



RAPPORT D'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

LABORATOIRE DYNFLUID

ANNÉE 2020

Table des matières

Effectifs pour l'année 2020	3
I Multi-Espèces & Thermodynamiques complexes (MET)	5
Cavitation dans un Venturi	7
Effets de hors-équilibre chimique dans une couche limite turbulente	8
Simulations LBM Multi-Espèces	9
Ecoulements de gaz denses autour d'aubes de turbine	10
Couches limites transitionnelles et turbulentes de gaz dense	11
Outils de génération de code pour les EDPs	12
II Compressibles, Turbulence & Acoustique (CTA)	13
Simulations HRL d'une tuyère sur-détendue	15
Dynamique auto-entretenu dans des turbomachines	16
Scalabilité d'outil numérique pour la SGE d'écoulement de jet supersonique	17
Simulations de jet supersonique en utilisant une approche d'ordre élevé non structurée	18
Bruit rayonné par un puff turbulent dans un canal carré	20
Etude de la pression pariétale sous une couche limite turbulente	21
Etude des spectres fréquence-nombre d'onde pour un canal plan	22
Interaction choc/perturbation en MHD	23
Étude numérique d'une machine thermoacoustique compacte	24
Streaming acoustique en résonateur	25
III Machine Learning & Quantification d'incertitude (MLQ)	27
Assimilation de données pour la calibration de modèles RANS I	29
Assimilation de données pour la calibration de modèles RANS II	30
Assimilation de données pour la calibration de modèles RANS III	31
Stratégie d'échantillonnage pour métamodèles parcimonieux	32
Modélisation réduite et identification de systèmes	33
Vers une unification des modèles linéaires basés sur la donnée	35

IV	Instabilités, Transition & Contrôle (ITC)	37
	Comparaison des schémas LBM et Vortex-Method	39
	Réceptivité linéaire d'un sillage tourbillonnaire	40
	Bifurcations autour d'une sphère en régime supersonique	41
	Meandering dynamics of streamwise vortex pairs in afterbody wakes	42
	Instabilités globales d'écoulements tridimensionnels	43
	Instabilités secondaires et écoulements périodiques	44
	Transition sous-critique dans un canal plan	45
	Transition to turbulence over superhydrophobic surfaces	47
V	Publications	49
	Publications - 2020	51

Effectifs permanents/non permanents pour l'année 2020— **Permanents :**

- ¹ Nicolas ALFEREZ – Maître de Conférences CNAM,
- ² Damien BIAU – Maître de Conférences ENSAM,
- ³ Paola CINNELLA – Professeur des Universités ENSAM (jusqu'au 01/11),
- ⁴ Virginie DARU – Maître de Conférences ENSAM,
- ⁵ Xavier GLOERFELT – Professeur des Universités ENSAM,
- ⁶ Francesco GRASSO – Professeur émérite CNAM (A partir du 01/09),
- ⁷ Simon MARIE – Maître de Conférences CNAM,
- ⁸ Xavier MERLE – Maître de Conférences ENSAM,
- ⁹ Jean-Christophe LOISEAU – Maître de Conférences ENSAM,
- ¹⁰ Jean-Christophe ROBINET – Professeur des Universités ENSAM.
- ¹¹ Luca SCIACOVELLI – Maître de Conférences ENSAM,

— **Ingénieurs de Recherche :**

- ¹ Junior JUNQUEIRA – ENSAM,
- ² Dan HLEVCA – CNAM,

— **ATER/postdoctorats :**

- ¹ Ismaïl BEN HASSAN SAÏDI,
- ² Gabriele NASTRO, Jan. 2021 - dec. 2022, CleanSky/PERSEUS,

— **Doctorants :**

- ¹ Soufiane CHERROUD, Oct. 2020 - Sept. 2023, CD-ENSAM,
- ² Maximilien DE ZORDO-BANLIAT, Dec. 2018 - Nov. 2021, CIFRE/SAFRANTECH,
- ³ Valentin FER, Oct. 2019 - Sept. 2022, ONERA,
- ⁴ Ricardo FRANTZ, Nov. 2018 - Oct. 2021, CD-ENSAM,
- ⁵ Camille GOUIN, Nov. 2018 - Oct. 2021, ANR/ASCA,
- ⁶ Antoine JOUIN, Oct. 2019 - Sept. 2022, Politecnico di Bari,
- ⁷ Enza PARENTE, Oct. 2018 - Sept. 2021, Politecnico di Bari,
- ⁸ Donatella PASSIATORE, Oct. 2018 - Sept. 2021, Politecnico di Bari,
- ⁹ Leonardo RIGO, Oct. 2017 - Sept. 2020, CD-ENSAM,
- ¹⁰ Aldo SERAFINO, Oct. 2017 - Sept. 2020, CIFRE/ENERTIME,
- ¹¹ Cosimo TARSIA-MORISCO, Oct. 2017 - Sept. 2020, CNES/ARIANEGROUP.

— **Stagiaires :**

- ¹ Alessandro CASTRIOTTA (01 Mars - 31 Août)

Objectifs scientifiques du laboratoire DynFluid

Le laboratoire DynFluid (équipe d'accueil EA 92) est un laboratoire en cotutelle Arts et Métiers ParisTech / Conservatoire National des Arts et Métiers. Il mène des travaux de recherche en Mécanique des fluides, Aérodynamique et Acoustique, avec des applications dans les secteurs aéronautique, automobile et celui des procédés industriels. Il développe des méthodes numériques originales pour simuler des écoulements et des phénomènes aéroacoustiques, ou analyser leurs instabilités et il met en œuvre ces méthodes dans le cadre de programmes de recherche nationaux ou internationaux. Le laboratoire collabore également avec de nombreux partenaires industriels et académiques.

Les thèmes du laboratoire sont les suivants :

Thème 1 : Multi-Espèces & Thermodynamiques complexes (MET)

Animateur : Simon Marié (CNAM)

Thème 2 : Compressibles, Turbulence & Acoustique (CTA)

Animateur : Xavier Gloerfelt (ENSAM)

Thème 3 : Machine Learning & Quantification d'incertitude (MLQ)

Animateur : Xavier Merle (ENSAM)

Thème 4 : Instabilités, Transition & Contrôle (ITC)

Animateur : Damien Biau (ENSAM)

Inter-groupe : GTNum

Animateur : Carlos Junqueira Junior (ENSAM)

Séminaires Externes & Internes

Animateur : Damien Biau (ENSAM)

Première partie

Multi-Espèces & Thermodynamiques
complexes (MET)

Etude numérique de la cavitation partielle tridimensionnelle dans une géométrie Venturi

Jean-Christophe ROBINET, Carlos JUNQUEIRA Junior, Camille GOUIN (doctorant)
Collaborations : Eric GONCALVES (Institut P'/ENSMA)

La cavitation par poche apparaît dans de nombreuses applications hydrauliques et peut entraîner des problèmes techniques de tenue mécanique ou d'érosion. Quelques résultats fondamentaux tels que la description de la topologie complexe des poches de cavitation tridimensionnelles et leurs dynamiques associées ont été analysées.

Dans ce travail, la dynamique de la cavitation partielle se développant dans une géométrie de venturi 3-D est étudiée numériquement et plus particulièrement le rôle de parois latérales qui est comparé avec un cas sans paroi latérale (conditions aux limites périodiques). Les simulations sont effectuées à l'aide d'un solveur résolvant les équations U-RANS compressibles avec un modèle de turbulence non linéaire $k-l/QCR$. La cavitation est modélisée par une approche à un fluide où un modèle d'équation de transport pour le taux de vide est calculé. Une analyse détaillée de cet écoulement cavitant est réalisée à l'aide d'outils de traitement du signal et de décomposition modale tels que la Spectral Proper Orthogonal Decompositions (SPOD). Une attention particulière est portée sur l'étude des effets 3-D en comparant les résultats numériques obtenus pour ces deux conditions aux limites et une comparaison avec les données expérimentales disponibles.

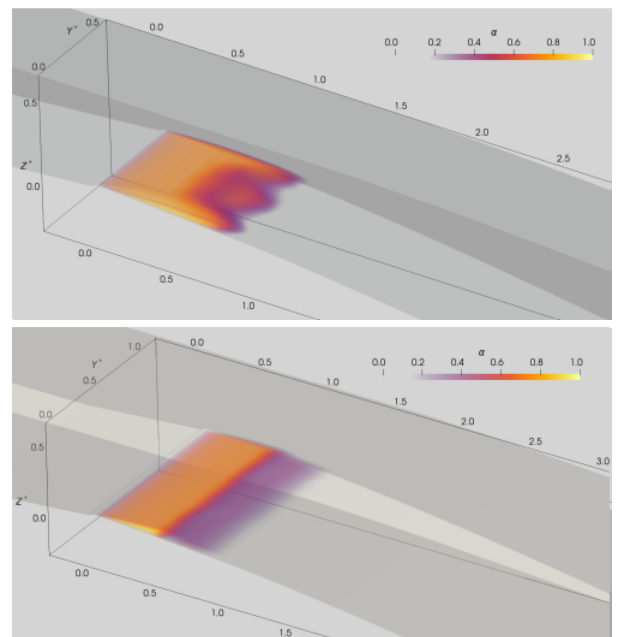


FIGURE 1 – Rendu volumique du taux de vide moyen : (a) avec parois latérales ; (b) avec conditions aux limites périodiques latérales

Publications et communications :

- ¹ C. Gouin, C. Junqueira-Junior, E. Goncalves, J.-C. Robinet. Numerical investigation of three-dimensional partial cavitation in a Venturi geometry, *International Journal of Multiphase Flow*, submitted, 2021.

Effets de hors-équilibre chimique dans une couche limite turbulente

Luca SCIACOVELLI, Paola CINNELLA, Donatella PASSIATORE (doctorante)

Collaborations : Giuseppe Pascazio (Politecnico di Bari, Italie)

L'influence des effets de haute enthalpie sur les couches limites turbulentes hypersoniques est étudiée à l'aide de simulations numériques directes (DNS). Nous considérons un écoulement d'air (modélisé comme un mélange à cinq espèces réagissant chimiquement) à Mach 10 sur une plaque plane quasi-adiabatique. Une deuxième DNS basée sur une hypothèse de chimie "gelée" (frozen) est également réalisée afin d'isoler l'effet des réactions chimiques et d'évaluer leur influence sur la dynamique de la turbulence pariétale. Afin de réduire les incertitudes liées à la génération de turbulence à l'entrée du domaine de calcul, les deux simulations sont initiées dans la région laminaire et l'écoulement est laissé évoluer jusqu'au régime entièrement turbulent. La transition d'un régime laminaire vers le turbulent est déclenchée grâce à un forçage modal réalisé par aspiration/soufflage localisés. Les températures élevées atteintes en proche paroi, y compris dans la sous-couche visqueuse et la zone tampon, activent des mécanismes de dissociation importants, à la fois de l'oxygène et de l'azote. Ceci modifie à son tour les propriétés thermodynamiques et de transport du mélange réactif, altérant les statistiques du premier ordre des grandeurs thermodynamiques. En raison de la nature endothermique des réactions chimiques, les fluctuations de température et de densité dans la couche limite réactive sont plus faibles que dans l'écoulement avec chimie gelée. Cependant, les statistiques du premier et du second ordre du champ de vitesse sont peu affectées par la chimie, si l'on considère un scaling prenant en compte la variation des variables thermodynamiques dans l'écoulement. Nous avons également observé que la Strong Reynolds Analogy (SRA) reste bien respectée, malgré les conditions hypersoniques sévères, et que les distributions calculées des coefficients de frottement pariétal correspondent bien aux résultats de la décomposition Renard-Deck étendue aux écoulements compressibles.

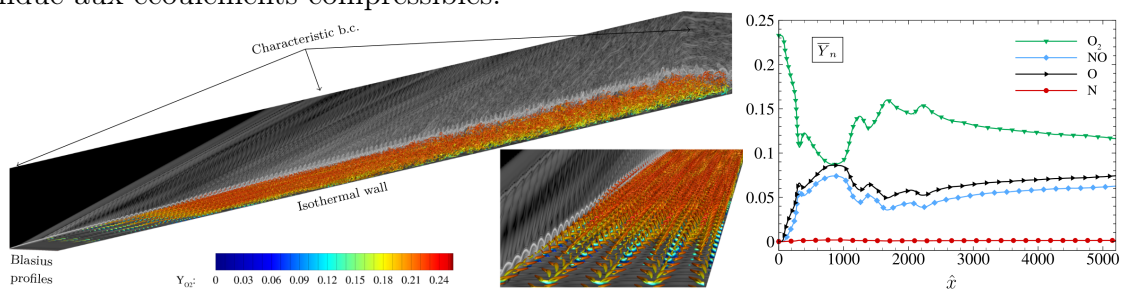


FIGURE 2 – Gauche : iso-surface du critère Q coloré avec la valeur locale de Y_{O_2} . Droite : évolution des fractions massiques moyennées $\langle Y_n \rangle$ pour O_2 , NO , O et N le long de la paroi.

Publications et communications :

- ¹ D. Passiatore, L. Sciacovelli, P. Cinnella, G. Pascazio. Finite-rate chemistry effects in turbulent hypersonic boundary layers : a direct numerical simulation study, *submitted to Physical Review Fluids*
- ² D. Passiatore, L. Sciacovelli, P. Cinnella, G. Pascazio. Direct numerical simulations of hypersonic boundary layer in chemical non-equilibrium. *AERO 2020 - 55th 3AF International Conference*, April 2021, Poitiers (France).

Simulation multi-espèce de l'instabilité de Saffman-Taylor

Simon MARIÉ, Lucien VIENNE (doctorant)

L'instabilité de Saffman-Taylor se produit dans un milieu poreux lorsqu'un fluide moins visqueux s'écoule vers un fluide plus visqueux. Lorsque les deux fluides ne se mélangent pas (non miscibles) l'instabilité est essentiellement pilotée par ses caractéristiques convectives. En revanche si les fluides en présence sont miscibles, une nouvelle échelle caractéristique intervient liée à la diffusion d'un fluide dans l'autre. Cette nouvelle échelle peut s'avérer plus complexe en présence de mélange pré-établi à plusieurs espèces. La simulation de ce type d'instabilité en LBM requiert une modélisation fiable d'un milieu poreux ainsi que la prise en compte de la diffusion complexe de type Maxwell-Stefan. Les simulations ont permis de mettre en évidence un pré-régime diffusif avant l'apparition des franges instables (digitation).

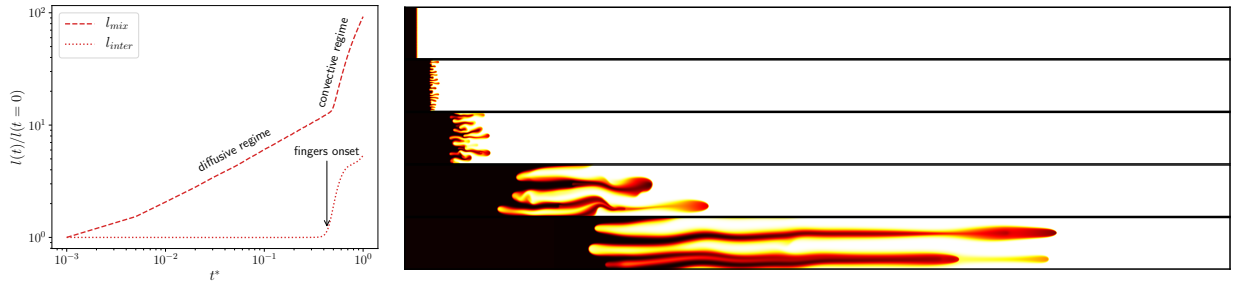


FIGURE 3 – (Gauche) Evolution des longueurs interfacial (l_{inter}) et de mélange (l_{mix}) de l'instabilité. (Droite) Evolution de l'interface à $t^* = 0.15, 0.46, 1.07, 3.05, 6.10$.

