

## **Appel à candidatures** pour une **thèse de doctorat**

### *Performance et persistance de coussins d'air retenus par des surfaces super-hydrophobes en présence de conditions turbulentes*

#### **Encadrement :**

BASLEY Jérémy, VAYRON Romain, ROBACHE Frédéric, KEIRSBULCK Laurent (**dir. de thèse**)

Contact : [jeremy.basley@uphf.fr](mailto:jeremy.basley@uphf.fr)

**Candidatures :** souhaitées le plus rapidement possible

***N'hésitez pas à nous contacter avec votre CV et des lettres de recommandation***

**Mots-clefs :** turbulence, instabilités, hydrodynamique, texturation des surfaces, rugosité, surfaces hydrophobes, hydrophiles, applications marines et navales.

#### **Profil recherché :**

- Master ou diplôme d'ingénieur en Mécanique des fluides
- Solides bases théoriques
- Curiosité scientifique et motivation pour la recherche
- Expérience ou/et motivation dans les sciences expérimentales
- Appétence pour les applications navales

#### **Résumé du sujet de thèse**

Cette thèse vise à concevoir et caractériser des surfaces texturées multi-échelles permettant une réduction significative des frottements dans des écoulements liquides, mais compatible avec des conditions réelles d'utilisation. Le travail se concentre sur une gamme de rugosités encore peu explorée ( $5 \mu\text{m} < Ra < 500 \mu\text{m}$ ), comprise entre les micro-texturations des surfaces superhydrophobes classiques et les texturations macroscopiques de type riblets.

Un premier objectif consiste à établir des relations entre les paramètres géométriques des texturations (taille, forme, pas, anisotropie) et leur capacité à piéger un film gazeux stable au voisinage de la paroi. Les conditions d'apparition, de maintien et de rupture de cette couche d'air seront étudiées en fonction de la mouillabilité de la surface et des conditions d'écoulement, afin d'identifier des configurations géométriques optimales maximisant la réduction de traînée.

Un second objectif porte sur l'évaluation des performances hydrodynamiques des surfaces en l'absence de film gazeux, afin de quantifier l'effet de la rugosité des texturations seules. L'influence du régime d'écoulement et du niveau de turbulence sur leur efficacité sera analysée, dans le but de mieux comprendre la réorganisation de la turbulence au contact des rugosités intermédiaires et d'identifier des domaines de fonctionnement pertinents pour une stratégie de contrôle passif.

Enfin, la durabilité des surfaces développées sera étudiée au moyen d'essais tribologiques visant à évaluer leur résistance à l'usure et leur durée de vie. Les résultats attendus incluent l'établissement de lois de conception reliant géométrie, mouillabilité et performances hydrodynamiques, la démonstration expérimentale de surfaces durables réduisant efficacement le frottement avec ou sans film gazeux, ainsi que des perspectives applicatives pour les domaines marin et naval, accompagnées de publications scientifiques internationales.

## DESRIPTIF DU SUJET

### 1) Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique et économique

La réduction drastique de la condition de non-glissement à la paroi par un film gazeux a depuis longtemps été utilisée pour minimiser la traînée dans les applications navales, et notamment les véhicules sous-marins [Lauga & Brenner, 2004]. La fabrication et le maintien du film gazeux ont longtemps reposés sur l'injection constante de gaz à travers la surface ou/et par de larges cavités utilisant la flottabilité (carénage ventral sous les navires), comme illustré en Figure 1.

Ces dernières années, un intérêt croissant a été porté sur l'utilisation de surfaces superhydrophobes pour maintenir la couche gazeuse (bien souvent d'air) en contact de la paroi [Song et al, 2018]. Ces surfaces superhydrophobes consistent généralement à créer des rugosités (pouvant descendre jusqu'à la dizaine de nm) piégeant des microbulles d'air (de viscosité typiquement deux ordres de grandeur plus faible que les liquides) et faisant ainsi « glisser » l'écoulement liquide extérieur. Des réductions de traînée d'environ 40% ont ainsi été observées [Wang et al 2022]. Cependant, ces surfaces posent d'innombrables questions sur les paramètres géométriques de la texturation qui sont favorables au piégeage de bulles d'air. Elles sont par ailleurs, fragiles voire éphémères, et de fabrication coûteuse.

