



Extension gyroïdale imprimée en résine, collée sur le bord de fuite d'un hydrofoil en acier inoxydable. Figure: EPFL/Alain Herzog



Le gyroïde au service des machines hydrauliques

Une structure poreuse imprimée en 3D élimine les vibrations induites par l'écoulement

Les vibrations induites par l'écoulement (vortex-induced vibration, VIV) constituent l'un des défis majeurs de l'ingénierie hydraulique. Des turbines Francis aux pompes industrielles en passant par les hélices de navires et les voiliers à haute vitesse, les tourbillons générés par l'écoulement exercent des forces périodiques sur les structures immergées, provoquant bruit, fatigue accélérée et érosion par cavitation. Malgré des décennies de recherche, aucune solution passive n'est parvenue à éliminer complètement ces phénomènes sans dégrader les performances hydrodynamiques.

Une technologie développée à l'EPFL change la donne. En exploitant les propriétés remarquables d'une structure mathématique appelée «gyroïde», imprimée en 3D et appliquée aux zones critiques des profils hydrodynamiques (figure de titre), il a été possible de démontrer une réduction des vibrations allant jusqu'à 99,5%, ainsi que la suppression totale de la cavitation de tourbillon de bout d'aile, le tout sans altération mesurable des performances. Cette avancée, protégée par un brevet [1] et validée expérimentalement à des nombres de Reynolds industriels, ouvre des perspectives concrètes pour l'énergie hydraulique et au-delà.

Des tourbillons aux conséquences coûteuses

Lorsqu'un fluide s'écoule autour d'un obstacle, pale de turbine, aile d'hélice, ou aubage de pompe, il se forme en aval des tourbillons alternés, décrits théoriquement pour la première fois par Theodore von Kármán en 1911. Ces «tourbillons de Kármán» (figure 1) exercent des forces oscillantes sur la structure. Lorsque la fréquence de détachement des tourbillons coïncide avec une fréquence propre du corps, le système entre en résonance avec un risque de



Figure 1 Visualisation des tourbillons de Kármán et de la cavitation dans le sillage d'un profil, avec cavitation attachée au bord d'attaque, lors de tests réalisés dans le tunnel de cavitation à haute vitesse de l'EPFL. Figure: EPFL/Alain Herzog

RÉSUMÉ



couplage hydro-élastique (lock-in), un phénomène particulièrement redouté, car il peut persister sur une large plage de vitesses d'écoulement et conduire à la rupture en fatigue. L'histoire industrielle regorge d'exemples liés à ce phénomène : les fortes vibrations de ponts, de cheminées élancées et de conduites marines, ou encore l'apparition de fissures prématurées sur des turbines de plusieurs mètres de diamètre, en sont des illustrations frappantes.

À l'extrémité de l'aile s'ajoute un second mécanisme : le tourbillon marginal (tip vortex), un concentré de vorticités¹, qui se forme à l'extrémité de toute surface portante par différence de pression entre intrados (surface soumise à une pression plus élevée) et extrados (surface soumise à une pression plus faible). Dans les turbines hydrauliques, ce tourbillon génère une dépression locale si faible que la pression chute sous le seuil de vaporisation, formant de la vapeur à température ambiante. Ce phénomène, appelé cavitation, est une source d'érosion, de bruit et de perte de rendement. Dans les turbines et pompes axiales, la cavitation du tourbillon marginal est souvent le facteur limitant de la plage de fonctionnement. Un phénomène similaire est bien connu dans l'aéronautique, où l'ajout d'ailettes (winglets) en bout d'aile vise justement à atténuer ces tourbillons marginaux.

Les coûts associés sont considérables. Dans l'hydroélectricité, les vibrations excessives imposent des réductions de charge, des arrêts de maintenance fréquents et des réparations coûteuses d'aubes érodées, auxquels s'ajoutent les coûts dus à la perte de production. Les solutions traditionnelles, telles que l'arrondi des bords de fuite, l'ajout de winglets ou l'injection d'air, apportent une atténuation partielle mais incertaine et impliquent systématiquement un compromis avec les performances hydrodynamiques ou une complexité opérationnelle accrue.

