

COMPTE RENDU DES DIFFÉRENTS TRAVAUX PRATIQUES DE MASTER 2 TMA

2025-2026

Fabrice Lucien LIAPOE FOM



18 janvier 2026

Table des matières

Résumé (Abstract)	2
Introduction Générale et Théorie Commune	3
1 Sillage Turbulent en Aval d'un Cylindre en Soufflerie	5
1.1 Étude Expérimentale : Description, Instrumentation, Principe de Mesure et Méthode d'Analyse des Résultats	5
1.1.1 Description de l'Expérience	5
1.1.2 Description de l'instrumentation	6
1.1.3 Description du Principe de Mesure	6
1.1.4 Description de la Méthode d'Analyse des Résultats	6
1.2 Résultats et Discussions	7
1.2.1 Spectres d'énergie et identification des régimes turbulents	7
1.2.2 Estimation du taux de dissipation par fonction de structure	8
2 TRAVAUX PRATIQUES SECONDAIRES	9
2.1 Gong Vibré	9
2.2 Couche Limite Atmosphérique	10
2.3 Plaque Tournante de Coriolis	11
Conclusion générale et perspectives	12
Bibliographie	13

Résumé(Abstract)

Ce compte-rendu présente une série d'études expérimentales menées dans le cadre de l'unité d'enseignement Méthodes Expérimentales Avancées. L'objectif est de caractériser la turbulence dans différents systèmes physiques, en mettant en uvre des techniques de mesure avancées et des méthodes d'analyse spectrale. Quatre configurations expérimentales sont étudiées : (1) le sillage turbulent en aval d'un cylindre en soufflerie, analysé par sonde Pitot multi-trous Cobra à haute fréquence (1250 Hz) ; (2) la turbulence d'ondes élastiques dans un gong vibré, caractérisée par mesures acoustiques et profilométrie optique rapide (10 kHz) ; (3) la couche limite atmosphérique en montagne, étudiée via anémométrie sonique et mesures thermiques sur plusieurs niveaux ; (4) les courants de bord ouest en rotation, visualisés par vélocimétrie par imagerie de particules sur la plateforme Coriolis. L'analyse repose sur des outils communs de traitement du signal : décomposition de Reynolds pour extraire les fluctuations turbulentes, densité spectrale de puissance par méthode de Welch pour identifier les régimes énergétiques, et fonctions de structure pour estimer le taux de dissipation. Dans les trois premiers cas, la loi de Kolmogorov $E(f) \propto f^{-5/3}$ caractérisant la cascade inertielle est observée, validant l'universalité de la turbulence pleinement développée à petite échelle. Les résultats des spectres mettent en évidence la présence des structures cohérentes (tourbillons de von Kármán), cascades énergétiques (turbulence d'ondes), effet de rotation et vorticité (force de Coriolis). Les statistiques nous aident à observer aussi la stabilité/instabilité de la couche limite. Ces travaux illustrent l'importance des méthodes expérimentales pour comprendre la turbulence dans des environnements variés.

This report presents a series of experimental studies conducted as part of the Advanced Experimental Methods course. The objective is to characterize turbulence in different physical systems by implementing advanced measurement techniques and spectral analysis methods. Four experimental configurations are investigated : (1) the turbulent wake downstream of a cylinder in a wind tunnel, analyzed using a high-frequency (1250 Hz) multi-hole Cobra Pitot probe ; (2) elastic wave turbulence in a vibrating gong, characterized by acoustic measurements and fast optical profilometry (10 kHz) ; (3) the atmospheric boundary layer in a mountainous environment, studied via sonic anemometry and multi-level temperature measurements ; (4) rotating western boundary currents, visualized using particle image velocimetry on the Coriolis platform. The analysis relies on common signal processing tools : Reynolds decomposition to extract turbulent fluctuations, power spectral density estimation using the Welch method to identify energetic regimes, and structure functions to estimate the dissipation rate. In the first three cases, Kolmogorov's law $E(f) \propto f^{-5/3}$ characterizing the inertial subrange is observed, validating the universality of fully developed turbulence at small scales. The spectral results highlight the presence of coherent structures (von Kármán vortices), energy cascades (wave turbulence), rotational effects, and vorticity (Coriolis force). The statistics also help us observe the stability/instability of the boundary layer. These works illustrate the importance of experimental methods for understanding turbulence in diverse environments.

Introduction Générale et Théorie Commune

La turbulence représente l'un des phénomènes les plus complexes et universels de la physique. Elle se manifeste dans une grande diversité de systèmes : écoulements autour d'obstacles, atmosphère terrestre, océans, ou encore vibrations de structures élastiques. Malgré cette diversité, la turbulence pleinement développée présente des propriétés statistiques universelles, décrites par la théorie de Kolmogorov 1941. L'étude expérimentale de la turbulence est importante sur le plan théorique comme sur le plan pratiques : prévision météorologique, conception aérodynamique, génie civil, océanographie, ou encore fatigue des matériaux. Les travaux pratiques présentés dans ce rapport visent à explorer différentes manifestations de la turbulence.