Des études récentes portent sur des texturations de plus grande taille (10-100  $\mu\text{m}$ ) permettant une meilleure durabilité. On peut notamment citer [Zhao et al 2025] qui ont démontré la performance de la texturation laser pour former des rugosités de type « *riblets* » (peau de requin) larges de 10  $\mu\text{m}$  et hauts de 20  $\mu\text{m}$  et ainsi diminuer les frottements à la paroi. La capture des bulles d'air était moins efficace mais fournissait encore une réduction de traînée de 11%, intéressante pour une stratégie de contrôle passif.

Extraite de  
[Wang et al 2022]

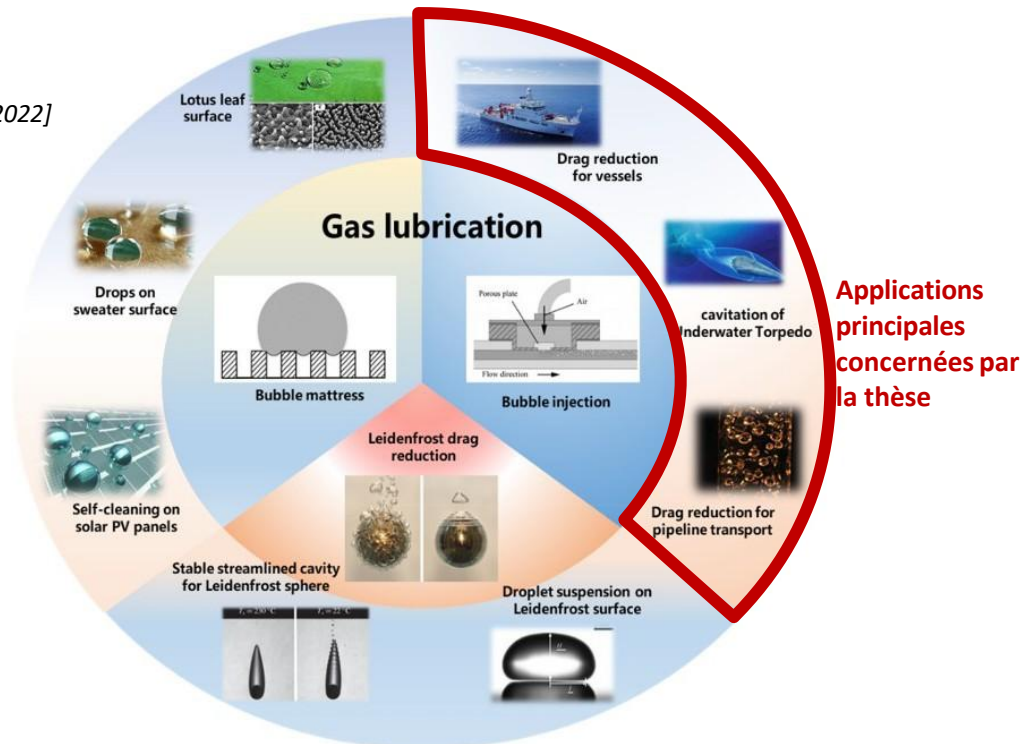


Figure 1 : Différentes applications de la lubrification par couche gazeuse

On se propose d'étudier une gamme de rugosité intermédiaire ( $5 \mu\text{m} < Ra < 500\mu\text{m}$ ) entre les micro-rugosités des surfaces superhydrophobes et les *riblets* macroscopiques non

hydrophobes mais réduisant la traînée sans film gazeux [Zani et al 2024]. Les échelles de texturation visées sont inaccessibles à des méthodes traditionnelles d'usinage mais sont atteignables avec la technologie laser femtoseconde du laboratoire LAMIH. Des essais préliminaires ont permis d'identifier un ensemble de paramètres pertinents pour la fabrication de surfaces superhydrophobes et superhydrophiles. Une fois les surfaces d'intérêt obtenues, elles devront être soumises à des essais tribologiques afin d'évaluer leur résistance à l'usure et, par conséquent, d'estimer leur durée de vie en conditions réelles d'utilisation. Le premier objectif est de pouvoir à la fois bénéficier d'une réduction de frottements importante quand un film d'air est piégé (émersion régulière) tout en conservant une durabilité plus importante et un effet non négligeable des *riblets* en l'absence de film. Le deuxième objectif est d'identifier l'influence de turbulences dans l'écoulement sur les performances du système.