Les taux de croissances observés montrent également une dépendance au nombre de Peclet permettant de confirmer une valeur limite en dessous de laquelle l'instabilité n'est pas observés. Des simulations ont également été réalisées en présence d'une espèce "catalytique" permettant la déstabilisation d'un cas défavorable par le mécanisme de rétro-diffusion. Pour ce dernier cas, il a été possible d'identifier 3 mécanismes distincts : i) La rétro-diffusion permettant le transfert de fluide moins visqueux dans le premier mélange, ii) l'apparition du régime diffusif lié à la nouvelle viscosité du premier mélange iii) le régime convectif contenant la forte croissance des franges instables.

Publications et communications :

- ¹ L. Vienne , S. Marié : "A Lattice Boltzmann study of miscible viscous fingering for binary and ternary mixtures" Physical Review F, 2021.

Écoulements de gaz denses autour d'aubes de turbine

Jean-Christophe HOARAU (doctorant), Paola CINNELLA & Xavier GLOERFELT

Pour tenter de progresser vers des simulations haute fidélité des effets de gaz dense sur la turbulence dans des configurations réalistes, des simulations des grandes échelles (LES) d'écoulements de PP11 dans une grille d'aubes de turbine transsonique ont été réalisées dans le cadre de la thèse de Jean-Christophe Hoarau (soutenue le 28 novembre 2019). Ces calculs ont été publiés dans *MDPI Energies*.

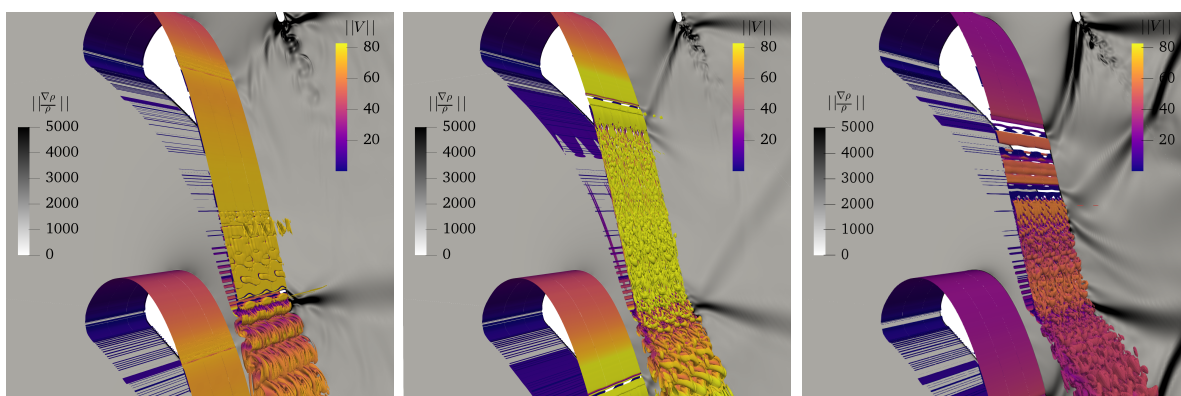


FIGURE 4 – Iso-surface instantanée du critère Q coloriée par l'amplitude de la vitesse (m/s) et vue en fond du gradient des fluctuations de masse volumique pour les cas sous-critique/bas rapport de pression IC1-LPR (left), sous-critique/haut rapport de pression IC1-HPR (middle) et sur-critique/bas rapport de pression IC2-LPR (right).

La géométrie correspond à la configuration VKI LS-89, largement étudiée dans la littérature pour des écoulements d'air. Différentes conditions d'entrée ont été simulées pour le gaz dense PP11 de la famille des perfluorocarbones, qui présente une large zone d'inversion (région de l'espace de Clapeyron pour laquelle la dérivée fondamentale de la dynamique des gaz est négative et qui correspond à un comportement inversé des ondes de chocs avec des ondes de détente et des faisceaux de compression). Deux rapports de pression entre l'entrée et la sortie de la grille ont été testées et deux points de fonctionnement thermodynamiques (conditions sous- et sur-critiques). Les conditions sous-critiques entraînent de légers effets non-idéaux de gaz non parfaits. Au contraire, des écarts importants par rapport au comportement du gaz parfait sont observés pour les conditions de fonctionnement sur-critiques, y compris des effets non classiques (dits BZT), notamment l'apparition d'onde de détente et de faisceaux de compression au niveau du bord de fuite qui interagissent avec les couches limites des aubes adjacentes. La LES permet de capturer la transition de couche limite, qui joue un rôle crucial rôle sur les performances de la turbine.

Publications :

- ¹ J.-C. Hoarau, P. Cinnella & X. Gloerfelt, Large eddy simulations of strongly non-ideal compressible flows through a transonic cascade, *Energies*, 14, p.772, 2021.
- ² J.-C. Hoarau, P. Cinnella & X. Gloerfelt, Large Eddy Simulations of a turbine cascade with strong non-ideal gas effects, *NICFD2020*, 29-30 October, 2020.

Couches limites transitionnelles et turbulentes de gaz dense

Xavier GLOERFELT, Paola CINNELLA, Luca SCIACOVELLI & Francesco GRASSO

Cette thématique vise à étudier la dynamique de couches limites turbulentes hypersoniques (Mach 6) en comparant un gaz parfait (air) et un gaz dense (PP11) représentatif des gaz utilisés dans les cycles de Rankine organiques. En effet, l'écoulement de couche limite en gaz dense n'a jamais été étudié et, en l'absence d'expériences capables de nous renseigner sur sa dynamique, nous avons réalisé pour la première fois une base de données haute-fidélité par simulation numérique directe. Les effets originaux de gaz dense sont notables pour les régimes hautement compressibles. C'est pourquoi une vitesse hypersonique a été choisie pour notre étude. Nous avons observé plusieurs différences remarquables par rapport au comportement d'un gaz parfait : la thermodynamique complexe du PP11 et notamment sa grande capacité thermique altère profondément les mécanismes de transition et le développement de la couche limite. Ces modifications ont un impact notable sur la génération de la traînée et les transferts thermiques.

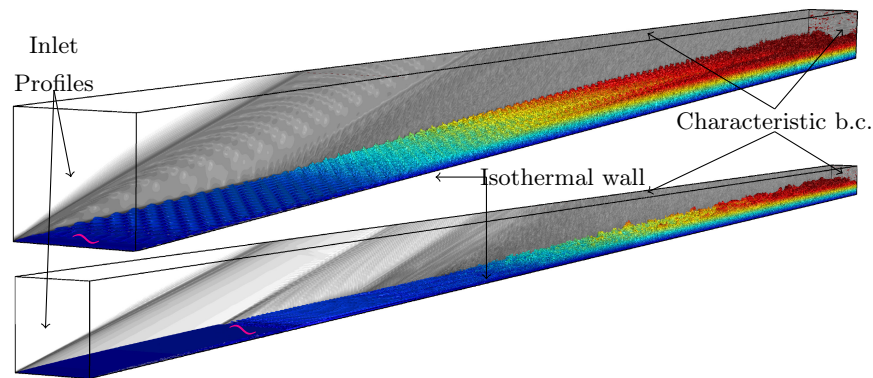


FIGURE 5 – Vues instantanées du critère Q colorié par l'altitude et du gradient de masse volumique en fond sur le domaine complet (gaz parfait en haut et gaz dense en bas).

Les derniers post-traitements concernent l'étude de la transition. La transition jusqu'à la turbulence en excitant un mode supersonique (le seul instable pour un gaz dense mais qui peut aussi apparaître pour des conditions particulières en gaz parfait) n'a jamais été étudiée auparavant. L'étude de la distorsion du champ moyen, de la croissance des modes, de vues instantanées des stries basse vitesse et du critère λ_2 ou du développement des spectres jusqu'au régime pleinement turbulent révèlent que la transition par un mode supersonique possède des caractéristiques proches de la transition par un second mode dans les couches limites hypersoniques, ce qui confirme sa nature de mode "acoustique".

Publications :

- ¹ L. Sciacovelli, X. Gloerfelt, D. Passiatore, P. Cinnella & F. Grasso, Numerical investigation of high-speed turbulent boundary layers of dense gases, *Flow, Turb. & Comb.*, 105, p.555-579, 2020.
- ² X. Gloerfelt, L. Sciacovelli, P. Cinnella & F. Grasso, Supersonic-mode transition in a dense-gas boundary layer at Mach 6, *NICFD2020*, 29-30 October, 2020.

Infrastructure logicielle HPC pour la résolution d'EDP hyperbolique de lois de conservation.

Nicolas Alferez

Collaboration : Emile Toubert (OIST, Japan)

Ce projet a pour objectif de développer une infrastructure logicielle (ou *framework*) permettant la résolution de systèmes d'Équations aux Dérivées Partielles (EDP) de lois de conservation sur des maillages structurés en utilisant des techniques de génération automatique de code dans un environnement de travail HPC. Le cadre d'applications envisagé concerne principalement les équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes ou MHD). Une généralisation à d'autres systèmes d'équations (par exemple Gross-Pitaevskii, Maxwell) peut cependant être envisagée "à moindre effort". La solution technique développée (nommée *dNami*) consiste en une infrastructure multilangage (Python/C/Fortran). La couche Python est utilisée pour générer automatiquement les noyaux C/Fortran optimisés, nécessaires à la résolution des équations données par l'utilisateur sous forme symbolique, et pour interagir avec les données pendant l'exécution du code. Les couches C et Fortran sont responsables de la gestion mémoire et des parties à intensité arithmétique élevées.

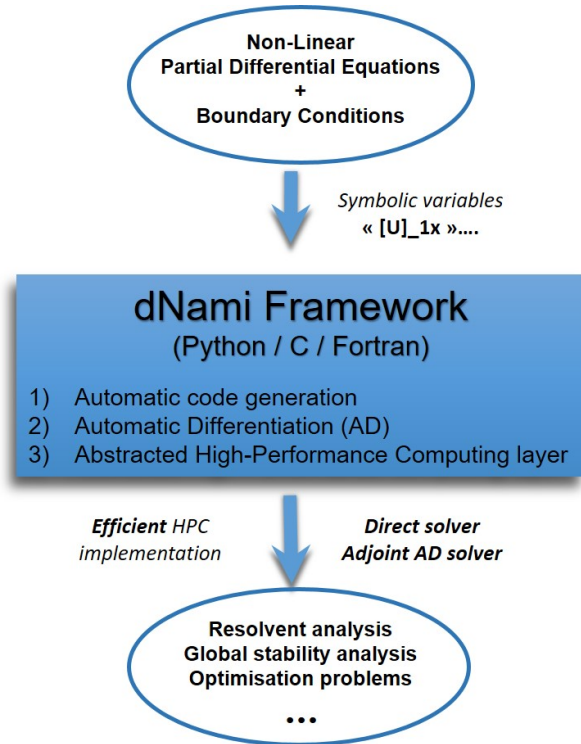


FIGURE 6 – dNami framework.

La solution technique développée (nommée *dNami*) consiste en une infrastructure multilangage (Python/C/Fortran). La couche Python est utilisée pour générer automatiquement les noyaux C/Fortran optimisés, nécessaires à la résolution des équations données par l'utilisateur sous forme symbolique, et pour interagir avec les données pendant l'exécution du code. Les couches C et Fortran sont responsables de la gestion mémoire et des parties à intensité arithmétique élevées.

dNami a été validé sur les équations de NS compressible 3D exprimées à l'aide d'une équation d'état arbitraire (sur cas test TGV). Le framework a permis de générer, à partir d'équations symboliques, un solveur aux différences finies d'ordres élevées affichant des performances intranoeud équivalentes voir supérieures à celles obtenues par le solveur OpenSBLI, une infrastructure logicielle moderne similaire construite à partir d'un DSL (*domain specific language*) développé par l'Université d'Oxford. Ce solveur NS a montré une scalabilité interneoeud supérieure à 95% jusqu'à 25600 coeurs AMD (sur une grille de 26 mds points). La faculté du framework à générer un solveur direct efficace a été démontrée. La prochaine étape de développement consistera à intégrer une étape de différentiation automatique du solveur direct pour permettre l'accès à des techniques modernes d'analyse linéaires (voir figure 6).

Deuxième partie

Compressibles, Turbulence &
Acoustique (CTA)

Simulations HRL d'une tuyère sur-détendue

Jean-Christophe ROBINET, Jean-Christophe LOISEAU, Cosimo TARSIA MORISCO (doctorant)

Collaborations : Julien HERPE (CNES), Didier SAUCEREAU (ArianeGroup)

Les interactions onde de choc/couche limite à l'intérieur de tuyères sur-détendues produisent des grandes régions détachées entraînant des forces non-axisymétriques appelées charges latérales.

Le mécanisme générateur (mettant en jeu le décollement, les couches de cisaillement et les disques de Mach) est auto-entretenu avec des échelles de temps et d'espace relativement bien séparées de celles de la turbulence. Dans de tels cas, une approche partiellement résolue pour la turbulence (e.g. DDES) est envisageable afin de réduire les coûts de calcul. Ce travail vise à étudier la nature auto-entretenu de cette instationarité à l'aide de simulations numériques hybrides dans le cas d'une tuyère sur-détendue. La géométrie considérée est une tuyère TIC, en régime free shock separation (FSS) et fonctionnant à 3 différents nombres de Mach de jet $M_j = [1.83, 2.09, 2.27]$. Les calculs non linéaires confirment les résultats expérimentaux : la densité spectrale d'énergie des perturbations de pression proche paroi est répartie sur 2 pics à fréquence intermédiaire ($St = 0.2 - 0.3$) et deux bosses à basse et haute fréquence, respectivement à $St < 1$ et $St \sim 1$ (Fig. 7-b). Pour un Mach de jet $M_j = 1.83$, l'énergie aux fréquences $St = 0.2$ et $St = 0.3$ sont comparables. A $M_j = 2.09$, le pic d'énergie à $St = 0.2$ domine tandis que les deux finissent par disparaître pour un Mach de jet $M_j = 2.27$. Une PSD calculée pour différentes composantes azimutales de la perturbation de la pression proche paroi montre une claire séparation azimutale pour toutes les contributions fréquentielles. En particulier, alors que le pic à $St = 0.3$ a une double contribution $m = 2, 3$ à $M_j = 1.83$ et il est exclusivement de type $m = 2$ à $M_j = 2.09$. Le pic à $St = 0.2$ a, quant à lui, une symétrie $m = 1$, avec une signature persistante à l'intérieur de la tuyère à $M_j = 2.09$.