Ce compte-rendu regroupe quatre expériences complémentaires permettant de comprendre la turbulence sous différents angles : (1) le sillage turbulent en aval d'un cylindre (TP principal), où l'on étudie la transition vers la turbulence dans un écoulement cisailé, avec identification des tourbillons de von Kármán, des instabilités de Kelvin-Helmholtz ; (2) la turbulence d'ondes dans un gong, examinant les vibrations turbulentes d'une surface métallique, où les vibrations interagissent pour transférer l'énergie des grandes aux petites échelles ; (3) la couche limite atmosphérique en montagne, analysant in-situ la turbulence avec effets de stratification thermique, et application de la théorie de similitude de Monin-Obukhov ; (4) les courants de bord ouest en rotation, visualisant la dynamique des courants océaniques sous l'effet de la force de Coriolis, reproduisant à échelle réduite des phénomènes comme le Gulf Stream.

L'analyse de la turbulence repose systématiquement sur la décomposition de Reynolds, qui sépare tout champ de vitesse instantané $u(x, t)$ en une composante moyenne $\bar{u}(x)$ et une fluctuation turbulente $u'(x, t)$: $u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t)$. Les corrélations des fluctuations forment le tenseur de Reynolds $\overline{u'_i u'_j}$, qui caractérise les transferts de quantité de mouvement par la turbulence. L'énergie cinétique turbulente (TKE) est définie par : $TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$. La répartition de l'énergie turbulente en fonction de l'échelle ou de la fréquence est analysée via la densité spectrale de puissance (PSD) $E(f)$, calculée par la méthode de Welch. Cette méthode divise le signal temporel en segments fenêtrés, calcule leur transformée de Fourier rapide (FFT), puis moyenne les spectres obtenus pour réduire le bruit statistique. En turbulence homogène isotrope pleinement développée, la théorie de Kolmogorov prédit l'existence d'une zone inertielle où l'énergie suit une loi de puissance universelle : $E(f) \propto f^{-5/3}$. Cette loi traduit l'auto-similarité de la cascade énergétique : l'énergie injectée aux grandes échelles est transférée vers les petites échelles sans dissipation significative dans la zone inertielle, jusqu'à atteindre l'échelle de Kolmogorov $\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ où la viscosité moléculaire ν dissipe l'énergie en chaleur.

La fonction de structure d'ordre 2 est définie comme : $S_2(r) = \langle [u(x+r) - u(x)]^2 \rangle$, où r est la séparation spatiale. Sous l'hypothèse de turbulence gelée (Taylor), la séparation temporelle τ est convertie en distance $r = \bar{u} \cdot \tau$. Dans la zone inertielle, K41 prédit : $S_2(r) = C \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot r^{2/3}$, $C \approx 2$. Cette relation permet d'estimer ε . Trois échelles principales structurent la turbulence : l'échelle intégrale L (taille des grandes structures énergétiques), l'échelle de Taylor $\lambda = \sqrt{15\nu u'^2/\varepsilon}$ (échelle de transition où les effets visqueux deviennent non négligeables), et l'échelle de Kolmogorov η (plus petite échelle de turbulence). Le nombre de Reynolds turbulent $Re_\lambda = u'\lambda/\nu$ quantifie l'intensité de la turbulence.

Les quatre expériences mettent en uvre des techniques de mesure complémentaires : la

sonde Pitot multi-trous Cobra (TP cylindre) pour la mesure tridimensionnelle de vitesse à haute fréquence (1250 Hz) dans un écoulement ; la profilométrie optique rapide (TP gong) pour la reconstruction du champ de déformation d'une plaque vibrante par analyse d'un motif sinusoïdal projeté (10 kHz) ; l'anémométrie sonique CSAT3 (TP atmosphère) pour la mesure simultanée de u , v , w et température à 20 Hz en conditions réelles sur terrain de montagne ; et la vélocimétrie par imagerie de particules (PIV) (TP Coriolis) pour la visualisation non-intrusive de champs de vitesse 2D par corrélation d'images de particules traceuses.

Le TP principal (Sillage turbulent) est développé en détail dans la première section, avec description de l'expérience, analyse spectrale, et estimation de ε par fonction de structure. Les trois TP secondaires sont présentés de manière synthétique sur une page chacun dans la deuxième section. Une conclusion générale synthétise les apports de ces travaux et ouvre des perspectives dans la troisième section.

1 Sillage Turbulent en Aval d'un Cylindre en Soufflerie

Introduction

La turbulence représente une grande classe de systèmes qui sont pleins d'irrégularités et de complexité. Les mouvements de fluide à grande vitesse et avec cisaillement imposé sont des systèmes typiques de turbulence ; par conséquent, les écoulements autour d'obstacles ont occupé place importante dans l'étude de la turbulence pendant des décennies [1]. Nous nous intéressons à l'écoulement en aval d'un obstacle cylindrique, qui génère un sillage turbulent caractérisé par des structures tourbillonnaires cohérentes et des fluctuations de vitesse intenses. Le sillage turbulent présente une forte anisotropie et une inhomogénéité spatiale marquée, en particulier dans la zone proche de l'obstacle[2]. Ce type d'écoulement est fondamental pour de nombreuses applications en aérodynamique, en génie civil et en ingénierie. L'étude du sillage en aval d'un cylindre permet notamment d'observer la formation d'allées tourbillonnaires de Von Kármán, la transition vers la turbulence via l'instabilité de Kelvin-Helmholtz dans les couches de cisaillement, et l'analyse des propriétés statistiques de la turbulence développée aux petites échelles. Les objectifs de ce TP sont d'identifier ces trois régimes dans les spectres d'énergie des fluctuations de vitesse, de valider la cascade turbulente par la loi $E(f) \propto f^{-5/3}$. Les mesures sont réalisées à l'aide de la sonde pitot multi-trou permettant l'acquisition temporelle des trois composantes de vitesse à différentes positions en aval du cylindre et pour deux vitesses en amont. Pour répondre à ces objectifs, nous procéderons comme suit : description de l'expérience, de l'instrumentation, du principe de mesure et de la méthode d'analyse des résultats, avant de présenter les résultats et les discussions.