## 2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil

La thématique de cette thèse s'inscrit pleinement dans des axes de recherche actuels du LAMIH — efficacité énergétique, sobriété des transports et durabilité des surfaces texturées — et repose sur une approche intrinsèquement transverse au sein du département de Mécanique. L'utilisation de techniques avancées de texturation de surfaces par laser femto-seconde (voir Figure 2), développées et maîtrisées par Romain Vayron et Frédéric Robache — groupe *Matériaux, Surfaces et Procédés (MSP)* —, pour répondre aux problématiques des écoulements pariétaux et de réduction de la traînée, portées par Jérémy Basley et Laurent Keirsbulck — au cœur des activités du groupe *Dynamique des Matériaux, des Structures et des Fluides (DMSF)*.

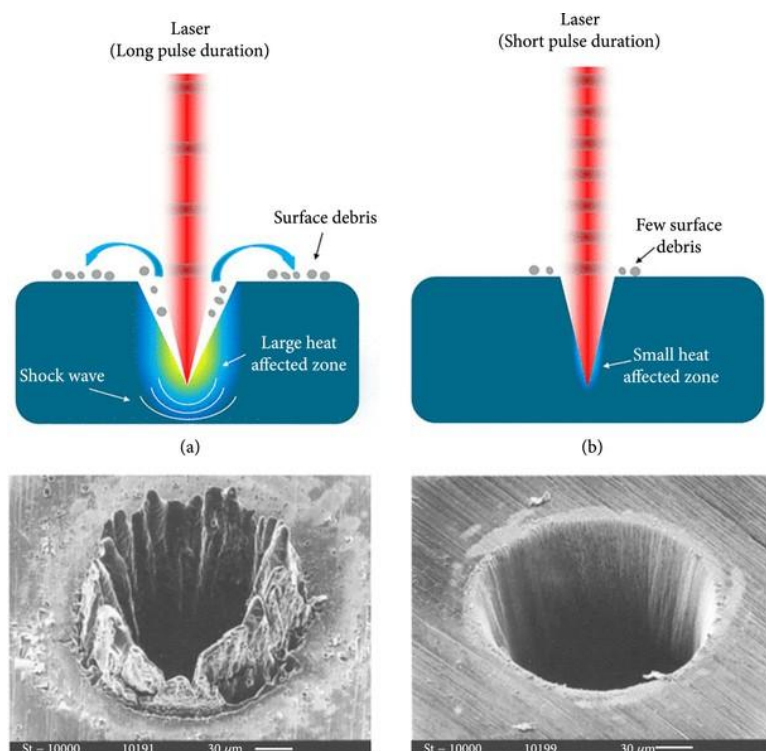


Figure 2 : Précision et qualité de la texturation améliorées par laser femtoseconde

Les écoulements au voisinage des parois rugueuses ou de géométries complexes et la réponse dynamique de ces systèmes (véhicules, voilures, turbomachines) constituent le principal sujet des recherches menées par Jérémy Basley ([Basley et al 2018, 2022](#)) et Laurent Keirsbulck ([Keirsbulck et al 2023, 2024](#)). Récemment, les travaux de notre groupe se focalisent sur l'influence des perturbations extérieures sur cette dynamique. On peut citer la thèse de Chandra Sekhar Kommineni (2025) portant sur l'effet d'une turbulence amont (générée par grille fractale) sur le sillage d'un corps élané ellipsoïdal, ou encore le projet ANR REACTIVE tout juste débuté en Septembre 2025, en collaboration avec le département d'Automatique,

s'intéressant à la stabilité, la contrôlabilité et l'autonomie des véhicules routiers ultralégers en présence de conditions réalistes de trafic et de vent.

Le laboratoire LAMIH dispose d'installations expérimentales de pointe permettant à la fois la fabrication contrôlée de rugosités multi-échelles et leur caractérisation, ainsi que l'étude des écoulements en conditions laminaire et turbulente. Après avoir été récemment utilisé pour l'étude de la turbulence de grille et de sillage, le canal hydrodynamique est actuellement modernisé et permettra de recevoir les campagnes expérimentales prévues au cours de cette thèse dans les meilleures conditions. Des travaux antérieurs menés au LAMIH ont déjà porté sur la texturation de surfaces fonctionnelles – voir Figure 3 – et sur l'analyse des interactions fluide-paroi (en particulier avec des textures superhydrophobes et superhydrophiles). Cette expérience constitue ainsi un socle scientifique solide pour le développement de la réduction de traînée par coussin d'air.