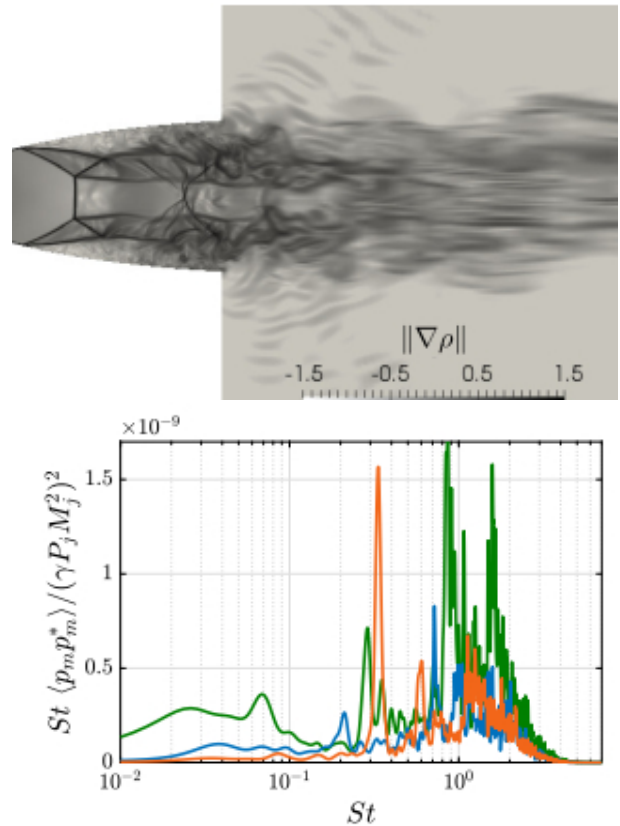


FIGURE 7 – Solution instationnaire DDES. (a) Contours du gradient de densité ($\|\Delta\rho\|$) pour un $NPR = 6$. (b) : PSD à $x/L = 0.665$.

Dynamique auto-entretenue dans des turbomachines

Jean-Christophe ROBINET, Valentin FER (doctorant/ONERA)

Collaborations : C. CONTENT, S. BOURASSEAU, S. BENEDDINE, D. SIPP (ONERA-DAAA)

La caractérisation de certains phénomènes propres aux turbomachines tels que l'apparition de décollements tournants ou le pompage est un domaine de recherche très actif et un enjeu majeur pour les motoristes aéronautiques. Du fait des géométries à considérer et de l'importance des nombres de Reynolds en jeu dans ce type de configurations, il est très délicat d'obtenir des informations fines sur les causes de ces phénomènes. Particulièrement aucune étude de stabilité linéaire globale n'a pu être menée sur ce type de configurations 3D. Ceci est dû au fait que les méthodes employées pour avoir les informations contenues dans l'opérateur jacobien sont basées sur l'extraction de la matrice jacobienne des équations de Navier-Stokes ou sur l'utilisation du « time-stepping » qui émule cette matrice par une intégration en temps.

Le changement de paradigme des architectures informatiques impose de limiter les accès mémoires. Il est donc nécessaire d'écrire différemment les algorithmes pour espérer bénéficier de l'augmentation de la puissance de calcul. En particulier, pour reporter les bonnes performances de notre code direct, nous nous sommes portés sur l'utilisation de la différentiation automatique (AD). Celle-ci permet l'obtention des informations contenues dans la matrice jacobienne des opérateurs spatiaux sous forme de produits matrice-vecteur à droite (code linéarisé ou tangent) et à gauche (code adjoint). L'enjeu de ce travail est double. Il s'agit de développer les outils de stabilités (recherche de modes globaux, sensibilité, suivi de branche, \dots) en ce basant sur l'obtention par AD des produits jacobienne-vecteur et de les utiliser pour caractériser au mieux le phénomène de pompage sur une configuration 3D compressible, à savoir le compresseur NASA rotor 37. Le logiciel de simulation de mécanique des fluides retenu pour cette étude est elsA.

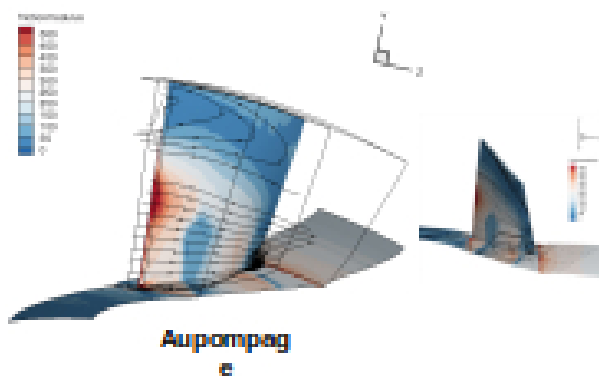


FIGURE 8 – Visualisation du pompage sur le NASA rotor 37

Sur la scalabilité d'un outil de CFD pour les configurations d'écoulement de jet supersonique

Carlos JUNQUEIRA-JUNIOR (ENSAM), João Luiz F. AZEVEDO (IAE), Jairo PANETTA (ITA), Sami YAMOUNI (Serasa DataLab), William R. WOLF (UNICAMP)

Nouvelles réglementations imposent des limitations d'émissions sonores pour l'industrie aéronautique qui poussent les chercheurs et les ingénieurs à investir des efforts dans l'étude des phénomènes aéroacoustiques. Suivant cette tendance, un outil informatique de dynamique des fluides est développé pour reproduire des résultats haute fidélité des écoulements de jets supersoniques pour les applications d'analogie aéroacoustique. Le code est écrit en utilisant la formulation de simulation de grandes échelles qui est discrétisée en utilisant une approche aux différences finies et une intégration temporelle explicite. Les simulations numériques des écoulements de jet supersonique sont très coûteuses et nécessitent un calcul efficace. Donc, des protocoles d'interface de passage de message non bloquants et des fonctionnalités d'entrée et sortie parallèles sont implémentés dans le code afin d'effectuer des simulations qui nécessitent jusqu'à un milliard de points de grille. Le travail aborde l'évaluation des améliorations du code ainsi que les performances de calcul du logiciel fonctionnant sur un ordinateur avec un pic théorique maximal de 2,727 PFlops. Différentes configurations de maillage, dont la taille varie de quelques centaines de milliers à environ un milliard de points, sont évaluées dans le présent article. Les calculs sont effectués en utilisant différentes charges de travail afin d'évaluer la scalabilité forte et faible de l'outil de calcul parallèle. De plus, les résultats de validation d'une condition d'écoulement réaliste sont également présentés.

Publications et communications :

- ¹ Junqueira-Junior, C., Azevedo, J. L. F., Panetta, J., Wolf, W. R., & Yamouni, S. (2020). On the scalability of CFD tool for supersonic jet flow configurations. *Parallel Computing*, 93, 102620.
- ² Junqueira-Junior, C., Azevedo, J. L. F., Panetta, J., Wolf, W. R., & Yamouni, S. (2019). Strong scaling of numerical solver for supersonic jet flow configurations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(12), 1-14.

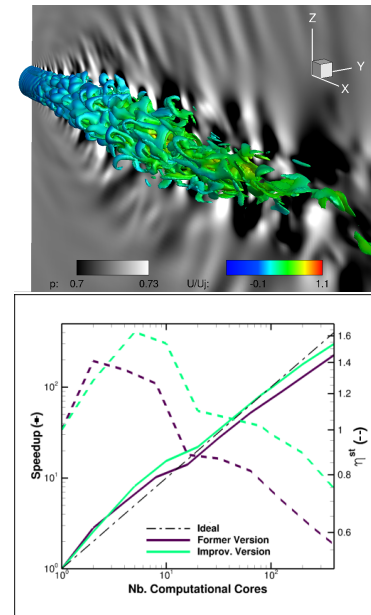


FIGURE 9 – Résultats de simulation. (a) Vue latérale de contours de pression, en gris, superposé par des contours 3-D de magnitude de vitesse, en couleur. (b) : Comparaison de courbes de speedup (-) et de efficacité forte (- -) des deux versions du code JAZzY sur un maillage de 50 million de points.

SGE de jet supersonique en utilisant une approche d'ordre élevé non structurée

Carlos JUNQUEIRA-JUNIOR

Collaborations : João Luiz F. AZEVEDO (IAE), Eron T. V. DAURICIO (ITA - thésard) et Diego ABREU (ITA - thésard)

L'objectif principal du projet est la simulation de grandes échelles avec la modélisation de paroi (WMLES) d'un jet supersonique en tenant compte de la géométrie de la buse. La discrétisation d'ordre élevé non structurée du code FLEXI présente des caractéristiques pour surmonter les problèmes observés dans les travaux récents de l'auteur en utilisant une discrétisation spatiale d'ordre faible. De plus, l'approche WMLES peut réduire de manière significative les coûts de calcul de la simulation en considérant les effets sur la paroi de la buse.

Le projet traite de l'étude du jet supersonique en deux étapes. Une première étude est actuellement en cours sans considérer la géométrie des buses pour valider le code FLEXI et guider le choix des meilleurs paramètres du code pour une telle configuration d'écoulement. La deuxième étape commencera dans la séquence et elle consiste, en calculer l'écoulement de jet avec la géométrie de la buse.

La première étape a demandé des efforts pour comprendre le comportement et les caractéristiques de FLEXI. Cette procédure d'apprentissage a guidé le choix du meilleur ordre polynomial et du nombre de degrés de liberté, ainsi de comment définir correctement le schéma hybride pour minimiser le nombre d'éléments en utilisant la discrétisation spatiale du type volumes finis. De plus, il a déjà généré des résultats préliminaires avec deux simulations avec des polynômes du premier et du second ordre, toutes deux utilisant environ 50 millions de degrés de liberté.

La validation de la mise en œuvre des modèles de paroi est un point crucial pour le projet en cours. La grande simulation de tourbillon de la configuration de la buse et du jet présente des coûts prohibitifs en raison des exigences de maillage près des couches limites. Des simulations de la pente et du canal périodiques sont en cours et ont dévoilé des

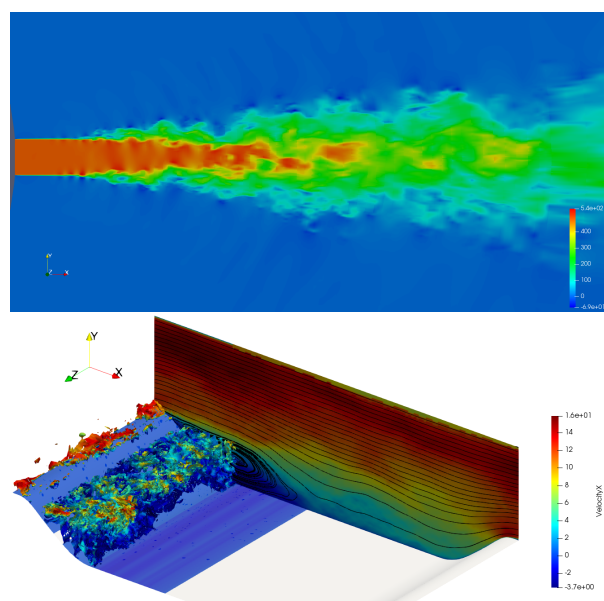


FIGURE 10 – Résultats de simulation. (a) Jet supersonique : Coupe latérale 2D colorée par composante axiale instantanée de la vitesse. (b) Bosse périodique : L'isosurface de pression colorée par la composante de vitesse moyenne dans le sens du courant et un plan d'arrière-plan bidimensionnel coloré par la composante de vitesse moyenne dans le sens du courant, superposée par le champ de vitesse.

problèmes de mise en œuvre. L'auteur travaille sur le débogage parallèle et les corrections semblent fonctionner comme les résultats préliminaires l'indiquent.

L'écoulement de canal plan pour un nombre de Reynolds de $Re_\tau = 590$ est le premier test de validation présenté dans la section courante. La configuration utilise un polynôme de quatrième ordre et une grille de 57,344 éléments, ce qui représente 286,720 degrés de liberté. Le cas de bosse périodique a un nombre de Reynolds, basé sur la vitesse globale et la hauteur de la bosse, de $Re = 10.595$. L'étude utilise un polynôme de troisième ordre et un maillage de 54,150 éléments, ce qui représente 2,164,600 degrés de liberté.

Bruit rayonné par un puff turbulent dans un canal carré

Leonardo RIGO (doctorant), Damien BIAU & Xavier GLOERFELT

L'apparition de "spots" turbulents dans les écoulements transitionnels est un phénomène bien connu et son observation remonte aux expériences d'Osborne Reynolds. Ces structures turbulentes, généralement dénommées "puffs" ou "slugs", suivant les régimes d'écoulement, ont été étudiées en détail depuis, à la fois par voie numérique ou expérimentale. Notre étude s'intéresse à une configuration de conduite de section carrée, qui présente certaines particularités intéressantes, comme la capacité d'une paroi à générer de la turbulence. Après des études consacrées à la caractérisation des propriétés statistiques et à l'influence de la courbure de la conduite, nous nous sommes intéressés au rayonnement acoustique généré par un puff turbulent. Nous espérons ainsi répondre à certaines questions qui restent ouvertes, comme (1) l'existence et la détermination d'une distance d'équilibre inter-puff; (2) la contribution relative des sources volumiques et des tensions surfaciques liées à la viscosité. Ce dernier point est un sujet de débat. Certains auteurs prévoient une domination des sources pariétales liées à la viscosité en raison de leur nature dipolaire, comparées aux sources volumiques de nature quadripolaire (donc moins efficace), au moins à bas nombre de Mach.

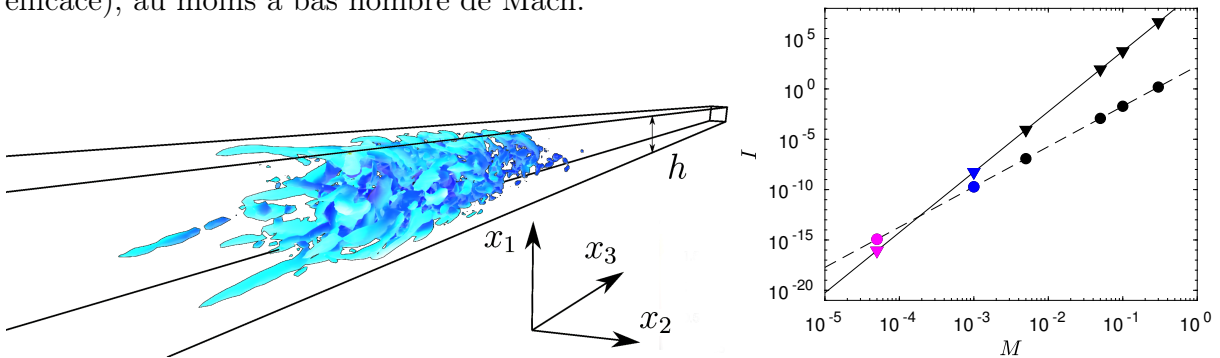


FIGURE 11 – Bruit d'un puff dans une conduite de section carr e pour $Re=1700$. Visualisation du champ de vorticité et intensité acoustique en fonction du nombre de Mach (∇ termes quadripolaires non visqueux; \circ termes dipolaires visqueux).

Le puff turbulent est un très bon candidat pour étudier cette question car il s'agit d'un écoulement naturellement localisé, bas Reynolds et bas Mach. Une approche analogique a été utilis e à partir des termes sources volumiques d'une simulation incompressible à $Re=1700$ et d'une fonction de Green adapt e à la géométrie d'une conduite de section carr e. La figure 11 montre que les termes sources quadripolaires suivent une loi en M^6 (trait plein) et les termes sources dipolaires suivent une loi en M^4 (tirets), conformément à la théorie des sources compactes dans une conduite. Les sources visqueuses dipolaires (*shear stresses* sur les parois) peuvent devenir prépondérant à très bas nombre de Mach. Le croisement s'opère pour $M \sim 2 \times 10^{-4}$, ce qui est considérablement plus bas que les observations précédentes de la littérature.

