

Sujet de thèse

1. Titre ou intitulé de la thèse

Analyse physique de la dynamique basse fréquence d'une rampe de compression supersonique transitionnelle.

2. Objet de la thèse

L'objet de la thèse est la caractérisation précise des mécanismes physiques à l'origine de l'instationnarité basse fréquence des rampes de compression supersoniques fortement décollées dans les cas transitionnels et turbulent. On s'intéressera ensuite au contrôle de ces instationnarités.

3. Descriptif de la thèse

o Problématique

Les situations dans lesquelles une onde de choc interagit avec une couche limite (IOCCCL : Interaction Onde de choc Couche Limite) sont nombreuses dans l'industrie aéronautique et spatiale. Ces interactions peuvent exister sur des surfaces externes (profils transsoniques, jonctions de surfaces, etc.) ou dans l'aérodynamique interne (prises d'air supersoniques, cascade d'aubes de turbines, tuyères, etc.) Dans certaines circonstances (nombre de Mach élevé, angle d'onde de choc important...), ces interactions peuvent créer une bulle de recirculation instable (séparation compressible). La séparation entraîne une augmentation des forces de traînée, des flux de chaleur et des fluctuations de pression à la paroi. En outre, de nombreuses études antérieures ont montré que la bulle de recirculation et l'onde de choc réfléchie sont soumises à un mouvement à basse fréquence dans le sens du courant, appelé "instabilité SWBLI". Ce phénomène soumet les structures à des charges oscillantes qui peuvent endommager l'intégrité de la structure solide [1,2,3] ou affecter fortement les performances des dispositifs techniques (par exemple, les turboréacteurs, etc.). Un problème industriel important est la conception de stratégies pour contrôler ce phénomène.

Dans ce sujet, on s'intéresse à la compréhension précise des mécanismes physiques à l'origine de l'instationnarité basse fréquence des interactions onde de choc couche limite ainsi qu'au contrôle de cette dernière.

o Etat de l'art

L'étude de la dynamique des IOCCCL est une thématique de recherche depuis plusieurs décennies. L'objectif du contrôle de ce phénomène a en effet motivé une activité de recherche soutenue de la part de la communauté afin d'identifier les mécanismes physiques sous-jacents pour pouvoir les contrôler. Ces études ont été menées à la fois de manière expérimentale et numérique. La communauté est parvenue à un consensus général sur le fait que l'instabilité de l'IOCCCL est due à deux mécanismes principaux. Pour les interactions faibles (couche limite faiblement séparée), l'instabilité est principalement liée à l'advection, à travers la zone d'interaction, de structures de grandes échelles issues de la couche limite amont (mécanisme amont). Pour les écoulements fortement séparés, on pense que l'expansion et la contraction périodiques résultant de la "respiration" basse fréquence de la bulle de séparation jouent un rôle majeur (mécanisme aval) [4]. **Dans ce dernier cas, le mécanisme physique exact à l'origine de la respiration de la bulle de séparation fait encore l'objet d'un débat et est l'objet principal du sujet de thèse.**