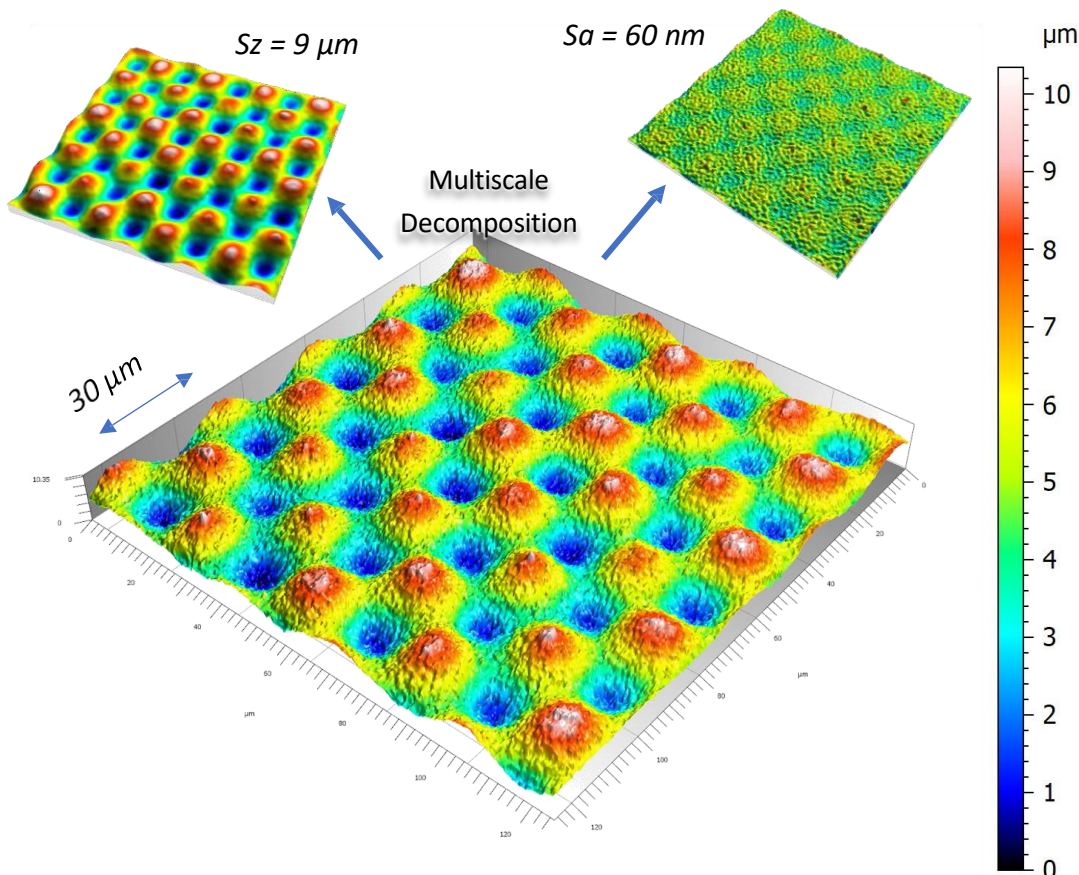


Figure 3 : Texture double sinus obtenue par le laser femtoseconde.  
L'état de surface est mesuré pour évaluer le bruit de fabrication

Ce travail de thèse viendrait ainsi structurer et renforcer une thématique émergente au LAMIH, à l'interface entre sciences des matériaux, mécanique des surfaces et dynamique des écoulements, tout en valorisant le caractère pluridisciplinaire du laboratoire.

### 3) Les objectifs visés, les résultats escomptés

L'objectif principal de cette thèse est d'identifier, concevoir et caractériser des surfaces texturées multi-échelles permettant une réduction significative des frottements pariétaux dans des écoulements liquides, tout en garantissant une durabilité compatible avec des conditions réelles d'utilisation. Le travail visera en particulier une gamme de rugosités

( $5 \mu\text{m} < r < 500 \mu\text{m}$ ) encore peu explorée à ce jour, intermédiaire entre les micro-texturations des surfaces superhydrophobes classiques et les texturations macroscopiques de type riblets,

Un premier objectif scientifique consistera à établir des relations entre les paramètres géométriques des texturations (taille, forme, pas, anisotropie) et leur capacité à piéger un film gazeux stable au voisinage de la paroi. Il s'agira notamment de déterminer les conditions d'apparition, de maintien et de rupture de la couche d'air en fonction de la mouillabilité de la surface et des conditions d'écoulement. Les résultats attendus sont l'identification de configurations géométriques optimales maximisant la réduction de traînée en présence d'un film gazeux.