Publications :

- ¹ L. Rigo, X. Gloerfelt & D. Biau, The contribution of viscous stresses to the sound generated by a turbulent puff, *J. Fluid. Mech. in revision*, 2021.

Etude de la pression pariétale sous une couche limite turbulente

Xavier GLOERFELT

L'étude de la pression de la paroi sous une couche limite turbulente (CLT) est d'un grand intérêt fondamental et applicatif afin notamment de mieux comprendre le couplage entre la dynamique de la couche limite et les modes de vibration de la structure. La génération de données de référence par des expériences numériques est nécessaire pour progresser dans la modélisation analytique, notamment dans la région des bas nombres d'onde et des nombres d'onde acoustiques qui peuvent être dimensionnants pour prédire l'excitation vibratoire.

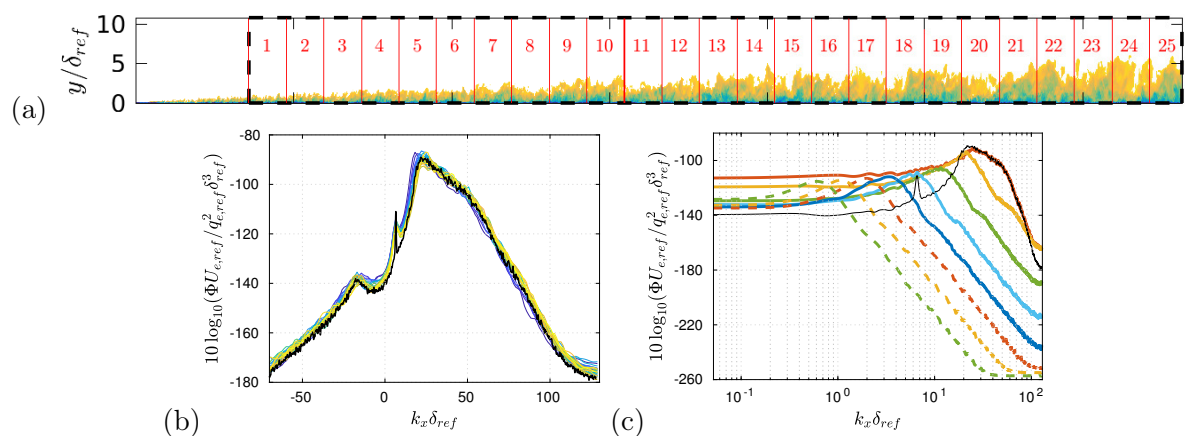


FIGURE 12 – Results for the large domain (ZPG, Mach 0.7, PRACE). Instantaneous side views (a) of the streamwise velocity. (b) Wavenumber-frequency spectra $\Phi_{pp}(k_x, k_z = 0, \omega)$ estimated with Capon's method on each subdomains 1 to 25 depicted in subplot (a). (c) Wavenumber-frequency spectra $\Phi(k_x, 0, \omega)$ of the EMD modes (— IMF1; — IMF2; — IMF3; — IMF4; — IMF5; - - - IMF6; - - - IMF7; - - - IMF8); full spectrum thin black line.

Dans l'étude qui correspond à l'article JASA, de nombreuses méthodes d'analyse statistique ont été mises en oeuvre : tests de stationarité par segmentation (méthode de Mann-Kendall, Reverse Arrangement, méthode de Foken et Wichura, méthode de Mahrt), test économétriques (ADF, KPSS), décomposition EMD (Empirical Mode Decomposition), spectres temps-fréquence, ondelettes ou spectres de Hilbert-Huang. La figure 12(a) donne un aperçu du domaine complet. Le découpage en 25 sous-domaines a permis de tester l'hypothèse d'homogénéité. La sous-figure (b) montre que celle-ci est justifiée a posteriori si l'échelle d'adimensionnement est fixe (ici l'épaisseur de couche limite médiane). Nous montrons que la prise en compte de l'épaississement de la couche limite, une augmentation significative du nombre de Reynolds, du nombre de Mach, la présence d'un gradient de pression ou le découpage en gamme d'échelle par EMD (sous-figure c), n'altèrent pas les caractéristiques de la représentation spectrale dans l'espace fréquence-nombre d'onde.

Publications :

- ¹ X. Gloerfelt, Stationarity and homogeneity assumptions in wavenumber-frequency representation of turbulent boundary layer wall pressure, *J. Acoust. Soc. Am.*, 148(8), p.2151-2160, 2020.

Etude des spectres fréquence-nombre d'onde pour un canal plan

Xavier GLOERFELT

Le cas du canal plan turbulent est intéressant pour une double raison. D'une part, le caractère homogène de l'écoulement dans les directions longitudinales et transverses permet d'obtenir sans ambiguïté les spectres fréquence-nombre d'onde pour la pression pariétale. D'autre part, il n'est pas trop coûteux numériquement car les directions homogènes simplifient le traitement des conditions aux limites (simples conditions de périodicité) et permettent de converger rapidement les statistiques en moyennant dans les directions longitudinales et transverses. De ce fait, il a constitué un cas d'épreuve pour les études théoriques de la pression pariétale sous un écoulement turbulent qui s'appuient toutes sur des simulations de type DNS ou LES en régime incompressible et la discussion du comportement des spectres de pression aux bas nombres d'onde ou dans le domaine acoustique est donc sujette à caution. Nous utilisons notre solveur compressible d'ordre élevé pour revisiter ce problème. Des calculs DNS et LES pour des nombres de Reynolds $Re_\tau=180$, 360 et 720 et des nombres de Mach de 0.1, 0.3 et 0.7 ont été réalisés.

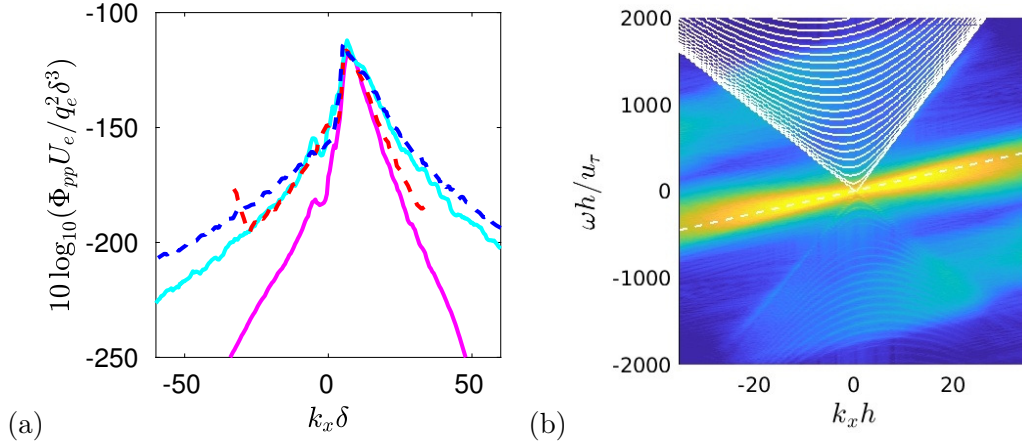


FIGURE 13 – Spectres fréquence-nombre d'onde pour les fluctuations de pression pariétale dans un canal plan à $M=0.3$. (a) Comparaison avec les DNS incompressibles de Hu, Morfey et Sandham pour $Re_\tau=180$ (present — & Hu et al. - - -) et $Re_\tau=360$ (present — & Hu et al. - - -). (b) Coupe du spectre $\Phi_{pp}(k_x, k_z=0, \omega)$ pour $Re_\tau=180$, qui montre l'activité acoustique avec des modes multiples, modélisés par la relation de dispersion $(\omega/c - k_x M)^2 - k_x^2 - k_z^2 - (\pi m/2h)^2 = 0$ (lignes blanches pour $m=0$ à 21).

Les calculs DNS ont été validés par rapport aux bases de données de la littérature et un très bon accord est observé. Des premiers résultats pour les spectres fréquence-nombre d'onde sont présentés dans la figure 13. La comparaison avec les spectres de Hu, Morfey et Sandham (fig.13a) indique une pente différente aux petits et grands nombres d'onde. La décroissance est plus rapide dans les calculs compressibles, ce d'autant plus que le nombre de Reynolds est petit (écart lié à la compressibilité ou à la façon de calculer les spectres?). Les spectres fréquentiels (intégrés en k_x et k_z) sont néanmoins en très bon accord avec la littérature. Une coupe à $k_z=0$ (fig.13b) montre des modes acoustiques multiples dans le canal, qui se corrélient très bien aux modes de conduite d'ordre supérieur.

Production de vorticité par interaction onde entropique/onde de choc dans un plasma idéal

Nicolas Alferez

Collaborations : Francis Nwobu (PhD, Imperial College, UK), Emile Toubert (OIST, Japan)

Ce projet a pour objectif d'étudier les mécanismes de production de vorticité au cours de l'interaction d'une fluctuation entropique avec une onde de choc dans un plasma idéal se déplaçant à haute vitesse. Vis-à-vis d'une perturbation incidente, l'onde de choc opère une redistribution d'énergie à travers une large gamme d'échelles spatio-temporelles. Comprendre ces mécanismes de redistribution au sein de gaz ionisés présente des intérêts applicatifs aussi bien dans le domaine de l'ingénierie aérospatial (utilisation d'actionneurs plasma en r entr e atmosphérique) qu'énergétique (fusion par confinement inertiel). En MHD, trois ondes caractéristiques ('slow', 'Alfvén' et 'fast') prennent collectivement le rôle des ondes acoustiques en dynamique des gaz non ionisés. Par opposition au cadre hydrodynamique, ces ondes isentropiques transportent de la vorticité. L'analyse linéaire de l'interaction choc/perturbation (LIA), étendue au cadre des équations de la MHD idéale, a ainsi mis en évidence une production d'ondes de vorticité avec un spectre d'échelles spatio-temporelles très étendu par rapport au cas hydrodynamique. En particulier, il a été démontré que les niveaux et l'orientation des ondes de vorticité produites peuvent être amplifiés ou atténués de façon sélective par simple changement de l'angle d'inclinaison entre le champ magnétique moyen et la vitesse de l'écoulement moyen (figure 14).

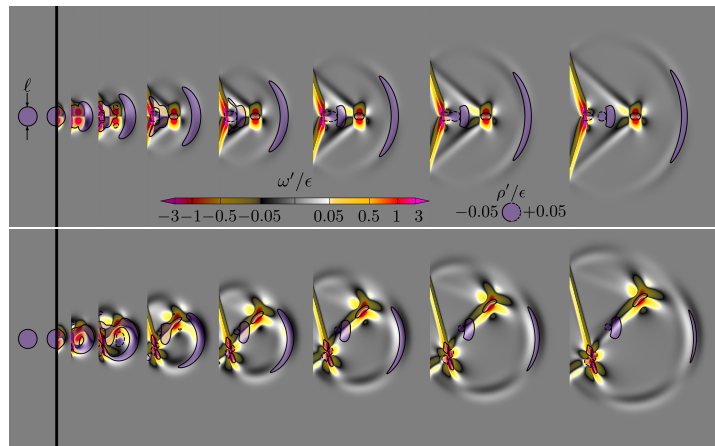


FIGURE 14 – Séries de visualisations instantan es extraites de simulations numériques de l'interaction d'un spot d'entropie avec une onde de choc parallèle (haut) et inclin e (bas) avec le champ magnétique en amont du choc. Les contours représentent l'évolution temporelle des fluctuations de masse volumique et de vorticité dans l'état post-choc.

Publications et communications :

- ¹ F. Nwobu, N. Alferez and E. Toubert : "Shock-induced vorticity production from entropy fluctuations in ideal plasmas", In preparation for the Journal of Fluid Mechanics.

Étude numérique d'une machine thermoacoustique compacte

Virginie DARU

Collaborations : Diana Baltean-Carlès, Catherine Weisman (*∂*'Alembert, Paris), Hélène Bailliet (Institut Pprime, Poitiers), Yann Fraigneau (LISN, Orsay)

Ce travail se place dans le cadre de l'ANR TACOT (ThermoAcoustic Cooler for Online Transportation, 2018-2021), qui vise à démontrer l'applicabilité de la thermoacoustique pour la climatisation automobile. Une machine thermoacoustique compacte est mise au point et fabriquée par l'institut Pprime, le LAUM au Mans et le constructeur automobile PSA. L'originalité et la compacité de la machine sont dues à l'utilisation de deux sources acoustiques, à la différence des machines classiques qui n'en utilisent qu'une (figure 15).

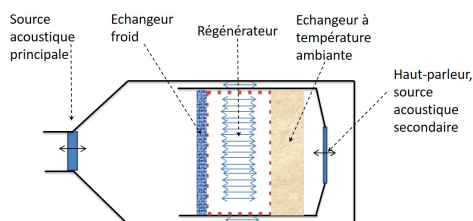


FIGURE 15 – Représentation schématique de la machine thermoacoustique compacte TACOT.

Les études numériques ont d'abord port e sur les effets de convection naturelle auxquels on peut s'attendre dans la machine, à l'intérieur de laquelle des différences de température importantes (plusieurs dizaines voire centaines de degrés) existent. Les premières simulations ont consid er e les écoulements de convection naturelle produits dans des configurations de machines simplifiées sans oscillation acoustique. Elles ont été effectuées au LIMSI en utilisant le code incompressible SunFluidH. Ces simulations ont été confrontées avec un excellent accord avec des mesures effectuées à l'institut Pprime. Les résultats ont montré que l'écoulement et la distribution de température dans la machine sont pleinement tridimensionnels et d'amplitude significative, et que les effets de convection naturelle pourraient ainsi interférer avec l'effet thermoacoustique et modifier le fonctionnement de la machine.

L'interaction entre l'effet thermoacoustique et les effets de convection naturelle est en cours d'étude. Pour cela, une configuration simplifiée de la machine complète est mise en oeuvre dans une approche dite "faible Mach". En effet, la compacité de la machine ($L \ll \lambda$, où L est la longueur caractéristique de la machine et λ est la longueur d'onde acoustique) rend l'approche compressible inefficace et justifie l'utilisation du modèle faible Mach, dans lequel la pression thermodynamique est uniforme en espace. Ce modèle est impl ement e dans le code SunFluidH, et il est en cours de validation dans ce type de configuration par comparaison avec les résultats données par un code compressible.

Publications et communications :

- ¹ O. Hireche, I. Ramadan, C. Weisman, H. Bailliet, Y. Fraigneau, D. Baltean-Carlès, V. Daru. Experimental and numerical investigation of natural convection flows in two horizontal thermoacoustic cavities, *Int. J. H. M. T.* 149, 119195, 2020.

Streaming acoustique en résonateur

Virginie DARU

Collaborations : Diana Baltean-Carlès, Catherine Weisman (∂' Alembert, Paris), Hélène Bailliet (Institut Pprime, Poitiers), S. Tabakova (BAS, Bulgarie)

Le streaming acoustique, écoulement moyen du second ordre en nombre de Mach engendré par l'interaction d'une onde acoustique et d'une paroi solide, est identifié comme l'une des sources principales de pertes thermiques dans les machines thermoacoustiques. Il est donc important d'en avoir une connaissance précise pour en contrôler les causes et les effets et optimiser le fonctionnement des machines. Ce travail sur le streaming acoustique (dit de Rayleigh) dans les résonateurs s'intéresse principalement à ce qui est souvent appelé le streaming "rapide", produit lorsque l'onde acoustique est de forte amplitude. Dans le cas où l'onde est de faible amplitude, l'écoulement moyen peut être étudié analytiquement ; il est régulier, constitué de 4 cellules de recirculation par demi-longueur d'onde acoustique. Lorsque l'amplitude de l'onde augmente, l'écoulement de streaming est fortement modifié (figure 16).

