

# Évaluation de l'activité des chercheurs et des chercheuses de la vague B – session d'automne 2024

Lionel Agostini – Charge de Recherche – CNRS

2024

## Contents

<b>1 Curriculum Vitae</b>	<b>1</b>
<b>2 profil scientifique</b>	<b>9</b>
<b>3 Rapport d'activité</b>	<b>10</b>
3.1 Raisonnement et Objectifs de mes Activités de Recherche	10
3.2 Originalité et Nouveauté	11
3.3 Activités de recherche en cours	19
3.4 participations à des contrats de recherche	26
3.5 Mobilités	26
3.6 Expertise & Intégration	27
3.7 Publications	28
<b>4 Encadrement, animation et management de la recherche</b>	<b>31</b>
4.1 Thèses de doctorat : Lou Guerin (2022-2025)	31
4.2 Thèses de doctorat : Niccolò Tonioni (2023-2026)	31
4.3 Résumé des activités d'encadrement à l'ENSMA	32
4.4 Participation à la diffusion de la recherche	32
<b>5 Transfert technologique, relations industrielles et valorisation</b>	<b>33</b>
<b>6 Encadrement, animation et management de la recherche</b>	<b>34</b>
6.1 Participation à des projets français, européens ou internationaux	34
<b>7 autres responsabilités</b>	<b>37</b>
<b>8 Projet programmé pour 2025</b>	<b>38</b>
<b>9 Observations</b>	<b>43</b>
9.1 HDR	43
9.2 Appels à projets auxquels j'ai répondu	43

# Dr. Lionel Agostini

## État Civil

**Lionel Marc Roger Agostini**, né à Aubagne (13) le 22 février 1985

## Titres universitaires

- 2008–2011 **Thèse**, *Mécanique des fluides*, IUSTI, Équipe Supersonique, Université d'Aix-Marseille University, Marseille, France
- 2007–2008 **Master recherche**, *Dynamique des fluides, Aéroacoustique*, Université Paris Sud , Orsay, France
- 2006–2007 **Master 1**, *Mécanique Physique*, Université Paris Sud , Orsay
- 2005–2006 **Licence**, *Physique*, Université d'Aix-Marseille , Marseille, France

## Fonctions

Depuis Oct 2020 **Chargé de Recherche CNRS en Section 10**, *Institut Pprime - Université de Poitiers*, Département Fluides, Thermique et Combustion, équipe CURIOSITY

**Autres fonctions :**

- membre de la CES 60
- Membre de la cellule de communication de Pprime

## Précédent postes dans la recherche

- 2019-2020 **Research associate**, *Imperial College London, Department of Aeronautics*, London, U.K., "High-Fidelity LES/DNS Data for Innovative Turbulence Models"  
supervisor : Prof. Peter Vincent - funding : EU project - [HIFI-TURB](#)
- 2016-2019 **Research associate**, *Imperial College London, Department of Aeronautics*, London, U.K., "near-wall turbulence and drag reduction at high Reynolds number"  
supervisor : Prof. Michael Leschziner - funding : EU-China project [DRAGY](#)
- 2014-2017 **Research associate**, *Ohio State University, Department of Aeronautics*, Columbus, USA., "near-wall turbulence, shockwave /boundary layer interaction, jet"  
supervisor : Prof. Datta Gaitonde - funding : US Airforce
- 2013-2014 **Research associate**, *Imperial College London, Department of Aeronautics*, London, U.K., "Control of Görtler vortices"  
supervisor : Dr. George Papadakis - funding : EPSRC
- 2012-2013 **Research associate**, *Imperial College London, Department of Aeronautics*, London, U.K., "Drag reduction in turbulent channel flow by oscillatory spanwise motion"  
supervisor : Prof. Michael Leschziner - funding : EPSRC
- 2011-2012 **Research associate**, *IUSTI, Aix-Marseille University*, Marseille, France, "Unsteadiness in separated supersonic flow"  
supervisor : Prof. Jean-Paul Dussauge - funding : State grant

## Thèmes de recherche :

Actuellement, je suis en poste en tant que chargé de recherche à l'Institut Pprime de l'Université de Poitiers. Mon expertise s'est construite sur plus de quinze ans d'expérience en mécanique des fluides, avec une attention particulière portée aux problématiques associées à la présence et au développement de couches limites. Mes recherches visent principalement à révéler les principes physiques et à approfondir nos connaissances afin de fournir une modélisation plus précise de la dynamique des couches limites turbulentes et des stratégies de contrôle innovantes des écoulements que cela soit pour la réduction des frottements ou les transferts thermiques.

Suite à ma thèse sur les couches limites compressibles décollées à l'Université d'Aix-Marseille, j'ai poursuivi mes recherches à l'étranger, notamment à l'Imperial College de Londres et à l'Ohio State University aux USA. Cette expérience internationale m'a donné l'opportunité de traiter une plus grande diversité de problématiques, notamment via l'encadrement d'étudiants en master et doctorat. J'ai travaillé, par exemple, sur la caractérisation des perturbations induites par des jets et sur l'interaction entre un vortex et une aile. Dans ce contexte, j'ai conçu et mis en pratique différentes procédures d'exploration de données, fondées sur des algorithmes statistiques et des méthodes guidées par les données. Ceci m'a permis d'analyser des bases de données volumineuses et d'en extraire des informations significatives. La majorité de mes recherches ont été rendues possibles par l'emploi de simulations numériques, en particulier les types DNS et LES.

## Domaines de recherche

- Mécanique des fluides
- Turbulence de proche paroi
- Écoulement compressible/incompressible
- Méthode d'apprentissage automatique
- Contrôle
- Modèle réduit
- Réduction de traînée
- Transfert thermique
- Écoulements décollés instationnaires
- Simulation numérique

Boundary layer theory :

- 2022 "Auto-encoder-assisted analysis of amplitude and wavelength modulation of near-wall turbulence by outer large-scale structures in channel flow at friction Reynolds number of 5200",  
*Physics of Fluids*, 34,  
L. Agostini & M. A. Leschziner .
- 2019 "On the departure of near-wall turbulence from the quasi-steady state",  
*Journal of Fluid Mechanics*, 871,  
L. Agostini & M. A. Leschziner .
- 2019 "The connection between the spectrum of turbulent scales and the skin-friction statistics in channel flow at  $Re_\tau \approx 1000$ ",  
*Journal of Fluid Mechanics*, 871,  
L. Agostini & M. A. Leschziner .
- 2017 "Multi-scale interactions in a compressible boundary layer",  
*Journal of Turbulence*, 18(8) 760,  
L. Agostini, M. A. Leschziner, J Poggie, NJ Bisek & D. Gaitonde .
- 2017 "Spectral analysis of near-wall turbulence in channel flow at  $Re_\tau = 4200$  with emphasis on the attached-eddy hypothesis",  
*Physical Review Fluids*, 2(1) :014603,  
L. Agostini & M. A. Leschziner .
- 2016 "On the validity of the quasi-steady-turbulence hypothesis in representing the effects of large scales on small scales in boundary layers",  
*Physics of fluids*, 28(4) :045102,  
L. Agostini & M. A. Leschziner .
- 2016 "Skewness-induced asymmetric modulation of small-scale turbulence by large-scale structures",  
*Physics of fluids*, 28(1) :015110,  
L. Agostini, M. A. Leschziner & D. Gaitonde.
- 2016 "Predicting the response of small-scale near-wall turbulence to large-scale outer motions",  
*Physics of fluids*, 28(1) :015107,  
L. Agostini & M. A. Leschziner.
- 2014 "On the influence of outer large-scale structures on near-wall turbulence in channel flow",  
*Physics of fluids*, 26(7) :075107,  
L. Agostini & M. A. Leschziner.

Drag reduction :

- 2021 "Statistical analysis of outer large-scale/inner-layer interactions in channel flow subjected to oscillatory drag-reducing wall motion using a multiple-variable joint PDF methodology",  
*Journal of Fluid Mechanics*, 923,  
L. Agostini & M. A. Leschziner .
- 2018 "The impact of footprints of large-scale outer structures on the near-wall layer in the presence of drag-reducing spanwise wall motion",  
*Journal of Flow, Turbulence and Combustion*, 1–25,  
L. Agostini & M. A. Leschziner .

- 2014 "The turbulence vorticity as a window to the physics of friction-drag reduction by oscillatory wall motion ",  
[International Journal of Heat and Fluid Flow](#), 09/2014(51),  
**L. Agostini**, E. Toubert, M. A. Leschziner.
- 2014 "Spanwise oscillatory wall motion in channel flow: Drag-reduction mechanisms inferred from DNS-predicted phase-wise property variations at  $Re_\tau = 1000$  ",  
[Journal of Fluid Mechanics](#), 743 :606,  
**L. Agostini**, E. Toubert, M. A. Leschziner.

#### Heat transfer :

- 2024 "Preferential Enhancement of Convective Heat Transfer Over Drag Via Near-Wall Turbulence Manipulation Using Spanwise Wall Oscillations ",  
[submitted to IJHFF](#) ,  
 L. Guérin, C. Flageul, L. Cordier, S. Grieu, & **L. Agostini** .
- 2024 "Breaking the Reynolds Analogy: Decoupling Turbulent Heat and Momentum Transport via Spanwise Wall Oscillation in Wall-Bounded Flow ",  
[arXiv preprint](#) , 2312.13002,  
 L. Guérin, C. Flageul, L. Cordier, S. Grieu, & **L. Agostini** .

#### Machine learning :

- 2024 "Catching up with missing particles",  
[Nature Machine Intelligence](#), 6,  
 S. Atis & **L. Agostini** .
- 2020 "Exploration and prediction of fluid dynamical systems using Auto-Encoder technology",  
[Physics of fluids](#), 32(6) :067103,  
**L. Agostini** .

#### Shock-wave and boundary layer interaction :

- 2020 "Dynamics of separation bubble dilation and collapse in shock wave/turbulent boundary layer interactions",  
[Shock Waves](#), 30, 63–75.  
 M. Waïndim, **L. Agostini**, L. Larchevêque & D. Gaitonde
- 2015 "Mechanism of shock unsteadiness in separated shock/boundary-layer interactions ",  
[Physics of fluids](#), 27(12) :126103,  
**L. Agostini**, L. Larchevêque & P. Dupont .
- 2012 "Zones of influence and shock boundary layer interaction",  
[AIAA Journal](#), 50(6) :1377,  
**L. Agostini**, L. Larchevêque, P. Dupont, J.-F. Debiève & J.-P. Dussauge.
- 2012 "Numerical study of three-dimensional modulations in a shock-induced separation ",  
[Progress in Flight Physics](#), 3, pp157–168,  
**L. Agostini**, L. Larchevêque, E. Garnier & E. De Martel.
- 2011 "Numerical study of a shock - turbulent boundary layer interaction with incipient and complete separation",  
[International Journal of Engineering System Modeling and Simulation](#), 3(1/2) :46,  
**L. Agostini**, P. Dupont, L. Larchevêque & J.-P. Dussauge.

#### Supersonic jet :

- 2017 "Directivity and intermittency in the nearfield of a Mach 1.3 jet ",  
[International Journal of Aeroacoustics](#), 16(3) :135,  
 S. Unnikrishnan, D. Gaitonde & **L. Agostini** .

## Oral communication with peer-reviewed proceedings

- April 2024 **L. Guérin**, **C. Flageul**, **L. Cordier**, **S. Grieu**, **L. Agostini** & , "Breaking the Reynolds Analogy: Decoupling Turbulent Heat and Momentum Transport via Spanwise Wall Oscillation in Wall-Bounded Flow ", DLES , 14.  
Erlangen, Germany
- March 2024 **L. Guérin**, **C. Flageul**, **L. Cordier**, **S. Grieu**, **L. Agostini** & , "Breaking the Reynolds Analogy: Decoupling Turbulent Heat and Momentum Transport via Spanwise Wall Oscillation in Wall-Bounded Flow ", EUROMECH, COLLOQUIUM 631.  
Madrid, Spain
- April 2023 **L. Agostini** & **M. A. Leschziner** , "A predictive model for the response of near-wall turbulence to outer structures ", ETC 15.  
Budapest, Hungary
- July 2022 **L. Agostini** & **M. A. Leschziner** , "Analysis of large-scale/small-scale interactions in turbulent channel flow using Auto-Encoder combined with Multivariate-Pdf ", TSFP , 12.  
Osaka, Japan
- August 2018 **L. Agostini** & **M. A. Leschziner** , "Features of eddies populating the meso-layer in a wall-bounded flow", EUROMECH, COLLOQUIUM 598.  
London, UK
- September 2018 **L. Agostini** & **M. A. Leschziner** , "Controlling the influence of outer large-scale structures on wall friction ", ETMM 12.  
Montpellier, France
- January 2018 **A.T Mohan** & **L. Agostini** , "A statistical insight into the onset of deep dynamic stall using multivariate empirical mode decomposition", Proc. 56th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
Kissimmee, Florida, USA
- July 2017 **L. Agostini** & **M. A. Leschziner** , "Inferring the structural properties of eddies in the log layer from spectral statistics ", TSFP10.  
Chicago,, USA
- June 2016 **S. Sengupta**, **L. Agostini** & **D. Gaitonde** , "Effect of Asymmetric Nozzle Configuration on Jet Flow Characteristics ", Proc. 46th AIAA Fluid Dynamics Conference.  
Washington, D.C, USA
- January 2016 **L. Agostini**, **M. Leschziner**, **J. Poggie**, **N.J Bisek** & **D Gaitonde** , "Causal relationship between large outer structures and small-scale near-wall turbulence in a compressible boundary layer at Mach= 2.3", Proc. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
San Diego, California, USA
- January 2016 **A.T Mohan**, **L. Agostini**, **M.R Visbal** & **D. Gaitonde** , "A Preliminary Spectral Decomposition and Scale Separation Analysis of a High-Fidelity Dynamic Stall Dataset", Proc. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
San Diego, California, USA
- January 2016 **S. Unnikrishnan**, **L. Agostini** & **D. Gaitonde** , "Scale-specific Intermittency and Spatio-temporal Correlations in a Supersonic Jet ", Proc. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
San Diego, California, USA
- January 2016 **M. Waindim**, **L. Agostini**, **L. Larchêveque** & **D. Gaitonde** , "Conditional analysis of unsteadiness in shock boundary layer interactions ", Proc. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
San Diego, California, USA

- January 2016 **C.M Stack, D. Gaitonde, L. Agostini, M.G Berry, A.S Magstadt & M.N Glauser** , “Numerical Investigation of a Supersonic Multistream Jet with an Aft-Deck ”, Proc. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
San Diego, California, USA
- January 2016 **S. Sengupta, L. Agostini, S. Unnikrishnan & D. Gaitonde** , “Investigation of Rectangular Jet Issuing From a Varying Cross-Section Nozzle ”, Proc. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
San Diego, California, USA
- August 2015 **L. Agostini & M. Leschziner** , “Predicting the response of small-scale near-wall turbulence to large-scale outer motions ”, 15th ETC .  
Delft, Netherlands
- June 2015 **A.T Mohan, L. Agostini, D. Gaitonde & D.J Garmann**, “Statistical Analysis and Model Reduction of Surface Pressure in the Interaction of a Streamwise-Oriented Vortex with a Wing ”, Proc. 22nd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference.  
Dallas, Texas, USA
- June 2015 **S. Unnikrishnan, L. Agostini & D. Gaitonde** , “Analysis of Intermittency of Supersonic Jet Noise with Synchronized LES ”, Proc. 22nd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference.  
Dallas, Texas, USA
- September 2014 **L. Agostini, M. A. Leschziner**, “On the influence of outer large-scales structures on near-wall turbulence in channel flow ”, Proc. 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements.  
Marbella, Spain
- July 2014 **L. Lu, L. Agostini, P. Ricco, G. Papadakis**, “Optimal state feedback control of streaks and Görtler vortices induced by free-stream vortical disturbances ”, Proc. 10th UKACC International Conference on Control.  
Loughborough, UK
- August 2013 **L. Agostini, E. Toubert, M. A. Leschziner**, “Spanwise oscillatory wall motion in channel flow : drag-reduction mechanisms inferred from DNS-predicted phase-wise property variations at  $Re_\tau = 1000$ ”, Proc. International Symposium On Turbulence and Shear Flow Phenomena.  
Poitiers, France
- August 2013 **L. Agostini, L. Larchevêque , P. Dupont**, “Features of shock wave unsteadiness in shock wave boundary layer interaction”, Proc. International Symposium On Turbulence and Shear Flow Phenomena.  
Poitiers, France
- August 2012 **L. Agostini, L. Larchevêque , P. Dupont**, “Inviscid quasistatic modeling for unsteady shock reflection with separation”, Proc. 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics.  
Peking, China
- January 2011 **L. Agostini, L. Larchevêque , P. Dupont, J-F Debiève et J.-P. Dussauge**, “Zones of Influence and Shock Motion in a Shock Boundary Layer Interaction ”, Proc. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting.  
Orlando, USA
- June 2010 **L. Agostini, L. Larchevêque , P. Dupont et J.-P. Dussauge**, “Numerical study of a shock-turbulent boundary layer interaction with incipient separation”, Proc. 8th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements.  
Marseille, France
- March 2010 **L. Agostini, L.Larchevêque, P.Dupont et J.-P.Dussauge**, “Numerical study of shock-turbulent boundary layer interaction with incipient and complete separation”, Proc. 45th Symposium on Applied Aerodynamics.  
Marseille, France



- September 2009 F. Moisy, **L. Agostini**, **G. Tan**, “Structure functions and energy transfers in a decaying rotating turbulence experiment”, Proc. 12th Euromech European Turbulence Conference.  
Marburg, Germany
- August 2009 **L. Agostini**, L. Larchevêque , **P. Dupont** and **J.-P. Dussauge**, “Three-dimensional separation in shock/boundary layer interaction”, Proc. colloque Euromech LESTAC, Congrès Français de Mécanique.  
Marseille, France
- July 2009 **L. Agostini**, L. Larchevêque , **E. Garnier** et **E. De Martel**, “Numerical study of three-dimensional modulations in a shock-induced separation”, Proc. 3rd European Conference for Aerospace Sciences.  
Versailles, France

*All these contributions were oral presentations, they were made by the author whose name is underlined.*



## 2 profil scientifique

Chargé de recherche au CNRS en section 10 depuis octobre 2020, je suis actuellement rattaché à l'Institut Pprime. Mon parcours scientifique a débuté par une thèse à l'IUSTI (2008/2011), suivie de deux expériences marquantes à l'international en tant que chercheur associé à l'Ohio State University pendant 3 ans et à l'Imperial College London durant 7 années. Au fil de ces années, j'ai développé une expertise approfondie dans le domaine de la turbulence de proche paroi, en me focalisant à la fois sur les écoulements canoniques et les écoulements contrôlés. Mes travaux ont permis de mettre en lumière les mécanismes pilotant la dynamique de ces écoulements complexes, notamment à travers le développement de modèles conceptuels simples capturant l'essentiel de la physique sous-jacente. Une part significative de mes recherches a été consacrée à la réduction de traînée. Plus récemment, je me suis intéressé à la façon dont la turbulence de proche paroi peut être modifiée pour améliorer les transferts thermiques. Cette thématique est cruciale pour optimiser les performances des systèmes d'échange de chaleur dans de nombreuses applications industrielles.

Mon expérience de recherche s'est construite autour d'une large palette de problématiques, depuis les interactions choc/couche limite jusqu'aux perturbations générées par un jet, en passant par les interactions vortex/aile. Pour chacune de ces configurations, des analyses approfondies ont été menées afin d'en extraire les phénomènes physiques clés. En parallèle, j'ai développé et continue à enrichir un large spectre d'algorithmes statistiques pour extraire efficacement l'information de bases de données massives. Cette démarche est essentielle pour tirer pleinement parti des simulations numériques haute-fidélité et des mesures expérimentales sur lesquelles s'appuient mes travaux. Plus récemment, mon intérêt s'est également porté sur les algorithmes d'apprentissage automatique, que je cherche à combiner à mon expertise en turbulence. L'objectif est double : approfondir notre compréhension de la dynamique de ces écoulements d'une part, et proposer des stratégies de contrôle novatrices d'autre part. En soumettant les données issues de simulations et d'expériences à des analyses poussées, en m'appuyant notamment sur les outils statistiques et d'apprentissage automatique que je développe, je cherche à caractériser finement la physique des écoulements turbulents considérés.

Mon parcours allie une expertise en turbulence, forgée au fil d'une dizaine d'années passées au sein de différents laboratoires nationaux et étrangers renommés, à une volonté d'explorer des problématiques et des outils novateurs. Cette dualité est un moteur puissant pour développer une activité de recherche originale et impactante.

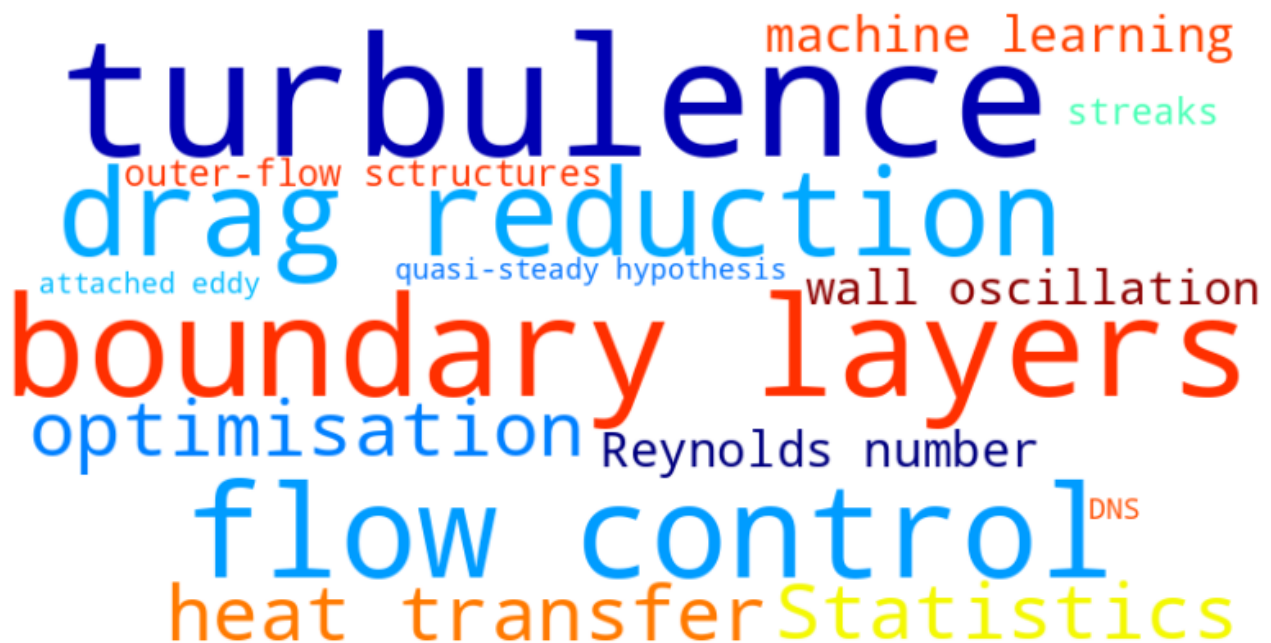


Figure 1: Word cloud representing the core themes and concepts of the author's research activities.