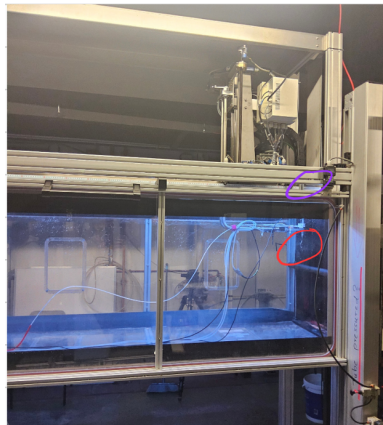


FIGURE 1 : *veine d'essai pour l'étude du sillage turbulent LEGI*

1.1 Étude Expérimentale : Description, Instrumentation, Principe de Mesure et Méthode d'Analyse des Résultats

1.1.1 Description de l'Expérience

Avant le début de l'expérience, le superviseur a commencé par une présentation des lieux. Ensuite, il nous a présenté les instruments de mesure, ici Sonde Pitot multi-trou Cobra que nous avons uniquement utilisé pour notre expérience mais aussi le fil chaud. Par la suite du principe de fonctionnement de la soufflerie qui gère par un ensemble de

système informatique et automatisé conçu pour contrôler la ventilation, la sonde Pitot multi-trou dans la soufflerie que nous avons testé au préalable avant le début de l'expérience. Nous avons fait une série de mesure à différentes positions verticale et horizontale derrière le cylindre pour des vitesses 5m.s^{-1} et 9m.s^{-1} . Ceci étant fait une sonde Pitot multi-trou nous a permis de mesurer les vitesses temporelles tridimensionnelles à aval de l'obstacle.

1.1.2 Description de l'instrumentation

Dans cette partie nous allons décrire les instruments utilisés.

Soufflerie : nous avons utilisé la soufflerie de Lospinard du LEGI. Ses dimensions globales sont de 5 mètres de haut, 16 mètres de long et 2.5 mètres de large. La ventilation est pilotée par deux moteurs tournant à la même vitesse sous réglage et allant jusqu'à 50m.s^{-1} [3].

Veine d'essai : qui fait 4m de long et $0.75 \times 0.75\text{m}^2$ de section à l'intérieur duquel circule le vent de soufflerie et où est placé la sonde.

Sonde Pitot multi-trou Cobra : utilisée généralement pour mesurer les vitesses et directions d'un flux, nous l'avons utilisée ici pour mesurer les vitesses tridimensionnelles en fonction du temps.

Cylindre : faisant 4cm de diamètre et de longueur presque égale à 0.75m que l'on fixe entre le convergent et la veine d'essai à mi-hauteur de la section de la veine pour des question de mesure.

1.1.3 Description du Principe de Mesure

Pour la mesure des vitesses, nous avons utilisé une sonde Pitot multi-trou Cobra (Figure 1, entourée en rouge) permettant de mesurer simultanément les trois composantes de vitesse $u(t)$, $v(t)$ et $w(t)$. Cette sonde a été positionnée en aval du cylindre afin de capturer les fluctuations de vitesse caractéristiques des tourbillons de von Kármán et des instabilités de Kelvin-Helmholtz.

Un système de déplacement tridimensionnel permet de positionner la sonde avec précision dans la veine d'essai, offrant la possibilité d'effectuer des mesures en différents points horizontaux et verticaux. Deux régimes d'écoulement ont été étudiés, correspondant à des vitesses incidentes de $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $9\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, avec des acquisitions réalisées à plusieurs positions en aval du cylindre. On ne notera que $V_{ms} - H_{mm} - V_{mm}$ sont vitesse en amont - positions horizontales - verticales en aval du cylindre.

Les mesures ont été réalisées dans des conditions contrôlées : la veine est maintenue en dépression avec une température constante de $16,3^\circ\text{C}$.

1.1.4 Description de la Méthode d'Analyse des Résultats

L'analyse des signaux de vitesses repose sur deux approches complémentaires : l'analyse spectrale et la fonction de structure. Remarquons ici que nous nous intéressons uniquement au signal donné par $u(t)$. Décrivons le code donné au préalable dans le notebook.

Analyse spectrale par méthode de Welch : Les fluctuations turbulentes $u'(t) = u(t) - \bar{u}$ sont obtenues par décomposition de Reynolds. Pour caractériser la répartition de l'énergie turbulente en fonction de la fréquence, nous utilisons la méthode de Welch qui calcule la densité spectrale de puissance $E(f)$. Cette méthode divise le signal en segments, calcule la FFT de chaque segment, puis moyenne les spectres obtenus. Les spectres sont tracés en échelle log-log pour identifier la zone inertielle où $E(f) \propto f^{-5/3}$.