Les études, analytiques et numériques, ont porté sur la caractérisation des mécanismes à l'oeuvre dans cette évolution. Un paramètre fondamental est le nombre de Reynolds de l'écoulement moyen Re_{NL} , qui atteint quelques dizaines dans le cas du streaming "rapide". Pour simuler numériquement cet écoulement il faut utiliser une approche compressible puisque l'écoulement moyen est engendré par une onde acoustique, et une méthode numérique précise capable de représenter à la fois les oscillations acoustiques et le champ moyen qui est presque incompressible. Les simulations nécessitent plusieurs millions d'itérations temporelles pour atteindre l'état stationnaire du champ moyen.

Les résultats obtenus ont mis en évidence les deux mécanismes principaux à l'origine de la modification du streaming en régime rapide : d'une part l'interaction non linéaire entre le champ acoustique et le champ moyen, et d'autre part la réorganisation du champ de température due au transport convectif de la température, qui produit un gradient radial de température. Un critère théorique prédisant les conditions de la modification du streaming a été développé. Les comparaisons entre les simulations numériques (effectuées en similitude) et les expérimentations menées à l'institut Pprime à Poitiers montrent un excellent accord.

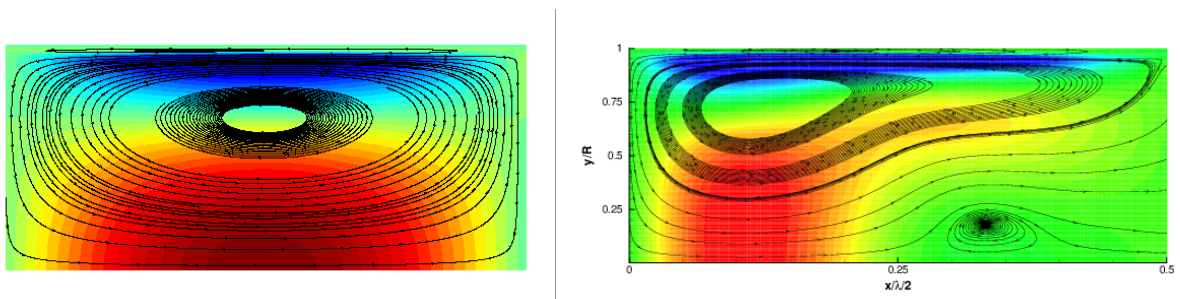


FIGURE 16 – Isovaleurs de la vitesse axiale et lignes de courant de l'écoulement de streaming sur $1/4$ de longueur d'onde acoustique, à faible (gauche) et forte amplitude acoustique (droite).

Publications et communications :

- ¹ D. Baltean-Carlès, V. Daru, C. Weisman, S. Tabakova and H. Bailliet. An unexpected balance between outer Rayleigh streaming sources, *J. Fluid Mech.* 867, pp. 985-1011, 2019.
- ² V. Daru, C. Weisman, D. Baltean-Carlès and H. Bailliet. Acoustically induced thermal effects on Rayleigh streaming, *J. Fluid Mech.* 911, A7, 2021.

Troisième partie

Machine Learning & Quantification
d'incertitude (MLQ)

Assimilation de données pour la calibration de modèles RANS I

Maximilien de ZORDO-BANLIAT, Xavier MERLE, Paola CINNELLA
 Collaborations : G. DERGHAM (Safran Tech)

Que ce soit en aérodynamique interne ou externe, la plupart des écoulements d'intérêt en milieu industriel sont turbulents. La simulation de ce type d'écoulements par des méthodes haute-fidélité est, encore aujourd'hui, grandement limitée par leur coût de calcul prohibitif. Les méthodes RANS, moins précises, demeurent donc la norme. Il s'avère donc nécessaire d'en améliorer les prédictions. Une voie d'amélioration possible consiste à calibrer les modèles RANS à partir de données haute-fidélité.

Une première approche, défendue par le laboratoire, consiste à mélanger les solutions produites par différents modèles RANS via un système de pondération des modèles. Aussi, après avoir appliqué les méthodes de *Bayesian Model Averaging (BMA)* et de *Bayesian Model Scenario Averaging (BMSA)* à un cas d'écoulement dans un compresseur (NACA65 V 103), en incluant un modèle non linéaire dans le mélange bayésien, l'année écoulée a été l'occasion d'investiguer l'ajout d'une dépendance spatiale pour les poids de modèles via un espace de *features*.

Plus spécifiquement, pour conserver des capacités de prédictions les plus générales possibles, la dépendance spatiale des poids de modèles n'est pas directement déterminée par la géométrie du cas d'apprentissage mais dans un espace de fonctions (les *features*) qui sont des caractéristiques locales de l'écoulement (courbure locale par exemple). Deux approches sont en cours de tests pour mettre en œuvre ces méthodes : la première est basée sur un algorithme de *Clustered Bayesian Averaging (CBA)* ; la seconde est basée sur une décomposition de Karhunen-Loève. Pour le moment, la *CBA* a donné des résultats très encourageants.

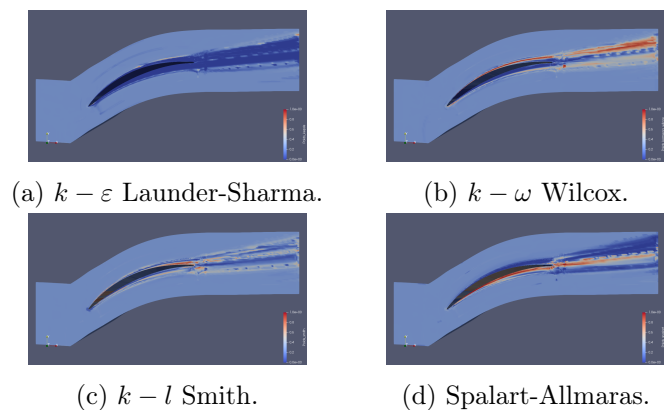


FIGURE 17 – Cartographie de poids d'un mélange de 4 modèles RANS sur une aube de compresseur.

Publications et communications :

- ¹ Zordo-Banliat, M. de, X. Merle, G. Dergham, & P. Cinnella., Bayesian Model-Scenario Averaged Predictions of Compressor Cascade Flows under Uncertain Turbulence Models., *Computers & Fluids* 201 (avril 2020).
- ² Zordo-Banliat, M. de, X. Merle, G. Dergham, & P. Cinnella., Estimates of turbulence modeling uncertainties in NACA65 cascade flow predictions by Bayesian Model-Scenario Averaging, 55th *3AF International Conference AERO2020+1*, April 12-14 2020+1, Poitiers, France.

Assimilation de données pour la calibration de modèles RANS II

Ismail BEN HASSAN SAÏDI, Paola CINNELLA, Francesco GRASSO

Que ce soit en aérodynamique interne ou externe, la plupart des écoulements d'intérêt en milieu industriel sont turbulents. La simulation de ce type d'écoulements par des méthodes haute-fidélité est, encore aujourd'hui, grandement limitée par leur coût de calcul prohibitif. Les méthodes RANS, moins précises, demeurent donc la norme. Il s'avère donc nécessaire d'en améliorer les prédictions.

Un défaut bien connu des modèles RANS « grand public » réside dans la dépendance linéaire entre le tenseur de Reynolds et le tenseur des taux de déformation du champ moyen \overline{S}_{ij} . Les modèles EARSM tentent de résoudre ce problème en imposant une dépendance non linéaire et en y ajoutant le tenseur des taux de rotation $\overline{\Omega}_{ij}$. Les coefficients de cette décomposition tensorielle sont des fonctions d'invariants et sont classiquement déterminés à partir de considérations physiques. Les récents travaux de thèse de M. SCHMELZER (encadré par P. CINNELLA) ont montré qu'il était possible d'identifier ces coefficients à l'aide d'une méthode d'apprentissage automatique, de type *data-driven*, et de données haute-fidélité, donnant lieu à de nouveaux modèles. De tels modèles sont entraînés hors-ligne, c'est à dire en dehors de toute simulation numérique. Ces modèles sont ensuite implantés dans un *solver* CFD pour pouvoir effectuer des simulations numériques. De telles approches permettent de construire des modèles EARSM plus précis pour la classe d'écoulements représentée par les données haute-fidélité utilisées. Cependant, l'apprentissage étant effectué hors ligne, de tels modèles peuvent s'avérer non robustes et induire des singularités numériques dans les simulations numériques. De plus, cette approche n'est pas flexible quant aux données nécessaires à l'entraînement des modèles. En effet, ce type de méthodes nécessite des données haute-fidélité du tenseur de Reynolds. Enfin, l'apprentissage hors ligne ne garantit pas l'exacte conservation de l'énergie mécanique.

Au cours de l'année écoulée, nous avons proposé et développé une approche *CFD-driven*, mettant en jeu un problème d'optimisation de coefficients (permettant la construction du modèle), dans laquelle à chaque itération, la qualité du modèle candidat est évaluée en effectuant une simulation RANS et en comparant les résultats à des données haute fidélité. Cette approche permet de résoudre les défauts des approches *data-driven*. En particulier, cette approche *online* garantit l'exacte conservation de l'énergie mécanique. De plus, n'importe quelles données haute fidélité peuvent être utilisées pour l'entraînement du modèle, rendant l'approche plus flexible. Enfin, les modèles candidats non robustes (conduisant à la divergence des simulations) sont détectés et éliminés durant le processus d'optimisation garantissant ainsi la robustesse du modèle construit. Cette approche a été validée pour le cas des écoulement 2D décollés.

Publications et communications :

- ¹ Ben Hassan Saïdi, I., Cinnella, P., & Francesco, G., Cfd-driven sparse identification of algebraic reynolds-stress models, 55th 3AF International Conference AERO2020+1, April 12-14 2020+1, Poitiers, France.

Assimilation de données pour la calibration de modèles RANS III

Soufiane CHERROUD, Xavier MERLE, Xavier GLOERFELT, Paola CINNELLA

Que ce soit en aérodynamique interne ou externe, la plupart des écoulements d'intérêt en milieu industriel sont turbulents. La simulation de ce type d'écoulements par des méthodes haute-fidélité est, encore aujourd'hui, grandement limitée par leur coût de calcul prohibitif. Les méthodes RANS, moins précises, demeurent donc la norme. Il s'avère donc nécessaire d'en améliorer les prédictions.

Un défaut bien connu des modèles RANS « grand public » réside dans la dépendance linéaire entre le tenseur de Reynolds et le tenseur des taux de déformation du champ moyen \overline{S}_{ij} . Les modèles EARSM tentent de résoudre ce problème en imposant une dépendance non linéaire et en y ajoutant le tenseur des taux de rotation $\overline{\Omega}_{ij}$. Les coefficients de cette décomposition tensorielle sont des fonctions d'invariants et sont classiquement déterminés à partir de considérations physiques. Les récents travaux de thèse de M. SCHMELZER (encadré par P. CINNELLA) ont montré qu'il était possible d'identifier ces coefficients à l'aide d'une méthode d'apprentissage automatique, de type *data-driven*, et de données haute-fidélité, donnant lieu à de nouveaux modèles.

Cette approche déterministe ne permet cependant pas de prendre en compte les incertitudes sur les conditions de fonctionnement du calcul et impactant la valeur des coefficients de la décomposition. Ainsi, l'idée est d'adapter l'approche de SCHMELZER à un environnement bayésien et, ce faisant, de doter ces coefficients d'une distribution de probabilité. Pour ce faire, deux algorithmes sont en cours d'évaluation : *Sparse Bayesian Learning* et *Bayesian LASSO*. Les premiers résultats sont prometteurs.

Stratégie d'échantillonnage pour métamodèles parcimonieux

Xavier MERLE

Collaborations : G. DERGHAM (Safran Tech)

La quantification d'incertitudes, l'analyse de sensibilité, l'inférence statistique sont des applications de Mécanique des Fluides qui requièrent la résolution des équations du mouvement en de nombreux points d'un plan d'expérience, représenté par les conditions de fonctionnement par exemple. Ce nombre varie de 10^4 à 10^6 . Il est donc humainement inenvisageable, même avec la puissance de calcul actuelle, d'utiliser un *solver* « traditionnel » pour ce type d'application, en particulier pour des écoulements turbulents. Pour contourner cette difficulté, la solution classiquement retenue consiste à générer un modèle de substitution capable d'approximer l'écoulement pour tout point du plan d'expérience. Ce modèle de substitution est déterminé, par différentes approches, à partir d'un « jeu d'entraînement », c'est-à-dire un nombre limité de points appartenant au plan d'expérience et pour lesquels l'écoulement est connu de manière exacte (aux erreurs de discrétisation et de modélisation près) en résolvant numériquement les équations du mouvement. Une approche bien connue, le chaos polynomial, consiste à considérer les variables du plan d'expérience comme aléatoires et à décomposer les équations du mouvement dans une base de polynômes orthogonaux bien choisie.

Le calcul des coefficients de cette décomposition peut se faire de différentes manières, parmi lesquelles la régression. Le chaos polynomial n'échappe cependant pas au « fléau de la dimension » : la taille du jeu d'entraînement dépend exponentiellement de la dimension du plan d'expérience. Pour limiter cet inconvénient, on peut recourir à une méthode de *Compressed Sensing* qui limite la taille du jeu d'entraînement en imposant une régularisation l_1 à la régression. On montre alors que la taille minimale du jeu d'entraînement est mino- rée par la mesure de cohérence μ . L'idée est donc d'utiliser un algorithme de *Cohere- nce Sampling*, basé sur de l'échantillon- nage d'importance et la mesure de cohé- rence, pour définir une stratégie d'échan- tillonnage minimisant la taille de l'échantil- lon, et de la comparer à d'autres approches bien connues du type *minimax*, *maximin*...

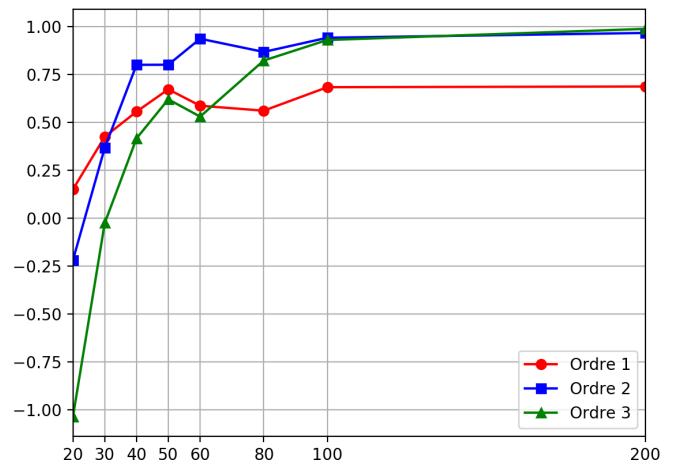


FIGURE 18 – Indice Q^2 en fonction de la taille de l'échantillon pour différents ordres de décomposition en chaos polynomial.