## 3 Rapport d'activité

### 3.1 Raisonnement et Objectifs de mes Activités de Recherche

La dynamique des fluides est une discipline scientifique qui joue un rôle central dans de nombreux phénomènes naturels et systèmes d'ingénierie. Elle gouverne la circulation atmosphérique et océanique de notre planète, influençant ainsi le climat et les conditions météorologiques. En météorologie, la dynamique des fluides est essentielle pour prévoir les schémas météorologiques et comprendre les phénomènes violents tels que les tornades et les ouragans. Dans le domaine médical, elle fournit des éclairages cruciaux sur l'écoulement sanguin cardiovasculaire, permettant de diagnostiquer et traiter les maladies cardiaques. Sur le plan de l'ingénierie, les principes de la dynamique des fluides sont fondamentaux pour concevoir et faire fonctionner une vaste gamme de machines et véhicules, comme les pompes, turbines, avions, voitures et bateaux. Les lois de l'aérodynamique et de l'hydrodynamique sous-tendent l'efficacité du transport aérien et maritime. La dynamique des fluides est également au cœur du secteur énergétique, en particulier pour le développement des éoliennes, des centrales hydroélectriques et d'autres technologies de production d'énergie. La dynamique des fluides imprègne notre quotidien. Elle permet d'améliorer les performances et l'efficacité d'une multitude de systèmes, de prédire des phénomènes naturels complexes, et de catalyser l'émergence de technologies innovantes. Comprendre et maîtriser les principes de la dynamique des fluides est donc crucial pour relever de nombreux défis scientifiques et d'ingénierie, avec des retombées potentielles considérables pour la société et l'environnement.

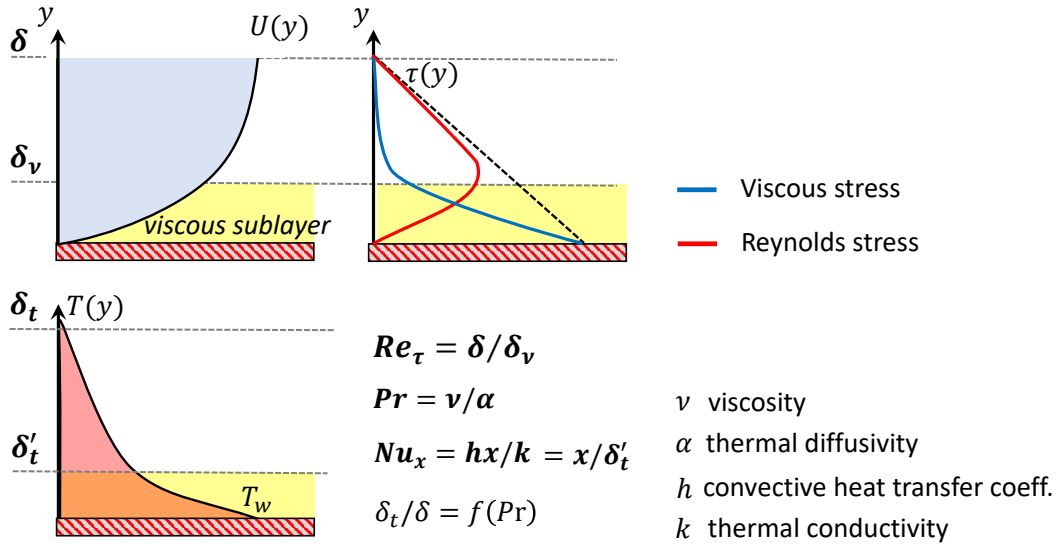
Mes travaux de recherche se focalisent sur l'étude des écoulements pariétaux, en mettant l'accent sur les structures turbulentes qui les composent et déterminent les performances des équipements industriels ainsi que la prédiction des écoulements environnementaux. Bien que fondamentalement chaotique, cet écoulement cisailé présente des structures cohérentes qui influencent fortement les processus de mélange de quantité de mouvement et, par conséquent, la traînée et les transferts thermiques. Plus la couche de cisaillement est intense, plus la dynamique est riche et complexe. La présence de ces structures génère une augmentation du mélange de quantité de mouvement et donc des frottements, pouvant dépasser les niveaux laminaires d'un facteur 10 à 100, selon le nombre de Reynolds. Le frottement impacte significativement l'efficacité d'une large gamme de dispositifs, notamment pour les corps autpropulsés et les écoulements en conduites. Face à l'urgence du changement climatique, réduire les émissions liées au transport, dont le frottement est une composante majeure, devient une nécessité impérieuse. Si diminuer le mélange de quantité de mouvement peut efficacement réduire la traînée, l'augmenter peut généralement améliorer les transferts thermiques. Atteindre une conception optimale pour les échangeurs de chaleur requiert donc un équilibre délicat entre traînée et transfert thermique. Améliorer leurs performances est un enjeu crucial pour réaliser des transferts d'énergie efficaces et rentables dans de nombreux systèmes d'ingénierie.

Motivé par l'urgente nécessité de lutter contre le changement climatique, mes travaux de recherche se concentrent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction de la pollution dans un large spectre d'applications. Cela englobe le transport des fluides, l'optimisation des performances des véhicules et les avancées dans le domaine des échangeurs de chaleur, qui jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs industriels ainsi que dans la conception et le développement de nouvelles technologies exploitant les énergies vertes. Dans ce contexte, mon principal objectif est d'approfondir notre compréhension de la turbulence pariétale. Je vise ainsi à développer des modèles d'ordre réduit qui permettront des prédictions plus précises et la mise au point de stratégies de contrôle robustes. Les résultats attendus comprennent une amélioration significative de l'efficacité des transferts d'énergie dans divers systèmes d'ingénierie, ouvrant la voie à un avenir plus durable caractérisé par une réduction des émissions et une utilisation optimisée des ressources. Plus précisément, en approfondissant la compréhension fondamentale de la turbulence pariétale et en introduisant des approches de contrôle innovantes, ces travaux devraient contribuer au développement de technologies plus propres et plus performantes pour la production d'énergie, le transport, les échanges thermiques et l'exploitation des énergies vertes.

Mon ambition à long terme est que les connaissances et les stratégies issues de ces recherches apportent une contribution significative à la lutte contre le changement climatique, en favorisant un développement technologique durable et une utilisation efficace de l'énergie. Dans cette perspective, je concentre, entre autre, mes efforts sur l'amélioration de la conception et du contrôle des échangeurs de chaleur, avec l'espoir de promouvoir l'émergence de solutions plus propres, plus efficaces et plus pérennes dans un large éventail d'industries.

## 3.2 L'originalité et la nouveauté de mes contributions à la recherche

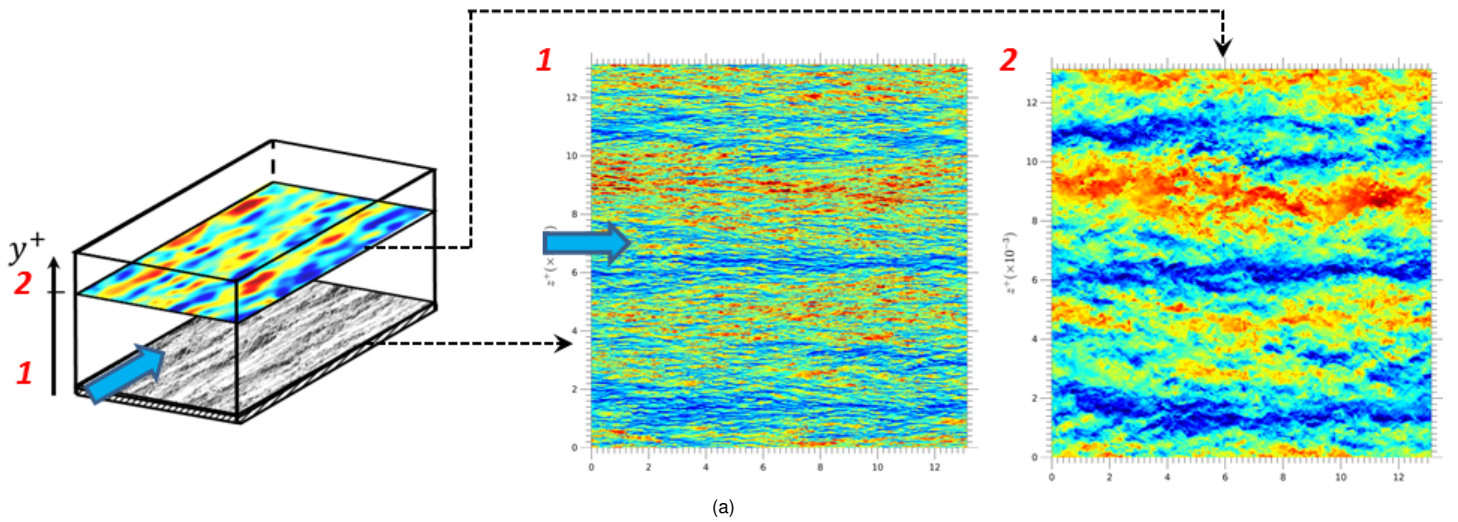
### 3.2.1 Couches limites de quantité de mouvement et thermiques.



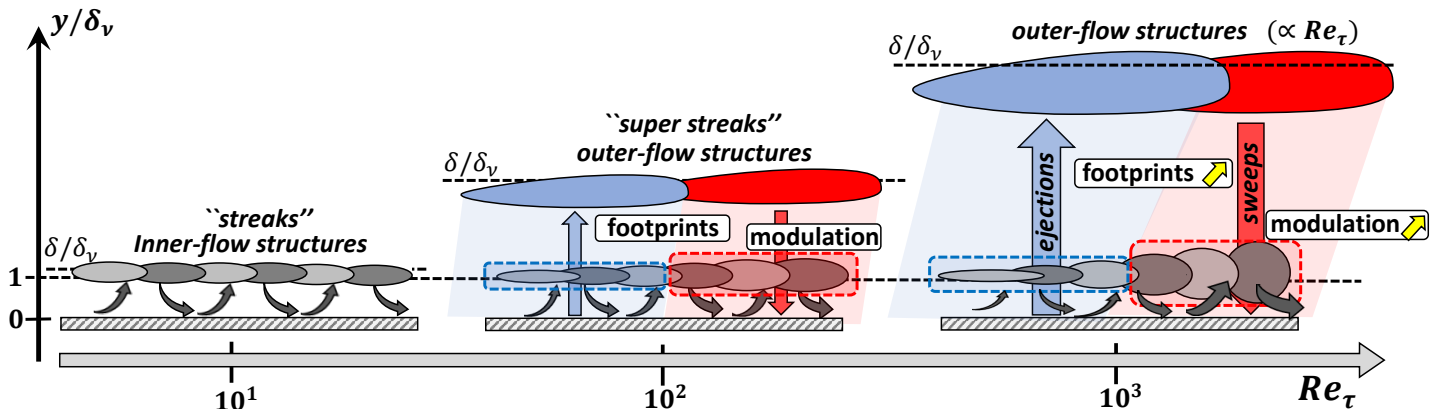
Bien qu'intrinsèquement chaotique, l'écoulement généré par une couche limite présente des structures cohérentes qui influencent significativement le processus de mélange de la quantité de mouvement et, par conséquent, la traînée et le transfert de chaleur. Plus la couche de cisaillement est intense, plus la dynamique est riche et complexe. La Figure 2 illustre une représentation conceptuelle d'une couche limite sur une plaque plane. Lorsque le gradient est relativement faible, seule la contrainte visqueuse entre en jeu. Cependant, lorsque le nombre de Reynolds augmente ( $Re_L = U_\infty L / \nu$ ), la déformation de cisaillement s'intensifie, entraînant l'apparition de structures produisant des contraintes de Reynolds, et l'écoulement passe d'un état laminaire à un état turbulent. Comme mentionné précédemment, un mélange important de la quantité de mouvement entraîne une traînée élevée, ce qui réduit considérablement l'efficacité opérationnelle de nombreux dispositifs et processus. Par conséquent, la réduction de la traînée est un défi prioritaire pour de nombreuses industries, à la fois pour améliorer leur compétitivité et pour réduire leur empreinte carbone. Cependant, pour certains processus, le transfert de chaleur est également primordial, et il peut être nécessaire d'augmenter le mélange de la quantité de mouvement à la paroi pour améliorer le transfert de chaleur.

Lorsque la paroi est à une température  $T_w$  différente de la température de l'écoulement libre  $T_\infty$ , une couche limite thermique est également présente, avec une épaisseur  $\delta_t$  distincte de l'épaisseur de la couche limite de quantité de mouvement  $\delta$ . La couche limite thermique turbulente comporte également des régions interne et externe. Dans la sous-couche visqueuse, le mélange turbulent diminue fortement et les mécanismes conductifs dominent (comme illustré sur la Figure 2). Étant donné que le mélange turbulent est inefficace dans la sous-couche visqueuse, celle-ci est connue pour contribuer de manière substantielle à la résistance thermique d'une couche limite turbulente. La couche "intermédiaire" (buffer layer), située juste au-dessus de la sous-couche visqueuse, est la région où les contraintes de Reynolds sont les plus importantes, le transfert de chaleur étant principalement régi par le mélange turbulent. En s'éloignant de la paroi, les mouvements de mélange s'atténuent progressivement jusqu'à disparaître complètement, définissant ainsi l'épaisseur des couches limites thermique et de quantité de mouvement.

À première vue, le nombre de Prandtl ( $Pr$  défini dans la Figure 2) peut ne pas sembler associé au transfert de chaleur étant donné que  $\delta_t$  et  $\delta$  sont similaires, mais il décrit d'abord le comportement de l'écoulement dans la première partie de l'écoulement pariétal, où la viscosité moléculaire et la conductivité thermique contrôlent encore le transport de chaleur et de quantité de mouvement (influençant ainsi le transfert de chaleur et la traînée de frottement). Au fur et à mesure que le mélange turbulent de la quantité de mouvement dans la région pariétale augmente, la couche limite s'amincit, offrant moins de résistance au flux de chaleur mais augmentant la traînée. Par conséquent, pour les échangeurs de chaleur, un équilibre doit être trouvé entre les pertes dues à la traînée et le transfert de chaleur. Pour améliorer le transfert de chaleur, la convection doit être renforcée. Le rapport entre le transfert de chaleur convectif et conductif à travers une frontière est défini par le nombre de Nusselt (voir la définition de  $Nu_x$  dans la Figure 2). En utilisant l'analogie de Reynolds-Colburn Colburn 1964, pour une couche limite turbulente canonique, le transfert de chaleur peut être étroitement lié à la contrainte de



(a)



(b)

Figure 3: (a) Champs de vitesse longitudinale pour un écoulement de canal à  $Re_\tau \approx 4200$  à deux emplacements normaux à la paroi: (1)  $y^+ \approx 12$  et (2)  $y^+ \approx 260$ , (b) Représentation schématique de l'écoulement à paroi au fur et à mesure que le nombre de Reynolds augmente.

cisaillement à la paroi par l'équation semi-empirique (1).

$$Nu = \frac{Re Pr Cf/2}{1 + 12.7 \left( Pr^{2/3} - 1 \right) \sqrt{Cf/2}} \quad (1)$$

Un de mes objectif est de développer un modèle prédictif du transfert de chaleur qui tient compte des effets du contrôle actif et des structures d'écoulement à grande échelle lorsque le nombre de Reynolds augmente. L'équation classique de Colburn (équation (1)), qui relie le transfert de chaleur à la contrainte de cisaillement à la paroi pour une couche limite turbulente canonique, servira de point de départ. L'objectif est d'étendre cette relation pour intégrer les dépendances du contrôle et de l'écoulement externe, afin de capturer avec précision la réponse du transfert de chaleur dans différents régimes d'écoulement. L'évaluation du modèle étendu dans diverses conditions permettra d'élucider l'interaction complexe entre le transfert de chaleur, le forçage du contrôle et la turbulence intrinsèque de l'écoulement. En approfondissant notre compréhension des mécanismes physiques sous-jacents, le modèle servira de base au développement de stratégies de contrôle optimisées et à une régulation précise du transfert de chaleur. L'objectif global est d'améliorer nos capacités de prédiction en établissant un cadre complet qui englobe les paramètres clés régissant le transfert de chaleur convectif dans les écoulements turbulents de proche paroi, tout en tenant compte des effets du nombre de Reynolds et des structures d'écoulement externe

### 3.2.2 Une introduction à la dynamique de la turbulence près de la paroi

Malgré son apparente complexité et sa nature chaotique, la turbulence pariétale est caractérisée par la présence de structures cohérentes qui jouent un rôle prépondérant dans le transfert de quantité de mouvement et les mécanismes de transport. Cette organisation de l'écoulement sont au cœur des processus physiques qui régissent le frottement pariétal et les transferts thermiques convectifs. Des simulations numériques et des études expérimentales ont clairement démontré que la région proche paroi, dominée par les effets visqueux et sujette à de forts gradients de vitesse, est caractérisée par des structures quasi-organisées allongées selon la direction de l'écoulement, périodiquement espacées dans la direction transverse, appelées communément "streaks". L'échelle de ces structures est dictée par les échelles visqueuses ( $\delta_\nu$ ). Ces streaks peuvent être visualisées sur le champ instantané de vitesse longitudinale présenté sur la Figure 3a (gauche), correspondant à un écoulement de canal pleinement développé à  $Re_\tau \approx 4200$  pour une position  $y^+ = y; u_\tau/\nu \approx 12$  où l'énergie des streaks est maximale. De nombreuses structures fines sont observables, l'ordre de grandeur des streaks ( $\lambda_x^+ \approx 10^3$ ; &  $\lambda_z^+ \approx 10^2$ ). Les streaks sont induites par des tourbillons quasi-longitudinaux qui sont le siège de mouvements "d'éjection" de fluide à basse vitesse et de "balayage" de fluide rapide, comme illustré schématiquement sur la Figure 3b où les ovales gris représentent les streaks et les flèches grises matérialisent les mouvements d'éjection/balayage. Ces structures turbulentes apparaissent dès les premiers stades de la transition vers la turbulence, pour lesquels le spectre d'échelles est restreint, leur étude ne requiert que des ressources de calcul modérées. Leur nature est donc relativement bien comprise. En revanche, la turbulence pariétale pleinement développée à haut nombre de Reynolds pose des défis bien plus conséquents du fait de l'émergence d'une seconde famille de structures de bien plus grande taille. En effet, des simulations et des mesures ont révélé l'existence de grandes structures particulières (souvent appelées "super-streaks") qui sont les plus énergétiques au centre de la couche limite et conservent une cohérence sur toute son épaisseur. Contrairement aux streaks, l'échelle des super-streaks est proportionnelle à l'épaisseur de couche limite  $\delta$  et à la vitesse externe moyenne. Le champ de vitesse longitudinale de la Figure 3a (droite), extrait loin de la paroi, met en évidence la présence de ces structures de bien plus grande échelle que les streaks de proche paroi ( $\lambda_x^+ \approx 5 - 8Re_\tau$ ; &  $\lambda_z^+ \approx Re_\tau$ ). L'analyse visuelle des deux champs de vitesse de la Figure 3a démontre la forte corrélation des fluctuations de grande longueur d'onde entre ces deux positions normales à la paroi, signature d'un phénomène d'"empreinte" des structures externes sur la région de proche paroi. De plus, ces visualisations révèlent que l'amplitude des fluctuations de petite échelle dans la région de proche paroi est modulée par le signe des fluctuations à grande échelle. Ainsi, les fluctuations à grande échelle positives amplifient les fluctuations à petite échelle tandis que les fluctuations à grande échelle négatives les atténuent. Ce phénomène de "modulation" implique une interaction entre les mouvements à grande échelle et les streaks proches de la paroi, dont l'intensité dépend de l'amplitude des structures externes  $u_{O,LS}$  et donc du nombre de Reynolds.

Cette relation empirique s'exprime comme suit:

$$u^+ p = u^* \underbrace{[1 + \beta u_{O,LS}^+(y_{O,\theta LS}^+)]}_{\text{modulation}} + \underbrace{\alpha u_{O,LS}^+(y_{O,\theta LS}^+)}_{\text{superposition}}, \quad (2)$$

où  $\beta$  et  $\alpha$  sont des paramètres empiriques dépendant de la distance à la paroi. Ils quantifient respectivement l'intensité de la modulation et de la superposition des fluctuations externes sur le champ de vitesse universelle  $u^*$  proche de la paroi. Les distances à la paroi  $y^+$  et  $y_O^+$  correspondent aux positions où sont évaluées les fluctuations à petite échelle et à grande échelle respectivement. Enfin,  $\theta_{LS}$  représente le déphasage spatial entre ces deux échelles de fluctuation.