Estimation de ε par fonction de structure : elle est estimée via la fonction de structure d'ordre 2, définie comme $S_2(r) = \langle [u(x+r) - u(x)]^2 \rangle$, où r représente la séparation spatiale entre deux points. Nous calculons d'abord S_2 pour différentes séparations temporelles τ , puis les convertissons en séparations spatiales $r = \bar{u} \cdot \tau$ selon l'hypothèse de Taylor (turbulence gelée) [4]. Dans la zone inertielle, la théorie de Kolmogorov prédit $S_2(r) = C \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot r^{2/3}$ avec $C \approx 2$ [4]. En tirant ε , nous obtenons $\varepsilon(r) = (S_2(r) \cdot r^{-2/3} / C)^{3/2}$ pour chaque séparation r . La valeur retenue pour ε correspond au maximum de $\varepsilon(r)$, qui représente le plateau dans la zone inertielle. Pour valider cette estimation, nous traçons la quantité normalisée $Y = (\varepsilon \cdot r)^{-2/3} \cdot S_2(r)$ en fonction de r . Si $S_2(r)$ suit bien la loi de Kolmogorov, alors $Y = (\varepsilon \cdot r)^{-2/3} \times [C \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot r^{2/3}] = C$. Ainsi, dans la zone inertielle, cette quantité doit former normalement un plateau horizontal à cette valeur $C = 2$.

1.2 Résultats et Discussions

1.2.1 Spectres d'énergie et identification des régimes turbulents

La figure(2) présente les spectres d'énergie de la turbulence pour différentes positions dans le sillage et deux vitesses amont ($5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Trois régimes caractéristiques sont identifiables [5] :

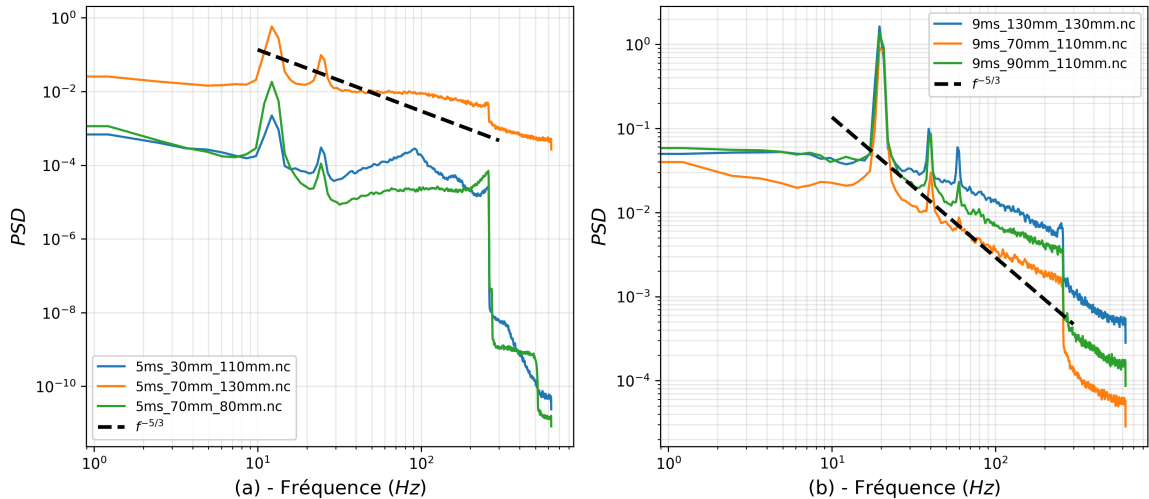


FIGURE 2 : Spectres d'énergie de la composante longitudinale de vitesse pour (a) $U_0 = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et (b) $U_0 = 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à différentes positions dans le sillage. La droite noire représente la loi de Kolmogorov $E(f) \propto f^{-5/3}$.

Les spectres révèlent deux pics distincts aux basses fréquences : un pic dominant à $f_K \approx 12 \text{ Hz}$ pour $U_0 = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $f_K \approx 20 \text{ Hz}$ pour $U_0 = 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, correspondant à la fréquence de lâcher tourbillonnaire de von Kármán [5], et son harmonique à $2f_K$,

signatures de la périodicité de l'émission alternée des tourbillons [5]. Aux fréquences plus élevées ($f \approx 90\text{--}100\text{ Hz}$), on observe un pic très élargie pour $U_0 = 5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ qui est associée aux instabilités de Kelvin-Helmholtz dans les couches de cisaillement [5] et très difficilement observable au vu des résultats pour $U_0 = 9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ces pics d'instabilité. De plus pour les fréquences supérieures ($f > 2f_K$), les spectres suivent la loi de Kolmogorov $E(f) \propto f^{-5/3}$ [6] mais cette fois uniquement pour $U_0 = 9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.2.2 Estimation du taux de dissipation par fonction de structure

La Figure 3 présente la quantité normalisée $(\varepsilon \cdot r)^{-2/3} S_2(r)$ en fonction de la séparation spatiale r pour les deux vitesses amont. Dans la zone inertielle, cette quantité forme un plateau à la valeur $C = 2$ selon la théorie de Kolmogorov, validant ainsi l'estimation de ε . Les résultats montrent que ce plateau est effectivement observé pour des r très différents dépendants de la vitesse, des positions horizontales et verticales de la sonde en aval du cylindre, confirmant la présence d'une cascade turbulente développée.