Quand les mathématiques rencontrent l'impression 3D

Le gyroïde est une surface minimale triplement périodique (triplly periodic minimal surface, TPMS), identifiée par le mathématicien Alan Schoen en 1970. Elle sépare l'espace en deux réseaux de canaux entrelacés et tridi-

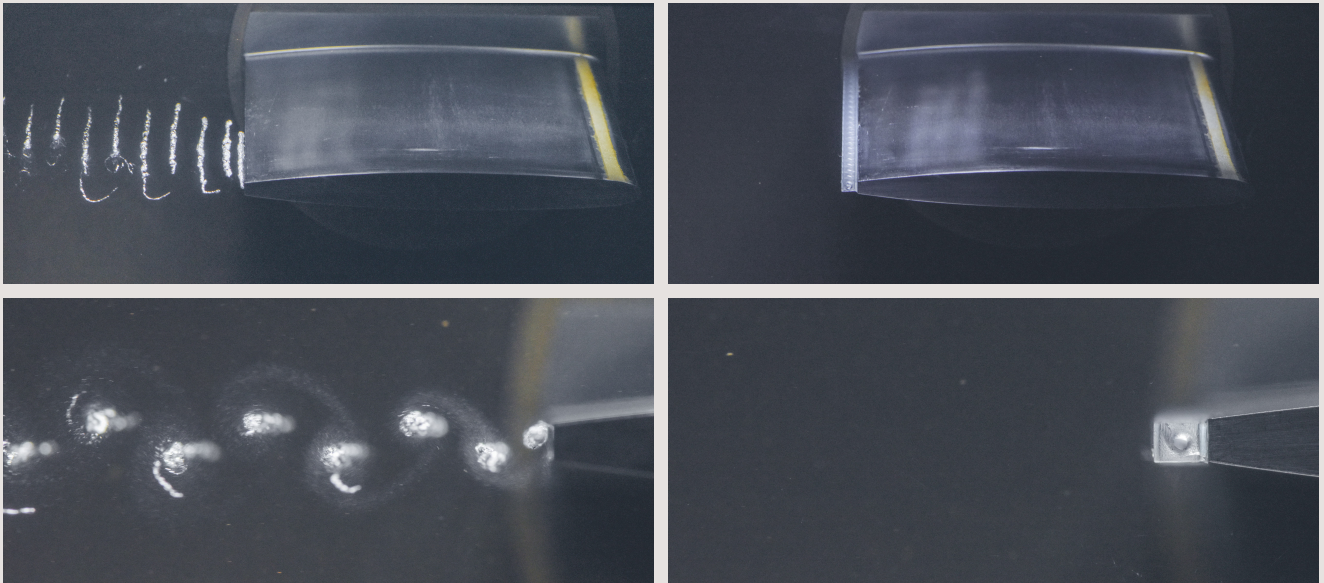


Figure 2 Comparaison du sillage tourbillonnaire entre le profil de référence (à gauche) et avec l'extension gyroïdale (à droite): visualisation expérimentale à une vitesse d'écoulement de 16 m/s et une pression statique de 1,7 bar. Figure: EPFL/Thomas Berger

mensionnels, formant une structure poreuse sans ligne droite: le fluide y suit des trajectoires tortueuses, ce qui favorise un mélange tridimensionnel et perturbe l'organisation des structures tourbillonnaires.

L'approche développée à l'EPFL consiste à fabriquer cette géométrie par impression 3D et à l'intégrer sous forme d'insert ou d'extension sur des

zones critiques, typiquement au bord de fuite ou à l'extrémité de pale (figure de titre). Ces structures sont ensuite testées dans le tunnel de cavitation à haute vitesse de l'EPFL, dans des conditions d'écoulement correspondant aux nombres de Reynolds industriels.