Cette relation empirique proposée par Marusic et al. Marusic, Mathis, and Hutchins 2010 pour prédire les statistiques de la turbulence en proche paroi présente plusieurs limitations. Une hypothèse clé de cette relation est la symétrie de la modulation des streaks de proche paroi par les structures externes de grande échelle. Or, des études récentes ont invalidé cette hypothèse en mettant en évidence des phénomènes plus complexes, en particulier lorsque l'amplitude des structures externes devient importante. En effet, outre une modulation d'amplitude, les streaks subissent un "étalement" dans la direction transverse sous l'effet des balayages de grande échelle. Ce phénomène, illustré schématiquement sur la Figure 4, n'est pas pris en compte dans la formulation actuelle de la relation empirique (eq. 2). Celle-ci prédit une variation proportionnelle de l'amplitude des streaks avec la vitesse induite localement par les éjections et balayages de grande échelle, mais pas l'étalement latéral observé, qui s'amplifie avec l'intensité des balayages. Cette incapacité à capturer fidèlement la réponse des streaks a des implications importantes, car elle conduit à une prédiction erronée des mécanismes de mélange turbulent responsables du frottement pariétal et des transferts de chaleur. De plus, le poids de cette inexactitude augmente avec le nombre de Reynolds, les structures externes jouant un rôle de plus en plus significatif à mesure que  $Re_\tau$  croît. Il est d'ailleurs à noter que l'impact de cet "étalement" sur la dynamique de proche paroi est déjà clairement visible pour des nombres de Reynolds modérés de l'ordre de 1000. Ces limitations soulignent la nécessité d'améliorer notre compréhension et notre modélisation des interactions non-linéaires entre structures turbulentes de grande échelle et de petite échelle dans la région de proche paroi. Cela passe notamment par une meilleure prise en compte des effets "d'étalement" mis en évidence, afin de prédire plus fidèlement les statistiques turbulentes à haut nombre de Reynolds et leurs conséquences sur



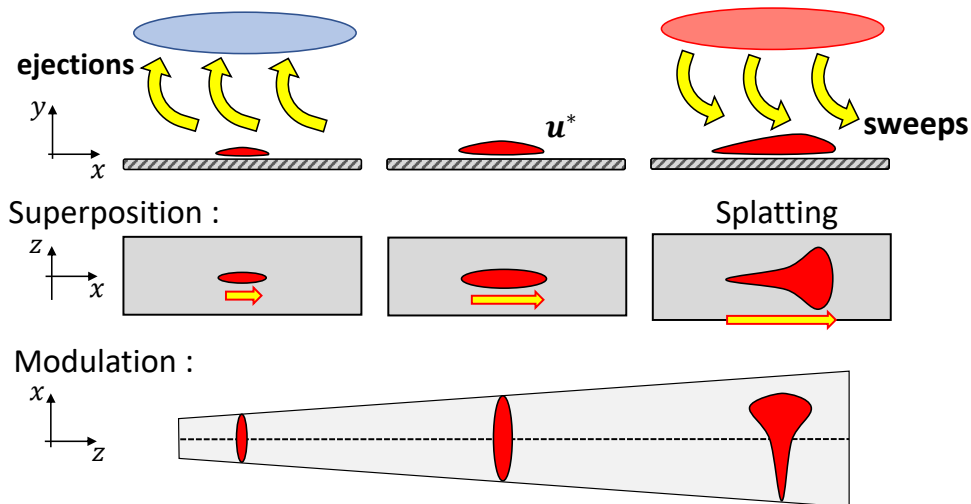


Figure 4: Représentation conceptuelle des effets des structures d'écoulement externes sur les structures internes pour un écoulement de base.

des quantités d'intérêt telles que le frottement ou les transferts thermiques.

Des analyses complémentaires sont nécessaires pour comprendre l'influence des caractéristiques de l'écoulement externe sur les structures de proche paroi et développer des modèles prédictifs robustes, non seulement pour des écoulements canoniques mais également en présence de contrôle actif. C'est l'un des objectifs de mes travaux de recherche. Pour relever ces défis, mon approche vise à combiner les connaissances en turbulence et les méthodes de la mécanique des fluides avec les techniques d'apprentissage automatique. En réunissant ces domaines, nous serons en mesure d'extraire plus efficacement les informations clés des vastes ensembles de données pour identifier les caractéristiques essentielles de l'écoulement. Cela permettra le développement de modèles prédictifs précis intégrant les effets du contrôle et les dépendances au nombre de Reynolds. En exploitant la puissance de l'apprentissage automatique, nous pourrions découvrir des motifs et des relations cachés dans les données qui pourraient ne pas être facilement discernables par les méthodes d'analyse classiques. Cette approche nous permettra de construire des modèles plus complets et plus robustes, capables de capturer avec précision les interactions complexes entre les structures proches paroi, les caractéristiques de l'écoulement externe et le contrôle actif sur une large gamme de nombres de Reynolds. In fine, ces travaux de recherche contribueront à une meilleure compréhension de la turbulence pariétale et fourniront des éléments précieux pour la conception de stratégies de contrôle d'écoulement efficaces et l'optimisation des systèmes d'ingénierie.

### 3.2.3 Exploiter la puissance de l'apprentissage automatique pour démêler les complexités de la turbulence près de la paroi

De nos jours, les simulations expérimentales et numériques génèrent un volume sans précédent de données extrêmement détaillées sur les écoulements turbulents, qui doivent être analysées et interprétées. Pour exploiter pleinement ce gisement d'informations, il est crucial de développer des outils d'analyse statistique et d'exploration de données performants. Dans ce contexte, les algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning, ML) offrent des perspectives prometteuses pour étudier des problèmes non linéaires et de haute dimension comme la turbulence de proche paroi (Brunton, Noack, and Koumoutsakos 2019). En combinant le ML avec les connaissances de la physique et la disponibilité croissante de données, des avancées majeures sont à portée de main dans la compréhension des mécanismes qui régissent la dynamique des écoulements pariétaux et leur contrôle. Cette approche synergique est d'autant plus pertinente que les modèles statistiques classiques de la turbulence, même basés sur les équations de transport des moments d'ordre deux, peinent à capturer toute la complexité du problème malgré des efforts soutenus de modélisation. Le ML offre de puissants outils, supervisés ou non (voir Figure 5), pour découvrir des motifs cachés dans les données (Brunton, Noack, and Koumoutsakos 2019). Son essor récent en mécanique des fluides est porté par les progrès de l'instrumentation, la baisse des coûts de calcul, et les avancées des architectures matérielles (GPU/TPU) et des algorithmes. Cependant, le ML ne vise pas à remplacer la physique par des données, mais bien à utiliser modèles, intuitions physiques et données en synergie (Samuel 1959).

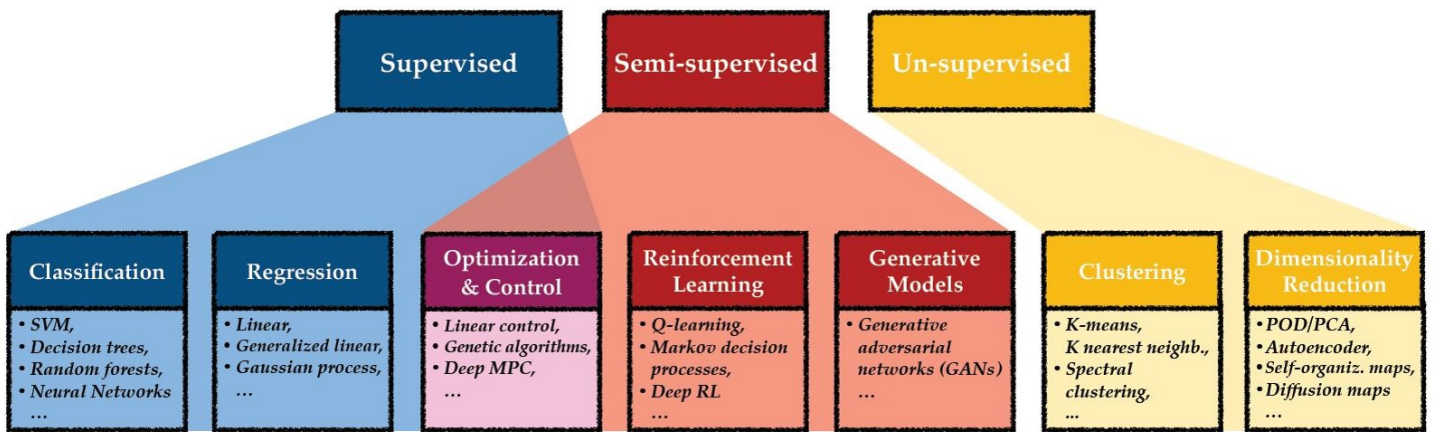


Figure 5: Vue d'ensemble organisationnelle des différentes méthodes d'apprentissage automatique (d'après Brunton, Noack, and Koumoutsakos (2019)).



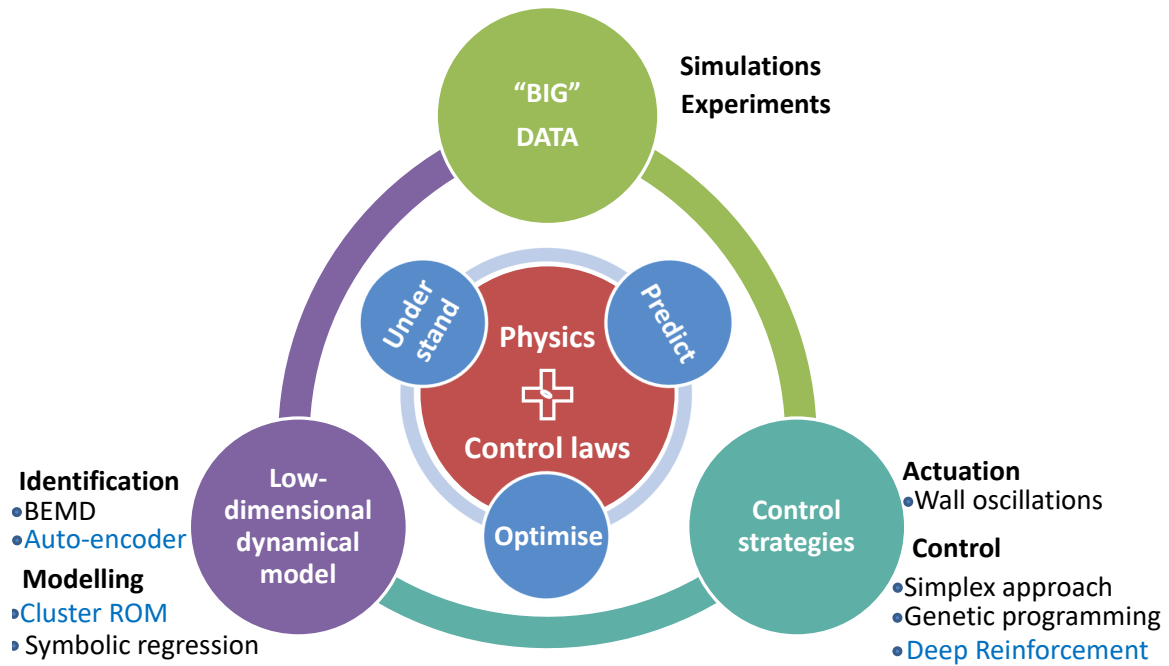


Figure 6: Contrôle par apprentissage automatique : changement de paradigme.

### 3.2.4 Apprentissage automatique : changement de paradigme

Dans une approche classique, la détermination d'un modèle prédictif ou d'une loi de contrôle optimale suit un processus séquentiel : compréhension approfondie de la dynamique, modélisation, puis optimisation. Cependant, cette approche est intenable pour la plupart des configurations d'écoulement. En effet, les écoulements présentent une très grande dimensionnalité, une forte non-linéarité et un caractère multi-échelles, rendant les deux premières étapes extrêmement ardues, en particulier pour les écoulements pariétaux. De plus, cette approche "model-driven" souffre de deux inconvénients majeurs : (i) la complexité du modèle rend difficile l'interaction en temps réel, et (ii) la généralisation du modèle dynamique à d'autres configurations est délicate.

L'apprentissage automatique (Machine Learning, ML) offre un changement de paradigme, en couplant de manière itérative la modélisation basée sur les données et l'optimisation des stratégies de contrôle, comme illustré sur la Figure 6. À chaque itération, un modèle prédictif est construit à partir des données, puis utilisé pour évaluer une stratégie de contrôle. Les résultats obtenus permettent d'affiner la compréhension du système et d'améliorer le modèle. Ainsi, les algorithmes de ML déchiffrent efficacement les mécanismes régissant la dynamique des écoulements et identifient les lois de contrôle optimales.

Cette approche repose sur trois piliers : (i) des données massives issues de simulations numériques haute-fidélité et/ou d'expériences, (ii) des modèles dynamiques basse-dimension, et (iii) des stratégies de contrôle. Les données fournissent des informations précieuses sur la physique des écoulements. Les caractéristiques principales de la dynamique sont alors extraites dans des modèles réduits, qui permettent de concevoir et tester des lois de contrôle. Le processus est répété, affinant progressivement modèles et contrôles grâce aux nouvelles données générées. Ce cadre "data-driven" couple modélisation et optimisation dans un cercle vertueux, pour faire progresser rapidement la connaissance et les performances.

En exploitant de manière synergique la puissance du ML, la richesse des données disponibles et les connaissances en mécanique des fluides, cette approche ouvre la voie à des avancées significatives dans la compréhension et le contrôle des écoulements complexes. Elle offre une alternative prometteuse aux méthodes classiques, en contournant les difficultés liées à la modélisation explicite de systèmes hautement non-linéaires et multi-échelles.

**- Modélisation d'ordre réduit basée sur les données** Une approche courante de la modélisation d'ordre réduit consiste à déterminer un système de coordonnées compact dans lequel la dynamique est efficacement représentée. La Figure 7 illustre le processus de transformation des données expérimentales ou de simulation haute dimension en un espace latent de dimension réduite pour un suivi et une modélisation simplifiés. Ce processus peut être divisé en plusieurs étapes clés :

1. La première étape consiste à acquérir des données étendues qui couvrent l'évolution du champ d'écoulement, fournissant une représentation complète de la dynamique de l'écoulement à travers diverses conditions et échelles de temps.

2. Un encodeur est ensuite utilisé pour identifier les caractéristiques dominantes de l'écoulement et les projeter dans un espace latent compact. Des techniques de projection issues de la dynamique des fluides ou de l'apprentissage automatique, telles que la transformation de Fourier rapide (FFT), la décomposition orthogonale propre (POD) ou les autoencodeurs, sont utilisées pour extraire les dynamiques clés et les représenter dans un espace de dimension réduite.
3. Dans cet espace d'ordre réduit, des modèles sont développés pour prédire l'évolution de l'écoulement. Les méthodes issues de la dynamique des fluides peuvent fournir des modèles interprétables avec une précision raisonnable. Les techniques d'apprentissage automatique, telles que les réseaux neuronaux, peuvent offrir des performances supérieures des modèles, bien qu'avec une interprétabilité et une généralisabilité réduites. Le choix de la méthode implique de peser ces compromis en fonction des objectifs et des exigences spécifiques de la modélisation.
4. À mesure que les conditions d'écoulement changent, la précision des modèles d'ordre réduit peut diminuer en raison de la dérive. Pour résoudre ce problème, l'encodeur peut être réentraîné pour identifier de nouvelles caractéristiques dominantes de l'écoulement qui émergent dans les conditions modifiées. Sinon, des mesures directes sur le terrain peuvent être utilisées pour corriger les écarts du modèle par rapport à la réalité et garantir que les modèles d'ordre réduit restent précis et fiables.
5. Enfin, le décodeur reconstruit les champs d'écoulement complets à partir de l'espace latent, fermant la boucle et permettant la visualisation et l'analyse des dynamiques d'écoulement prédites.

L'objectif de ma recherche est d'introduire un cadre qui combine de manière synergique les techniques de dynamique des fluides et d'apprentissage automatique pour extraire la physique sous-jacente et prédire la dynamique des écoulements sans nécessiter de simulations ou d'expériences exhaustives. En intégrant de manière innovante des méthodes telles que la FFT, la POD, les autoencodeurs et les réseaux neuronaux, je vise à développer des modèles d'ordre réduit basés sur les données qui capturent les caractéristiques et dynamiques essentielles des écoulements tout en minimisant la complexité computationnelle. Ce cadre ne se contentera pas d'améliorer notre compréhension des phénomènes d'écoulement complexes, mais facilitera également le développement de stratégies de contrôle efficace des écoulements. En tirant parti des forces combinées de la dynamique des fluides et de l'apprentissage automatique, cette recherche cherche à repousser les limites de la modélisation d'ordre réduit et à fournir des outils puissants pour analyser, prédire et manipuler les dynamiques des écoulements dans une large gamme d'applications.

**- Structures internes d'écoulement et contrôle** Comme mentionné précédemment, les "streaks" – formées par des régions quasi-régulières de haute et basse vitesse, allongées dans le sens de l'écoulement et réparties périodiquement dans la direction transversale – sont associées à des tourbillons quasi-longitudinaux. Ces derniers provoquent une élévation du fluide à basse vitesse et un abaissement du fluide à haute vitesse, entraînant ainsi un important mélange de quantité de mouvement. Le développement de ces structures conduit donc à une augmentation significative de la traînée. Depuis des décennies, la communauté aérodynamique étudie un large éventail de stratégies de contrôle, passives et actives, visant à supprimer ces structures.

Peu d'options de contrôle se sont révélées efficaces pour réduire la traînée de frottement sur de grandes surfaces, et il faut reconnaître que toutes impliquent des défis techniques importants. Les dispositifs passifs, tels que les riblets et les surfaces super-hydrophobes, offrent des marges de réduction de traînée modestes et se dégradent rapidement, ou ne sont réalisables que dans des circonstances très particulières, par exemple dans les liquides. Les méthodes actives impliquent généralement un actionnement à la paroi. À faible nombre de Reynolds, elles ciblent toutes les processus dans la couche limite visqueuse, perturbant la structure en bandes proche paroi et le mécanisme de régénération associé qui maintient les streaks et les tourbillons. Mis à part quelques tentatives d'utilisation de jets synthétiques, de bosses/picots actifs et d'actionneurs plasma, principalement appliqués localement et à très faible nombre de Reynolds, une approche viable en laboratoire (Auteri et al. (2010) and Marusic et al. (2021)) consiste à imposer des cisaillements transversaux instables à la fine sous-couche visqueuse par un **mouvement oscillant de la paroi**. Les motifs d'écoulement oscillatoire les plus efficaces impliquent des ondes longitudinales de mouvement transversal, où la vitesse transversale de la paroi est  $W = W_m \sin(2\pi x/\lambda_x - 2\pi t/T)$ <sup>1</sup>. (Gatti and Quadrio 2013) a réalisé une étude approfondie à  $Re_\tau \approx 200$  en explorant une large gamme de combinaisons des paramètres  $\lambda_x$  et  $T$  et leur effet sur la traînée. La carte de la variation de traînée dans le plan  $\lambda_x - T$  est présentée sur la Figure 8. Avec un choix judicieux des paramètres d'actionnement, des niveaux de réduction de traînée brute supérieurs à 45% ont été démontrés dans des simulations numériques d'écoulements en canal à faible nombre de Reynolds ( $Re_\tau \approx 200$ ) Quadrio and Ricco (2004) and Quadrio, Ricco, and Viotti (2009). Ces études montrent que la traînée peut également être considérablement augmentée, en fonction du choix des paramètres de contrôle (voir Figure 8). Il est établi que, pour des périodes d'oscillation adimensionnées par les échelles de paroi  $T^+ \approx 100$ , la traînée est considérablement réduite, tandis que  $T^+ \gtrsim 200$  conduit à une augmentation substantielle de la traînée. Le

<sup>1</sup> Les paramètres de contrôle sont représentés en rouge.

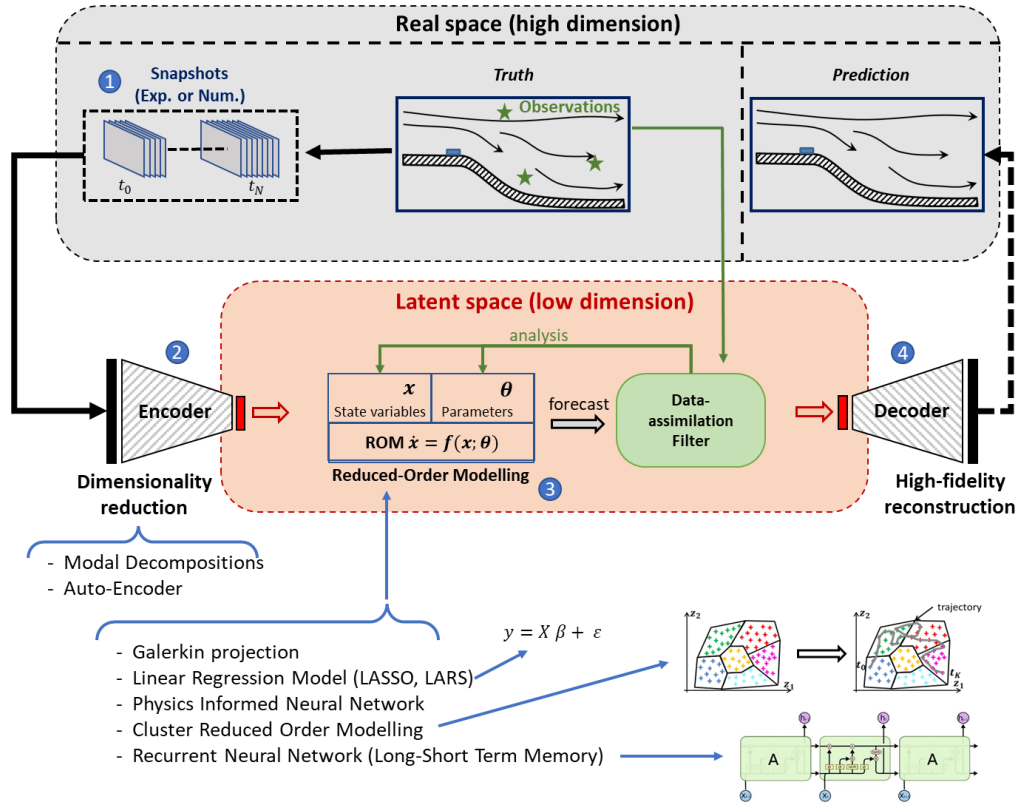


Figure 7: Cadre général pour la construction d'un système dynamique bas-dimensionnel basé sur les données.

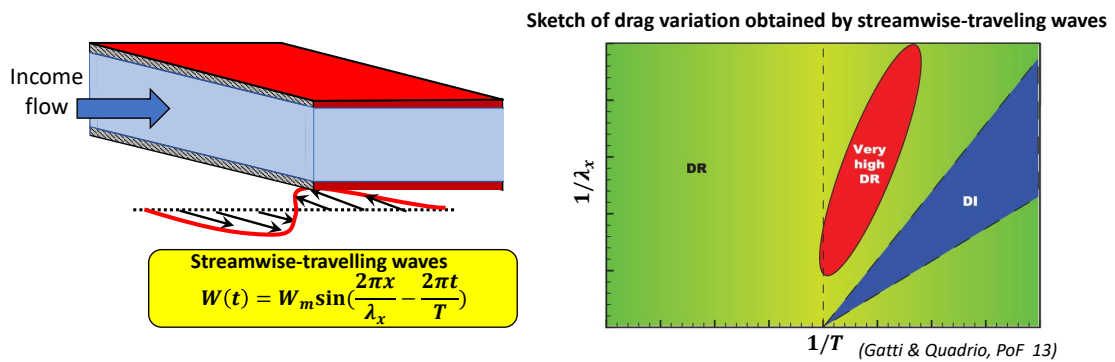


Figure 8: Graphique à gauche : schéma du système pour un écoulement turbulent dans un canal avec un actionnement par onde de déplacement. Graphique à droite : carte de la variation de la traînée dans le plan  $\lambda_x$ - $T$ , DR : Réduction de la traînée et DI : Augmentation de la traînée. (Gatti and Quadrio (2013)).

mécanisme exact par lequel de telles oscillations contrôlent la traînée est complexe et fait l'objet de nombreuses études (par exemple Ricco et al. (2012) and Agostini, Toubert, and Leschziner (2015)). Essentiellement, les oscillations créent une couche limite de Stokes instable près de la paroi qui affaiblit ou renforce les streaks turbulents dans la sous-couche visqueuse, réduisant ou augmentant ainsi les échanges turbulents de quantité de mouvement près de la paroi. Une intensification de la turbulence proche paroi peut être attendue pour améliorer le transfert thermique, et une question est de savoir s'il est possible d'augmenter considérablement le transfert de chaleur avec une pénalité de traînée augmentée de manière modeste.