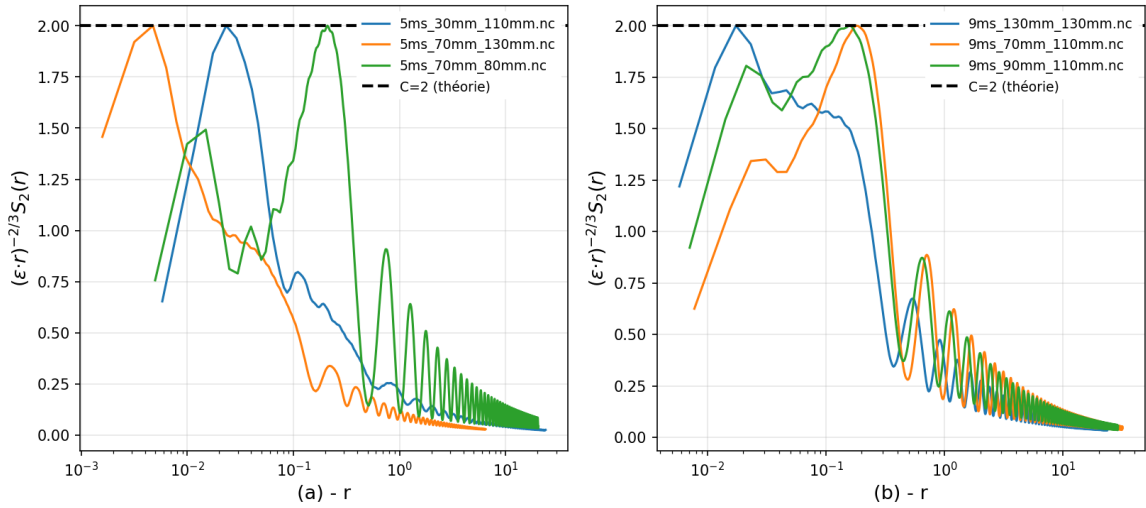


FIGURE 3 : Spectres d'énergie de la composante longitudinale de vitesse pour (a) $U_0 = 5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et (b) $U_0 = 9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à différentes positions dans le sillage. La droite noire représente la loi de Kolmogorov $E(f) \propto f^{-5/3}$.

Conclusion

L'analyse spectrale et par fonction de structure a permis de caractériser la dynamique turbulente du sillage en aval du cylindre. Le spectre d'énergie révèle la coexistence de trois régimes : les structures de von Kármán aux basses fréquences, les instabilités de Kelvin-Helmholtz dans les couches de cisaillement aux fréquences hautes bien que très difficile à observer pour $U_0 = 9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, et la cascade inertielle de Kolmogorov ($E(f) \propto f^{-5/3}$) aux hautes fréquences $2f_K$ et pas très convaincante pour $U_0 = 5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La validation du taux de dissipation ε par la fonction de structure, matérialisée par l'observation d'un plateau (dans notre cas c'est très faible, touche juste la théorie) à $C = 2$, confirme la présence d'une turbulence qu'on peut qualifier de pleinement développée.

2 TRAVAUX PRATIQUES SECONDAIRES

2.1 Gong Vibré

Le TP a pour but de caractériser les propriétés statistiques de la turbulence d'ondes via les mesures sonores du bruit émis, et mesure directe des vibrations par profilométrie optique rapide. ci dessous (5) schéma du dispositif. Deux régimes d'excitation sont

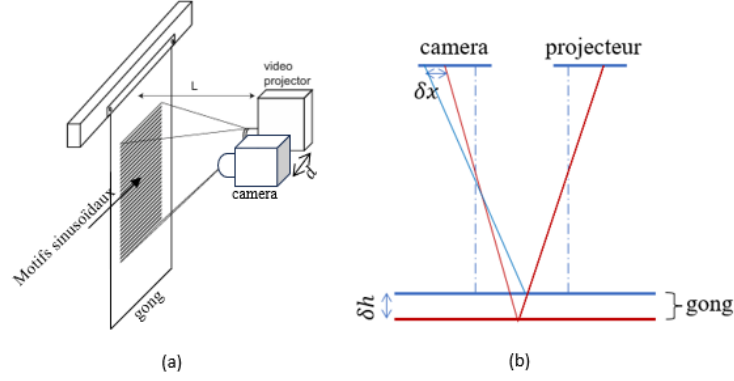


FIGURE 4 : Dispositif expérimental (a) vue de dessus (b)

étudiés : permanent (martelage continu) et transitoire (percussion unique). Les mesures sonores, réalisées via Audacity, révèlent une cascade d'énergie turbulente en régime permanent (5 b), matérialisée par une loi de puissance spectrale $E(f) \propto f^{-5/3}$, signature d'une turbulence développée. En régime transitoire, la loi de puissance spectrale est complètement différente (5 a). Les mesures optiques par caméra rapide (10 kHz) permettent d'accéder au champ de déplacement transverse via une analyse de motif sinusoïdal projeté. La mesure du déplacement transverse δh est déduite du décalage δx observé sur les motifs sinusoïdaux projetés. La caméra filme un point de référence sur sa surface ; lorsque le gong se déplace vers l'arrière ou l'avant, ce point apparaît décalé de δx (4b). La relation $\delta x \propto \delta h$ permet ainsi de reconstruire le mouvement transverse complet à partir de la déformation du motif projeté. À partir de la vitesse, une analyse spectrale espace-temps $E(k, \omega)$ donne une relation de dispersion linéaire $k \propto \omega$, confirmant la nature propagative des ondes. Ces résultats sont en accord avec les modèles théoriques pour les plaques minces élastiques [8, 7, 9].