o Originalité du sujet

Le sujet de thèse renouvelle une stratégie d'étude du problème basée sur une simplification de la configuration, physiquement consistante vis à vis des phénomènes étudiés, dans laquelle une couche limite amont laminaire (éventuellement forcée, on parle alors d'interactions transitionnelles) est considérée afin de s'affranchir de la possible influence des grandes structures de la turbulence de la couche limite amont sur la dynamique de la zone d'interaction. Ce type de simplification du problème a été employé par le passé et a permis différentes avancées [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Il a été par ailleurs montré que la dynamique basse fréquence des interactions transitionnelles était analogue à celles des interactions pleinement turbulentes, dans des conditions d'écoulements équivalentes par ailleurs. Ce type d'approche est actuellement relativement délaissé par la communauté qui s'intéresse de plus en plus à des interactions plus complexes et à des effets représentatifs des écoulements associés aux applications industrielles (écoulements confinés, interactions non homogènes dans la direction transverse, écoulement hypersoniques, etc). Ce type d'approche s'avère cependant plein de potentiel. Sa pertinence actuelle est motivée par deux éléments. En premier lieu, les récentes avancées concernant les méthodes numériques pour les études de stabilité des écoulements compressibles permettent d'envisager de mener des études stabilité linéaire globale inédites pour ces interactions. Par ailleurs, de récents travaux ont montré la possible implication cruciale de la dynamique non linéaire de la couche de mélange entourant la bulle de recirculation (en particulier des interaction triadiques) dans les mécanismes physiques à l'origine de l'instationnarité basse fréquence des IOCCL. Or, de nouvelles méthodes de décomposition modale (en particulier l'algorithme Bispectral Mode Decomposition : BSMD [12]) ont été récemment développées afin d'étudier ces couplages quadratiques. L'emploi de ces nouvelles méthodologies à l'étude des IOCCL transitionnelles permettra d'étudier différents aspects de ces écoulements peu ou pas étudiés jusqu'à présent afin de compléter notre connaissance des mécanismes physiques sous tendant l'instationnarité basse fréquence. L'originalité du sujet de thèse réside également dans l'association dans le même sujet d'une étude fondamentale sur des configurations transitionnelles, d'une comparaison avec des configurations turbulentes équivalente ainsi que de l'exploration de stratégies de contrôle de l'écoulement. Le sujet fait donc à la fois cohabiter des problématiques et méthodologies plutôt fondamentales avec d'autres plus appliquées, les premières servant de base aux secondes.

o Objectifs généraux et les perspectives au-delà de la thèse proprement dite

La thèse vise à l'étude numérique de la dynamique basse fréquence des IOCCL. L'objectif fondamental de la thèse est d'aboutir à une description détaillée des mécanismes physiques à l'origine de l'instationnarité basse fréquence de l'IOCCL. Pour cela des aspects très peu étudiés des IOCCLs et concernant lesquels beaucoup reste à faire (stabilité globale, dynamique non linéaire) seront étudiés avec des outils originaux (stabilité globale, résonant, BSMD). Ces mécanismes seront d'abord étudiés à travers la configuration simplifiée d'IOCCL transitionnelle. Des configurations pleinement turbulentes analogues seront ensuite simulées et analysées afin d'évaluer le devenir des mécanismes mis en évidence pour les configurations transitionnelles. Sur la base des connaissances produites par ces analyses, des stratégies de contrôles seront développées et testées numériquement.

Les perspectives de ces travaux sont multiples. Les stratégies physiques qui seront testées numériquement pourront l'être expérimentalement à l'issue de ces travaux. À plus long terme, on pourrait envisager leur déploiement pour le contrôle des écoulements réels dans les systèmes industriels. Par ailleurs, au-delà des résultats scientifiques qui seront obtenus concernant les problèmes spécifiques étudiés, la réalisation de cette thèse permettra la mise en place et la maturation d'outils de simulation et d'analyse qui pourront être massivement

utilisés dans les années à venir pour étudier des cas d'interaction plus complexes et/ou directement liés à des applications technologiques, notamment dans le domaine de la défense.

o Avancées escomptées

Ce travail de thèse doit donc permettre d'améliorer notre compréhension physique de la dynamique basse fréquence des IOCCL en régime transitionnel et turbulent. On vise en particulier la détermination précise des mécanismes physiques impliqués. Par ailleurs, des avancées concernant le contrôle des IOCCL sont également attendues dans la mesure où différentes stratégies de contrôle seront développées et testées, sur la base des connaissances physiques développées. Enfin cette thèse permettra la mise en place d'un cadre méthodologique applicable à l'étude de la dynamique d'une large variété d'écoulements supersonique en présence d'onde de choc (analyse de stabilité globale, analyse modale de la dynamique non linéaire).

o Retombées potentielles civiles et de défense ?