Des études plus récentes (Agostini and Leschziner 2019; Agostini and Leschziner 2021) ont montré que les mouvements à grande échelle altèrent fortement le comportement des streaks lorsque des oscillations de paroi sont appliquées ; en effet, dans les régions où les empreintes à grande échelle sont renforcées par les mouvements de balayage, les streaks réapparaissent rapidement et la traînée augmente rapidement. Il existe une forte asymétrie dans la réponse des streaks entre les mouvements à grande échelle négatifs et positifs, c'est-à-dire que la modulation ne dépend pas linéairement des mouvements à grande échelle (comme illustré dans la Figure 4 pour un écoulement de base), la relation empirique donnée par l'équation 2 ne peut donc plus être appliquée.

### 3.3 Activités de recherche en cours

Mes activités de recherche actuelles s'articulent autour de trois projets principaux, chacun se focalisant sur différents aspects des écoulements pariétaux et du transfert thermique :

- Le premier projet vise à étudier le contrôle des structures à petite échelle sur la traînée et le transfert thermique, ainsi que l'évolution de l'efficacité de ce contrôle avec l'augmentation du nombre de Reynolds. L'objectif est d'élucider les mécanismes fondamentaux par lesquels les structures à petite échelle influencent la traînée et le transfert thermique, et de développer des stratégies de contrôle efficaces adaptables à diverses conditions d'écoulement. L'analyse des caractéristiques des structures à petite échelle à différents nombres de Reynolds fournira des informations précieuses sur l'évolution de leur dynamique et de leurs interactions avec l'écoulement lorsque la turbulence s'intensifie. Ces connaissances sont cruciales pour concevoir des stratégies de contrôle robustes sur une large gamme de conditions d'écoulement.
- Le deuxième projet se concentre sur la prédiction et la modélisation de l'évolution de la dynamique des écoulements pariétaux avec l'augmentation du nombre de Reynolds. L'objectif est de développer des modèles dynamiques d'ordre réduit précis et efficaces capables de capturer la dynamique non linéaire et multi-échelles des écoulements pariétaux à hauts nombres de Reynolds, un élément essentiel pour la conception et l'optimisation des stratégies de contrôle des écoulements. Ces modèles d'ordre réduit visent à réduire la complexité computationnelle de la simulation des écoulements à haut Reynolds tout en capturant les caractéristiques et dynamiques clés de l'écoulement. En intégrant ces modèles dans les algorithmes de contrôle des écoulements, il devrait être possible de mettre en œuvre des stratégies de contrôle plus efficaces et efficientes, applicables aux systèmes réels.
- Le troisième projet explore l'exploitation des instabilités des écoulements secondaires pour générer et contrôler de grandes structures améliorant le transfert thermique avec une perturbation énergétique minimale (voir section 8). Il étudie le potentiel d'utilisation des instabilités des écoulements secondaires, telles que celles induites par la rugosité de surface ou les caractéristiques géométriques, pour créer des structures à grande échelle capables d'améliorer le mélange et le transfert thermique entre les régions d'écoulement pariétal et externe. En concevant judicieusement les caractéristiques de surface ou en introduisant des perturbations spécifiques, il est possible de déclencher des instabilités des écoulements secondaires donnant naissance à des structures cohérentes à grande échelle. Ces structures peuvent significativement améliorer le mélange et le transfert thermique en favorisant le transport de chaleur et de quantité de mouvement entre les différentes régions de l'écoulement. Le projet se focalise sur l'identification des perturbations optimales capables de produire les structures à grande échelle souhaitées en maximisant l'efficacité de l'amélioration du transfert thermique avec un coût minimal.

L'hypothèse selon laquelle le contrôle des structures à petite échelle près de la paroi, où les gradients de température sont les plus raides, peut améliorer le transfert thermique pariétal, et que le contrôle des structures à grande échelle peut favoriser le mélange entre les régions d'écoulement pariétal et externe, où la différence de température est la plus importante, suggère que ces deux stratégies de contrôle peuvent être mises en œuvre sans interférence mutuelle. Une stratégie de contrôle multi-échelle, opérant sur différentes échelles de temps et affectant différentes régions de l'écoulement, peut significativement améliorer le transfert thermique. Cela peut être réalisé en contrôlant simultanément les structures à petite échelle près de la paroi et les structures à grande échelle dans la région d'écoulement externe, optimisant ainsi le transfert thermique sur l'ensemble du domaine d'écoulement. De plus, le contrôle des mouvements à grande échelle peut aider à prédire leurs effets locaux sur les structures à petite échelle, permettant d'adapter le contrôle à petite échelle pour une performance optimale. Cette approche de contrôle adaptatif peut encore améliorer l'efficacité et la robustesse de la stratégie

de contrôle multi-échelle, la rendant adaptée à une large gamme de conditions d'écoulement et d'applications.

### Projet : Influence de la Turbulence Proche Paroi sur le Transfert de Chaleur & Modélisation des Effets du Nombre de Reynolds

Contrairement à de nombreuses disciplines scientifiques, la mécanique des fluides bénéficie des équations de Navier-Stokes (NS) comme fondement théorique pour décrire les écoulements. En principe, la dynamique des fluides peut être parfaitement prédite en résolvant ces équations. Cependant, pour les écoulements à paroi, la résolution directe des équations de NS devient rapidement prohibitive en termes de coût de calcul à mesure que le nombre de Reynolds augmente. Cette complexité croissante est due au fait que pour tout fluide visqueux en mouvement relatif par rapport à une paroi solide, la vitesse s'annule à la paroi, générant une couche de cisaillement. Cette dernière engendre des structures turbulentes chaotiques sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. En effet, les tourbillons présents dans l'écoulement couvrent des tailles allant de l'échelle de Kolmogorov jusqu'à des multiples de l'épaisseur de la couche limite. Plus le cisaillement est intense, plus la dynamique est riche et complexe. Ceci est d'autant plus vrai qu'avec l'augmentation du nombre de Reynolds, de nouvelles familles de structures à grande échelle émergent dans l'écoulement externe, enrichissant davantage la dynamique. Ces aspects rendent l'étude de la turbulence de paroi extrêmement fascinante et stimulante.

La Figure 3a illustre les champs de vitesse longitudinale dans les régions interne et externe d'un écoulement en canal à un nombre de Reynolds modéré ( $Re_\tau \approx 4200$ ). L'observation visuelle met en évidence la complexité de cet écoulement, soulignant son caractère hautement dimensionnel, multi-échelle et fortement non linéaire. Lorsqu'une simulation numérique directe (DNS) est appliquée à de telles conditions d'écoulement, il est aisé de montrer que la disparité croissante des échelles implique que le maillage numérique requis pour résoudre toutes les échelles doit augmenter proportionnellement à  $Re_\tau^3$ . Par conséquent, **les simulations à haut nombre de Reynolds deviennent rapidement irréalisables**. Le plus grand  $Re_\tau$  simulé par DNS est d'environ 5,200 (Lee and Moser (2015)), ce qui reste relativement faible comparé aux applications industrielles et aux couches limites atmosphériques où les ordres de grandeur de  $Re_\tau$  dépassent 100,000. Il est donc essentiel de disposer de **modèles de substitution** qui réduisent la complexité du problème, conduisant à des solutions à un coût de calcul inférieur. **Ces modèles sont nécessaires pour fournir des cadres conceptuels qui soient interprétables, améliorer la compréhension physique, prédire la dynamique des écoulements et faciliter la conception de stratégies de contrôle**. Les études numériques et expérimentales tendent à montrer que les structures externes pilotent les variations des écoulements à paroi à mesure que le nombre de Reynolds augmente. À la fois la taille et l'amplitude de ces structures augmentent avec le nombre de Reynolds. Sans une compréhension suffisamment détaillée de la manière dont les structures d'écoulement externes modifient directement et indirectement le mélange de la quantité de mouvement, la prédiction précise des écoulements à haut nombre de Reynolds ne sera pas possible, et la plupart des stratégies de contrôle sont destinées à rester sous-optimales voire inefficaces, car elles sont conçues à faible nombre de Reynolds. Par conséquent, afin de concevoir des stratégies de contrôle actives et passives capables de réduire significativement la traînée ou d'améliorer le transfert de chaleur pour les écoulements pratiques, il est essentiel d'améliorer d'abord notre compréhension de la turbulence à paroi, en se concentrant sur la traînée de frottement et le transfert de chaleur. De plus, il est essentiel de caractériser leur variation avec l'augmentation du nombre de Reynolds en considérant les effets des grandes structures d'écoulement externes. Cette compréhension formera la base du développement de stratégies de contrôle robustes et efficaces qui peuvent être appliquées à une large gamme d'applications industrielles et de couches limites atmosphériques où les nombres de Reynolds sont significativement plus élevés que ceux actuellement réalisables par simulation numérique directe.

Dans ce cadre, les objectifs de ma recherche actuelle sont les suivants :

1. Approfondir notre compréhension de la manière dont le mélange de la quantité de mouvement généré par les structures proches de la paroi entraîne la traînée et, plus spécifiquement, le transfert de chaleur. Cet objectif vise à élucider l'interaction complexe entre les structures turbulentes proches de la paroi et le mélange de la quantité de mouvement qui en résulte, ce qui a des implications significatives pour les caractéristiques de la traînée et du transfert de chaleur. En mettant en lumière les mécanismes physiques sous-jacents, des informations précieuses peuvent être obtenues sur les principes fondamentaux qui régissent ces processus et des modèles prédictifs plus précis peuvent être développés. Ce travail fait partie du projet **ANR JCJC Inference**.
2. Caractériser l'effet du contrôle sur la traînée et, plus spécifiquement, sur le transfert de chaleur lorsque les streaks sont manipulées par des oscillations de paroi. Ce travail est actuellement en cours dans le cadre du projet **ANR SOLAIRE**, via la supervision de l'étudiant en thèse Lou Guerin et en collaboration avec le laboratoire Promes. En étudiant la réponse des streaks proches de la paroi aux oscillations de la paroi, nous visons à quantifier l'impact de cette stratégie de contrôle sur la réduction de la traînée et l'amélioration du transfert de chaleur. Cette recherche fournira des informations précieuses sur l'efficacité des oscillations de la paroi en tant que technique de contrôle de l'écoulement et guidera le développement de paramètres de contrôle optimisés pour des applications spécifiques.
3. Fournir un modèle amélioré capable de prédire l'effet des structures à grande échelle sur la turbulence proche paroi, en particulier sur le mélange de quantité de mouvement, et de définir un estimateur des fluctuations de flux pariétal à



### Outer-flow structures effects ( Reynolds number)

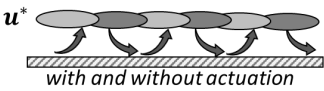
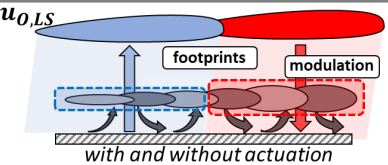
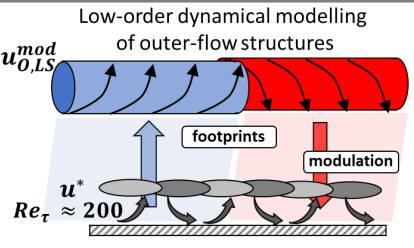
	$Re_\tau \approx 200$	$Re_\tau \approx 1000 \rightarrow 5200$	$Re_\tau \approx 200$ + Synthetic outer-flow structures
open-ended questions	 <p><b>Q1</b> – How skin friction and heat transfer are related and driven by wall-bounded structures?</p>	 <p><b>Q2</b> – What are the effects of outer-flow large-scale structures on wall-bounded flow:  → Streaks → Skin friction → Heat transfer</p>	 <p><b>Q3</b> – Modelling of the <math>Re</math> effects on the turbulent boundary layer.</p>
Achievements	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Relation between drag and convective heat transfer.</li> <li>➤ How effective is spanwise wall motion in increasing or decreasing the heat transfer?</li> <li>➤ Map of <math>Nu</math> variation depending on control parameters &amp; identified set of parameters for maximising <math>Nu</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Predict the effects of outer-flow structure on drag and heat transfer for both canonical and actuated flows.</li> <li>➤ Revise the empirical relationship :  <math>u_p^+ = u^* [1 + \beta u_{O,LS}^+(y_O^+, \theta_{LS})] + \alpha u_{O,LS}^+(y_O^+, \theta_{LS})</math>.</li> <li>➤ Introduce a relation for the <math>Nu</math> taking under consideration the effect of large-scale motions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Modelling the near-wall turbulence, or at least the variation of the skin friction and heat transfer, using simulation at low Reynolds with synthetic outer-flow structures obtained by reduced order model.</li> </ul>

Figure 9: Questions ouvertes et jalons

partir de capteurs dans l'écoulement externe. Ces recherches seront menées dans le cadre du projet **ANR Inference**. En développant des modèles avancés qui capturent l'influence des structures à grande échelle sur la turbulence proche paroi, nous visons à améliorer les capacités prédictives des simulations d'écoulement et à permettre l'estimation des fluctuations de flux pariétal à partir de mesures dans l'écoulement externe. Cette étude contribuera à une compréhension plus complète des interactions multi-échelles dans la turbulence pariétale et facilitera le développement de stratégies de contrôle d'écoulement efficaces.

4. Acquérir une compréhension approfondie des effets des structures à grande échelle sur la turbulence proche paroi contrôlée activement et être en mesure de les modéliser. Ces recherches seront effectuées dans le cadre du projet **ANR Inference**. En étudiant comment les structures à grande échelle interagissent avec la turbulence proche paroi activement contrôlée, nous cherchons à "démêler" ces dynamiques complexes et à développer des modèles robustes qui capturent ces interactions. Cette étude fournira des informations sur l'efficacité des stratégies de contrôle d'écoulement en présence de structures à grande échelle et guidera la conception d'algorithmes de contrôle adaptatif prenant en compte ces effets.

Ce projet est fondamentalement **interdisciplinaire**, avec une portée à la fois en science fondamentale et en ingénierie appliquée. Il combine et fait progresser plusieurs concepts scientifiques de pointe ; à ce titre, il a le potentiel d'un impact académique substantiel dans des contextes plus larges, indépendamment de son utilisation pratique finale. Premièrement, l'exploitation de simulations DNS avancées pour l'optimisation combinée du frottement et du transfert thermique, soumise à une combinaison de stratégies de contrôle actif utilisant des oscillations de paroi, est novatrice et est susceptible de faire progresser les DNS vers une nouvelle direction de contrôle d'écoulement d'intérêt pour la communauté de physique des écoulements. Deuxièmement, l'adaptation de l'apprentissage automatique (ML) pour optimiser les systèmes thermo-fluidiques en est à ses débuts ; l'application de cette technologie émergente pour modéliser, prédire et optimiser le frottement et le transfert thermique de la manière proposée présente de nombreux aspects uniques. Les résultats de recherche devraient aider à modéliser, prédire et contrôler les écoulements pariétaux chauffés, ouvrant la voie à des systèmes d'ingénierie plus efficaces et durables dans un large éventail d'applications, de l'aérospatiale et l'automobile à la production d'énergie et la gestion environnementale.

Le projet est structuré autour de trois questions (dans la Figure 9) :

1. Comment le frottement pariétal et le transfert thermique sont-ils liés et pilotés par les structures proches paroi ?
2. Quels sont les effets des structures à grande échelle de l'écoulement externe sur l'écoulement proche paroi ?
3. Modélisation des effets du nombre de Reynolds sur la couche limite turbulente ?

## **Q1 - Comment la friction pariétale et le transfert de chaleur sont-ils liés et influencés par les structures pariétales ?**

### **Couche limite turbulente canonique**

Pour une couche limite turbulente à faible nombre de Reynolds, les petites échelles engendrent des mouvements tourbillonnaires qui favorisent le mélange de quantité de mouvement et, par conséquent, une augmentation de la traînée. L'une des premières tâches consiste à étudier la corrélation entre la traînée et le transfert de chaleur par convection, pour différents rapports entre la diffusivité thermique et celle de quantité de mouvement. L'objectif est de mettre en évidence le rôle de l'épaisseur de la couche limite thermique dans la promotion ou l'inhibition du transfert de chaleur. Une compréhension fondamentale approfondie de la manière dont les structures turbulentes présentes dans les écoulements pariétaux sont liées au transfert de chaleur permettra d'optimiser l'efficacité de ce dernier.

### **Couche limite turbulente contrôlée**

L'objectif de la deuxième partie est d'utiliser un mouvement oscillatoire transversal de la paroi pour modifier le transfert de chaleur. Bien que l'imposition d'un mouvement oscillatoire transversal de la paroi soit l'une des rares options de contrôle qui se sont révélées efficaces pour réduire la traînée de frottement sur de grandes surfaces, et ait été largement étudiée par la communauté aérodynamique, son potentiel pour améliorer le transfert de chaleur reste largement inexploré. L'objectif est de produire une cartographie similaire à celle de la Figure 8 montrant la variation de traînée en fonction des paramètres de contrôle, mais pour le transfert de chaleur. Comme le montre la Figure 8, selon l'ensemble des paramètres, la traînée peut être augmentée ou diminuée. Il est très probable qu'une augmentation du transfert de chaleur soit associée à une augmentation de la traînée. Cependant, l'information importante à découvrir est la marge de transfert de chaleur qui peut être obtenue et la pénalité de traînée associée, d'autant plus que les dispositifs de contrôle passif utilisés pour améliorer le transfert de chaleur s'accompagnent le plus souvent d'une perte de charge importante. À ma connaissance, l'utilisation d'un mouvement oscillatoire de la paroi pour contrôler le transfert de chaleur n'a jamais été explorée. La conception de stratégies de contrôle actif pour améliorer le transfert de chaleur sur de grandes surfaces sera l'une des principales réalisations.

## **Q2 - Quels sont les effets des structures à grande échelle de l'écoulement externe sur l'écoulement pariétal ?**

La prédiction de la dynamique de la turbulence pariétale à mesure que le nombre de Reynolds augmente a été un domaine de recherche actif au cours des deux dernières décennies. Une contribution pionnière a été apportée par Marusic et ses collègues, qui ont introduit un modèle pour prédire la turbulence proche de la paroi en mesurant les structures d'écoulement externes. Ce modèle, connu sous le nom de modèle prédictif interne-externe (PIO) (équation (2)), utilise un cadre mathématique pour relier les mouvements à grande échelle dans la région externe de la couche limite aux fluctuations à petite échelle dans la région proche de la paroi (Mathis et al. 2009; Marusic, Mathis, and Hutchins 2010). Comme discuté précédemment, ce modèle prédictif présente des limitations, telles que l'hypothèse d'un coefficient de modulation d'amplitude symétrique et la nécessité de connaître a priori les statistiques de la vitesse proche de la paroi pour définir la valeur des coefficients empiriques. Nous visons à surmonter ces limitations en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique, qui peuvent potentiellement fournir des lois interprétables pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et permettre une généralisation à d'autres écoulements.

Les analyses précédentes se sont principalement concentrées sur le champ de quantité de mouvement, avec une attention limitée portée à la couche limite thermique. Il n'existe actuellement pas d'évaluation de l'impact des structures d'écoulement externes sur la couche limite thermique, ce qui est indispensable pour comprendre et prédire le transfert de chaleur dans les écoulements pariétaux à mesure que le nombre de Reynolds augmente. Étendre la modélisation prédictive pour inclure les fluctuations de température, afin que les prédictions de transfert de chaleur puissent être faites à partir de mesures des structures d'écoulement externes uniquement, est l'un de nos principaux objectifs. En tirant parti des algorithmes d'apprentissage automatique, nous visons à mettre en lumière les caractéristiques des connexions entre les événements d'écoulement externes et les variations thermiques proches de la paroi. Cela impliquera le développement de nouveaux algorithmes et techniques pour extraire des "caractéristiques propres aux échelles" et identifier leurs connexions, qui pourront ensuite être utilisés pour construire des modèles prédictifs robustes. Élucider comment le transfert de chaleur convectif à la paroi réagit à une perturbation turbulente externe à travers un large éventail d'échelles constitue un défi scientifique majeur, et notre recherche vise à fournir de nouvelles perspectives et solutions à ce problème.

La première étape pour étudier la manière dont les différentes familles de structures turbulentes contribuent à la friction pariétale et au transfert de chaleur consiste à séparer ces familles les unes des autres. Pour ce faire, nous proposons une méthodologie basée sur les données appelée "**Auto-Encodeur**" (AE).