Modélisation réduite et identification de systèmes

Jean-Christophe LOISEAU

Collaborations : S. L. Brunton & J. N. Kutz (UW, Seattle, USA), B. R. Noack (Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Chine), G. Rigas (Imperial College, Londres, UK)

Ce thème de recherche en collaboration étroite avec le groupe de Steven Brunton (UW, Seattle, USA) s'intéresse à l'utilisation de méthodes tirées de l'apprentissage statistique pour la réduction de modèle et l'identification de systèmes non-linéaires à partir de données venant aussi bien de campagnes expérimentales que de simulations numériques. Une attention particulière est portée à l'identification de modèles dits *interprétables* notamment via l'utilisation jointe de méthodes de régression parcimonieuse et/ou symbolique. Enfin, le cadre mathématique de ces méthodes permet à l'utilisateur d'imposer des contraintes au sein du problème d'optimisation conduisant alors à l'identification de modèles respectant un ensemble de propriétés physiques fondamentales telles que la conservation de l'énergie pour les systèmes hamiltoniens ou l'appartenance à certains groupes de symétrie.

En combinant cette approche avec des techniques plus classiques de réduction de la dimension telles que la POD ou la DMD, nous avons pu montrer sur un ensemble d'exemples canoniques que cette méthodologie conduit à l'identification de modèles réduits plus précis et plus efficaces que ceux traditionnellement obtenus via une projection de Galerkin (Loiseau & Brunton, *J. Fluid Mech.*, 2018). Récemment, l'utilisation de cette méthodologie dans le cas d'un écoulement de convection forcée confiné au sein d'une géométrie annulaire (Loiseau, *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 2020) a par ailleurs mis en avant de nouveaux éléments suggérant l'universalité du modèle de Lorenz pour des stratifications thermiques instables. La généralisation de ces résultats à d'autres géométries (e.g. géométrie plane) est aujourd'hui à l'étude.

Il est à noter que l'utilisation d'une telle méthode de régression semi-symbolique pour des écoulements tri-dimensionnels pleinement turbulents se heurte au fameux *fléau de la dimension*. Des travaux actuellement en cours au sein de l'équipe de Steven Brunton cherchent alors à combiner ces méthodes d'identification avec d'autres méthodes de réduction de la dimension issues cette fois-ci du domaine de l'apprentissage profond telles que les auto-encodeurs. Un second axe de recherche poursuivi par J.-Ch. Loiseau est l'extension de ces méthodes pour l'identification de systèmes dynamiques stochastiques. En s'intéressant cette fois-ci à des grandeurs intégrales telles que l'évolution de la position du centre de pression à l'arrière d'un corps axisymétrique obtenue expérimentalement, de récents travaux ont montré qu'il était possible d'étendre cette méthodologie d'identification pour des systèmes où la turbulence est traitée de façon stochastique. Pour le cas sus-mentionné, un système stochastique très simple a ainsi été identifié. Malgré cette apparence simplicité, le modèle obtenu reproduit fidèlement les propriétés statistiques de la grandeur regardée et est aujourd'hui en cours d'extension afin de pouvoir l'utiliser dans un objectif de contrôle en boucle fermée.

Depuis le recrutement de Jean-Christophe Loiseau au sein du laboratoire en 2017 en tant que Maître de conférences, le développement de cette thématique de recherche s'est concrétisé par la publication de cinq articles dans des journaux internationaux, autant

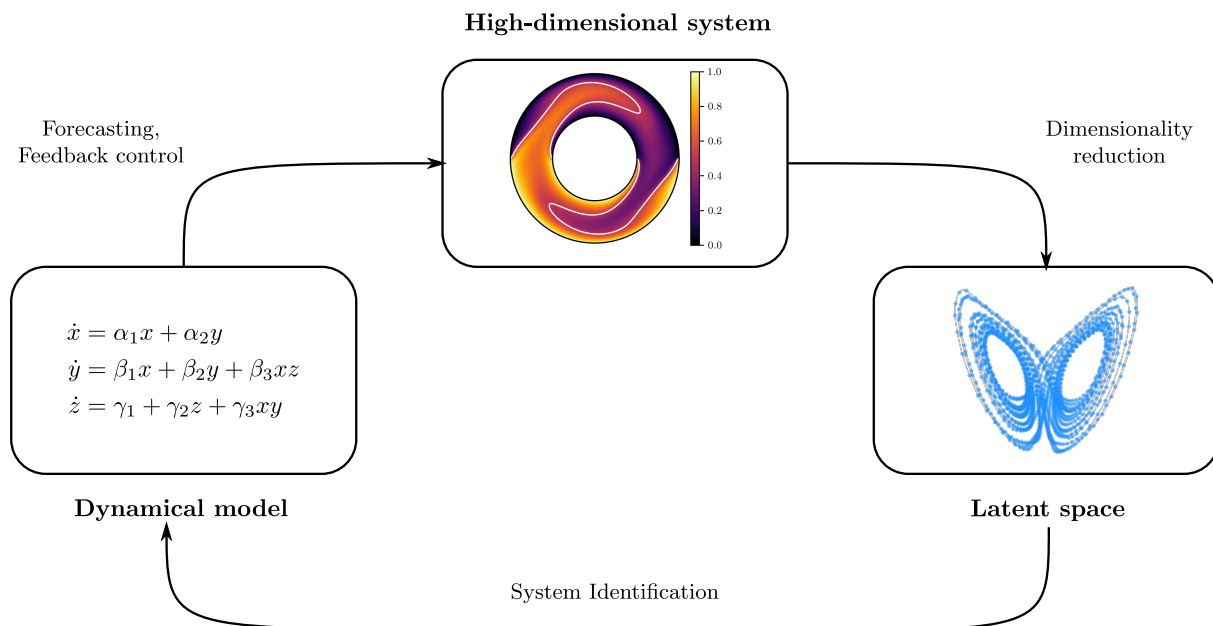


FIGURE 19 – Aperçu général de la stratégie mise en place pour l’identification du modèle de Lorenz dans le cas de la convection thermique chaotique au sein d’une géométrie annulaire. La phase de réduction de la dimension est faite à l’aide de la méthode DMD tandis que l’identification de système est réalisée grâce à *SINDy* (Brunton *et al.*, *PNAS*, 2016).

de présentations à des conférences ainsi qu’un chapitre invité et un séjour en tant que chercheur invité au sein de l’*Institute for Pure and Applied Mathematics* de l’Université de Californie à Los Angeles. Enfin, quatre autres articles sont en cours de rédaction ou de soumission ainsi qu’un livre à visée pédagogique sur l’utilisation des méthodes basées sur la donnée pour l’étude des systèmes dynamiques.

Publications et communications :

- ¹ J. L. Callahan, **J.-Ch. Loiseau**, G. Rigas and S. L. Brunton. Nonlinear stochastic modeling with Langevin regression. Submitted to Proc. R. Soc. A, 2021.
- ² **J.-Ch. Loiseau**. Data-driven modeling of the chaotic thermal convection in an annular thermosyphon. *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 34(4), 339-365, 2020.
- ³ B. de Silva, K. Champion, M. Quade, **J.-Ch. Loiseau**, J. N. Kutz and S. L. Brunton. PySINDy : A Python package for the sparse identification of nonlinear dynamical systems from data. *J. Open Source Softw.* 5(49), 2104, 2020.
- ⁴ **J.-Ch. Loiseau**, S. L. Brunton and B. R. Noack. From the POD-Galerkin method to sparse manifold models. In Benner, P. (ed.). *Handbook of Model Order Reduction, Vol. II : Applications*. De Gruyter GmbH, pp. 1-47 (invited), 2020.
- ⁵ **J.-Ch. Loiseau**, B. R. Noack and S. L. Brunton. Sparse reduced-order modelling : sensor-based dynamics to full-state estimation. *J. Fluid Mech.*, vol. 844, pp. 459-490, 2020.
- ⁶ **J.-Ch. Loiseau** & S. L. Brunton. Constrained sparse Galerkin regression. *J. Fluid Mech.*, vol. 838, pp. 42-67, 2018.

Vers une unification des modèles linéaires basés sur la donnée

Jean-Christophe LOISEAU

Collaborations : S. L. Brunton & J. N. Kutz (UW, Seattle, USA)

Au cours de la dernière décennie, l'accroissement des capacités de calculs et des moyens expérimentaux a conduit à la création de bases de données toujours plus massives. La popularisation des méthodes issues de l'apprentissage statistique et de l'apprentissage profond pour analyser ces données a alors provoqué l'émergence d'un nouveau paradigme pour la modélisation des systèmes complexes. Malgré la popularité des réseaux de neurones, le fer de lance de ces modélisations reste malgré tout formé par des modèles dits *linéaires* dont le plus connu est la décomposition en composantes principales (PCA). En dynamique des fluides, l'introduction de ces modèles linéaires (aussi appelés décompositions modales) remontent aux travaux précurseurs de Lumley sur la *proper orthogonal decomposition* (POD) à la fin des années 1960. De nombreuses autres techniques de décomposition modale ont été proposées depuis dont les plus connues sont l'estimation stochastique (Adrian, 1992), la décomposition en modes dynamique (Schmid, 2010) ou la *spectral proper orthogonal decomposition* (Town, 2018).

En reformulant l'ensemble de ces méthodes dans le cadre mathématique plus général des *régressions linéaires multivariées à contrainte de rang*, le présent axe de recherche cherche à proposer un cadre théorique unifié permettant d'étudier les propriétés d'approximation et de convergence/robustesse statistique de ces différents modèles basés sur la donnée. Une telle unification est présentée sur la figure 20 pour les méthodes POD, d'estimation stochastique et DMD. Bien que chacune de ces méthodes ait un objectif différent (i.e. la POD cherche à caractériser les statistiques d'ordre 2, l'estimation stochastique à faire le lien entre des mesures ponctuelles issues de capteurs et le vecteur d'état du système tandis que la DMD approxime le lien causal entre \mathbf{x}_k et \mathbf{x}_{k+1}), elles apparaissent toutes comme un cas particulier d'un problème d'optimisation plus général. Des résultats similaires ont été obtenus concernant la *spectral proper orthogonal decomposition* ainsi que l'estimation stochastique dans l'espace spectral. Enfin, des avancées encourageantes concernant la reformulation dans ce cadre des méthodes BPOD et ERA pour l'identification de systèmes entrées-sorties pour le problème du contrôle optimal en boucle fermée ont été obtenues et sont en cours de finalisation.

Ce cadre plus général permet notamment de donner de solides bases théoriques aux liens jusqu'ici pressentis entre ces différentes méthodes et est développé étroitement avec le précédent axe de recherche sur l'identification de système. Par ailleurs, une telle unification des modèles linéaires basés sur les données trouve des applications bien au-delà de la dynamique des fluides, notamment en traitement de l'image et en optique non-linéaire grâce aux travaux connexes de J. N. Kutz.

Publications et communications :

- ¹ **J.-Ch. Loiseau**, S. L. Brunton and J. N. Kutz. Toward a unifying framework for data-driven linear modeling. En cours de rédaction.

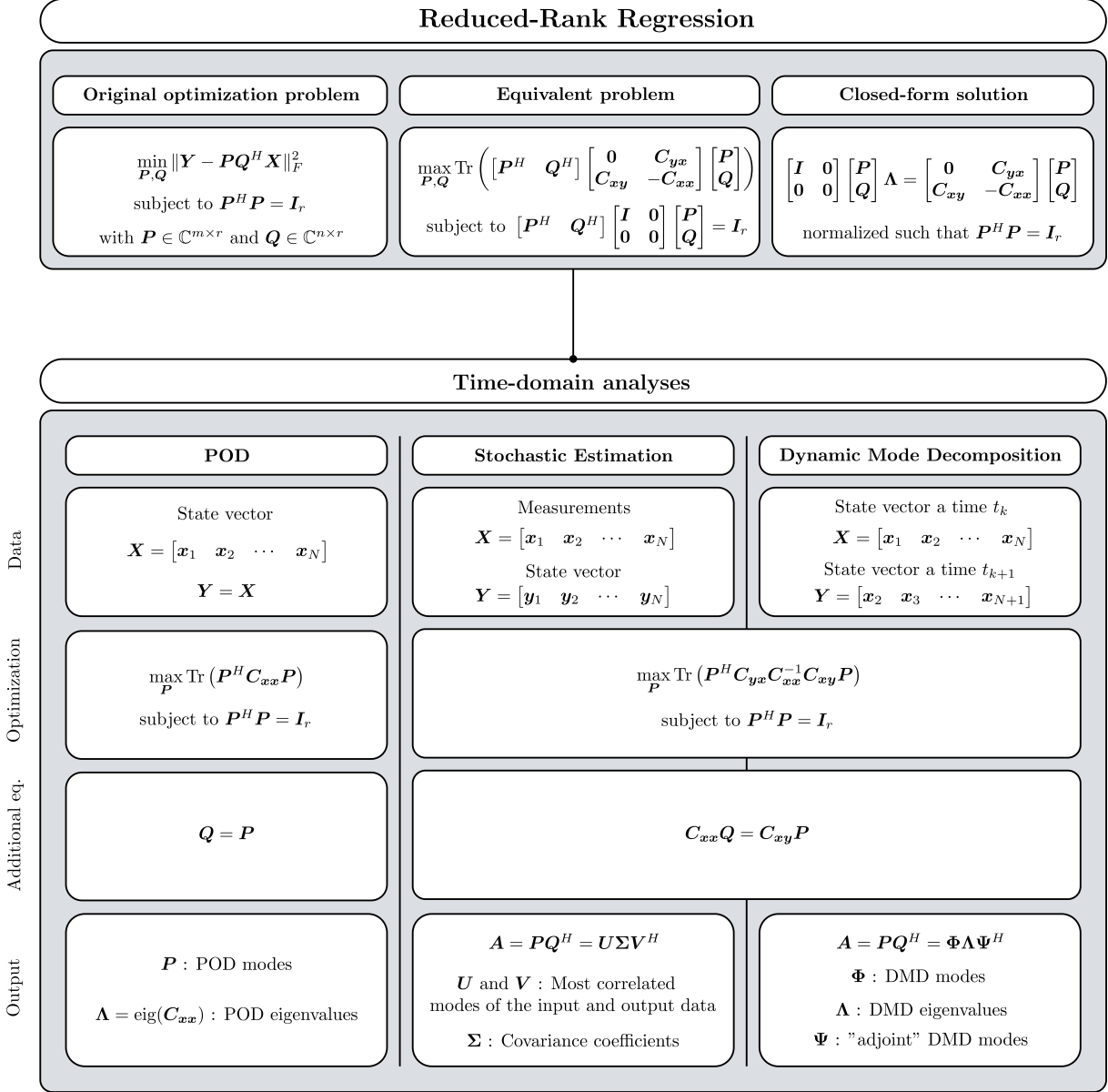


FIGURE 20 – Unification des méthodes POD, d'estimation stochastique et DMD dans le cadre des régressions linéaires multivariées à contrainte de rang.