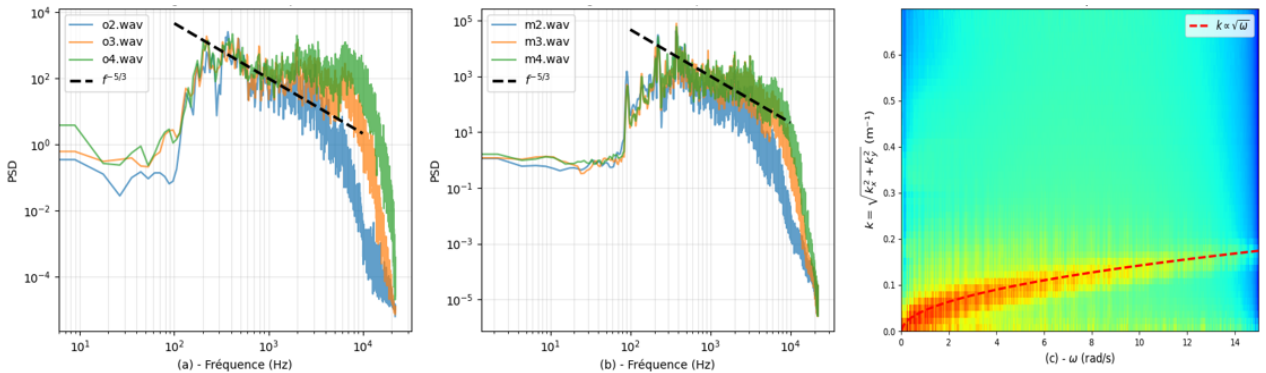


FIGURE 5 : Spectres d'énergie en régime transitoire (a), permanent (b) montrant la cascade turbulente, relation de dispersion $k(\omega)$ sur le spectre spatio-temporel $E(k, \omega)$ (c).

2.2 Couche Limite Atmosphérique

Ce TP vise à caractériser la turbulence en couche limite atmosphérique par une analyse fine sur une fenêtre temporelle de 5 minutes. Les mesures sont effectuées sur une montagne de Belledonne enneigée. Nous nous intéresserons aux données du 14 novembre 2025 entre 21h50 et 21h55. L'instrumentation principale comprend un anémomètre sonique CSAT3(6) permettant de mesurer les vitesses u , v , w à 20 Hz, six thermocouples et une station météorologique. Le cadre théorique permettant d'effectuer les calculs ci-dessous vient de Charrondière et al. [11], notamment l'équation (6) pour estimer la dissipation par la méthode isotrope. Le tenseur de Reynolds donne $\overline{u'u'} = 0,7521 \text{ m}^2/\text{s}^2$,

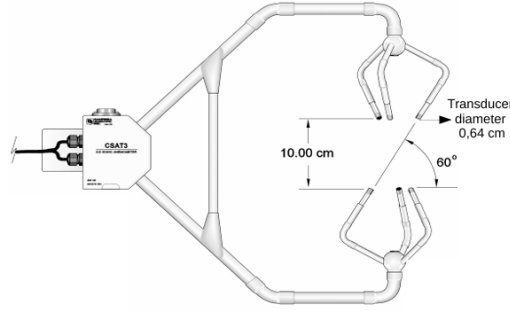


FIGURE 6 : Anémomètre Sonique CSAT3 [11]

$\overline{v'v'} = 1,5617 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\overline{w'w'} = 0,2879 \text{ m}^2/\text{s}^2$, et $\overline{u'u'} = -0,1039 \text{ m}^2/\text{s}^2$. L'énergie cinétique turbulente (TKE) moyenne est de $1,3008 \text{ m}^2/\text{s}^2$. La dissipation estimée par la méthode isotrope (Eq. 6) de [11] vaut $\varepsilon = 1,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$. L'échelle de Taylor est $\lambda = 31,55 \text{ cm}$, conduisant à un nombre de Reynolds turbulent $Re_\lambda \approx 625$. L'échelle de Kolmogorov $\eta = 0,65 \text{ mm}$ représente la plus petite échelle de turbulence, et l'échelle intégrale $L \approx 1,2 \text{ m}$ caractérise les grandes structures. Le flux de chaleur sensible est $\overline{w'\theta'} = 0,0420$ (positif malgré la nuit), et l'échelle de Monin-Obukhov $L_{MO} = -58,0 \text{ m}$ indique une signature apparemment instable [12]. La figure ci-dessous nous présente le cycle diurne sur une semaine (10-17 nov. 2025) (a), la figure (b) le profil de température vertical moyen du 14 nov. (18:00-22:00). nous observons que la température augmente au fur et à mesure qu'on monte. les données du premier thermocouple ne sont pas présentes peut-être à cause de la présence de la neige sur celui-ci. et le dernier graphe représente les spectres de vitesses turbulente sur une plage de 5 minutes (18:00-18:05). Le Spectre suit la loi de K41 sur un peu plus d'une décade, signature d'une turbulence développée.