A tous ces égards, l'ensemble des résultats qui seront obtenus dans le cadre de cette thèse (tant sur le plan de la compréhension physique que sur celui du contrôle) seront d'un intérêt direct pour l'ensemble des applications mettant en jeu des IOCCL dans les domaines aéronautique et spatiales à la fois civils et militaires. Le cadre méthodologique employé pourra également être employé et enrichi pour l'étude de problèmes d'IOCCL plus complexes présents dans les applications industrielles civiles et militaires. On pense en particulier aux IOCCL en flèche, en écoulement hypersoniques réactifs, dans des tuyères, autour de corps axisymétriques, cônes pointus ou arrondis, etc.

o Lien de la thèse avec les thématiques prioritaires de l'appel à projets.

Le sujet proposé s'inscrit pleinement dans le sous-thème n°1 « écoulements fluides » de l'axe thématique fluides-structures à deux titres : « performances aérodynamiques et hydrodynamiques : écoulements à forte dynamique, écoulements à surface libre, écoulements multi-fluides ou multiphasiques » et « contrôle des écoulements : approches théoriques et de simulation du contrôle, développement de technologies d'actionneurs ». Il s'agit d'ailleurs d'un item prioritaire de l'aspect « maîtrise des écoulements complexes ».

Références :

[1] D.-V. Gaitonde. "Progress in shock wave/boundary layer interactions". In: *Progress in Aerospace Sciences* 72 (2015) p. 80-99

[2] J. Détery and J.-P. Dussauge. "Some physical aspects of shock wave/boundary layer interactions". In: *Shock waves* 19 (2009) p. 453-468

[3] I. Ben Hassan Saïdi. "Numerical simulations of shock wave boundary layer interactions". PhD. Thesis (2019).

[4] L. Souverein, P. Dupont, J.-F. Debiève, J.-P. Dussauge, B. van Oudheusden and F. Scarano. "Effect of interaction strength on the unsteady behavior of shock wave boundary layer interactions". In: *39th AIAA Fluid Dynamics Conference*. (2009). San Antonio. Texas.

[5] A. Sansica, N. D. Sandham and Z. Hu. "Forced response of a laminar shock-induced separation bubble". In: *Physics of fluids*. 26 (2014)

- [6] I. Ben Hassan Saïdi, G. Fournier and C. Tenaud. “Contribution of the breathing modes in the SWTBLI unsteadiness”. In: *55th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics*. (2021). Poitiers. France.
- [7] A. Sansica. “Stability and unsteadiness of transitional shock-wave/boundary-layer interactions in supersonic flows”. PhD. Thesis. (2015).
- [8] M. Mauriello, L. Larchevêque and P. Dupont. “Non-linearities in the low-frequency dynamics of transitional shock wave / boundary layer interactions”. In: *56th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics*. (2022). Toulouse. France.
- [9] Bugeat, Benjamin, J-Ch Robinet, J-C. Chassaing, and Pierre Sagaut. "Low-frequency resolvent analysis of the laminar oblique shock wave/boundary layer interaction." *Journal of Fluid Mechanics* 942 (2022): A43.
- [10] Ben Hassan Saïdi, Ismaïl “Numerical simulations of shock wave boundary layer interactions”. PhD. Thesis (2019).
- [11] Robinet, J.-C. “Bifurcation in shock-wave/laminar-boundary-layer interaction: global instability approach”. In: *Journal of Fluid Mechanics*. 579 (2007) p. 85-112
- [12] Schmidt Oliver T. “Bispectral mode decomposition of nonlinear flows”. In: *Nonlinear Dynamics* 102 (2020), pp. 2479–2501. doi: 10.1007/s11071-020-06037-z.

4. Programme de la thèse

- o Questions scientifiques traitées ;

La thèse traite de deux questions scientifiques liées entre elles. La première question est la détermination précise des mécanismes physiques à l’origine de l’instationnarité basse fréquence des IOCCCL fortes, mettant en jeu de large bulles de recirculation. La seconde est le contrôle de cette instationnarité par le contrôle des mécanismes mis en évidence par les réponses apportées à la première question.