Un AE est un algorithme d'apprentissage non supervisé entraîné pour reconstruire ses entrées. Comme illustré sur la Figure 10, un AE se compose d'un encodeur, d'un goulot d'étranglement (espace latent) et d'un décodeur. L'encodeur compresse l'entrée dans un espace latent de faible dimension, et le décodeur reconstruit ensuite l'entrée d'origine en utilisant les informations compressées. L'algorithme apprend et exploite toute structure ou corrélation dans les données lorsqu'il les force à travers le goulot d'étranglement. En réduisant la dimension de l'espace latent, l'AE doit identifier la représentation la



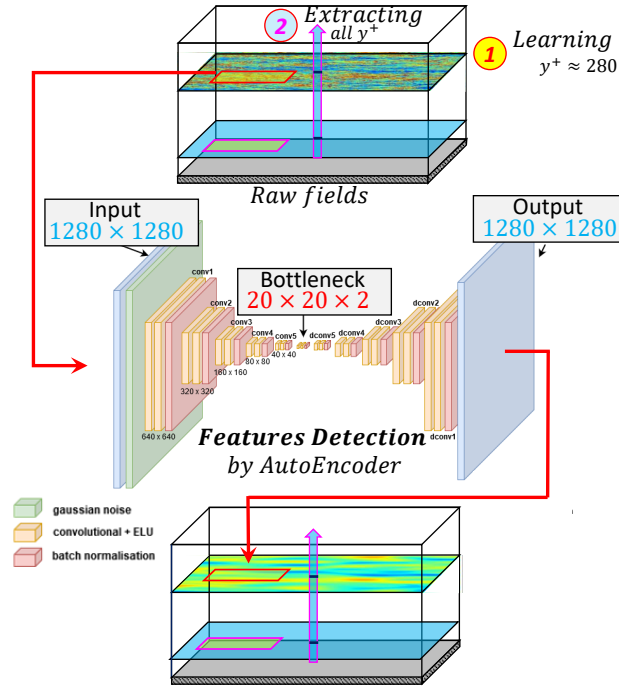


Figure 10: Représentation schématique du processus d'extraction des mouvements à grande échelle en utilisant un Auto-Encodeur multicouche (Agostini and Leschziner 2022).

plus efficace pour compresser les données sans perdre d'informations cruciales. La réduction dimensionnelle agit comme un processus de filtrage, la taille du goulot d'étranglement limitant la quantité d'informations pouvant traverser le réseau. La représentation de faible dimension de la dynamique de l'écoulement dans l'espace latent peut également être utilisée pour identifier un système dynamique de faible dimension.

Les autoencodeurs (AE) peuvent être utilisés pour extraire les effets des structures d'écoulement externe. Pour ce faire, l'AE est initialement entraîné pour apprendre uniquement les caractéristiques associées à ces structures. Concrètement, les données d'entraînement consistent en des champs de vitesse longitudinale à la position normale à la paroi où les structures d'écoulement externe sont les plus énergétiques Agostini and Leschziner (2022). En limitant la quantité d'informations transitant par le goulot d'étranglement de l'AE, celui-ci est contraint d'apprendre les caractéristiques les plus significatives de l'entrée afin de minimiser l'erreur de reconstruction, définie comme la valeur absolue de la différence entre l'image d'entrée et l'image de sortie. Ce procédé guide l'AE à reconstruire préférentiellement les échelles les plus énergétiques, correspondant aux mouvements à grande échelle. Une fois l'apprentissage achevé, l'AE exploite uniquement la "bibliothèque" de caractéristiques apprises pour filtrer efficacement les champs de vitesse à n'importe quelle position normale à la paroi, isolant ainsi les grandes échelles générées par l'écoulement externe. En résumé, l'AE, entraîné sur des fluctuations énergétiques à grande échelle, sert ensuite d'extracteur pour identifier ces structures à partir des champs de vitesse bruts, en s'appuyant sur les signatures apprises.

Une fois les structures à grande échelle séparées du reste de l'écoulement, leur influence sur la turbulence pariétale, la friction et le transfert de chaleur peut être étudiée. Pour ce faire, nous envisageons d'utiliser une approche basée sur la *régression symbolique*, un algorithme d'apprentissage automatique capable de modéliser les données d'entrée par des expressions analytiques Li et al. (2018). Contrairement aux méthodes de régression classiques, telles que la régression linéaire ou polynomiale, la régression symbolique ne présuppose pas de forme fonctionnelle prédéfinie pour la relation entre les variables d'entrée et de sortie. Elle explore plutôt un espace d'expressions mathématiques pour identifier celle qui correspond le mieux aux données, permettant ainsi de découvrir des relations potentiellement complexes et non linéaires, difficiles à mettre en évidence par des approches traditionnelles. L'intérêt de la régression symbolique réside dans le caractère concis et interprétable de l'expression mathématique obtenue, qui se généralise mieux à des données en dehors de la distribution d'entraînement, telles que des nombres de Reynolds ou des températures de paroi plus élevés. L'interprétabilité constitue un avantage significatif de la régression symbolique, les expressions résultantes pouvant être facilement comprises et analysées par des experts du domaine, fournissant ainsi des informations précieuses sur les mécanismes physiques sous-jacents.

L'objectif ultime est de prédire la réponse de la friction et du transfert de chaleur sous l'influence des structures d'écoulement externes pour les couches limites turbulentes canoniques ou avec effet de contrôle. Des travaux antérieurs ont montré que la réponse des petites structures proches de la paroi aux fluctuations à grande échelle diffère entre les

cas canoniques et contrôlés ; spécifiquement, les streaks proches de la paroi se renforcent beaucoup plus intensément avec l'augmentation de l'empreinte par rapport au cas canonique Agostini and Leschziner (2021). C'est une tâche ardue, car les simulations doivent être effectuées à des nombres de Reynolds plus élevés (au moins  $Re_\tau \approx 1000$ ) pour que les structures externes influentes se développent suffisamment Lozano-Durán and Jiménez (2014) and Lee and Moser (2015). Les simulations à haute fidélité couplées à des techniques innovantes d'apprentissage automatique offrent une approche prometteuse pour dériver de tels modèles prédictifs. Notre objectif est de dévoiler les relations mathématiques sous-jacentes qui régissent l'influence des structures à grande échelle sur la dynamique des écoulements, nous permettant de développer des modèles interprétables et généralisables capables de prédire précisément le comportement des écoulements turbulents, en particulier la friction et le transfert de chaleur, sur une large gamme de nombres de Reynolds et de températures de paroi.

### Q3 - Modélisation des effets du nombre de Reynolds sur la couche limite turbulente ?

Les recherches antérieures se sont principalement concentrées sur la région proche paroi de la couche limite, s'efforçant d'élucider les mécanismes qui caractérisent la réponse des petites structures aux mouvements à grande échelle. L'objectif est de déterminer comment les mesures des événements d'écoulement externe peuvent être exploitées pour prédire l'évolution de la friction et du transfert de chaleur convectif. Cependant, pour fournir des capacités prédictives à travers la couche limite à mesure que le nombre de Reynolds augmente, l'attention doit se tourner vers la région externe. Les efforts doivent se concentrer sur la modélisation des super streaks à grande échelle qui peuplent la couche limite, car leur influence s'accroît avec le nombre de Reynolds, et leur dynamique demeure mal comprise. Pour approfondir notre connaissance, le présent travail vise à formuler un modèle dynamique de dimension réduite, intégrant les effets du nombre de Reynolds, pour représenter la physique essentielle qui régit ces mouvements cohérents externes influents. L'objectif est de créer un modèle unifié qui incorpore à la fois les mécanismes de turbulence interne et externe dans un seul modèle applicable à une large gamme de conditions opératoires. Cette tâche nécessite une analyse statistique approfondie de bases de données issues de simulations à haute fidélité. L'accent est mis sur la dérivation de modèles précis qui possèdent des interprétations physiques claires et qui élucident les mécanismes d'écoulement fondamentaux sous-jacents aux écoulements turbulents pariétaux.

Le développement du modèle dynamique de dimension réduite s'appuiera sur une extension du cadre introduit à la Section 3.2.4. La première étape de ce processus consiste à identifier un système de coordonnées plus pertinent dans lequel la dynamique du système peut être représentée de manière plus simple mais plus efficace. Pour ce faire, nous avons l'intention d'utiliser la technologie des Auto-Encodeurs Agostini (2020) ou une variante telle que l'Auto-Encodeur Variationnel (Eivazi et al. 2022). Ces méthodes nous permettront de déterminer un espace d'encodage optimal qui capture la physique essentielle de l'écoulement. Par la suite, les éléments du squelette du modèle dans le système de coordonnées réduit seront déterminés en regroupant efficacement les données encodées en groupes similaires, chaque groupe représentant un ensemble d'états d'écoulement apparentés. En combinant la représentation de dimension réduite des données et un algorithme de partitionnement (par exemple, k-means), une description grossière des données sera définie, résultant en un "squelette" de l'espace de dimension réduite. Pour établir les interactions entre ces éléments squelettiques, les relations entre les transitions de groupes peuvent être déterminées en appliquant des méthodes de régression symbolique (Li et al. 2018) ou la méthode du modèle réduit à base de groupes (CROM) (Kaiser et al. 2014). Bien que la modélisation d'un écoulement de canal turbulent plus complexe représente un défi plus grand, nous avons déjà utilisé avec succès une approche similaire pour modéliser l'écoulement derrière un cylindre (Agostini 2020), que nous avons l'intention d'appliquer ici. La Figure 11 illustre le processus de développement du modèle dynamique de dimension réduite. Les instantanés d'écoulement empilés servent d'entrées à l'Auto-Encodeur, qui identifie un sous-espace de projection de dimension réduite via la couche d'encodage. Les données encodées sont ensuite regroupées efficacement en utilisant l'algorithme des k-moyennes, fournissant un squelette des états d'écoulement clés. Une chaîne de Markov probabiliste est utilisée pour décrire les probabilités de transition entre les groupes. Enfin, la couche de décodage est utilisée pour reconstruire une représentation dynamique de dimension réduite des données dans l'espace original. Cette approche intégrée distille la turbulence en un modèle compact qui élucide la physique sous-jacente et fournit une description dynamique simplifiée, offrant de nouvelles perspectives sur les mécanismes fondamentaux qui sous-tendent les écoulements turbulents pariétaux.

Les objectifs de cette recherche sont doubles. Premièrement, nous mettrons en évidence comment les structures à petite échelle entraînent la friction et le transfert de chaleur en l'absence de structures d'écoulement externes. Les résultats obtenus nous permettront de déterminer comment les structures d'écoulement externes modifient les streaks et de fournir des relations pour prédire la friction et le transfert de chaleur. Une fois qu'un modèle dynamique d'ordre réduit des structures d'écoulement externes est défini, des super streaks synthétiques peuvent être construits, et en exploitant ces relations, nous serons en mesure de modéliser l'évolution des écoulements pariétaux avec l'effet du nombre de Reynolds. Le principal défi réside dans la modélisation des structures d'écoulement externes, en particulier dans la définition d'un modèle capable de prédire l'effet du nombre de Reynolds. Il est relativement bien établi à partir de simulations numériques et d'expériences que les structures d'écoulement externes deviennent plus grandes et plus intenses à mesure que le nombre de Reynolds augmente ; cependant, leur nature ne semble pas évoluer. Par conséquent, l'une des attentes est que le modèle développé

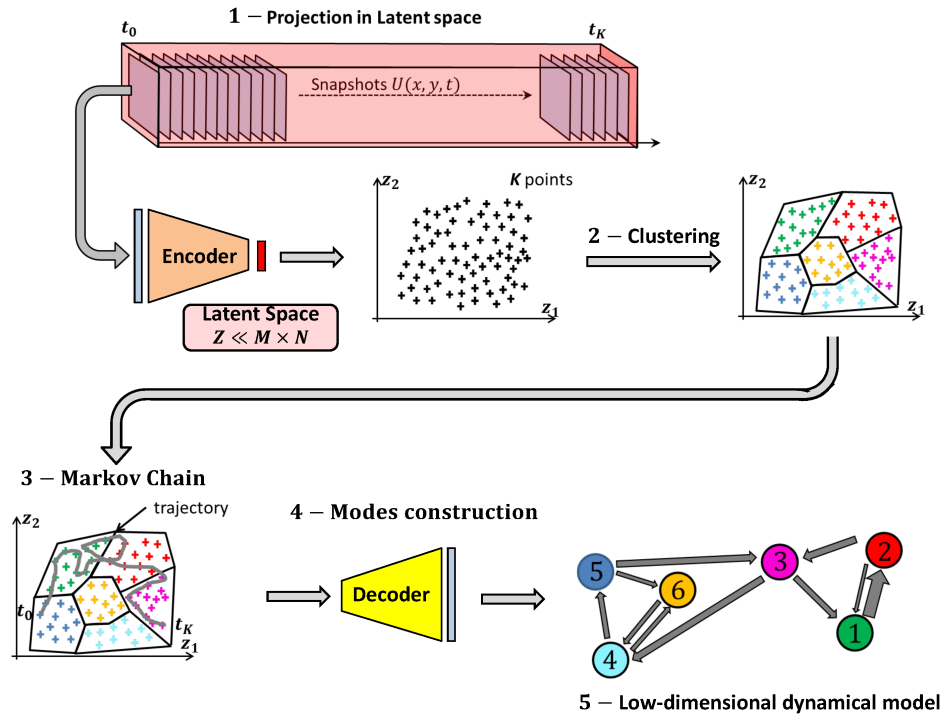


Figure 11: Cadre de modélisation d'ordre réduit combinant : réduction dimensionnelle par Auto-Encodeurs (étape 1), regroupement des données bas-dimensionnelles (étape 2), modélisation dynamique bas-dimensionnelle des données encodées (étape 3), et données décodées (étapes 4 et 5).

à partir des données pour  $Re_\tau = 500$  à  $Re_\tau = 5200$  puisse être aisément étendu à des nombres de Reynolds plus élevés en conservant une forme d'"homothétie". Identifier le modèle parfait qui soit à la fois précis et robuste est une tâche extrêmement ardue, et le risque d'échec est élevé. Cependant, même un pas dans cette direction sera considéré comme un succès, et les chances de développer un modèle qui fonctionne relativement bien sont raisonnablement élevées. Comme l'a dit George E. P. Box, "Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles".

3.4 participations à des contrats de recherche

Je suis impliqué dans plusieurs projets de recherche collaboratifs et interdisciplinaires, notamment l'ANR SOLAIRE et l'ANR MUFDD, ainsi que dans le co-encadrement d'une thèse financée conjointement par l'EUR Intree et le professeur Ricardo Vinuesa de KTH.

- L'ANR SOLAIRE est une collaboration entre trois laboratoires : le LISN, le PROMES et le Pprime. Le porteur de projet est Adrien Toutan du laboratoire PROMES. Dans le cadre de ce projet, deux thésards ont été recrutés, dont Lou Guerin, dont je co-dirige la thèse depuis novembre 2023. L'objectif de sa thèse est d'étudier l'impact des oscillations de parois sur les transferts thermiques. Des informations complémentaires sur le projet SOLAIRE et la thèse de Lou Guerin sont présentées respectivement dans les sections 6.1 et 4.1.
- L'ANR MUFDD implique également une collaboration entre trois laboratoires : le LHEEA, l'IMFT et le Pprime. Laurent Perret en est le porteur. Les tâches attribuées au laboratoire Pprime consistent à développer des méthodes pour construire des estimateurs et des modèles réduits à partir de données issues de simulations et d'expériences. À cette fin, un post-doctorant a été recruté il y a environ six mois. La section 6.1 fournit davantage de détails sur le projet MUFDD.
- Enfin, je participe au co-encadrement d'une thèse financée d'une part par l'EUR Intree et d'autre part par Ricardo Vinuesa de KTH. L'objectif de cette thèse est de développer une approche pilotée par les données afin d'identifier les caractéristiques principales qui régissent la dynamique d'un écoulement, puis de construire un modèle dynamique de substitution de faible dimension. Des précisions sur cette thèse et ses résultats sont disponibles dans la section 4.2.

Ces projets interdisciplinaires combinent des concepts scientifiques avancés et des capacités de pointe, offrant ainsi un potentiel d'impact académique substantiel dans des contextes plus larges, indépendamment de leur utilisation pratique finale. Ils illustrent mon engagement dans des collaborations de recherche innovantes visant à faire progresser la compréhension des phénomènes d'écoulement complexes et à développer des outils prédictifs efficaces.

Année	Nom du porteur	Titre du projet	Type de financement	N° de référence du projet	Nature et montant de l'aide
2024/2028	L. Agostini (Institut Pprime, Poitiers)	INFERENCE	ANR-JCJC	23-CE46-0004	330 KEuros
2022/2026	A. Toutant (PROMES, Perpignan)	SOLAIRE (L.A, L.C & C.F)	ANR	21-CE50-0031	179 KEuros
2023/2027	L. Perret (LHEEA, Nantes)	MUFDD (L.C & L.A)	ANR	22-CE22-0008	182 KEuros

Table 1: Tableau des projets

3.5 Mobilités

En février 2024, j'ai effectué un séjour de deux semaines au laboratoire de Los Alamos, où j'ai rejoint l'équipe d'Arvind Mohan. L'objectif principal de cette visite était d'établir des collaborations portant sur le développement et l'utilisation d'outils d'apprentissage automatique enrichis par la physique pour l'étude des écoulements turbulents. Cette approche novatrice vise à tirer parti des connaissances physiques afin d'améliorer les performances et la robustesse des modèles d'apprentissage automatique appliqués à la mécanique des fluides.

De la mi-juin à la fin juillet 2024, j'ai séjourné à l'Ohio State University, au sein de l'équipe du professeur Datta Gaitonde. Durant cette période, nous nous sommes concentrés sur l'étude des couches limites compressibles, un domaine de recherche d'une grande importance pour de nombreuses applications aéronautiques et aérospatiales. Ce séjour a également permis d'initier de nouvelles collaborations visant à combiner nos expertises complémentaires pour approfondir la compréhension des phénomènes physiques complexes régissant la dynamique des couches limites compressibles.

Par ailleurs, j'ai passé une semaine au laboratoire de l'IUSTI, dans l'équipe de Pierre Dupont, dans le but de préparer une proposition pour l'appel à projets ANR ASTRID, en partenariat avec Safran (voir section 8).

## Insertion dans l'équipe "CURIOSITY"

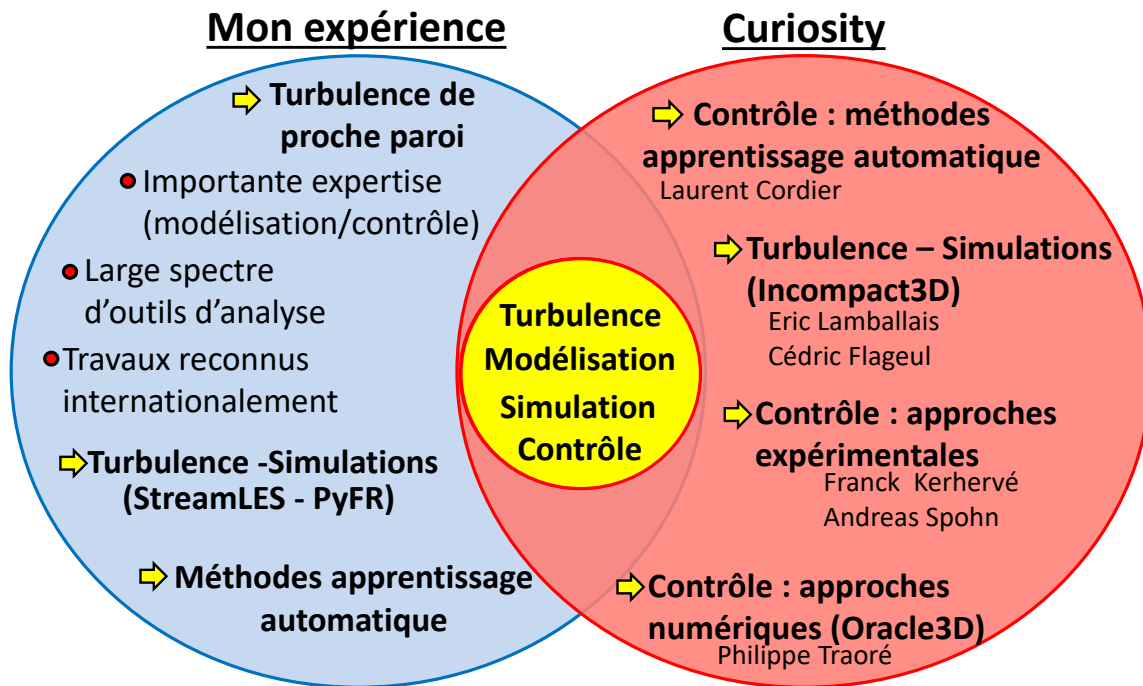


Figure 12: Expertise et Intégration

### 3.6 Expertise & Intégration

Mon projet s'articule de manière cohérente et synergique avec les axes de recherche de l'équipe Curiosity, comme l'illustre le schéma dans la figure 12. Mon expertise dans la modélisation et le contrôle de la turbulence de proche paroi vient directement renforcer l'un des thèmes centraux de recherche de l'équipe. Les outils d'analyse avancés que j'ai développés tout au long de ma carrière, ainsi que les approches novatrices que j'ai mises en œuvre pour mener à bien mes travaux, apportent une valeur ajoutée substantielle aux recherches menées au sein de Curiosity.

C'est avec beaucoup d'enthousiasme que j'envisage les synergies potentielles entre ma maîtrise des méthodes d'apprentissage automatique pour le contrôle et les approches expérimentales de contrôle développées par Franck Kerhervé et Andreas Spohn, ainsi qu'avec les approches numériques de contrôle mises en place par Philippe Traoré autour du code Oracle3D. Mes compétences en simulation numérique de la turbulence seront également complémentaires de celles d'Eric Lamballais et Cédric Flageul sur le code Incompact3D. La collaboration avec Laurent Cordier sur la modélisation de la turbulence s'annonce extrêmement prometteuse. En effet, la mise en commun de nos expertises respectives dans ce domaine devrait permettre des avancées significatives et ouvrir de nouvelles perspectives de recherche particulièrement stimulantes. Je suis convaincu que mon projet bénéficiera de fortes synergies avec les autres membres, permettant un enrichissement mutuel et des avancées significatives. En retour, j'ai l'espoir que mon expertise contribuera à renforcer les différents axes de recherche de l'équipe et à ouvrir de nouvelles perspectives dans la compréhension et le contrôle de la turbulence de proche paroi. L'intégration de mon projet au sein de Curiosity m'apparaît donc comme une opportunité extrêmement prometteuse, tant pour le succès de mes travaux que, plus largement, pour le rayonnement scientifique de l'équipe.

## 3.7 Publications

### 3.7.1 Agostini and Leschziner 2021 : Analyse statistique des interactions entre les grandes échelles externes et la couche interne dans un écoulement en canal soumis à un mouvement oscillatoire de paroi réduisant la traînée, en utilisant une méthodologie de fonction de densité de probabilité conjointe à variables multiples

Cet article présente une analyse statistique des interactions entre les grandes échelles de l'écoulement externe et les petites échelles de la région proche paroi dans un écoulement de canal soumis à un forçage oscillant transversal à la paroi, utilisant une méthodologie basée sur des fonctions de densité de probabilité (PDF) à plusieurs variables. Des données de simulation numérique directe sont analysées en consolidant l'ensemble des données dans des PDF jointes, permettant d'en extraire une grande variété de statistiques conditionnelles. L'étude se concentre sur l'élucidation des mécanismes par lesquels la turbulence proche paroi est modifiée par l'action des empreintes des grandes structures, qui tendent à s'intensifier lorsque le nombre de Reynolds augmente. Les contraintes de Reynolds et leurs taux de production, conditionnés par l'intensité des fluctuations de frottement pariétal à grande échelle, sont examinés. La décomposition en mode empirique (EMD) est utilisée pour séparer les contraintes de Reynolds en composantes de grande et petite échelle. L'analyse met en évidence la réponse fortement asymétrique du taux de production et du niveau de turbulence dans la couche tampon aux empreintes positives et négatives, les premières amplifiant fortement la turbulence à petite échelle. Ceci est proposé comme une explication au moins partielle de la diminution de l'efficacité de la réduction de traînée du mouvement oscillant de la paroi lorsque le nombre de Reynolds augmente.