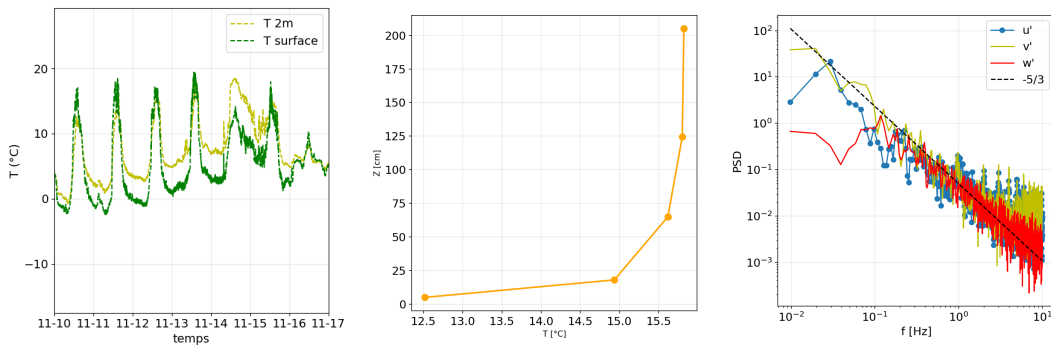


FIGURE 7 : (a) Cycle diurne, (b) profil vertical de température, (c) spectres de turbulence .

2.3 Plaque Tournante de Coriolis

Ce TP a pour but d'étudier les courants de bord ouest (Western Boundary Currents - WBC) comme le Gulf Stream. Il est effectué sur la plateforme tournante de Coriolis du LEGI. L'instrumentation utilisée comprend la vélocimétrie par imagerie de particules (PIV), technique optique non intrusive. Le fluide estensemencé avec des particules traceuses illuminées par laser, et des caméras scientifiques capturent les images. Les champs de vitesse instantanés 2D (U,V) sont calculés par corrélation entre images successives (pas de temps de 1 seconde entre chaque image pour 1000 images par expérience), avec une haute résolution spatiale et temporelle. Quatre expériences (EXP23-26)

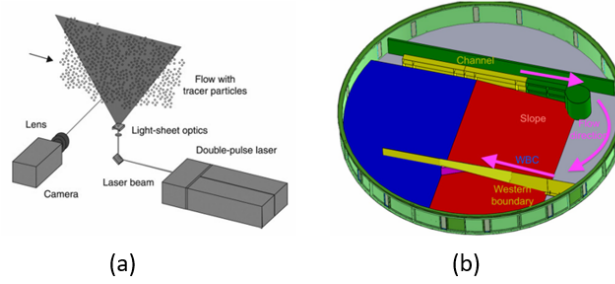


FIGURE 8 : mesure image - vue en perspective de la plateforme.

ont été réalisées avec différents débits et périodes de rotation.

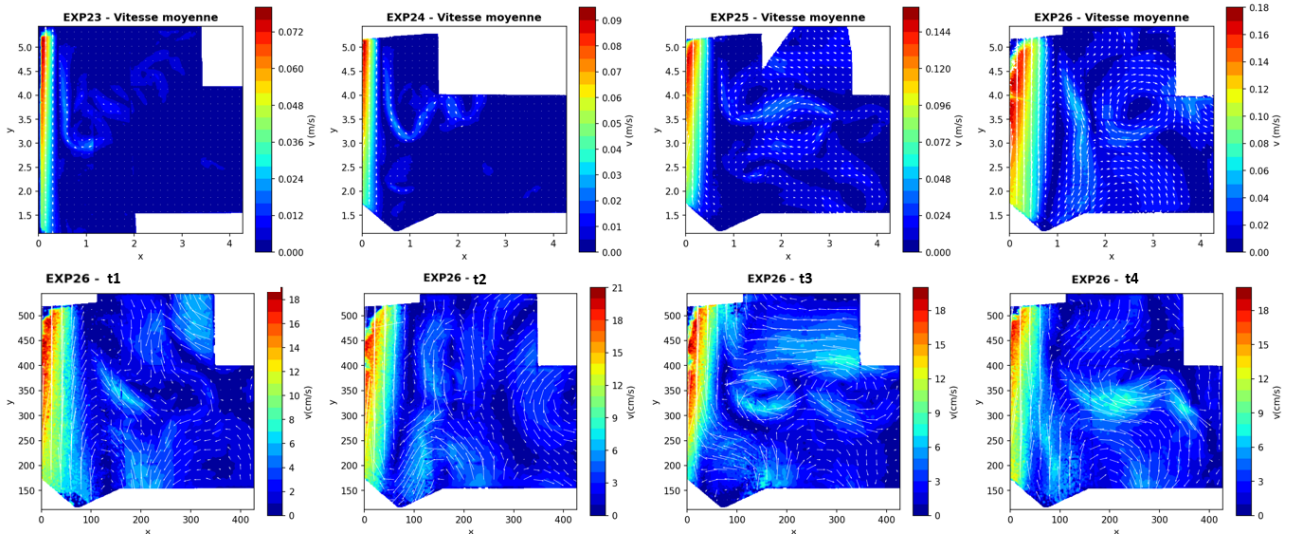


FIGURE 9 : Champ de vitesse moyen pour EXP23-24 et instantanés de vitesses pour EXP26 en dessous.

