (InMR) (situation limite correspondant au critère de Von Neumann).
- f- Combinaison des polaires de choc correspondant à une interaction régulière (RR) et à une interaction de Mach (solution non phasique) formée d’une réflexion de Mach directe (DiMR) et d’une réflexion de Mach inverse (InMR).

Les points de transition numérique ont été portés sur la figure 8, en comparant avec celles expérimentale et les domaines d’existence des différents types de configuration de choc théorique pour un nombre de Mach $M_0 = 4.96$. Les triangles représentent les transitions MR vers RR, et les carrés correspondent aux transitions RR vers MR. Cette figure met en évidence non seulement le phénomène d’hystérésis prédit au cas des interférences symétrique, mais de plus elle montre une très bonne concordance entre les niveaux de transition théoriques, expérimentales et les valeurs numérique.

On considère sur la figure, une interaction de Mach obtenue pour un angle θ_2 donné et un angle θ_1 suffisamment important pour être situé au-delà de la ligne de détachement. Lorsque l’on diminue θ_1 pendant que l’on maintient θ_2 constant, on atteint d’abord la ligne de détachement. Dans la zone duale l’interaction de Mach doit se maintenir. Lorsque l’on arrive à la ligne de Von Neuman la transition vers l’interaction régulière doit s’effectuer puisque au-delà de cette ligne, il n’y a plus de solution théorique pour une interaction de Mach. Dans l’autre direction, lorsqu’on augmente θ_2 la ligne de Von Neuman est atteinte en premier. La configuration régulière doit se maintenir dans la zone duale et la transition vers la configuration de Mach doit s’opérer à la ligne de détachement, puisque au-delà de cette ligne, il n’y a plus de solution pour une interaction régulière.

Les différents domaines d’existence des diverses configurations d’interactions sont représentés, sur la figure 9, dans le plan (M_0, θ_1) pour un angle de déflexion $\theta_2 = 25^\circ$.

Sur cette figure, la ligne θ_1^T représente le critère de Von Neumann étendu au cas dissymétrique. La ligne θ_1^N représente le critère de détachement étendu au cas dissymétrique. Le critère de Von Neumann, dans le cas symétrique, est représenté par la ligne pointillée θ_1^N . La ligne θ_1^D indique la valeur limite supérieure au-delà de laquelle une onde de choc attachée ne peut plus être obtenue.

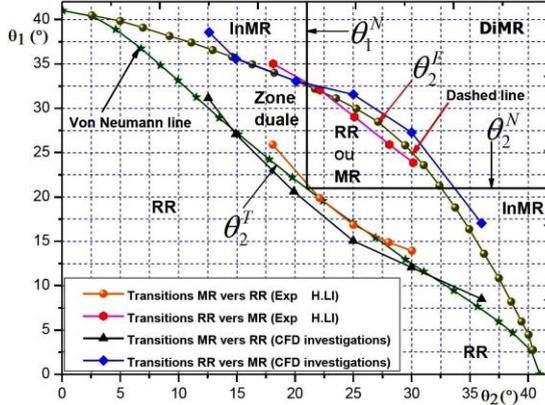


Fig. 8: Domaines d'existence des différents types de configuration de choc et les points de transition numérique pour un nombre de Mach, $M_0 = 4.96$

Ces quatre courbes délimitent cinq zones caractérisées par des topologies d'interactions différentes. Pour un nombre de Mach donné, et en faisant varier θ_1 , il est clairement possible d'obtenir différentes configurations de réflexions. Pour $0 < \theta_1 < \theta_1^T$, on obtient une réflexion régulière (RR), pour $\theta_1^T < \theta_1 < \theta_1^N$, on obtient soit une réflexion régulière (RR), soit une réflexion de Mach inverse (InMR), pour $\theta_1^N < \theta_1 < \theta_1^E$, on a une réflexion régulière (RR) ou une réflexion de Mach directe (DiMR), et enfin pour $\theta_1^E < \theta_1 < \theta_1^D$, on a soit une réflexion de Mach inverse (InMR), soit une réflexion de Mach directe (DiMR).