**Introduction** De nombreuses études ont démontré que l'imposition d'un mouvement transversal oscillant de la paroi dans les écoulements proche paroi entraîne une réduction substantielle de la traînée turbulente. Bien que le niveau de réduction de traînée dépende des paramètres d'actionnement, les marges de réduction brute et nette peuvent atteindre environ 45% et 20%, respectivement, dans le scénario le plus favorable. Cependant, un obstacle potentiellement sérieux est que la marge de réduction de traînée diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Des études de simulation suggèrent un déclin de la réduction de traînée proportionnel à  $Re_\tau^{-\alpha}$ , l'exposant  $\alpha$  étant compris entre 0.1 et 0.46, en fonction des scénarii d'actionnement. À mesure que le nombre de Reynolds augmente, les structures turbulentes dans la région logarithmique ont tendance à impacter de plus en plus la sous-couche visqueuse. Ces "empreintes" des mouvements turbulents externes affectent progressivement la sous-couche visqueuse, diminuant l'efficacité du forçage oscillant transversal. De plus, une élévation distincte de l'intensité de turbulence longitudinale apparaît autour de la position  $y^+ \simeq \sqrt{Re_\tau}$ , reflétant la présence de grandes "super-streaks" soutenues par de grands balayages et éjections. Cette étude vise à étudier l'impact de ces grandes structures externes sur l'efficacité de la réduction de traînée de l'actionnement.

**Configuration et traitement statistique** L'analyse est effectuée sur des données de DNS pour un écoulement de canal à  $Re_\tau \simeq 1025$ , avec des parois supérieure et inférieure actionnées en phase avec une vitesse transversale spatialement homogène :

$$W(t) = W_m^+ \sin(2\pi t/T^+)$$

avec  $W_m^+ = 12$  et  $T^+ = 100$ , cette dernière valeur donnant lieu à la marge de réduction de traînée la plus élevée (30%) réalisable avec un actionnement homogène dans la direction de l'écoulement.

Un total de 500 réalisations de volume complet ont été collectées sur une période  $t^+ = 5000$ , correspondant à 50 cycles d'actionnement. La décomposition en modes empiriques (EMD) est utilisée pour décomposer le champ de vitesse en modes d'échelle. Les données sont ensuite consolidées dans des PDF jointes multi-variables de la forme  $P(X_1, \dots, X_i, \dots, X_N; Cf_{LS})$ , où  $X_i$  est la fluctuation turbulente de n'importe quelle variable d'écoulement et  $Cf_{LS}$  représente les fluctuations de frottement pariétal à grande échelle. Cela permet de dériver diverses propriétés statistiques conditionnelles, y compris les niveaux de production turbulente.

**Résultats et conclusion** L'analyse des statistiques conditionnées par l'intensité des fluctuations de frottement à grande échelle met en évidence la réponse fortement asymétrique du taux de production et du niveau de turbulence dans la couche tampon aux empreintes positives et négatives des grandes échelles externes. Les empreintes positives amplifient fortement la turbulence à petite échelle, tandis que les empreintes négatives ont tendance à l'atténuer. Cette asymétrie dans la modulation des petites échelles proche paroi par les grandes échelles externes est proposée comme une explication au moins partielle de la diminution de l'efficacité de réduction de traînée du mouvement oscillant de la paroi lorsque le nombre de Reynolds augmente. Les grandes structures, à elles seules, sont responsables d'environ 25% du frottement pariétal total. Cette étude fournit ainsi de nouvelles informations sur les mécanismes d'interaction d'échelles qui influencent la réduction de traînée par actionnement oscillant de la paroi dans les écoulements de canal à nombres de Reynolds élevés. La méthodologie basée sur les PDF jointes s'avère un outil puissant pour extraire des statistiques conditionnelles.



### 3.7.2 Agostini and Leschziner 2022 : Analyse assistée par auto-encodeur de la modulation d'amplitude et de longueur d'onde de la turbulence proche paroi par les grandes structures de la région externe dans un écoulement en canal à un nombre de Reynolds de frottement de 5200

Cet article présente une nouvelle méthodologie utilisant un algorithme d'auto-encodeur pour séparer les mouvements à grande et à petite échelle à partir de champs de simulation numérique directe (DNS) extrêmement larges d'un écoulement de canal à un nombre de Reynolds de frottement  $Re_\tau \approx 5200$ . Cette approche permet de surmonter les limitations de la méthode de décomposition en modes empiriques (EMD) précédemment utilisée à des nombres de Reynolds inférieurs. La modulation de la turbulence à petite échelle par les structures à grande échelle est quantifiée à l'aide de fonctions de densité de probabilité conjointes à variables multiples et de la dérivée de la fonction de structure du second ordre, ce qui permet de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents. La validité de l'hypothèse quasi-stationnaire, proposant l'universalité de la turbulence près de la paroi lorsqu'elle est mise à l'échelle par la contrainte de cisaillement à la paroi à grande échelle variable, est également examinée.

**Introduction** Des études expérimentales et numériques ont montré que la turbulence près de la paroi dans les couches limites est considérablement perturbée par les structures externes à grande échelle, ce qui contredit la notion de leur indépendance. Cette interaction, appelée modulation d'amplitude et de fréquence, augmente avec le nombre de Reynolds et a des implications sur le frottement pariétal et les schémas de contrôle. Bien que les études expérimentales fournissent des informations précieuses, les études numériques utilisant la DNS permettent une étude plus approfondie des mécanismes de modulation et de l'hypothèse quasi-stationnaire. Cependant, la séparation des échelles devient difficile à des nombres de Reynolds plus élevés en raison du large spectre des échelles et des ensembles de données DNS extrêmement volumineux.

**Séparation des échelles grandes et petites** La présente étude adopte un algorithme d'auto-encodeur (AE) pour la séparation des échelles, surmontant ainsi les limites de la méthode EMD utilisée dans les études précédentes à des nombres de Reynolds inférieurs. L'AE est entraîné sur des champs de vitesse longitudinale à  $y^+ \approx 280$  pour apprendre les caractéristiques importantes associées aux structures de l'écoulement externe à grande échelle. L'AE entraîné est ensuite utilisé pour extraire ces structures à partir des données brutes à tous les emplacements normaux à la paroi. L'efficacité de la décomposition basée sur l'AE est démontrée par des visualisations des champs séparés, des spectres de densité d'énergie pré-multipliés et des comparaisons avec la méthode de décomposition en modes empiriques bidimensionnelle (BEMD).

**Analyse de la modulation** La modulation de la turbulence à petite échelle par les structures à grande échelle est quantifiée à l'aide de fonctions de densité de probabilité (PDF) conjointes à variables multiples et de la dérivée de la fonction de structure du second ordre. Les PDF conjointes permettent de mieux comprendre les mécanismes d'amplification et d'atténuation des petites échelles par les fluctuations positives et négatives à grande échelle, respectivement. La dérivée de la fonction de structure est utilisée pour quantifier la modulation de l'échelle de longueur à petite échelle, offrant un formalisme transparent qui ne nécessite pas de discrétisation.

**Hypothèse quasi-stationnaire** La décomposition basée sur l'AE permet de tester l'hypothèse quasi-stationnaire, qui propose que la turbulence près de la paroi soit universelle lorsqu'elle est mise à l'échelle par la contrainte de cisaillement instantanée et locale à la paroi à grande échelle. La validité de cette hypothèse est examinée tant pour la modulation d'amplitude que pour la modulation d'échelle de longueur en reliant les statistiques à petite échelle au frottement pariétal à grande échelle.

**Conclusions** La présente étude introduit une nouvelle méthodologie pour étudier la modulation de la turbulence près de la paroi par les structures externes à grande échelle dans un écoulement de canal à  $Re_\tau \approx 5200$ . L'algorithme d'auto-encodeur permet une séparation efficace des échelles à partir d'ensembles de données DNS extrêmement larges, surmontant les limites des méthodes précédentes. L'analyse de la modulation, basée sur les PDF conjointes et la dérivée de la fonction de structure, fournit des informations sur les mécanismes sous-jacents et la validité de l'hypothèse quasi-stationnaire. Le cadre proposé offre une approche transparente et robuste pour étudier les interactions entre échelles et leurs implications pour la modélisation et le contrôle de la turbulence.



### 3.7.3 Guérin et al. 2024 : Amélioration préférentielle du transfert de chaleur convectif par rapport au traînée via la manipulation de la turbulence proche paroi par des oscillations transversales de paroi

Cette étude examine la manipulation du transfert de chaleur convectif par des oscillations transversales de paroi dans un écoulement turbulent en canal. Des simulations numériques directes sont réalisées à  $Re_\tau = 180$  et  $Pr = 1$ . L'objectif principal de ce travail est d'explorer la réponse du transfert de chaleur à des paramètres d'oscillation qui favorisent l'augmentation de la traînée, un régime qui a reçu une attention limitée. En adoptant une période ( $T^+ = 500$ ) et une amplitude ( $W^+ = 30$ ), qui ont été signalées comme augmentant la traînée, une dissemblance remarquable entre le transport de quantité de mouvement et de chaleur apparaît. Dans ces conditions, le transfert de chaleur convectif subit une intensification substantielle de 15%, tandis que la traînée n'augmente que de 7.7%, brisant ainsi l'analogie de Reynolds. Pour élucider les mécanismes physiques responsables de ce comportement dissimilaire, une analyse statistique complète est menée. L'effet du contrôle sur les streaks proches paroi et le mélange associé de quantité de mouvement et de chaleur est étudié en examinant la répartition d'énergie à travers les échelles et les positions normales à la paroi. Cette analyse fournit des indications précieuses sur l'impact du contrôle sur les structures turbulentes. De plus, la corrélation entre les fluctuations de vitesse normale à la paroi et les fluctuations de vitesse longitudinale et de température est examinée pour comprendre la modification des événements de balayage et d'éjection, qui pilotent le transport de quantité de mouvement et de chaleur. L'identité FIK (Fukagata-Iwamoto-Kasagi) est utilisée pour identifier les facteurs contribuant aux changements de traînée et de transfert de chaleur. L'analyse met en évidence l'importance du terme de pression dans l'équation de vitesse longitudinale et la linéarité de l'équation de température. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes complexes régissant le léger découplage du transfert de chaleur et de quantité de mouvement. Les résultats de cette étude soulignent le potentiel d'utilisation de paramètres non conventionnels d'oscillations transversales de paroi pour améliorer préférentiellement le transfert de chaleur convectif tout en minimisant la pénalité de traînée associée.

**Méthodologie et configuration numérique** Les simulations numériques directes d'un écoulement canonique en canal sont effectuées à  $Re_\tau \approx 180$  dans un domaine périodique défini par  $x \in [0, L_x]$ ,  $y \in [0, L_y]$ ,  $z \in [0, L_z]$  où  $x$ ,  $y$  et  $z$  représentent respectivement les composantes longitudinale, normale à la paroi et transversale (voir Figure 1). Le champ de vitesse est noté  $\mathbf{u}(x, t) = [u(x, t), v(x, t), w(x, t)]^T$ , la pression  $p(x, t)$  et la température  $T(x, t)$ .

Les équations de Navier-Stokes incompressibles régissent l'évolution de la vitesse  $\mathbf{u}$  et le transport passif d'un scalaire par  $\mathbf{u}$  donne l'évolution de la température  $T$ . Des conditions aux limites périodiques sont imposées dans les directions longitudinale et transversale de l'écoulement, ainsi que des conditions aux limites homogènes de Dirichlet sur les parois pour la vitesse et la température. Une condition aux limites mixte (MBC) est imposée pour la thermique, avec un flux de chaleur constant uniforme moyen  $q_w$  appliqué sur les parois, tout en supposant que les fluctuations de température à la paroi sont nulles.

**Résultats et analyse** Les paramètres d'oscillation  $T^+ = 500$  et  $W^+ = 30$  servent de point de départ pour l'étude car cette période a été montrée par Jung, Mangiavacchi, and Akhavan 1992 comme causant une augmentation globale de la traînée. Les décompositions FIK permettent d'identifier les différentes composantes contribuant aux variations de transfert de chaleur et de traînée. Les résultats montrent une dissemblance remarquable entre le transport de quantité de mouvement et de chaleur dans ces conditions : le transfert de chaleur convectif subit une intensification de 15% tandis que la traînée n'augmente que de 7.7%. L'analyse structurelle des sries proche paroi et l'analyse quadrant permettent de mieux comprendre les améliorations thermiques/de quantité de mouvement. L'étude souligne l'importance du terme de pression dans l'équation de vitesse longitudinale et la linéarité de l'équation de température comme facteurs potentiels facilitant l'obtention d'un transfert de chaleur dissemblable.

**Conclusion** Cette étude représente le premier exemple connu d'amélioration du transport thermique supérieure à l'augmentation du frottement en utilisant des oscillations transversales de paroi dans un écoulement incompressible, brisant efficacement l'analogie de Reynolds. Les résultats démontrent le potentiel d'utilisation de paramètres non conventionnels d'oscillations pour améliorer préférentiellement le transfert de chaleur convectif tout en minimisant la pénalité de traînée associée. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les paramètres optimaux maximisant cette disproportionnalité et pour démêler complètement les mécanismes complexes régissant le découplage du transfert de chaleur et de quantité de mouvement dans ces conditions.

## 4 Encadrement, animation et management de la recherche

### 4.1 Thèses de doctorat : Lou Guerin (2022-2025)

Dans le cadre de l'ANR SOLAIRE visant à améliorer les transferts thermiques au sein des récepteurs solaires par des méthodes de contrôle actif, je co-encadre officiellement la thèse de Lou Guerin (2022-2025). Parmi les rares méthodes applicables à de larges surfaces en dehors d'une installation expérimentale de laboratoire, les oscillations de paroi ont été choisies. Des travaux antérieurs ont montré que cette technique, appliquée à une couche limite turbulente, affaiblit les petites échelles de proche paroi, sources de mélange, réduisant ainsi les frottements. L'objectif de la thèse est d'évaluer le potentiel de cette méthode pour la manipulation des transferts de chaleur.

Les travaux sont organisés en deux parties. La première partie de la thèse se concentre sur l'étude du cas bien connu de réduction maximale des frottements et de ses effets sur les transferts thermiques. Sans surprise, ces derniers sont réduits du même montant que la traînée, conservant l'analogie de Reynolds. Ensuite, une étude paramétrique limitée est réalisée pour identifier les paramètres entraînant une augmentation de la traînée et étudier leur impact sur les transferts thermiques. Les résultats montrent que les transferts thermiques augmentent avec les frottements, mais de manière plus marquée, invalidant l'analogie de Reynolds. Le forçage engendre une augmentation de la traînée, ce qui laisserait présager une augmentation de l'amplitude des petites échelles de proche paroi. Cependant, contrairement aux attentes, leur amplitude diminue. Toutefois, leur nature est modifiée de telle sorte que les mouvements verticaux sont mieux corrélés, c'est-à-dire que les perturbations de vitesse et de température sont transportées sur une plus grande épaisseur de couche limite, favorisant ainsi le mélange. Le mécanisme complet pilotant ces phénomènes reste à élucider et fera l'objet de recherches dans le cadre de mon ANR JCJC, avec le recrutement d'une doctorante en octobre 2024. Ces études ont donné lieu à deux conférences et un article en cours de révision dans JHFF, avec des rapporteurs favorables à une publication moyennant des corrections mineures.

La seconde partie de la thèse se focalise sur la recherche de paramètres optimaux via des méthodes d'apprentissage par renforcement profond. La première étape a consisté à coupler les codes de simulation à des algorithmes d'apprentissage automatique adaptés et guidés par les observations des études précédentes. Les résultats confirment l'efficacité de cette approche pour trouver les paramètres de contrôle optimaux. Des études sont en cours et devraient rapidement aboutir à des publications.

Pour conclure, cette thèse, à travers une approche numérique, vise à approfondir la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur dans les couches limites turbulentes contrôlées par oscillations de paroi, et à optimiser les paramètres de contrôle pour améliorer les performances des récepteurs solaires.

### 4.2 Thèses de doctorat : Niccolò Tonioni (2023-2026)

La thèse de Niccolò Tonioni, est un projet de collaboration entre Poitiers et KTH, le superviseur à KTH étant Prof. Ricardo Vinuesa. L'objectif principal est de développer une approche générique pour la construction de modèles d'ordre réduit d'écoulements turbulents, en exploitant des techniques d'apprentissage automatique. Cette approche sera appliquée à deux cas d'étude : un écoulement derrière un cylindre couplé à un ressort et une couche limite turbulente.

La construction des modèles d'ordre réduit suivra une approche en plusieurs étapes. Tout d'abord, des techniques d'apprentissage automatique non supervisé, telles que les auto-encodeurs (AE), les auto-encodeurs variationnels (VAE) et les auto-encodeurs variationnels bêta ( $\beta$ -VAE), seront utilisées pour extraire un espace latent compact à partir des données d'écoulement. Cet espace latent représentera les caractéristiques essentielles de l'écoulement dans un système de coordonnées optimal. Ensuite, une analyse par clustering de l'espace latent permettra d'identifier un ensemble d'états d'écoulement caractéristiques, formant ainsi un "squelette" de l'espace de faible dimension. Un modèle dynamique décrivant les probabilités de transition d'un cluster à un autre sera alors dérivé en s'appuyant sur une chaîne de Markov probabiliste. Enfin, la couche de décodage sera utilisée pour obtenir une représentation dynamique d'ordre réduit des données dans l'espace d'origine. Cette représentation dynamique contribuera grandement à améliorer notre compréhension de la dynamique sous-jacente de l'écoulement.

La méthodologie proposée sera d'abord appliquée à un écoulement derrière un cylindre couplé à un ressort, pour lequel des bases de données issues de simulations numériques sont disponibles. Ce cas d'étude permettra de valider l'approche et d'identifier les paramètres importants pour la construction de modèles réduits performants. Dans un second temps, l'approche sera étendue au cas plus complexe d'une couche limite turbulente. L'objectif sera de capturer la dynamique des structures cohérentes de proche paroi (streaks) et leurs interactions avec les grandes échelles de l'écoulement externe. Des bases de données issues de simulations numériques directes (DNS) seront exploitées pour cette étude.

Pour l'instant, les travaux de recherche se concentrent sur la première étape de la construction du modèle, qui est l'identification du système de coordonnées optimal, c'est-à-dire l'identification du squelette. Un article présentant ces résultats est en cours de rédaction.

Les modèles d'ordre réduit développés dans le cadre de cette thèse permettront une meilleure compréhension de la dynamique des écoulements turbulents et de leurs structures cohérentes. Ils ouvriront la voie à des applications en contrôle

d'écoulement et en réduction de traînée, en fournissant des outils prédictifs efficaces et peu coûteux en termes de temps de calcul.

### 4.3 Résumé des activités d'encadrement à l'ENSMA

J'ai eu l'opportunité de participer à l'encadrement de projets de recherche à l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ENSMA) de Poitiers. Cette expérience s'est déroulée sur un trimestre, totalisant 80 heures d'encadrement.

**Encadrement de projet de recherche** L'objectif principal du projet était d'initier une vingtaine d'étudiants de première année d'école d'ingénieur à l'utilisation de méthodes d'apprentissage automatique (machine learning) pour étudier et prédire le comportement d'un écoulement autour d'un cylindre. Ce projet visait à familiariser les étudiants avec les concepts fondamentaux et les applications pratiques du machine learning dans le domaine de la mécanique des fluides.

Au cours de ce projet, les étudiants ont été amenés à :

- Comprendre les principes de base des algorithmes d'apprentissage automatique supervisés et non supervisés
- Appliquer ces algorithmes à des données d'écoulement issues d'expériences
- Analyser les résultats obtenus et en tirer des conclusions pertinentes sur la dynamique de l'écoulement étudié
- Développer leur esprit critique et leur capacité à travailler en équipe sur un projet de recherche appliquée

Ce projet a permis aux étudiants de se familiariser avec les outils et les méthodologies de la recherche en mécanique des fluides, tout en acquérant des compétences précieuses en science des données et en apprentissage automatique.

**Participation aux jurys de stage de fin d'études** J'ai également eu l'honneur d'être rapporteur pour les jurys de stage de dernière année de l'ENSMA. Cette expérience m'a permis de suivre le travail de recherche réalisé par les étudiants en fin de cursus, d'évaluer la qualité de leurs travaux et de leur apporter des conseils pour la poursuite de leur carrière.

Ces différentes expériences d'encadrement et d'évaluation à l'ENSMA ont été très enrichissantes, tant sur le plan pédagogique que scientifique. Elles m'ont permis de développer mes compétences en termes de transmission des connaissances, de gestion de projet et d'interaction avec les étudiants.

### 4.4 Participation à la diffusion de la recherche

Sous l'impulsion de Karl Joulain, directeur de Pprime, une cellule de communication rassemblant une dizaine de membres du laboratoire a été créée afin de communiquer efficacement sur les différentes activités de recherche menées au sein de l'institut. Cette initiative vise à renforcer la visibilité et le rayonnement de Pprime, tant en interne qu'auprès du grand public et des partenaires académiques et industriels.

Dans ce cadre, nous développons une stratégie de communication à plusieurs niveaux. D'une part, nous mettons en place des actions de communication interne pour favoriser les échanges et les synergies entre les différentes équipes pluridisciplinaires qui composent Pprime. D'autre part, nous nous attachons à diffuser les travaux et les résultats du laboratoire vers l'extérieur, en participant activement à des événements de vulgarisation scientifique destinés au grand public. Nous veillons également à publier régulièrement des articles de vulgarisation et à intervenir dans des émissions de radio ou de télévision pour partager notre expertise et susciter l'intérêt du plus grand nombre pour les sciences.

Afin d'affirmer l'identité de Pprime en tant que laboratoire pluridisciplinaire d'envergure, nous avons entièrement revu et modernisé sa charte graphique. Cette nouvelle identité visuelle, déclinée sur l'ensemble des supports de communication, contribue à renforcer la cohésion et le sentiment d'appartenance au sein du laboratoire.