Les données sont téléchargées depuis le serveur du LEGI et traitées sur grâce à Python. Les champs de vitesse moyens montrent une intensification marquée du courant le long de la paroi ouest (x faible), reproduisant le comportement d'un WBC comme le Gulf Stream. La comparaison entre les expériences révèle que le courant ouest est présent mais moins intense pour EXP23-24 tandis que pour EXP25-26 le courant ouest est beaucoup plus intense et la zone de vitesses élevées est plus large. Les instantanés (snapshot des images 100, 400, 700 et 1000) de vitesse pour EXP26 montrent que le WBC n'est pas stationnaire il présente une forte variabilité temporelle avec des structures tourbillonnaires qui évoluent au cours du temps. L'augmentation du débit et de la rotation renforce l'intensification du WBC.

Conclusion générale

Ce rapport a présenté quatre études expérimentales sur la turbulence dans différents systèmes physiques, en utilisant des outils d'analyse communs : décomposition de Reynolds, analyse spectrale (méthode de Welch) et fonction de structure. Ces méthodes ont permis de valider l'universalité de la loi de Kolmogorov $E(f) \propto f^{-5/3}$ dans des contextes variés.

L'étude du sillage turbulent d'un cylindre a identifié trois régimes énergétiques : les structures de von Kármán (12-20 Hz), les instabilités de Kelvin-Helmholtz (90-100 Hz), et la cascade inertielle de Kolmogorov à haute fréquence. La fonction de structure a confirmé la méthode pour estimer le taux de dissipation ε .

La turbulence d'ondes dans un gong a montré que la cascade de Kolmogorov s'applique aussi aux vibrations de plaques élastiques, avec un transfert d'énergie caractéristique aux petites échelles. La relation de dispersion des ondes de flexion a été vérifiée via l'analyse spatio-temporelle.

L'analyse de la couche limite atmosphérique en montagne a montré que le système est instable qui est normalement sensé être stable la nuit, signe de la présence d'un élément autre qui pourrait générer cette instabilité. Aussi la turbulence était pleinement développée ($Re_\lambda \approx 625$) avec une cascade inertielle sur plus d'une décade.

L'étude des courants de bord ouest en rotation a permis de visualiser l'intensification caractéristique des courants océaniques le long de la paroi ouest, montrant la formation de méandres et de structures tourbillonnaires sous l'effet Coriolis.

Ces travaux confirment l'universalité statistique de la turbulence aux petites échelles (dissipation), tout en soulignant la spécificité des mécanismes de production aux grandes échelles selon les systèmes. Les méthodes expérimentales utilisées constituent une base solide pour aborder les défis liés à la turbulence en météorologie, ingénierie et océanographie. Des perspectives incluent l'amélioration des résolutions expérimentales (PIV) et l'exploration de régimes stratifiés en couche limite atmosphérique.

Références

- [1] Zhen-Su She. *Towards a complex system approach for the study of turbulence*. Elsevier, 2007.
- [2] Gamel, H. *Caractérisation expérimentale de l'écoulement et de la dispersion autour d'un obstacle bidimensionnel*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, soutenue le 10 février 2015, pages 37 et 64.
- [3] Lagauzère, M., & Obligado, M. *La soufflerie à bas niveau de turbulence*. Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LEGI, Grenoble, France.
- [4] Canet, L. *Introduction à la turbulence, Chapitre I : Fundamental observations in fully developed turbulence, Section I.1.3 Structure functions*. Cours de Master II, Université Grenoble Alpes.
- [5] Lu, W. ; Chan, L. ; Ooi, A. Spectral Analysis of Confined Cylinder Wakes. *Fluids* **2025**, 10, 84. <https://doi.org/10.3390/fluids10040084>.
- [6] Lévêque, E., Touil, H., Malik, S., Ricot, D., & Sengissen, A. Wall-modeled large-eddy simulation of the flow past a rod-airfoil tandem by the Lattice Boltzmann method. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, **2018**, 28(5), 1096–1116. DOI : 10.1108/HFF-06-2017-0258.
- [7] Cobelli, P., Petitjeans, P., Maurel, A., Pagneux, V., & Mordant, N. Space-Time Resolved Wave Turbulence in a Vibrating Plate. *Physical Review Letters* **2009**, 103, 204301. DOI : 10.1103/PhysRevLett.103.204301.
- [8] Mordant, N. Fourier analysis of wave turbulence in a thin elastic plate. *European Physical Journal B* **2010**, 76, 537–545. DOI : 10.1140/epjb/e2010-00197-y.
- [9] Hassaini, R. *Étude de la turbulence d'ondes élastiques et gravito-capillaires : de l'idéal théorique aux conditions réelles*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2018. NNT : 2018GREAI064. <https://theses.hal.science/tel-01961656v1>.
- [10] Miyaura, E. H. *Modélisation de fatigue et de mécanique de la rupture d'une structure éolienne soumise au chargement dynamique et aléatoire du vent*. Thèse de doctorat, INSA Rouen Normandie, 2016. Page 11.
- [11] Charrondière, C. *Étude in-situ des écoulements catabatiques sur pente alpine forte en situation anticyclonique*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2021. NNT : 2021GRALU028. <https://theses.hal.science/tel-03767542v1>.
- [12] Silva, M. P. A., Rocadenbosch, F., Farré-Guarné, J., Salcedo-Bosch, A., González-Marco, D., and Peña, A. Assessing Obukhov Length and Friction Velocity from Floating Lidar Observations : A Data Screening and Sensitivity Computation Approach. *Remote Sensing*, 14(6):1394, 2022. ISSN 2072-4292. DOI : <https://doi.org/10.3390/rs14061394>.