- o Approches scientifiques proposées : point de départ des travaux, démarches envisagées, moyens mis en œuvre ou expérimentations prévues ;

L’état de l’art nous permet d’envisager deux mécanismes hypothétiques possibles à l’origine de l’instationnarité des SWBLI :

- 1/ Le premier mécanisme repose sur l’existence d’un mode global marginalement linéairement stable (ou légèrement instable) de la bulle de recirculation autour de l’écoulement moyen à la fréquence de respiration basse fréquence de la bulle de recirculation. S’il existe, ce mode peut être déstabilisé s’il est excité par des perturbations suffisamment énergétiques. Ces perturbations pourraient être les structures non linéaires apparaissant dans la région de recollement de la couche limite pour des interactions suffisamment fortes.
- 2/ Le second mécanisme repose sur l’existence d’une boucle fermée dans la bulle de recirculation entre la dynamique de la couche de cisaillement et un mécanisme de rétroaction, mis en évidence dans des études antérieures, qui transporte une partie de l’activité dynamique de la zone de recollement jusqu’à la zone décollement. Ce

mécanisme pourrait s'auto-entretenir à condition que le bilan énergétique le long de la boucle soit positif.

Il est possible que les deux descriptions précédentes soient deux façons différentes de décrire le même mécanisme, la première reposant sur le formalisme mathématique de l'analyse de stabilité linéaire globale ; la seconde reposant sur des arguments purement physiques.

Le premier objectif de la thèse est d'étudier la validité des mécanismes proposés.

L'étude de ces mécanismes suppose la possibilité de mener des analyses de stabilité globale des IOCCL. Néanmoins, ce type d'études pour les écoulements compressibles, notamment en présence d'ondes de choc est toujours une tâche difficile en raison de la complexité du système d'équations de Navier-Stokes compressibles. En effet, l'approche "différencier puis discrétiser", qui consiste à écrire d'abord les équations linéarisées analytiquement, et qui représente le cheval de bataille de l'approche actuelle, est difficile à mettre en œuvre car elle implique des problèmes de consistance et de conditions aux limites. Récemment, de nouvelles approches d'analyse de stabilité globale ont été développées sur la base de la différenciation automatique de solveurs Navier-Stokes compressibles explicites d'ordre élevé. Ces approches "discrétiser puis différencier" permettent de contourner les inconvénients de l'approche "différencier puis discrétiser" et sont mieux adaptées à la stabilité globale des écoulements supersoniques. Cette approche a été développée au laboratoire DynFluid dans le solveur open-source dNami et pourra être employée (Thèse - A. Franchini, 2024). Par ailleurs, un autre point crucial est la possibilité d'étudier la dynamique non linéaire des écoulements. Pour ce faire de nouveaux outils tels que la BSMD, déjà évoquée, pourront être mis à profit. Cet algorithme permet, en effet, de mettre en évidence les couplages quadratiques entre les modes à des fréquences différentes et l'emplacement de ces couplages non linéaires dans l'écoulement.

Pour étudier la validité des mécanismes proposés, nous simulerons tout d'abord par LES des cas d'IOCCL transitionnelles (avec forçage de la couche limite amont) de type rampe de compression. Les résultats seront analysés à l'aide des nouvelles méthodes d'analyse de pointe évoquées ci-dessus. La configuration de l'écoulement sera similaire à l'expérience de l'IUSTI avec un nombre de Mach de l'écoulement libre $M=1,68$, de sorte que la comparaison avec les expériences sera possible. L'analyse des résultats visera tout d'abord l'exploration de la validité du premier mécanisme possible conduisant à l'instationnarité de l'IOCCL évoquée ci-dessus. À cette fin, nous effectuerons des analyses de stabilité globale autour de l'écoulement moyen afin de vérifier l'existence d'un mode global marginalement linéairement stable (ou légèrement instable) de la bulle de recirculation à la fréquence de respiration. Ensuite, nous explorerons la validité du second mécanisme en effectuant des analyses dynamiques des IOCCL simulées. Nous nous concentrerons plus précisément sur la dynamique de la couche de cisaillement afin de caractériser la nature, la forme, les fréquences et les nombres d'ondes des modes développés par la couche de cisaillement. Cette analyse sera réalisée à l'aide d'analyses de stabilité locale, d'outils de post-traitement classiques, tels que les analyses de Fourier et les décompositions modales (SPOD). En outre, les interactions triadiques non linéaires seront étudiées à l'aide de la BSMD. Le mécanisme de rétroaction dans la bulle de recirculation sera également étudié. L'objectif sera de déterminer sa nature physique. Enfin, nous étudierons le bilan énergétique le long de la boucle de rétroaction pour vérifier si le mécanisme possible peut être auto-entretenu.