En ce qui me concerne, une de mes responsabilités principales au sein de cette cellule de communication est de gérer et d'animer la présence de Pprime sur le réseau social professionnel LinkedIn. L'objectif est d'y publier régulièrement des actualités sur la vie du laboratoire, à mettre en avant les projets de recherche les plus marquants et à interagir avec notre communauté de followers. Cette présence active sur LinkedIn nous permet de toucher un public plus large, de nouer de nouvelles collaborations et de renforcer notre attractivité auprès de potentiels partenaires scientifiques et industriels.

## 5 Transfert technologique, relations industrielles et valorisation

**Projet:** "Étude des écoulements turbulents dans les moteurs d'avions à l'aide de simulations numériques"

*Partenaires :* PPRIME-IUSTI-SAFRAN

*Lien:*

<https://www.overleaf.com/read/ywtgtwzqpcyn#b242e9>

*Description:* Cette collaboration se concentre sur l'efficacité du contrôle de la turbulence proche paroi à l'aide de dispositifs actifs optimisés. Ces dispositifs sont conçus pour générer de grands tourbillons longitudinaux sinueux en exploitant les instabilités de l'écoulement secondaire qui se manifestent sur une paroi concave. Les caractéristiques de ces tourbillons seront ajustées par des actionneurs plasmas afin de maximiser la capacité de transfert thermique. La recherche vise à répondre au besoin de concepts, de méthodologies et de conceptions innovants pour améliorer les performances des échangeurs de chaleur, notamment dans les conduits d'écoulement des moteurs d'avions, en contrôlant la génération de tourbillons longitudinaux pour augmenter le transfert thermique tout en minimisant les pertes de charge.

*Dépôt de brevet:* "Enveloppe SOLEAU", décrivant le concept de contrôle actif, a été déposée sur le site de l'Institut National de la Propriété Intellectuelle avec le contenu des documents identifiés dans la déclaration d'invention n°B-029741. Ce dépôt a été effectué le 23/01/2024 sous le n° DSO2024001272.

## 6 Encadrement, animation et management de la recherche

### 6.1 Participation à des projets français, européens ou internationaux

#### 1. **Projet français : Projet ANR SOLAIRE**

*Nom du projet :* "Apprentissage automatique pour les récepteurs solaires à haute température - SOLAIRE"

*Lien :*

<https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE50-0031>

**Objectif principal:** Dans un contexte de transition énergétique, le projet SOLAIRE vise à améliorer l'efficacité des centrales solaires à concentration (CSP) en se focalisant sur l'optimisation du transfert de chaleur dans le récepteur solaire. Cet élément clé, considéré comme le "cœur du CSP", absorbe l'énergie solaire concentrée et la transmet au fluide de travail. L'objectif est d'augmenter significativement les échanges thermiques tout en minimisant la pénalité de traînée, grâce à un contrôle actif de la turbulence proche paroi.

**Sous-objectifs:**

- (a) Approfondir la compréhension des mécanismes par lesquels les structures cohérentes de proche paroi (streaks) influencent les échanges de quantité de mouvement et de chaleur dans les couches limites turbulentes.
- (b) Concevoir et optimiser une stratégie de contrôle basée sur un mouvement oscillatoire rapide de la paroi circumférielle, adapté aux conditions de fonctionnement des récepteurs CSP (air à 1000 K).
- (c) Caractériser expérimentalement et numériquement les gains en transfert thermique et les éventuelles pénalités de traînée associés au contrôle proposé.
- (d) Évaluer le potentiel d'intégration de cette technologie dans des centrales CSP industrielles et son impact sur leur rendement global.

**Ampleur:** Le projet SOLAIRE se concentre sur les échanges thermiques et de quantité de mouvement dans les couches limites turbulentes à haut nombre de Reynolds, typiques des récepteurs solaires. Il combine des approches expérimentales avancées et des simulations numériques haute-fidélité pour étudier les interactions complexes entre structures turbulentes, transferts pariétaux et contrôle actif. Les résultats obtenus sur des configurations académiques seront confrontés aux contraintes et spécificités des centrales CSP industrielles pour évaluer le potentiel de transfert technologique.

**Impact potentiel:** En révélant de nouvelles stratégies pour optimiser les transferts de chaleur avec un impact minimal sur la traînée, le projet SOLAIRE pourrait contribuer significativement au développement de centrales solaires à concentration plus performantes et rentables. À terme, les avancées obtenues devraient favoriser l'essor de cette filière énergétique propre et renouvelable, et ainsi participer à la lutte contre le changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. De plus, les connaissances fondamentales acquises sur la turbulence pariétale et son contrôle enrichiront la recherche en mécanique des fluides, avec de potentielles retombées pour d'autres applications impliquant des transferts thermiques intensifiés (échangeurs de chaleur, refroidissement de systèmes électroniques, etc.).

**Partenaires:** PROMES/LISN/PPRIME

**Moyens :** une thèse financée pour Pprime

#### 2. **Projet français : Projet ANR MUFDD**

*Nom du projet :* "Modélisation des écoulements en canopée urbaine par des approches guidées par les données"

*Lien :*

<https://anr.fr/Projet-ANR-22-CE22-0008>

**Objectif principal:** L'objectif principal du projet MUFDD est de développer des modèles d'ordre réduit (ROMs) de l'écoulement dans la canopée urbaine, à la fois dérivés et pilotés par les données. Cela sera réalisé en combinant des techniques d'identification de modèle basées sur les données et des méthodes d'assimilation de données. Ces ROMs constitueront une alternative séduisante aux méthodes numériques classiques, trop coûteuses en calcul pour être utilisées à des fins opérationnelles.

**Sous-objectifs:** Le projet abordera les défis scientifiques suivants :

- Dérivation de ROMs rapides, précis et stables à long terme, capables de reproduire les caractéristiques essentielles stationnaires des écoulements urbains ciblés.
- Prise en compte de la forte complexité et variabilité des écoulements urbains due aux changements de direction ou de vitesse du vent et à la stabilité atmosphérique.

Les défis techniques associés sont les suivants :

- Le développement et l'implémentation de méthodes à la pointe de l'identification des modèles et de l'apprentissage automatique, robustes dans le contexte urbain.
- La réalisation d'expériences et de simulations numériques bien conçues d'écoulements atmosphériques à haut nombre de Reynolds sur un terrain de type urbain.

**Ampleur:** Le développement et la validation des ROMs seront effectués sur des configurations de canopée urbaine canoniques et réalistes, allant des expériences en laboratoire à petite échelle aux canyons urbains grandeur nature. Les configurations d'écoulement étudiées se limiteront principalement au modèle de canyon urbain qui offre toutes les caractéristiques de base des écoulements urbains. L'étude sera étendue aux écoulements pilotés par la flottabilité ainsi qu'aux processus de dispersion.

**Impact potentiel:** En fournissant des outils précieux pour étudier la micro-climatologie urbaine, évaluer la ventilation stationnaire des rues et traiter les problèmes liés à l'exposition accidentelle, le projet MUFDD est clairement en mesure de répondre aux enjeux de recherche couverts par l'axe de recherche H18 "Sociétés urbaines, territoires, constructions et mobilité". A plus long terme, les méthodes dérivées pourront être étendues et adaptées à des configurations géométriques plus complexes. Les modèles développés seront diffusés à la communauté académique pour être ensuite intégrés dans les modèles opérationnels actuels de prévision urbaine.

**Moyens : une postdoc financée pour Pprime**

**Partenaires: LHEEA/IMFT/PPRIME**

### 3. **Projet français : Projet ANR JCJC INFERENCE**

*Nom du projet :* "Inférence de modèles réduits pour les écoulements turbulents en présence de parois complexes"

*Lien :*

<https://www.overleaf.com/read/pswrhrzgkfnx#f86cd1>

**Objectif principal:** Le projet INFERENCE vise à approfondir la compréhension de la turbulence proche paroi à haut nombre de Reynolds, en se focalisant sur les effets des structures d'écoulement externe sur le frottement pariétal et le transfert de chaleur. Cet objectif sera atteint en combinant de manière unique simulations numériques et méthodes pilotées par les données.

**Sous-objectifs:**

- (a) Élucider comment le mélange de quantité de mouvement généré par les structures internes pilote la traînée et le transfert de chaleur.
- (b) Caractériser l'effet des stratégies de contrôle, comme les oscillations de paroi, sur la traînée et le transfert de chaleur lors de la manipulation des stries.
- (c) Développer un modèle prédictif précis de l'effet des structures d'écoulement externe sur la turbulence proche paroi et le mélange de quantité de mouvement. Définir un estimateur des fluctuations proche paroi à partir de capteurs d'écoulement externe.
- (d) Approfondir la compréhension et la modélisation des effets des structures d'écoulement externe sur la turbulence proche paroi contrôlée.

**Ampleur:** Le projet couvre les couches limites de quantité de mouvement et thermiques à des nombres de Reynolds élevés pertinents pour l'industrie et l'atmosphère ( $Re_\tau > 10^5$ ). Il étudiera la dynamique complexe, multi-échelles et non linéaire des écoulements turbulents confinés et l'interaction entre structures internes et externes. Des méthodes de pointe pilotées par les données, dont l'apprentissage automatique supervisé et non supervisé, seront exploitées en synergie avec des modèles physiques pour extraire des connaissances de simulations numériques haute fidélité.

**Impact potentiel:** En approfondissant la compréhension fondamentale de la turbulence de paroi à haut Reynolds et en fournissant des modèles prédictifs améliorés, INFERENCE permettra de développer des stratégies de contrôle des écoulements plus efficaces pour réduire la traînée et améliorer le transfert de chaleur. Cela aura un impact direct sur l'efficacité et l'empreinte environnementale de nombreuses applications industrielles (transport, pipelines, échangeurs de chaleur). Les résultats pourraient conduire à des économies d'énergie et des réductions d'émissions substantielles, contribuant ainsi aux objectifs de développement durable et de transfert d'énergie rentable. De plus, les avancées scientifiques et les approches de modélisation développées enrichiront la recherche sur la turbulence et inspireront de nouvelles voies en dynamique des fluides et mathématiques appliquées.

**Moyens : une these + 2 ans de Postdoc**

#### 4. Collaboration internationale entre Pprime et KTH, via le cofinancement d'une thèse.

**Objectif principal:** Dans le cadre d'une collaboration internationale avec le professeur Ricardo Vinuesa, cette thèse vise à développer des méthodes d'apprentissage automatique avancées, telles que les auto-encodeurs et les auto-encodeurs variationnels, pour extraire les caractéristiques clés des écoulements turbulents et les projeter dans un espace réduit. Les auto-encodeurs sont des algorithmes d'apprentissage non supervisé qui permettent de déterminer une structure de données résultant de la réduction de la dimensionnalité du système d'origine. Ils se composent d'un encodeur, qui projette les données d'entrée dans un espace latent de faible dimension, et d'un décodeur, qui reconstruit les données d'origine à partir de cette représentation compressée. L'intérêt principal des auto-encodeurs pour la construction de modèles réduits en mécanique des fluides réside dans leur capacité à extraire automatiquement les caractéristiques les plus pertinentes des écoulements complexes, souvent non linéaires et de grande dimension, sans nécessiter de connaissances physiques a priori. L'objectif final est de construire des modèles d'ordre réduit précis et efficaces, capables de prédire et de contrôler la dynamique des écoulements complexes, en particulier la turbulence proche paroi.

**Sous-objectifs:**

- (a) Exploiter les auto-encodeurs pour déterminer une structure de données optimale résultant de la réduction de dimensionnalité du système natif. Une fois projetées dans l'espace latent, ces caractéristiques clés pourront être utilisées pour développer des modèles dynamiques de faible dimension, par exemple en combinant la représentation compressée avec des algorithmes de clustering ou des méthodes de régression symbolique.
- (b) Combiner la représentation de faible dimension obtenue par les auto-encodeurs avec des algorithmes de clustering pour obtenir une description "grossière" mais pertinente des données d'écoulement. Cela permettra de capturer l'essentiel de la physique sous-jacente tout en étant beaucoup plus léger et rapide à simuler que les modèles haute-fidélité d'origine.
- (c) Intégrer les connaissances physiques de la dynamique des fluides dans le processus d'apprentissage des auto-encodeurs afin de guider et de contraindre les modèles réduits générés. Des contraintes basées sur les lois de conservation ou les symétries du problème pourront ainsi être imposées à l'architecture des auto-encodeurs.
- (d) Évaluer les performances des modèles d'ordre réduit obtenus en termes de précision de prédiction, d'efficacité de calcul et de capacité à capturer les caractéristiques essentielles de la turbulence proche paroi. La flexibilité de l'architecture des auto-encodeurs sera exploitée pour les adapter à une grande variété d'écoulements et de configurations.

**Ampleur:** Cette thèse s'appuie sur une collaboration étroite entre l'équipe Pprime, experte en simulations numériques haute-fidélité et en méthodes basées sur les données, et le professeur Ricardo Vinuesa, spécialiste reconnu de l'apprentissage automatique appliqué à la mécanique des fluides. Elle combinera des approches fondamentales et appliquées, allant du développement d'algorithmes d'apprentissage profond, tels que les auto-encodeurs et leurs variantes, à leur validation sur des configurations d'écoulement réalistes. Les modèles réduits générés seront confrontés à des données expérimentales et numériques de référence pour évaluer leur potentiel de transfert vers des applications industrielles. Le couplage de l'encodeur et du décodeur des auto-encodeurs sera également exploité pour reconstruire des champs instantanés haute-résolution à partir de mesures basse-fidélité ou sous-échantillonnées, ouvrant des perspectives prometteuses pour l'assimilation de données et le contrôle en temps réel des écoulements.

**Impact potentiel:** En fournissant des modèles d'ordre réduit précis et efficaces, construits par des auto-encodeurs capables d'extraire automatiquement les caractéristiques clés de la turbulence proche paroi, cette thèse ouvre la voie à des avancées significatives en termes de prédiction et de contrôle des écoulements. À terme, ces outils pourraient révolutionner la conception et l'optimisation de systèmes fluidiques dans de nombreux domaines, de l'aéronautique à l'énergie en passant par les transports. Sur le plan fondamental, ils permettront d'approfondir notre compréhension des mécanismes régissant les interactions multi-échelles dans les écoulements turbulents, et d'introduire des modèles plus universels en exploitant la flexibilité des architectures d'auto-encodeurs. Enfin, en combinant expertise de pointe en



mécanique des fluides et en apprentissage automatique, cette thèse renforcera la position du porteur de projet et de ses collaborateurs à la frontière entre ces deux disciplines en plein essor, et démontrera le potentiel des approches orientées données, et en particulier des auto-encodeurs, pour la modélisation, la prédiction et le contrôle des systèmes fluides complexes.

**Moyens : une these**

## **7 autres responsabilités**

- Membre de la CES 60 de l'université de Poitiers
- Membre de la cellule de communication de Pprime

## 8 Projet : Amélioration du Transfert de Chaleur Convectif par Contrôle Actif des Instabilités de Flux Secondaires

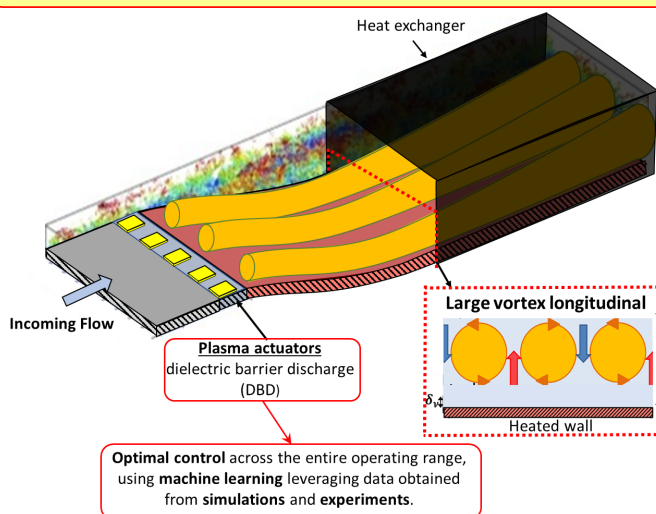
Un programme de recherche collaboratif avec IUSTI et Safran Aircraft Engines vise à explorer l'efficacité du contrôle de la turbulence près de la paroi à l'aide de dispositifs actifs optimisés. Ces dispositifs seront conçus pour générer des vortex longitudinaux sinueux significatifs en exploitant les instabilités de flux secondaires qui se manifestent naturellement sur des surfaces concaves. Les caractéristiques de ces vortex seront modulées à l'aide d'actionneurs plasma, avec l'objectif principal de maximiser la capacité de transfert de chaleur tout en minimisant la pénalité associée à la traînée.

L'amélioration des performances des échangeurs de chaleur est un défi technologique crucial qui est essentiel pour améliorer l'efficacité et la rentabilité des systèmes où le transfert de chaleur joue un rôle fondamental. Avec l'augmentation rapide de la consommation d'énergie à l'échelle mondiale au cours des dernières décennies, il existe une demande croissante pour des concepts, des méthodologies et des conceptions innovants pour optimiser les processus de transfert de chaleur. Ce programme de recherche cherche à répondre à ce besoin en étudiant de nouvelles stratégies de contrôle actif de la turbulence près de la paroi dans les couches limites chauffées.

Les défis scientifiques à relever incluent la compréhension des mécanismes physiques par lesquels la génération de structures tourbillonnaires longitudinales peut augmenter le transfert de chaleur sans augmenter la traînée, ainsi que le développement de modèles robustes pour prédire les effets de différents paramètres de contrôle, tels que la géométrie des actionneurs et la fréquence d'excitation, sur les caractéristiques de l'écoulement et du transfert de chaleur. En couplant des simulations numériques avancées et des expériences avec des techniques d'apprentissage automatique, le projet vise à concevoir de nouvelles stratégies pour améliorer l'efficacité des échangeurs de chaleur en manipulant le développement des tourbillons à l'interface entre la paroi et le fluide.

### Dynamic Enhancement of Heat Transfers:

- The control is adjustably modified in response to external conditions, with an aim to **optimise** the efficiency of **thermal exchanges**.
- A 'boost in the heat exchange coefficient' is generated to accommodate extreme scenarios within the operational range



- **Exploitation of Görtler instabilities:** These instabilities, naturally present in flows, are easily controllable with very slight disturbances, allowing an intensification of convective heat transfer.
- **Strategically placed plasma controllers:** Installed upstream of the heat exchange area, they facilitate the creation of longitudinal vortices.
- **Adaptability of control:** The plasma controllers provide extensive versatility in determining the type of disturbance to implement (such as amplitude, wavelength, frequency) and can be conveniently fine-tuned 'on the fly'.
- **Optimisation of vortex mobility:** Plasma control can be designed to facilitate the spanwise movement of vortices, guaranteeing a more homogeneous and effective heat extraction.

Figure 13: Gauche : Concept illustratif d'un échangeur de chaleur optimisé, utilisant des techniques de contrôle actif pour améliorer le transfert de chaleur. Droite : Structure du programme de recherche. Le programme combine simulations numériques et expériences dans une perspective axée sur les données. La modélisation des écoulements près de la paroi et le développement de stratégies de contrôle sont basés sur l'apprentissage automatique.

Concevoir des échangeurs de chaleur pour les moteurs est un défi en raison de la nécessité de s'adapter à une large gamme de conditions de fonctionnement, y compris des événements extrêmes de température ambiante rares. Ces événements, tels que la spécification "journée extrêmement chaude", se produisent moins de cinq fois dans la durée de vie d'un moteur d'avion mais dictent néanmoins la taille de l'échangeur de chaleur. Le système surdimensionné résultant de cela aura une marge thermique excessive dans des conditions typiques, entraînant une augmentation du poids et une perte de pression, ce qui se traduit par une consommation spécifique et une pénalité de consommation de carburant. Pour relever ce défi, des stratégies de contrôle avancées doivent être développées pour optimiser de manière adaptative les performances de l'échangeur de chaleur sur une large gamme de conditions de fonctionnement. Cela garantira un fonctionnement efficace tout en minimisant l'impact sur le poids du système et la perte de pression.

Ce programme de recherche vise à explorer le domaine relativement inexploré du contrôle actif de la turbulence près

de la paroi dans une couche limite chauffée, en combinant des simulations numériques avancées, des expériences et des techniques d'apprentissage automatique. Le projet cherche à faire progresser la connaissance fondamentale du contrôle des systèmes thermo-fluidiques turbulents à des nombres de Reynolds élevés, un domaine d'exploration en cours dans la communauté scientifique qui présente un grand potentiel pour les futures avancées dans l'amélioration du transfert de chaleur et l'efficacité énergétique. Les résultats réussis de cette recherche ont le potentiel de permettre des améliorations significatives de l'efficacité énergétique des échangeurs de chaleur dans diverses applications industrielles, conduisant au développement de systèmes d'ingénierie plus efficaces et plus durables.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs défis scientifiques doivent être relevés :

- Explorer si le transfert de chaleur convectif peut être considérablement amélioré sans encourir une pénalité de traînée substantielle en générant des structures tourbillonnaires longitudinales dans les écoulements turbulents à paroi. Une compréhension approfondie des mécanismes physiques sous-jacents régissant l'interaction entre ces structures tourbillonnaires et la turbulence près de la paroi est cruciale pour caractériser leur impact sur le transfert de chaleur et la traînée. Cela nécessitera une analyse détaillée du comportement de l'écoulement dans la région à paroi, où la viscosité et la conductivité thermique contrôlent le transport de la quantité de mouvement et de la chaleur, influençant à la fois le frottement de paroi et le transfert de chaleur.
- Développer des modèles robustes qui capturent la relation entre différents paramètres de contrôle (tels que la géométrie des actionneurs et l'excitation, la longueur d'onde et la vitesse transversale des structures tourbillonnaires) et leur influence sur le transfert de chaleur et la traînée. Ces modèles seront essentiels pour prédire les performances du système contrôlé et optimiser les stratégies de contrôle pour une efficacité maximale.
- Optimiser les stratégies de contrôle en intégrant les observations des expériences et des simulations numériques, ainsi que les capacités d'apprentissage automatique. Cette approche tirera parti des forces de chaque méthode, en combinant la haute fidélité des simulations numériques, le réalisme des données expérimentales et les capacités de reconnaissance de motifs et d'optimisation des algorithmes d'apprentissage automatique pour développer des stratégies de contrôle qui soient à la fois efficaces et robustes.
- Généraliser les résultats obtenus à une large gamme de conditions de fonctionnement (nombres de Reynolds, de Mach et de Prandtl) pour permettre des stratégies de contrôle multi-paramètres adaptées aux conditions variées rencontrées dans les systèmes aérospatiaux réels. Cela garantira que les stratégies de contrôle développées ne sont pas seulement applicables à un ensemble spécifique de conditions, mais peuvent être adaptées aux exigences variées rencontrées dans les systèmes aérospatiaux réels.