Les résultats expérimentaux indiquent deux effets clés. D'une part, la formation de tourbillons de

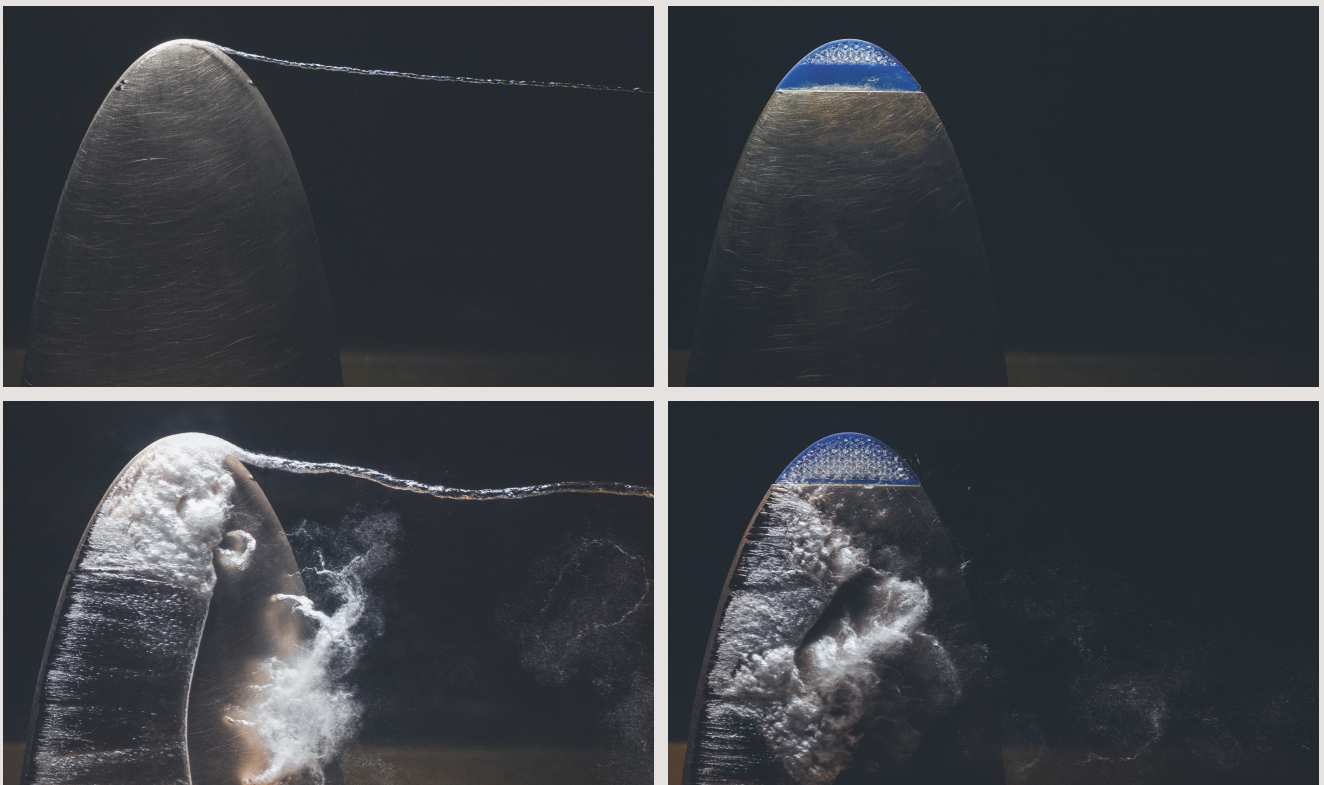


Figure 3 Visualisation du tourbillon marginal (à gauche) et suppression de la cavitation grâce à l'extension gyroïdale (à droite): test à une vitesse d'écoulement de 16 m/s et une pression statique de 2,6 bar (en haut), respectivement de 1,6 bar (en bas).

Figure: EPFL/Thomas Berger

Kármán en sillage est fortement inhibée (figure 2) [2]. En résonance, l'amplitude vibratoire RMS mesurée au vibromètre laser chute de 268 à 1,3 mm/s – soit une réduction de 99,5%. Hors résonance, la réduction atteint 67%. L'analyse fréquentielle confirme la disparition complète du pic associé au détachement tourbillonnaire.