Nous augmenterons ensuite le nombre de Reynolds et simulerons les mêmes interactions dans une configuration totalement turbulente. Les analyses de ces simulations seront réalisées avec

des outils similaires et viseront à évaluer le devenir des mécanismes mis en évidence pour les interactions transitoires.

Enfin, à la lumière des mécanismes mis en évidence par ces analyses, nous construirons des stratégies de contrôles de ces mécanismes visant au contrôle de l'instationnarité de l'IOCCL. Ces stratégies seront testées par des simulations LES de l'écoulement contrôlé.

o Programme prévu.

- **En première année**, il s'agira d'effectuer les simulations d'IOCCL transitionnelles dans la configuration rampe de compression considérée ici. Deux stratégies de forçage seront testées. La première consistera en un forçage modal, ce qui signifie que nous forcerons la couche limite en amont avec des combinaisons de ses modes linéaires les plus instables [19]. La seconde consistera en un forçage « free-stream » [9]. Les deux méthodes ont été développées au laboratoire Dynfluid. On effectuera ensuite l'étude de la pertinence des deux mécanismes proposés sur ces cas d'interaction transitionnelle. Les outils d'analyse décrit plus haut seront ici employés.

- **En deuxième année**, une fois l'analyse de l'IOCCL transitionnelle terminée, on effectuera une simulation des mêmes configurations d'IOCCL sur rampe de compression en considérant cette fois une couche limite incidente pleinement turbulente. On emploiera pour ce faire des conditions d'entrée turbulente appropriées à l'entrée du domaine de calcul. On reproduira alors les analyses effectuées dans le cas transitionnel pour évaluer le devenir des mécanismes mis en évidence pour les IOCCL transitionnelles.

- **La troisième année** sera consacrée à la construction de la stratégie de contrôle des mécanismes physiques mis en évidence. On s'intéressera ici au contrôle du cas transitionnel ainsi qu'au contrôle du cas pleinement turbulent. On testera ces stratégies en effectuant des simulations des IOCCL contrôlées.

5. Profil du candidat

Le candidat recherché est titulaire d'un master recherche avec une spécialisation en mécanique des fluides ou mathématiques appliquées. Le candidat doit être intéressé par l'analyse et la compréhension physiques de la dynamique des écoulements. Une appétence pour l'aérodynamique supersonique est également nécessaire. Une bonne expérience et un goût pour les outils d'analyse et de simulation numérique sont également indispensables.

6. Contact

- Jean-Christophe ROBINET: jean-christophe.robinet@ensam.eu

- Ismaïl BEN HASSAN SAÏDI: Ismail.benhassansaidi@ensam.eu

7. Références

- A) Robinet, J.-C. "Bifurcation in shock-wave/laminar-boundary-layer interaction: global instability approach". In: *Journal of Fluid Mechanics*. 579 (2007) p. 85-112
- B) Guiho, F., Alizard, F., & Robinet, J. C. (2016). Instabilities in oblique shock wave/laminar boundary-layer interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, 789, 1-35.

- C) Ben Hassan Saïdi, Ismaïl “Numerical simulations of shock wave boundary layer interactions”.PhD. Thesis (2019).
- D) Bugeat, Benjamin, J-Ch Robinet, J-C. Chassaing, and Pierre Sagaut. "Low-frequency resolvent analysis of the laminar oblique shock wave/boundary layer interaction." *Journal of Fluid Mechanics* 942 (2022): A43.
- E) Schmidt, O. T. (2020). Bispectral mode decomposition of nonlinear flows. *Nonlinear dynamics*, 102(4), 2479-2501.