Quatrième partie

**Instabilités, Transition & Contrôle
(ITC)**

Comparaison des schémas LBM aux schémas Vortex-Method

Simon MARIÉ

Collaborations : Chloé Mimeau, Iraj Mortazavi (Laboratoire de Modélisation Mathématique et Numérique)

Les méthodes vortex et les méthodes LBM incompressibles sont des méthodes qui s'écartent toutes les deux des méthodes standard basée sur Navier-Stokes. D'abord, elles opèrent toutes les deux dans un espace qui n'est pas complètement macroscopique, et peuvent partager dans certains cas des stencils identiques. En revanche, la construction hétérogène des méthodes vortex rend leur étude globale particulièrement difficile en particulier dans le cadre des approches linéarisées. Dès lors, il devient intéressant de pouvoir comparer les caractéristiques relatives de ces deux méthodes afin de mieux comprendre leurs comportements et de mieux les situer dans le paysage numérique. Dans le cadre de cette collaboration avec le laboratoire M2N, les méthodes Vortex avec noyau de remaillage ont été étudiées et comparées à une méthode LBM incompressible standard de type MRT sur des cas tests 3D bien documentés. Les résultats montrent que la partie lagrangienne des méthodes vortex leur confère des propriétés dispersives plus intéressante en particulier pour les faibles résolutions. De plus pour les faibles résolutions il apparaît que les méthodes VM présentent une sous-dissipation qui rend leur convergence atypique par rapport aux comportements observés en LBM et en Navier-Stokes (Cf Fig.21). Enfin, les simulations sur un cube 3D montrent des résultats similaires malgré l'importante sensibilité du cas test aux perturbations apportés par les différences de traitement des conditions de paroi dans les deux méthodes.

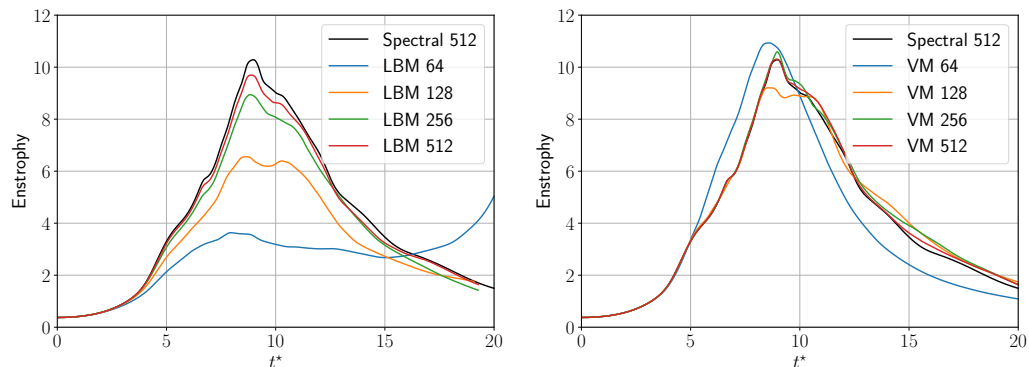


FIGURE 21 – Evolution temporelle de l'enstrophy du Taylor-Green Vortex. A gauche LBM, a droite VM.

Publications et communications :

- ¹ C. Mimeau , S. Marié , I. Mortazavi : "A comparison of semi-Lagrangian Vortex method and Lattice Boltzmann method for incompressible flows", Computers & Fluids, 2021 Vol 224.

Réceptivité linéaire d'un sillage tourbillonnaire

Jean-Christophe ROBINET

Collaborations : Tobias Bölle (PhD), Vincent Brion & Denis Sipp (ONERA/DAAA)

Ce présent travail étudie le processus d'excitation d'un tourbillon de sillage par lequel les perturbations extérieures sont converties en perturbations au coeur du tourbillon. Ce problème de réceptivité est modélisé en termes de *resolvent* dans l'espace fréquentiel comme réponse linéaire au forçage. Cette formulation de la réceptivité suggère que la non-normalité du résolvant est nécessaire pour permettre aux perturbations de *free-stream* d'exciter le coeur du tourbillon. En considérant une mesure locale (en fréquence) de la non-normalité, nous montrons que les tourbillons sont sélectivement non normaux en fréquence dans une bande de fréquence étroite de perturbations rétrogrades tandis que le reste de la plage est régi par un opérateur effectivement normal, ne contribuant ainsi pas à la réceptivité.

En effet, dans cette configuration, pour qu'il y ait réceptivité il est nécessaire que le forçage et la réponse soient spatialement disjoints. La décomposition canonique du resolvent révèle que les tourbillons sont les plus sensibles à des perturbations enroulés autour de la couche critique induisant des ondes de flexion sur le coeur du tourbillon. En considérant les tourbillons de Lamb - Oseen, Batchelor et Moore - Saffman comme modèles de référence, nous trouvons que la réceptivité issue d'un forçage *free-stream* est essentiellement générique et indépendante de la longueur d'onde axiale sur la plage considérée. Une interprétation stochastique des résultats pourrait être un modèle explicatif du phénomène de *meandering*.

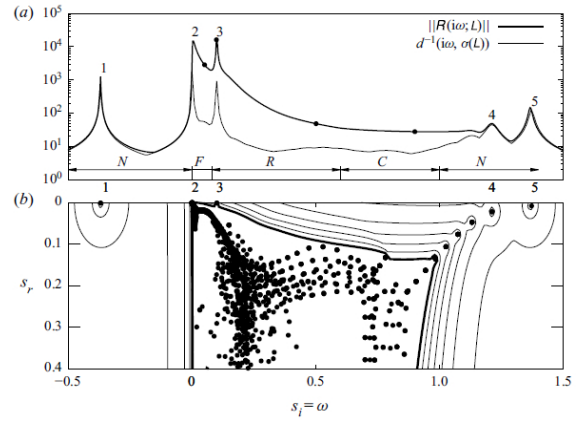


FIGURE 22 – Tourbillon Lamb - Oseen ($m = 1$, $\alpha = 1.55$, $R_\Lambda = 5000$). (a) : Comparaison et l'inverse de la distance d^{-1} et la norme du resolvent $\|R\|$ pour une fréquence réelle. (b) : spectre \bullet et pseudo-spectre dans le plan complexe s .

Publications et communications :

- ¹ T. Bölle, V. Brion, J.-C. Robinet, D. Sipp, L. Jacquin, On the linear receptivity of trailing vortices, J. Fluid Mech. (2021), vol. 908, A8.

Bifurcations autour d'une sphère en régime supersonique

Jean-Christophe ROBINET

Collaborations : A. SANSICA, Y. OHMACHI, A. HASHIMOTO (JAXA)

Ce travail s'intéresse aux deux premières bifurcations d'un écoulement autour d'une sphère pour un nombre de Mach de $M_\infty = 1.2$. L'étude de la stabilité globale est réalisée autour d'écoulements de base axisymétriques et montre que la première bifurcation est régulière avec pour nombre de Reynolds critique $Re_{cr}^{reg} = 650$ (Fig. 23-haut), passant d'une configuration axisymétrique à une symétrie planaire. La stabilité globale est ensuite effectuée autour des écoulements de base symétriques planaires, mettant en évidence une seconde bifurcation, de type Hopf, autour de $Re_{cr}^{Hopf} = 875$. Malgré certaines différences dues aux effets de compressibilités, les bifurcations en régime supersoniques présentent des caractéristiques remarquablement similaires à leurs homologues incompressibles, indiquant une dynamique d'usillage robuste sur une large gamme de vitesses d'écoulement.

Une nouvelle bifurcation pour des solutions d'écoulement de base à symétrie planaire constante se trouve au-dessus de $Re > 1000$, causée par un mode anti-symétrique et qui correspond à une rotation de 90° du mode dominant. Afin d'étudier la dynamique non-linéaire pour des nombres de Reynolds plus élevés, des simulations numériques directes (DNS) ont été réalisées ainsi qu'une décomposition modale dynamique (DMD). Les DNS et l'analyse DMD montrent que la dynamique jusqu'à $Re = 1300$ reste qualitativement identique à celle observée à l'issue de la bifurcation de Hopf et caractérisée par le développement d'un sillage instationnaire sous la forme de lâchés périodiques de structures cohérentes de type *hairpin*. La complexité accrue de cette dynamique de sillage à $Re = 1300$ (apparition d'une basse fréquence) n'est pas liée à de nouvelles bifurcations mais plutôt à des interactions non linéaires.

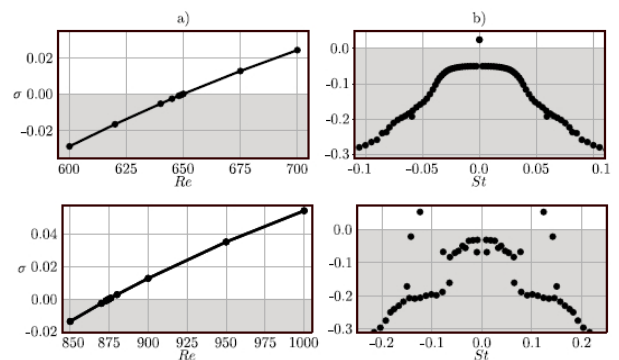


FIGURE 23 – Analyse de la stabilité globale par bifurcation régulière (haut : $Re = 700$) puis Hopf (bas : $Re = 1000$) : (a) évolution du nombre de Reynolds du taux de croissance du mode global non oscillatoire le moins amorti / le plus amplifié temporellement ; (b) eigenspectre dans le plan $St - \sigma$.

Publications et communications :

- ¹ A. Sansica, Y. Ohmichi, J.-Ch. Robinet, and A. Hashimoto, Laminar supersonic sphere wake unstable bifurcations, Phys. Fluids 32, 126107 (2020).

Meandering dynamics of streamwise vortex pairs in afterbody wakes

Jean-Christophe ROBINET

Collaborations : R. RANJAN, D. GAITONDE (Ohio State Univ.)

Le sillage en aval d'arrières-corps sont caractérisés par une paire de vortex contra-rotatifs. La dynamique instable de ces tourbillons est examinée avec un jeu de données issu de simulations aux grandes échelles (LES) pour une configuration géométrique constituée d'un cylindre de diamètre D dont le culot est tronqué d'un angle de 20° . L'accent est mis sur la compréhension de la dynamique sinueuse de la paire de tourbillons, y compris le déplacement du coeur du tourbillon, le contenu spectral et les mécanismes de stabilité. Les deux premiers modes classés en fonction de leur énergie obtenus par *proper orthogonal decomposition* (POD) révèlent une paire de tourbillons dipolaire alignés relativement perpendiculairement l'un à l'autre.

Les analyses de stabilité spatiale montrent des structures dipolaires instables associées à une paire de modes elliptiques $|m| = 1$. Cette instabilité elliptique à petites longueur d'onde domine le mouvement de *meandering*, la déformation due à la vitesse axiale jouant un rôle clé dans l'instabilité. La basse fréquence du mode instable (nombre de Strouhal $St_D = 0.3$) est cohérente avec l'analyse spectrale du *meandering* dans la LES. Le sillage est examiné en terme de dimensionalité; le nombre de modes requis reproduire l'écoulement avec un degré de précision donné diminue rapidement. Au-delà de deux diamètres en aval, seuls les deux premiers modes POD sont nécessaires pour reconstruire le mouvement de *meandering* dominant et la structure spatiale dans les données LES avec une perte de performance de 15%, tandis que dix modes sont nécessaire reproduire à 99% l'écoulement. Ce comportement d'ordre faible peut être prometteur dans la construction d'un modèle d'ordre réduit à des fins de contrôle.

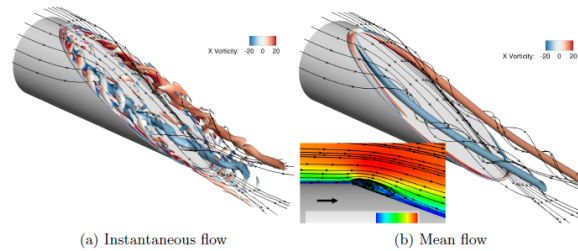


FIGURE 24 – Tourbillons longitudinaux derrière le cylindre tronqué. Une iso-surface de $Q = 30$ colorée par la vorticité ω_x . La zone de séparation moyenne près du sommet en amont est représentée dans l'encart (b).

Publications et communications :

- ¹ R. Ranjan, J.-C. Robinet, D. Gaitonde, Meandering dynamics of streamwise vortex pairs in afterbody wakes. J. Fluid Mech. (2021), submitted.

Instabilités globales d'écoulements tridimensionnels

Jean-Christophe LOISEAU & Jean-Christophe ROBINET

Collaborations : M. A. BUCCI (INRIA), S. CHERUBINI (Politecnico di Bari, Italie)

Cet axe de recherche, présent au laboratoire depuis une dizaine d'années, est au cœur des thèmes abordés par l'équipe *Instabilité, Transition et Contrôle* (ITC). En combinant développements algorithmiques et calculs hautes performances, il a permis à l'équipe ITC d'acquérir une expertise reconnue au niveau mondial dans l'étude des mécanismes d'instabilité et de transition à la turbulence des écoulements pleinement tridimensionnels, notamment en régime incompressible.

Parmi les différents écoulements étudiés, celui se développant le long d'une plaque plane en présence de rugosités de surface est celui ayant fait le sujet du plus d'études. Un tel écoulement, particulièrement pertinent dans un contexte aéronautique, présente en effet une transition à la turbulence non triviale. En absence de rugosité, la transition vers la turbulence d'un écoulement de couche limite est essentiellement piloté par le bruit environnemental. Ainsi, en fonction de ce bruit, la transition se fait soit via le scénario classique de développement des ondes de Tollmien-Schlichting soit via un scénario *bypass* caractérisé initialement par la croissance algébrique de stries de vitesse longitudinales puis par leur *breakdown*. De façon surprenante, la présence de rugosités de surface conduit à l'apparition de stries de vitesse longitudinales pouvant retarder la transition à la turbulence dans le premier scénario. Néanmoins, si les rugosités ou le nombre de Reynolds de l'écoulement excède une valeur critique, alors la transition se fait directement en aval des rugosités comme présenté sur la figure 25. Les analyses conduites par les membres d'ITC ont permis d'expliquer cette transition induite par les rugosités grâce à un mécanisme d'instabilité global prenant naissance dans la zone d'écoulement décollé se développant juste en aval des rugosités. Ces analyses ainsi que les accords obtenus entre les prédictions et les observations ont alors permis de justifier théoriquement les divers critères empiriques proposés depuis les années 1960 dans la littérature.

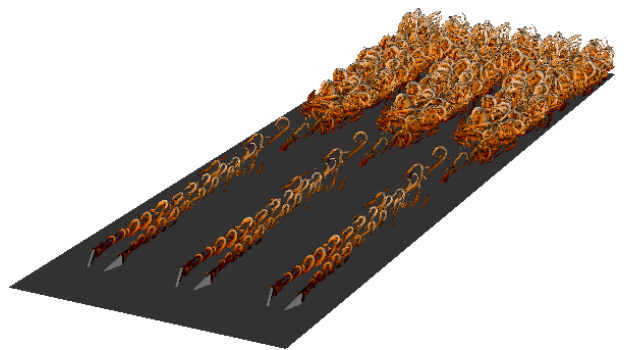


FIGURE 25 – Visualisation λ_2 des tourbillons générés dans le sillage d'un agencement périodique de *micro-vortex generators*. Thèse de M. A. Bucci soutenu au laboratoire en 2017.

Publications et communications :

- ¹ J.-Ch. Loiseau, M. A. Bucci, S. Cherubini and J.-Ch. Robinet. Time-stepping and Krylov methods for large-scale instability problems. Computational modelling of bifurcations and instabilities in fluid dynamics. Invited chapter. pp. 33-73, Springer Cham, 2019.
- ² M. A. Bucci *et al.* Roughness-induced transition by quasi-resonance of a varicose global mode. J. Fluid Mech., vol. 936, pp. 167-191, 2018.

Instabilités secondaires et écoulements périodiques

Jean-Christophe LOISEAU & Jean-Christophe ROBINET

Collaborations : R. Frantz (PhD.)