Le second volet des travaux de recherche, en cours de publication [3], s'attaque au tourbillon de bout d'aile. Un insert gyroïdal a été appliqué à l'extrémité d'un profil elliptique (figure 3). Les mesures des profils de vitesse par vélocimétrie laser Doppler montrent que l'insert redistribue la vorticité en épaississant le cœur visqueux²⁾: la vitesse tangentielle maximale est réduite d'un facteur 3 et le rayon du cœur visqueux est multiplié par 6. Quant au coefficient de pression minimale au centre du tourbillon, il passe de -1,4 à -0,1, repoussant considérablement le seuil d'apparition de la cavitation.

Un aspect essentiel de cette technologie est l'absence de pénalité sur les performances. Pour les deux configurations, son ajout n'entraîne aucune

pénalité mesurable sur la portance ni sur la traînée. Contrairement aux solutions classiques d'arrondi du bord de fuite ou d'ajout de winglets, qui impliquent systématiquement un compromis, le gyro ide offre le bénéfice vibratoire et anti-cavitation sans contrepartie mesurable. Cette caractéristique est capitale pour les turbomachines hydrauliques, où chaque dixième de point de rendement compte.

Applications et perspectives pour l'énergie hydraulique

Ces résultats ouvrent des perspectives directes pour plusieurs domaines clés de l'énergie hydraulique. Les turbines Francis, qui représentent environ 60% du parc de turbines hydrauliques à l'échelle mondiale, peuvent souffrir de vibrations sévères liées au détachement tourbillonnaire au bord de fuite de leurs aubes. Les turbines Kaplan sont, quant à elles, limitées par la cavitation de bout de pale. Les pompes centrifuges et axiales industrielles font face à des problèmes analogues, générant bruit et usure prématurée. Des inserts gyroïdaux, appliqués au bord

Das Gyroid im Dienste der Wasserkraft

Eine poröse 3D-gedruckte Struktur eliminiert strömungsinduzierte Schwingungen

Str mungsinduzierte Schwingungen stellen eine der grössten Herausforderungen im Bereich der Hydrauliktechnik dar. Von Francis-Turbinen über industrielle Pumpen bis hin zu Schiffsschrauben und Hochgeschwindigkeitssegelbooten üben die durch die Strömung erzeugten Wirbel periodische Kräfte auf Strukturen unter Wasser aus und führen zu Vibrationen, Lärm, beschleunigter Materialermüdung und Kavitationserosion. Trotz jahrzehntelanger Forschung ist es bisher nicht gelungen, diese Phänomene mit einer passiven Lösung vollständig zu beseitigen, ohne die hydrodynamische Leistung zu reduzieren.

Eine an der EPFL entwickelte Technologie sorgt nun für einen Durchbruch. Das Gyroid ist eine dreifach periodische Minimalfläche (Triply Periodic Minimal Surface), die den Raum in zwei miteinander verflochtene, dreidimensionale Kanalnetze unterteilt und so eine poröse Struktur ohne gerade Linien bildet: Die Strömung folgt dort gewundenen Bahnen, was eine dreidimensionale Vermischung begünstigt und die Bildung von Wirbelstrukturen unterdrückt. Der Ansatz besteht darin, diese Geometrie mittels 3D-Druck herzustellen und sie als Einsatz oder Verlängerung an den Hinterkanten

oder an den Blattspitzen zu integrieren. Diese Strukturen wurden im Hochgeschwindigkeits-Kavitationstunnel der EPFL unter Strömungsbedingungen getestet, die den industriellen Reynolds-Zahlen entsprechen. Die Experimente zeigten, dass durch die Integration dieser gyroïdalen Strukturen in die kritischen Bereiche der Profile die Schwingungsamplitude bei Resonanz um 99,5% und ausserhalb der Resonanz um 67% reduziert werden konnte. Zudem wurde eine komplette Unterdrückung der Wirbelkavitation an den Flügelenden erreicht. Bei beiden Effekten konnte keine Reduktion der Leistung gemessen werden.