Un second objectif portera sur l'évaluation des performances hydrodynamiques des surfaces en l'absence de film gazeux, afin de quantifier l'effet propre des texturations de type riblets sur la réduction de frottements. L'influence du régime d'écoulement, et en particulier du niveau de turbulence, sur l'efficacité des surfaces sera analysée. Les résultats escomptés incluent une meilleure compréhension des mécanismes d'interaction entre turbulence et rugosités intermédiaires, ainsi que l'identification de domaines de fonctionnement pertinents pour une stratégie de contrôle passif.

Un troisième objectif concernera la durabilité des surfaces développées. Des essais tribologiques seront menés afin d'évaluer la résistance à l'usure des texturations et d'estimer leur durée de vie en conditions d'exploitation. Les résultats attendus sont la mise en évidence de compromis entre performance hydrodynamique et robustesse mécanique, et la définition de critères de conception orientés vers des applications industrielles.

À l'issue de la thèse, les résultats escomptés sont (i) l'établissement de lois de conception reliant géométrie, mouillabilité et performances hydrodynamiques, (ii) la démonstration expérimentale de surfaces texturées durables offrant une réduction de frottement significative avec ou sans film gazeux, et (iii) des perspectives applicatives pour les domaines marin et naval. Ces travaux devraient également conduire à des publications scientifiques de rang international et contribuer au rayonnement du laboratoire dans le domaine des surfaces fonctionnelles pour la dynamique des écoulements.

#### **4) Le programme de travail avec les livrables et l'échéancier prévisionnel**

Le programme de travail est organisé en quatre workpackages (WP) successifs et partiellement imbriqués, couvrant l'ensemble de la durée de la thèse (36 mois).

**WP1 - État de l'art, définition des paramètres et mise en place des outils (M0–M6).** Cette première étape sera consacrée à une revue approfondie de la littérature sur la réduction de traînée par surfaces texturées, les surfaces superhydrophobes, les riblets et les interactions turbulence/rugosité. En parallèle, les outils expérimentaux nécessaires seront mis en place et adaptés aux besoins du projet (procédés de texturation laser, protocoles de caractérisation de surface, dispositifs d'essais hydrodynamiques et tribologiques (incluant la mesure des forces, des vitesses, des pressions, et des mécanismes de mouillabilité et d'usure sous sollicitations mécaniques et fluides maîtrisées).

*Livrables :*

- Rapport d'état de l'art et de positionnement scientifique

- Cahier des charges des surfaces à fabriquer
- Protocoles expérimentaux validés

**WP2 - Fabrication et caractérisation des surfaces texturées (M6–M18).** Ce travail portera sur la fabrication de surfaces texturées multi-échelles dans la gamme de rugosités visée ( $5 \mu\text{m} < \text{Ra} < 500 \mu\text{m}$ ) par laser femtoseconde. Différentes géométries (motifs périodiques, anisotropes, riblets modifiés) et états de mouillabilité (superhydrophobes et superhydrophiles) seront explorés. Les surfaces produites feront l'objet d'une caractérisation morphologique et physico-chimique (topographie, mouillabilité, homogénéité, reproductibilité).

*Livrables :*

- Bibliothèque de surfaces texturées caractérisées
- Base de données reliant paramètres laser et géométrie des rugosités
- Rapport intermédiaire de fabrication et caractérisation

**WP3 - Évaluation hydrodynamique et étude de l'influence de la turbulence (M12–M30).** Les surfaces sélectionnées seront soumises à des essais en écoulement afin de mesurer la réduction de frottements en présence et en absence de film gazeux. L'influence du régime d'écoulement (laminaire à turbulent) et des niveaux de turbulence sera analysée. Cette étape visera à identifier les mécanismes dominants gouvernant les performances hydrodynamiques des surfaces texturées intermédiaires.

*Livrables :*

- Jeux de données expérimentales sur la réduction de traînée
- Analyse de l'influence de la turbulence et du film gazeux
- Publication(s) scientifique(s) intermédiaire(s)

**WP4 - Durabilité, essais tribologiques et valorisation des résultats (M24–M36).** Ce dernier WP sera consacré à l'étude de la durabilité des surfaces via des essais tribologiques représentatifs des conditions d'utilisation. L'impact de l'usure sur les performances hydrodynamiques sera évalué. Les résultats seront synthétisés afin de proposer des critères de conception optimisés et d'identifier des perspectives applicatives. La rédaction du manuscrit de thèse et la valorisation scientifique et technologique concluront le projet.