Cette thématique, en continuité directe avec la précédente, est développée au sein du laboratoire depuis 2018 dans le cadre de la thèse de doctorat de R. Frantz (contrat ministériel) et s'intéresse aux mécanismes d'instabilité et de transition au sein d'écoulements pour lesquels l'état de base présente une dynamique périodique en temps. De tels écoulements peuvent résulter d'une bifurcation primaire (e.g. dynamique de type *oscillateur auto-entretenu*) ou bien d'un forçage extérieur (e.g. *oscillateur forcé harmoniquement*) comme dans le cas des actuateurs à jet pulsé dans des perspectives de contrôle.

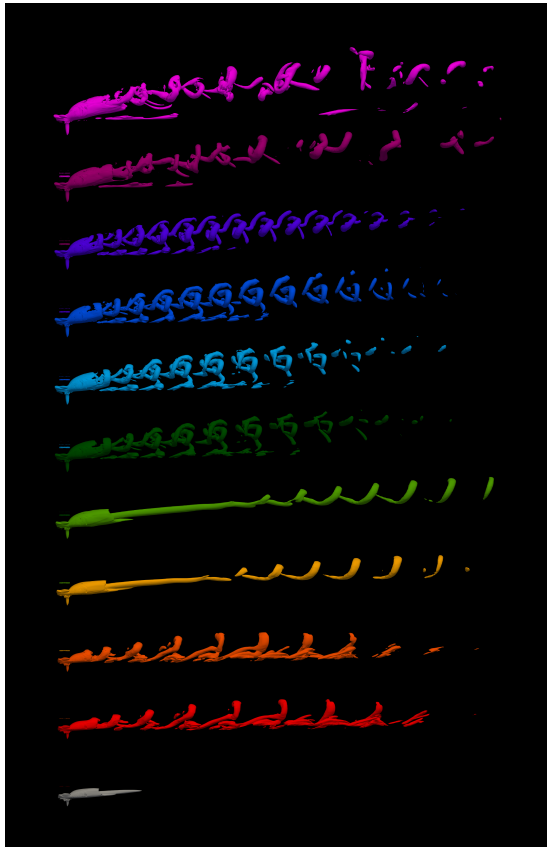


FIGURE 26 – Visualisation λ_2 des tourbillons dans le sillage d'un jet pénétrant une couche limite. Le rapport de vitesse entre le jet et la couche augmente du bas vers le haut.

applicatifs évidents tels que celui présenté sur la figure ci-contre ou bien celui induit par un jet pulsé, i.e. un type d'actuateur régulièrement utilisé dans des optiques de contrôle et de réduction de la traînée en aérodynamique.

A titre d'exemple, la figure ci-contre illustre l'évolution des tourbillons se développant dans le sillage d'un jet pénétrant une couche limite pour divers rapports de vitesse. Au fur et à mesure que le rapport de vitesse entre le jet et la couche limite incidente augmente, la typologie et la dynamique des tourbillons dans le sillage évolue, passant d'une absence de tourbillon à faible rapport à un lâcher périodique pour des rapports intermédiaires. Lorsque ce rapport augmente encore, le lâcher perd sa dynamique périodique et l'écoulement transitionne alors vers un comportement chaotique réminiscent de la turbulence. C'est afin de mieux comprendre ce changement de dynamique que l'équipe ITC poursuit les développements algorithmiques initiés dans le précédent axe de recherche afin de les adapter à des états de base périodiques en temps. Elle s'inspire notamment des outils classiquement utilisés en théorie des systèmes dynamiques et les adapte au cas particulier de la dynamique des fluides en les implémentant dans des solveurs Navier-Stokes hautes performances tels que Nek5000.

Tout comme pour la thématique précédente, une attention particulière est portée à l'étude d'écoulements pleinement tri-dimensionnels qui, bien que simplifiés, présentent des intérêts ap-

Transition sous-critique dans un canal plan : perturbation optimale non linéaire

Jean-Christophe ROBINET, Enza PARENTE (doctorante/Politecnico di Bari)
 Collaborations : S. CHERUBINI (Politecnico di Bari)

La transition vers la turbulence d'un écoulement dans deux plaques planes parallèles séparées d'une distance de $2h$ et infinie dans les autres directions spatiales est une question ancienne et très étudiée depuis plus d'un siècle. La stabilité linéaire de l'écoulement montre que celui-ci devient asymptotiquement linéairement instable pour $Re_h > 5772.2$. Cependant, la transition vers un écoulement turbulent pleinement développé est expérimentalement observée pour un $Re > 2700$. En dessous de cette valeur ($600 \lesssim Re \lesssim 2700$) l'état turbulent est localisé sous la forme de bandes obliques immergées dans un écoulement laminaire. Ce travail se situe dans ce régime. Il s'agit dans un premier temps de calculer la perturbation optimale non linéaire pour un horizon temporel T donné et une énergie cinétique initialz E_0 minimale permettant la transition vers la turbulence dans un domaine de grande dimension ($L_x \times L_y \times L_z = 250 \times 2 \times 125$).

La perturbation optimale initiale est fortement localisée spatialement et présente toutes les caractéristiques d'un spot (Fig. 27-(a)). La perturbation optimale pour un temps T de l'ordre du temps de retournement d'un tourbillon (le mécanisme de Orr est dominant), $T = 10$, reste sous la forme d'un spot bien localisé mais sa complexité spatiale et temporelle augmente (Fig. 27-(b)).

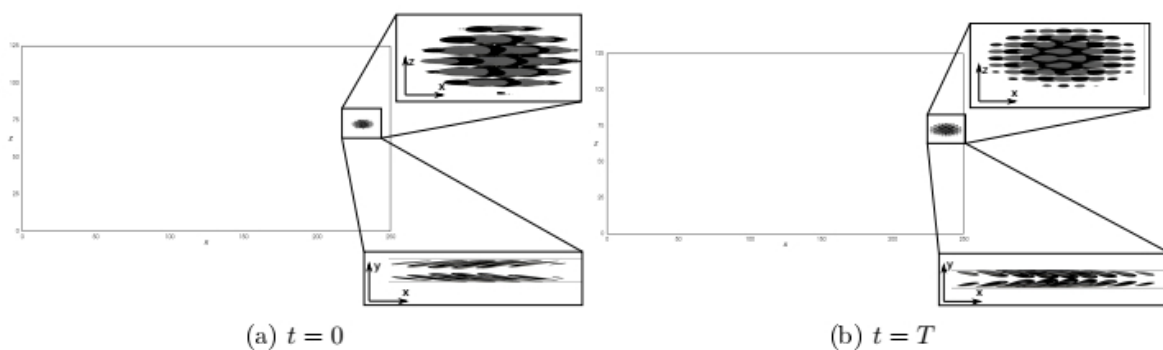


FIGURE 27 – Perturbation optimale non linéaire pour $Re = 1150$, $U_{bulk} = 3/2$, $T = 10$ and $E_0 = 1.1 \times 10^{-7}$ à (a) $t = 0$ et (b) $t = T$: iso-surface de la vitesse longitudinale (gris clair et noir pour respectivement les valeurs positives et négatives, $u = \pm 0 : 003$ (a) and $u = \pm 0 : 02$ (b)).

Lorsque l'on injecte cette perturbation dans une DNS, l'évolution de celle-ci pour des temps jusqu'à $t = 3000$ montre l'apparition progressive des bandes de turbulence issues du spot qui a progressivement transitionné. la présence du spot entraîne la création de tourbillons bi- ou quadri-polaires dans la zone laminaire. Ces tourbillons interagissent à leur tour avec le spot qui le déforme latéralement jusqu'à créer des bandes turbulentes obliques qui à leurs tours modifient la dynamique à grande échelle qui crée ensuite de nouvelles bandes,...

Transition to turbulence over superhydrophobic surfaces

Jean-Christophe ROBINET, Antoine JOUIN (doctorant/Politecnico di Bari)
Collaborations : S. CHERUBINI (Politecnico di Bari)

Les surfaces superhydrophobes sont des surfaces texturées composées d'une couche de gaz piégée par des rugosités microscopiques réparties au niveau de la paroi. De telles surfaces présentent des propriétés intéressantes telles qu'une réduction de la traînée turbulente ou un retard dans la transition vers la turbulence.

Ce travail se concentre sur ce dernier aspect pour les rugosités de riblet superhydrophobes orientées comme dans Pralits et al. 2017. La surface est modélisée avec un ensemble de conditions aux limites effectives. La technique d'homogénéisation est adaptée de celle pour les surfaces rugueuses décrite dans Zampogna et al. (2019) et Bottaro & Naqvi 2020. Les conditions aux limites effectives donnent un écoulement de base de la forme $\mathbf{U} = [U(y); 0; W]^T$ sur lequel une analyse de stabilité modale et non modale est réalisée. Le théorème de Squire n'est plus valide et une forte asymétrie de la courbe neutre autour de l'axe $\beta = 0$ peut être observée sur la figure 28. La croissance transitoire est également affectée : le gain maximum est obtenu pour un α petit mais non nul et pour $\beta < 0$. Les perturbations

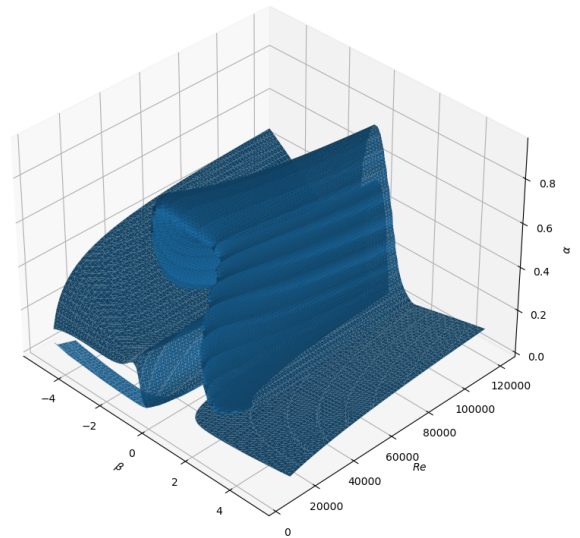


FIGURE 28 – Courbe neutre 3D pour une taille de rugosité $\varepsilon = 0.03$ et une orientation de riblet $\theta = 45^\circ$.

initiales optimales sont toujours composées de vortex contrarotatifs, mais les stries dans la composante de vitesse dans le sens du courant sont maintenant obliques. La transition vers la turbulence est étudiée par simulation numérique directe (DNS). La transition pour les deux types de mode à $Re = 5000$ est considérée pour étudier l'influence de l'orientation des riblets dans le délai de transition. Pour les petites longueurs de glissement, les structures cohérentes sont similaires à celles trouvées dans l'écoulement plan de Poiseuille. Les épingles à cheveux présentent une asymétrie et les deux jambes sont étirées dans le sens du courant. Pour des longueurs de glissement plus importantes, le scénario de transition est radicalement différent : les mécanismes modaux produisent des stries (modulations de vitesse alignées dans le sens des courants) près des parois et l'instabilité secondaire de ces stries conduit à la rupture turbulente de l'écoulement.

Cinquième partie

Publications

Publications - Communications

— ACL

- ¹ X. Gloerfelt, J.-C. Robinet, L. Sciacovelli, P. Cinnella, F. Grasso. Dense gas effects on compressible boundary layer stability, *Journal of Fluids Mechanics* - 2020 - Vol. 893 - pp. A19.
- ² F. Picella, J.-C. Robinet, S. Cherubini. On the influence of the modelling of superhydrophobic surfaces on laminar-turbulent transition. *Journal of Fluids Mechanics* - 2020 - Vol. 901 - pp. A15
- ³ E. Parente, J.-C. Robinet, P. De Palma, S. Cherubini. Modal and non-modal stability of a stably-stratified boundary layer flow. *Physical Review Fluids* - 2020 - Vol. 5 - Issue 11 - pp. 113901
- ⁴ S. Cherubini, F. Picella, J.-C. Robinet. Variational Nonlinear Optimization in Fluid Dynamics : The Case of a Channel Flow with Superhydrophobic Walls. *Mathematics* - 2021 - Vol. 9, 53
- ⁵ T. Bölle, V. Brion, J.-C. Robinet, D. Sipp, L. Jacquin, On the linear receptivity of trailing vortices, *J. Fluid Mech.* (2021), vol. 908, A8.
- ⁶ A. Sansica, Y. Ohmichi, J.-Ch. Robinet, and A. Hashimoto, Laminar supersonic sphere wake unstable bifurcations, *Phys. Fluids* 32, 126107 (2020).
- ⁷ J.-Ch. Loiseau. Data-driven modeling of the chaotic thermal convection in an annular thermosyphon. *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 34(4), pp. 339-365 (2020).
- ⁸ B. de Silva, K. Champion, M. Quade, J.-Ch. Loiseau, J. N. Kutz and S. L. Brunton. PySINDy : a Python package for the sparse identification of nonlinear dynamical systems from data. *J. Open Source Softw.*, 5(49), 2104 (2020).
- ⁹ J.-Ch. Loiseau, B. R. Noack and S. L. Brunton. Sparse-reduced-order modelling : sensor-based dynamcis to full-state estimation. *J. Fluid Mech.*, vol. 844, pp. 459–490 (2020).
- ¹⁰ N. Tabchouri, M. Bouqot, H. Hermand, O. Benoit, J.-Ch. Loiseau, S. Dokmak, B. Aussilhou, S. Gaujoux, O. Turrini, J.-R. Delpero and A. Sauvanet. A novel pancreatic fistula risk score including preoperative radiation therapy in pancreatic cancer patients. *J. Gastrointest. Surg.* (2020).
- ¹¹ C. Junqueira-Junior, J. L. F. Azevedo, J. Panetta, W. R. Wolf and S. Yamouni. On the scalability of CFD tool for supersonic jet flow configurations. *Parallel Computing*, 2020, vol. 93, p. 102620.
- ¹² C. Junqueira-Junior, J. L. F. Azevedo, J. Panetta, W. R. Wolf, and S. Yamouni, S. Strong scaling of numerical solver for supersonic jet flow configurations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41(12), 1-14.
- ¹³ C. Mimeau , S. Marié , I. Mortazavi : "A comparison of semi-Lagrangian Vortex method and Lattice Boltzmann method for incompressible flows", *Computers & Fluids*, 2021 Vol 224 (104946).

— **C-ACTI**¹— **C-ACTN**¹— **C-COM**

¹ N. Deng, L. Pastur, G. C. Maceda, L. Lusseyran, J.-Ch. Loiseau, M. Morzynski and B. R. Noack. Modèle de force basé sur les dynamiques transitoires de sillage dans le pinball fluide. 23^{ème} Rencontre du Non-linéaire, Paris, France, 2020.

² S. L. Brunton, J. L. Callahan, K. Champion, J. N. Kutz and J.-Ch. Loiseau. Data-driven discovery of dynamics and coordinates in fluids. SIAM Conference on mathematics of data science (MDS20), Cincinnati, USA, May-June 2020.

— **C-INV**

¹ J.-Ch. Loiseau. Dimensionality reduction and system identification for physical systems. LMFL Webminar series, November 2020.

² J.-Ch. Loiseau. Incorporating a priori physical constraints in the sparse identification of nonlinear dynamical systems. Workshop *Learning sparse models : theory and applications from system identification to neural networks*. Online, September 2020.

³ J.-Ch. Loiseau. Dimensionality reduction and system identification for physical systems. Invited seminar @ INRIA, March 2020.