Diese Ergebnisse eröffnen neue Perspektiven für mehrere Schlüsselbereiche der Wasserkraft: Francis-Turbinen können unter starken Schwingungen leiden, die mit der Wirbelablösung an der Hinterkante ihrer Schaufeln zusammenhängen, während Kaplan-Turbinen durch die Kavitationserscheinungen an den Schaufelspitzen eingeschränkt sind. Gyroid-Einsätze könnten diese Ph nomene ohne tiefgreifende Änderung der bestehenden Geometrie d mpfen und bieten somit eine Nachr stl sung für bestehende Anlagen.

de fuite ou à l'extrémité des aubes, pourraient atténuer ces phénomènes sans modification profonde de la géométrie existante, offrant ainsi une solution deetrofit pour le parc installé.

Au-delà des turbines et pompes hydrauliques, la technologie est applicable aux hélices marines, où la réduction du bruit sous-marin rayonné est un enjeu croissant pour la protection de la faune marine. La solution pourrait même s'exporter à l'aérodynamique, où elle trouverait également un grand potentiel d'application pour équiper les pales d'éoliennes, les rotors de drones, les systèmes de ventilation, ou encore divers profils dans l'aviation.

La compréhension complète des mécanismes physiques figure au cœur de la thèse en cours du premier auteur de cet article, qui a conçu et validé expérimentalement la technologie gyroïde pour le contrôle passif des tourbillons: de manière peu banale, la solution a été trouvée avant l'explication théorique, témoignant du caractère fondamentalement novateur de cette approche.

Références

- [1] M. Farhat, T. Berger, «Fluid engaging device with a vortex mitigating component», brevet PCT WO2025/099062A1.
- [2] T. Berger, M. Farhat, «Gyroid as a novel approach to suppress vortex shedding and mitigate induced vibration», Scientific Reports 15, 25777, 2025.
- [3] T. Berger, M. Farhat, «Gyroid porous inserts as a novel flow control to mitigate tip vortex cavitation», Experiments in Fluids 67, 69, 2026.

Auteurs

Thomas Berger est doctorant en génie mécanique à l'EPFL.

> EPFL, 1007 Lausanne
> thomas.berger@epfl.ch

Mohamed Farhat est maître d'enseignement et de recherche, spécialiste des écoulements complexes et de la cavitation dans les turbomachines hydrauliques, et responsable du groupe de recherche en cavitation à la Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur de l'EPFL.

> mohamed.farhat@epfl.ch

La technologie est soutenue par le Fonds national suisse et l'EPFL Technology Transfer Office.

¹⁾ La vorticité est une grandeur vectorielle définie mathématiquement comme le rotationnel du champ de vitesse. Elle quantifie un taux de rotation locale des particules d'un fluide.

²⁾ Le cœur visqueux désigne la région centrale d'un tourbillon où les effets de frottement (viscosité) prédominent. Dans cette zone, le fluide tourne sur lui-même à la manière d'un corps solide. La vitesse tangentielle engendrée par le tourbillon atteint son maximum à la périphérie de ce noyau. Élargir le cœur visqueux, pour une même intensité de tourbillon (circulation), conduit à diminuer cette vitesse maximale, réduisant d'autant la dépression générée en son centre.

ANZEIGE

SIEMENS



Le **SENTRON ECPD** révolutionne votre distribution d'énergie!

Découvrez l'avenir de la distribution d'énergie avec le SENTRON ECPD de Siemens. Cet appareil de protection d'avant-garde offre une commutation ultrarapide, une configuration flexible, une excellente tenue à l'impulsion et de multiples fonctions gérables via une appli: l'idéal pour des projets énergétiques avancés, de toute envergure. Economisez de l'espace et optimisez vos besoins en ressources. Synonyme de durabilité et d'efficacité, le SENTRON ECPD satisfait aux plus hauts standards de sécurité. Profitez de la technique innovante de protection des circuits de Siemens et faites passer votre distribution d'énergie au niveau supérieur.

[siemens.ch/smartinfrastructure](https://www.siemens.ch/smartinfrastructure)