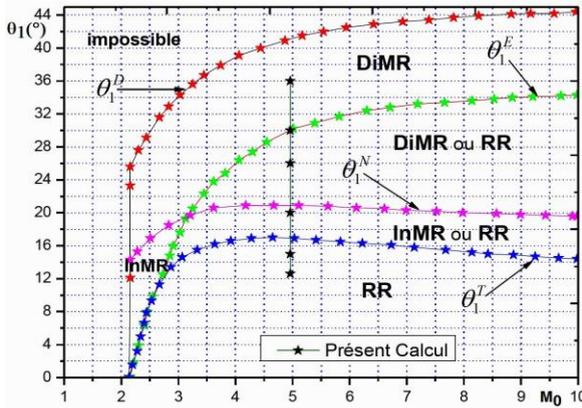


Fig. 9: Domaines des différentes réflexions théoriquement possibles dans le plan (M_0, θ_1) , pour un angle $\theta_2 = 25^\circ$ fixé

5. CONCLUSION

Une étude numérique concernant l'interaction de deux chocs obliques asymétrique a été mise en œuvre. Bien que l'étude fût en 2 D. elle a permis de confirmer l'identification des critères de transitions (entre la configuration de choc RR et MR), avec celle trouvée analytiquement. Une zone duale où les deux configurations de choc RR/MR peuvent se reproduire a été mise en évidence. L'étude suggère l'existence d'une réflexion de Mach inverse. L'hypothèse de l'existence d'un phénomène d'hystérésis due à l'effet de mémoire de l'écoulement, causé par l'interférence entre les ondes de choc analogue à celui existant en interaction de choc symétrique a été formulée et vérifiée numériquement. Une réflexion de Mach inverse a été obtenue numériquement pour la première fois en écoulement supersonique stationnaire.

NOMENCLATURE

RR, Interaction régulière	$i_1 - i_2$, Choc incident
MR, Interaction de Mach	$r_1 - r_2$, Choc réfléchi
DiMR, Interaction de Mach directe	θ , Angle de déflexion de l'écoulement
InMR, Interaction de Mach inverse	δ , Angle de l'onde de choc
StMR, Interaction de Mach stationnaire	$T_1 - T_2$, Points triples
$s_1 - s_2$, Lignes de glissement	M_0 , Nombre de Mach amont
γ , Rapport des chaleurs spécifiques c	ζ , Rapport des pressions
CFL, Pas de temps	
θ_1^T, θ_2^T , Critère de Von Neumann (cas dissymétrique)	θ_1^N, θ_2^N , Critère de détachement (cas dissymétrique)
θ_1^E, θ_2^E , Critère de détachement (cas symétrique)	θ_1^D , Valeur limite d'onde de choc attachée

REFERENCES

- [1] H. Li, A. Chpoun and G. Ben-dor, 'Analytical and Experimental Investigations of the Reflection of Asymmetric Shock Waves in Steady Flows', Journal fluid Mechanics, pp. 25 – 43, 1999.
- [2] J. Von Neumann, 'Refraction, Intersection and Reflection of Shock Waves', Navord Report 203-45, Navy Dept, Bureau of Ordinance, and Washington DC, USA.
- [3] H.G. Hornung, H.Jr. Oertel and R.J. Sandemen, 'Transition to Mach Reflection of Shock Waves in Steady and Pseudo-Steady Flow With and Without Relaxation', Journal of fluid Mechanics, 90-541, 1979.
- [4] M.S.I. Ivanov, G. Ben-dor, E. Elperin, A.N. Kudryavtes, D.V. Khotyanovsky. 'The Reflection of Asymmetric Shock Waves in Steady Flows: A Numerical Investigation', Journal of fluid Mechanics, pp. 71 – 87, 2002.
- [5] A. Chpoun, D. Passerel, H. Li and G. Ben-Dor, 'Reconsideration of the State-of-the-Art of Oblique Shock Wave Reflections in Steady Flows. Part 1: Experimental Investigation', Journal of fluid Mechanics, pp. 19 - 35, 1995.
- [6] Z. Han and X. Yin, 'Shock Dynamics', Kluwer Academic Publishers, 1993.

- [7] B. Chanetz et M.C. Cote, '*Etudes des Interférences de Choc en Ecoulement Hypersonique*', ONERA, Rapport Technique de Synthèse, N°32/4362 AY, Février 1993.
- [8] A. Durand, B. Chanetz, R. Benay and A. Chpoun. '*Investigation of Shock Waves Interference and Associated Hysteresis Effect at Variable-Mach-Number Upstream Flow*', Shock Waves, Vol. 12, pp. 469 – 477, 2003.