L'objectif ultime de ce programme de recherche est de construire une compréhension fondamentale suffisante du contrôle actif de la turbulence près de la paroi dans les couches limites chauffées pour permettre la conception rationnelle de systèmes de contrôle efficaces pour améliorer les échangeurs de chaleur à des nombres de Reynolds relativement élevés, tout en tenant compte des effets de compressibilité. En relevant les défis scientifiques décrits ci-dessus et en tirant parti de l'expertise des institutions partenaires, ce projet a le potentiel de contribuer de manière significative au domaine de l'amélioration du transfert de chaleur et de stimuler le développement d'échangeurs de chaleur plus efficaces et plus adaptables pour un large éventail d'applications industrielles, avec une pertinence particulière pour le secteur aérospatial.

Le défi fondamental auquel est confrontée la conception des échangeurs de chaleur installés dans les moteurs est la nécessité de s'adapter à une large gamme de conditions de fonctionnement. Cela inclut des événements extrêmes de température ambiante peu fréquents, tels que la spécification "journée extrêmement chaude". Bien que rares, ces événements se produisent généralement moins de cinq fois au cours de la durée de vie d'un moteur d'avion, mais ils dictent néanmoins la taille de l'échangeur de chaleur. Le système surdimensionné qui en résulte aura une marge thermique excessive dans des conditions typiques, avec une augmentation du poids et de la perte de pression associées, ce qui entraîne une consommation spécifique et une pénalité de consommation de carburant.

Ce projet vise à explorer le domaine relativement inexploré du contrôle actif de la turbulence près de la paroi dans une couche limite chauffée. Il combine des simulations numériques avancées, des expériences et des techniques d'apprentissage automatique. Les avancées dans ce domaine pourraient conduire à des améliorations significatives de l'efficacité énergétique des échangeurs de chaleur pour diverses applications industrielles. Outre son intérêt technologique, ce projet vise à faire progresser la connaissance fondamentale du contrôle des systèmes thermo-fluidiques turbulents à des nombres de Reynolds élevés, un domaine qui est actuellement en cours d'exploration.

Les défis scientifiques à relever sont :

- Comprendre comment la génération de structures tourbillonnaires longitudinales pourrait améliorer le transfert de chaleur sans augmenter la traînée, y compris les mécanismes physiques impliqués.
- Développer des modèles robustes de la manière dont différents paramètres de contrôle (géométrie et excitation des actionneurs, longueur d'onde, vitesse transversale des structures tourbillonnaires, etc.) influencent le transfert de chaleur et la traînée.

- Optimiser les stratégies de contrôle en intégrant les observations des expériences et des simulations numériques, ainsi que les capacités d'apprentissage automatique.
- Généraliser les résultats obtenus à une large gamme de conditions de fonctionnement (nombres de Reynolds, de Mach et de Prandtl) pour permettre des stratégies de contrôle multi-paramètres adaptées à la large gamme de conditions pertinentes pour les applications aérospatiales.

L'objectif est de construire une compréhension fondamentale suffisante pour permettre la conception rationnelle de systèmes de contrôle efficaces pour améliorer les échangeurs de chaleur à des nombres de Reynolds relativement élevés, en tenant compte des effets de compressibilité.

Les stratégies de manipulation des écoulements peuvent être classées en deux groupes distincts. Le premier englobe les techniques visant à modifier l'écoulement primaire, tandis que le deuxième groupe est basé soit sur l'introduction, soit sur l'exploitation des écoulements secondaires. Lorsqu'il est possible, il est plus souhaitable d'utiliser les instabilités de l'écoulement pour le contrôle de l'écoulement, car les mouvements d'écoulement secondaire se développent naturellement à partir d'une perturbation mineure. Une large gamme de méthodologies a été examinée pour améliorer le transfert de chaleur sur une plaque. Ces études indiquent que, indépendamment du type de turbulators utilisés, les dispositifs présentant la plus grande efficacité sont ceux qui favorisent les écoulements secondaires contre-rotatifs (Jacobi and Shah 1995; Fiebig 1995). La génération passive de vortex longitudinaux s'est révélée particulièrement efficace pour augmenter le transfert de chaleur. En effet, en augmentant le mélange de la quantité de mouvement près de la paroi, les vortex longitudinaux entraînent la couche limite à devenir turbulente (Jacobi and Shah 1995; Méndez, Shadloo, and Hadjadj 2020). Dans les cas où la couche limite est déjà turbulente, une augmentation du mélange de la quantité de mouvement combinée à un amincissement de la couche limite dû à un affaissement, conduit à une augmentation du transfert de chaleur convectif. Cependant, cet avantage est partiellement neutralisé par l'affaissement, entraînant une variation transversale à la fois du transfert de chaleur et de la traînée. Cette variation de température à travers la largeur entraîne des contraintes importantes sur la structure. Pour surmonter cette limitation, l'idée est **d'appliquer des stratégies de contrôle d'écoulement instables en utilisant une excitation périodique qui exploite les phénomènes d'instabilité naturelle de l'écoulement**. Un aspect innovant de cette proposition de recherche est l'exploitation des instabilités de l'écoulement pour générer de grands vortex longitudinaux avec des perturbations très faibles. Les avantages sont : (i) ils sont plus faciles à contrôler, et (ii) plus rentables. Le contrôle instable de l'écoulement via une excitation périodique exploitant les instabilités naturelles de l'écoulement a le potentiel de surmonter les barrières d'efficacité.

L'étude se concentre sur l'écoulement sur une paroi concave, comme illustré dans la Figure 13. La courbure de la paroi induit des forces centrifuges qui conduisent à des instabilités de flux secondaires, c'est-à-dire à la formation de tourbillons cohérents de flux connus sous le nom de vortex de Görtler. L'objectif principal est de comprendre l'effet de ces structures sur le transfert de chaleur dans un écoulement turbulent à paroi. Par la suite, une loi de contrôle sera conçue en utilisant des actionneurs plasma pour fournir une stratégie de contrôle optimale qui maximise le transfert de chaleur avec une pénalité de traînée minimale. Le projet repose sur des simulations numériques et des expériences soutenues par des techniques d'apprentissage automatique (ML) de manière intégrée. Les algorithmes de ML incluent la réduction dimensionnelle, la modélisation dynamique bas-dimensionnelle et la conception de lois de contrôle optimales, et sont organisés en 4 étapes distinctes :

⇒ **1 Révéler la physique.** L'effet des structures tourbillonnaires longitudinales sera étudié. Ces structures, caractérisées par une large gamme de longueurs d'onde transversales et des degrés variables de cohérence longitudinale, sont générées par une force corporelle. Il convient de noter, cependant, que celles-ci ne reflètent pas nécessairement des stratégies de contrôle pratiques. L'objectif fondamental est d'élucider la corrélation entre la traînée et le transfert de chaleur associé aux vortex longitudinaux instables. Pour ce faire, des algorithmes statistiques, des décompositions basées sur les données et des algorithmes d'apprentissage automatique tels que l'autoencodeur seront utilisés.

L'objectif principal est de développer un modèle dynamique bas-dimensionnel et d'identifier les structures tourbillonnaires qui ont le plus grand impact sur le mélange de la quantité de mouvement, la traînée et le transfert de chaleur. Compte tenu de la complexité inhérente des écoulements à paroi, il est essentiel que les algorithmes d'apprentissage automatique soient guidés par notre compréhension des phénomènes qui régissent la dynamique (Agostini and Leschziner 2014; Silva et al. 2020). Le savoir obtenu à partir de cette étape fondamentale jouera un rôle important dans les deux étapes suivantes.

⇒ **2 Prédiction de l'écoulement.** Cette étape se compose de deux parties indépendantes, avec des objectifs différents :

- **Conception d'un estimateur robuste.** Les expériences qui étudient les écoulements turbulents à paroi rencontrent des défis importants lorsqu'il s'agit de mesurer directement les quantités d'intérêt, telles que le transfert de chaleur et la traînée de frottement. Pour surmonter cette limitation, une approche prometteuse consiste à utiliser des bases de données issues de simulations numériques et d'expériences pour développer des algorithmes capables d'estimer ces variables à partir de mesures directes. Une méthodologie pour améliorer la précision

consiste à utiliser la programmation génétique. Cela suit un principe évolutif où une population initiale de modèles est progressivement affinée grâce aux opérations de sélection et de reproduction. Li et al. (2018) a démontré l'efficacité de cette technique pour produire des estimateurs linéaires. De plus, l'intégration de l'assimilation de données en temps réel pour mettre à jour les paramètres du modèle pourrait potentiellement améliorer la robustesse contre le bruit et les petits changements de configuration de l'écoulement. En combinant simulations, expériences et méthodes d'apprentissage automatique, il est possible d'inférer des quantités difficiles à mesurer et de construire des modèles réduits fiables. Cela fait progresser notre compréhension de la dynamique de la turbulence à paroi et des interactions qui contrôlent le transfert de chaleur et la traînée.

- **Amélioration des fermetures RANS/LES.** L'une des principales difficultés de la modélisation RANS est de reproduire l'impact des flux secondaires (développement et rupture des streaks longitudinaux). Les modèles RANS instables peuvent être améliorés avec des algorithmes de ML en développant des termes correctifs d'un modèle de base avec un réseau neuronal profond (Ling, Kurzawski, and Templeton 2016; Cherroud et al. 2022) ou une programmation génétique (Weatheritt and Sandberg 2016).

⇒ **3 Conception de stratégies de contrôle réalistes.** L'objectif principal est de mener des investigations sur diverses stratégies de contrôle "réalistes" utilisant des actionneurs plasma. Ici, "réaliste" signifie que les dispositifs de contrôle sont viables pour une mise en œuvre expérimentale. Initialement, des simulations numériques impliquant des actionneurs plasma seront exécutées en utilisant le code maison Oracle3D de Pprime. L'objectif central est de recréer des structures turbulentes, telles qu'identifiées dans la première étape, qui améliorent l'échange de chaleur entre la paroi et le fluide de travail, en utilisant diverses stratégies de forçage. Il est à noter que ce n'est qu'à travers les connaissances obtenues dans les étapes précédentes qu'il sera possible de restreindre la gamme des possibilités de paramètres de contrôle. Cela permettra aux algorithmes d'apprentissage automatique de converger plus rapidement vers une solution robuste.

#### ⇒ 4 Déterminer des stratégies de contrôle optimales.

Dans les tâches précédentes, l'objectif est de déterminer à partir de simulations numériques les caractéristiques que doivent avoir les structures cohérentes pour améliorer le transfert de chaleur. De plus, ces tâches visent à proposer des méthodes pour détecter ces structures à partir de mesures expérimentales. Dans ces tâches initiales, les efforts se sont concentrés sur l'identification, la modélisation et l'estimation des structures cohérentes. Tirant parti de ces connaissances, des investigations d'optimisation seront entreprises pour identifier la loi de contrôle la plus efficace.

Pour limiter la complexité et atténuer les risques, cette tâche sera divisée en deux étapes :

- Initialement, une étude paramétrique sera menée pour évaluer l'influence de différents paramètres des actionneurs plasma sur le transfert de chaleur et la traînée. Bien que la probabilité d'identifier une loi de contrôle optimale soit limitée par un ajustement manuel, cette étude cartographiera l'espace des paramètres et leurs impacts sur la turbulence près de la paroi pour préparer l'apprentissage par renforcement profond (DRL). Les expériences en soufflerie à IUSTI sont bien adaptées pour explorer efficacement les paramètres tels que la tension, la fréquence et l'agencement des actionneurs. Les réglages les plus prometteurs trouvés pour manipuler la dynamique près de la paroi seront ensuite analysés en profondeur à l'aide de simulations numériques. Les simulations fournissent un accès détaillé aux structures cohérentes générées et aux effets du chauffage sur les vortex secondaires et le transfert de chaleur. L'étude paramétrique a deux objectifs :
  1. Effectuer une exploration large mais grossière du domaine des paramètres de contrôle afin de le restreindre pour le DRL. Ainsi, avec un domaine de recherche plus limité, cela permettra au DRL de limiter sa phase d'exploration et de se concentrer davantage sur l'exploitation afin de converger plus rapidement vers une solution robuste.
  2. Améliorer la compréhension de la physique des écoulements contrôlés. Cela affinera les modèles de prédiction et d'estimation développés dans les précédents WPs. Surtout, cela facilitera la conception de fonctions de coût et de récompense pertinentes, en intégrant des connaissances physiques. Avec des fonctions de coût et de récompense basées sur la physique, le DRL sera plus efficace pour trouver la loi de contrôle optimale.
- Ensuite, le DRL sera appliqué pour rechercher de manière autonome la meilleure loi de contrôle afin de maximiser le transfert de chaleur tout en minimisant les pertes de pression. Le DRL est une technique d'apprentissage par renforcement basée sur des réseaux neuronaux profonds dans laquelle un agent interagit avec son environnement en prenant des actions et en recevant des récompenses. Son objectif est de déterminer les actions optimales qui maximisent ses récompenses à long terme. Différentes variantes du DRL seront testées, en variant l'architecture du réseau neuronal, les algorithmes d'apprentissage et d'exploration, et la définition des récompenses. L'objectif est de déterminer l'approche la plus efficace pour trouver rapidement une loi de contrôle optimale, même avec un temps de calcul limité. En fin de compte, le DRL devrait atteindre des performances difficiles à atteindre avec une

méthode conventionnelle. La mise en œuvre des algorithmes de DRL sera effectuée par le chercheur postdoctoral et se poursuivra jusqu'à la fin de son financement.

## 9 Observations

### 9.1 HDR

Je devrais soutenir mon HDR avant la fin Novembre, la composition du jury est la suivante :

**Jacques Borée**

Professeur, ENSMA, Laboratoire Pprime  
Université de Poitiers

**Sergei I Chernyshenko**

Professor of Aerodynamics, Department of Aeronautics  
Imperial College London

**Laurent Cordier**

Directeur de Recherche CNRS, Laboratoire Pprime  
Université de Poitiers

**Nicholas Hutchins**

Professor, Department of Mechanical Engineering  
University of Melbourne  
*(It is likely that he will participate in the jury via video conference.)*

**Bérengère Podvin**

Directrice de Recherche CNRS, Laboratoire EM2C  
CentraleSupélec

**Jean-Christophe Robinet**

Professor, DynFluid Laboratory  
Arts et Métiers Institute of Technology

**Michael Leschziner**

Professor of Aerodynamics, Department of Aeronautics  
Imperial College London

### 9.2 Appels à projets auxquels j'ai répondu

Le manque de moyens financiers contraint les chercheurs à consacrer un temps considérable à la rédaction de projets dans le but de décrocher des financements, au détriment du temps réellement passé à faire de la recherche. C'est une tâche extrêmement chronophage et frustrante, mais néanmoins nécessaire pour pouvoir mener une activité de recherche pérenne.

Voici quelques exemples d'appels à projets auxquels j'ai répondu ces dernières années, ainsi qu'une estimation du temps que j'y ai consacré :

- 3 ANR JCJC (Jeunes Chercheuses et Jeunes Chercheurs) : environ 8 mois au total
- 6 ANR PRC/PRCE (Projets de Recherche Collaborative) : environ 4 mois
- 1 projet Région : environ 2 mois
- 3 programmes CNRS de thèses en cotutelle internationale : environ 2 mois
- 2 projets AIRSTRIP (IRT Saint-Exupéry) : environ 3 mois

Malgré un faible taux de réussite inhérent à la compétitivité de ces appels à projets, y répondre représente un investissement indispensable pour maintenir une activité de recherche pérenne et compétitive au sein de mon laboratoire. C'est un processus chronophage et souvent frustrant, mais malheureusement obligatoire faute de moyens financiers et humains suffisants alloués à la recherche publique.

Il est important de souligner que le temps consacré au montage de ces projets empiète significativement sur le temps de recherche à proprement parler, celui passé à faire avancer les connaissances et les compétences scientifiques et techniques. Un meilleur financement récurrent des laboratoires publics permettrait aux chercheurs de se consacrer pleinement à leur cœur de métier.



## References

- Agostini, L. (June 2020). "Exploration and prediction of fluid dynamical systems using auto-encoder technology". In: *Physics of Fluids* 32.6, p. 067103. ISSN: 1070-6631.
- Agostini, L. and M. Leschziner (2014). "On the influence of outer large-scale structures on near-wall turbulence in channel flow". In: *Physics of Fluids* 26.7, p. 075107.
- (July 2019). "The connection between the spectrum of turbulent scales and the skin-friction statistics in channel flow at". en. In: *Journal of Fluid Mechanics* 871. Publisher: Cambridge University Press, pp. 22–51. ISSN: 0022-1120, 1469-7645.
- (2021). "Statistical analysis of outer large-scale/inner-layer interactions in channel flow subjected to oscillatory drag-reducing wall motion using a multiple-variable joint-probability-density function methodology". In: *Journal of Fluid Mechanics* 923. Publisher: Cambridge University Press.
- (Nov. 2022). "Auto-encoder-assisted analysis of amplitude and wavelength modulation of near-wall turbulence by outer large-scale structures in channel flow at friction Reynolds number of 5200". In: *Physics of Fluids* 34.11, p. 115142. ISSN: 1070-6631.
- Agostini, L, E Toubert, and M. Leschziner (2015). "The turbulence vorticity as a window to the physics of friction-drag reduction by oscillatory wall motion". In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 51, pp. 3–15.
- Auteri, F. et al. (Nov. 2010). "Experimental assessment of drag reduction by traveling waves in a turbulent pipe flow". In: *Physics of Fluids* 22.11, p. 115103. ISSN: 1070-6631.
- Brunton, Steven L, Bernd R Noack, and Petros Koumoutsakos (2019). "Machine learning for fluid mechanics". In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 52. Publisher: Annual Reviews.
- Cherroud, S. et al. (2022). "Sparse Bayesian Learning of Explicit Algebraic Reynolds-Stress models for turbulent separated flows". In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 98. Publisher: Elsevier, p. 109047.
- Colburn, Allan P. (1964). "A method of correlating forced convection heat-transfer data and a comparison with fluid friction". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 7.12. Publisher: Elsevier, pp. 1359–1384.
- Eivazi, Hamidreza et al. (2022). "Towards extraction of orthogonal and parsimonious non-linear modes from turbulent flows". In: *Expert Systems with Applications* 202. Publisher: Elsevier, p. 117038.
- Fiebig, Martin (1995). "Embedded vortices in internal flow: heat transfer and pressure loss enhancement". In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 16.5. Publisher: Elsevier, pp. 376–388.
- Gatti, Davide and Maurizio Quadrio (Dec. 2013). "Performance losses of drag-reducing spanwise forcing at moderate values of the Reynolds number". en. In: *Physics of Fluids* 25.12, p. 125109. ISSN: 1070-6631, 1089-7666.
- Guérin, Lou et al. (May 2024). *Preferential Enhancement of Convective Heat Transfer Over Drag Via Near-Wall Turbulence Manipulation Using Spanwise Wall Oscillations*. en. SSRN Scholarly Paper. Rochester, NY.
- Jacobi, A. M. and R. K. Shah (1995). "Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: a review of recent progress". In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 11.3. Publisher: Elsevier, pp. 295–309.
- Jung, WJ, N Mangiavacchi, and R Akhavan (1992). "Suppression of turbulence in wall-bounded flows by high-frequency spanwise oscillations". In: *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)* 4.8, pp. 1605–1607.
- Kaiser, Eurika et al. (2014). "Cluster-based reduced-order modelling of a mixing layer". In: *Journal of Fluid Mechanics* 754. Publisher: Cambridge University Press, pp. 365–414.
- Lee, M. and R. D. Moser (July 2015). "Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $\mathrm{Re}_\tau \approx 5200$ ". In: *Journal of Fluid Mechanics* 774, pp. 395–415. ISSN: 1469-7645.
- Li, R. et al. (2018). "Linear Genetic Programming Control for strongly nonlinear dynamics with frequency crosstalk". In: *Arch. Mech.* 70.6, pp. 505–534.
- Ling, Julia, Andrew Kurzwaski, and Jeremy Templeton (2016). "Reynolds averaged turbulence modelling using deep neural networks with embedded invariance". In: *Journal of Fluid Mechanics* 807. Publisher: Cambridge University Press, pp. 155–166.
- Lozano-Durán, A. and J. Jiménez (2014). "Effect of the computational domain on direct simulations of turbulent channels up to  $\mathrm{Re}_\tau = 4200$ ". In: *Physics of Fluids* 26.1. Publisher: AIP Publishing, p. 011702.
- Marusic, I., R. Mathis, and N. Hutchins (2010). "Predictive model for wall-bounded turbulent flow". In: *Science* 329.5988, pp. 193–196.
- Marusic, Ivan et al. (Oct. 2021). "An energy-efficient pathway to turbulent drag reduction". en. In: *Nature Communications* 12.1. Number: 1 Publisher: Nature Publishing Group, p. 5805. ISSN: 2041-1723.
- Mathis, R. et al. (2009). "Comparison of large-scale amplitude modulation in turbulent boundary layers, pipes, and channel flows". In: *Physics of Fluids* 21.11, p. 111703.
- Méndez, M, Mostafa Safdari Shadloo, and A Hadjadj (2020). "Heat-transfer analysis of a transitional boundary layer over a concave surface with Görtler vortices by means of direct numerical simulations". In: *Physics of Fluids* 32.7. Publisher: AIP Publishing LLC, p. 074111.
- Quadrio, M. and P. Ricco (2004). "Critical assessment of turbulent drag reduction through spanwise wall oscillations". In: *Journal of Fluid Mechanics* 521, pp. 251–271.
- Quadrio, M., P. Ricco, and C. Viotti (2009). "Streamwise-travelling waves of spanwise wall velocity for turbulent drag reduction". In: *Journal of Fluid Mechanics* 627, pp. 161–178.
- Ricco, P. et al. (2012). "Changes in turbulent dissipation in a channel flow with oscillating walls". In: *Journal of Fluid Mechanics* 700.1, pp. 1–28.
- Samuel, Arthur L (1959). "Some studies in machine learning using the game of checkers". In: *IBM Journal of research and development* 3.3. Publisher: IBM, pp. 210–229.
- Silva, CM de et al. (2020). "Periodicity of large-scale coherence in turbulent boundary layers". In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 83. Publisher: Elsevier, p. 108575.

Weatheritt, J. and R. Sandberg (2016). "A novel evolutionary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress–strain relationship". In: *Journal of Computational Physics* 325. Publisher: Elsevier, pp. 22–37.