*Livrables :*

- Résultats d'essais tribologiques et analyse de durée de vie
- Recommandations de conception et perspectives applicatives
- Manuscrit de thèse
- Publication(s) scientifique(s) finale(s)

L'échéancier prévisionnel prévoit une progression cohérente entre les phases de conception, d'expérimentation et d'analyse, avec des chevauchements permettant d'optimiser la durée du projet et d'assurer une production scientifique continue tout au long de la thèse.

### **5) Les collaborations prévues (préciser le cadre, la nature des collaborations, l'ancrage national, international, la transdisciplinarité éventuellement)**

Le projet de thèse s'appuie sur un ensemble de collaborations structurées, existantes ou en cours de consolidation, s'inscrivant dans un cadre national et international, et reposant sur une forte dimension transdisciplinaire.

Le projet s'inscrit dans le cadre du **projet CARNOT-ARTS MARSUPILAMI (2025)**, qui constitue un environnement structurant favorisant les interactions avec des partenaires académiques et industriels. À ce titre, des échanges sont prévus avec le LMFL (**Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille**), reconnu pour son expertise en dynamique des écoulements, en particulier en turbulence et en écoulements pariétaux ; et l'**IRENav**, sur les applications marines et navales de la réduction de traînée, la transposition des résultats expérimentaux à des conditions réalistes d'utilisation et l'identification de verrous technologiques pour le passage à l'échelle réelle. Cette triple collaboration portera sur la conception des protocoles expérimentaux, l'analyse des résultats hydrodynamiques et l'interprétation physique des mécanismes de réduction de traînée. Elle se traduira par des échanges réguliers de personnels, l'accès à des moyens expérimentaux complémentaires et la co-encadrement scientifique de certains aspects du projet.

Sur le plan international, des collaborations pourront être envisagées avec des équipes académiques reconnues travaillant sur les surfaces superhydrophobes, les texturations bio-inspirées et la réduction de traînée en écoulement turbulent. Ces interactions pourront prendre la forme de séjours de recherche de courte durée, de participation conjointe à des campagnes expérimentales ou de publications communes, contribuant ainsi à l'ancrage international du projet et à la visibilité des travaux.

Enfin, le caractère intrinsèquement transdisciplinaire du projet constitue un élément central de la collaboration scientifique. La thèse se situe à l'interface entre la mécanique des fluides, la science des matériaux, la physique des surfaces et la tribologie. Elle mobilise des compétences variées en procédés laser, caractérisation de surface, dynamique des écoulements et durabilité mécanique, favorisant ainsi les échanges entre communautés scientifiques distinctes et le développement de méthodologies intégrées.

Ces collaborations permettront d'assurer à la fois l'excellence scientifique du projet, sa pertinence applicative et son inscription durable dans des réseaux de recherche nationaux et internationaux.

### **Bibliographie**

**Lauga E. & Brenner M. P.** "Dynamic mechanisms for apparent slip on hydrophobic surfaces", *Phys Rev E*, 70, 026311 (2004)

**Song, W. et al** "Experimental study of microbubble drag reduction on an axisymmetric body" *Mod Phys Lett B* 32 (3), 1850035 (2018)

**Wang H. et al** "Drag reduction by gas lubrication with bubbles", *Ocean Engineering*, 258. 111833, (2022)

**Zhao L. et al** "Study on the Fabrication and Drag Reduction Performance of Biomimetic Riblet-Polydimethylsiloxane-Graphene Composite Superhydrophobic Surface", *Materials Today Communications*, 26. 112884 (2025)

**Zani et al**, « Turbulent Boundary Layer Control with Multi-Scale Riblet Design », *Energies* 17, 15 (2024)

**Basley, J., Perret, L., Mathis R. « Spatial modulations of kinetic energy in the roughness sublayer ». *Journal of Fluid Mechanics*, 850, 584-610 (2018).**

**Basley J., Gouder K., Morrison J. F. « Mixing and large-scale modulation of a turbulent boundary layer perturbed by an effusion film ». 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP12), Osaka, Japan, (2022).**

**Keirsbulck L., Cadot O., Lippert M., Boussemart D., Basley J., Delprat S., Paganelli S. « Underbody flow control for base drag reduction of a real car model ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 252, pp. 105822 (2024)**

**Keirsbulck L., Cadot O., Basley J., Lippert M. « Base suction, entrainment flux, and wake modes in the vortex formation region at the rear of a three-dimensional blunt bluff body ». *Physical Review E*, 108, pp. 15101 (2023).**

**Kommineni C. S. « An experimental investigation of the effect of high intensity turbulence on a slenderbody wake », *These de doctorat*, (2025)**