

RAPPORT DE TRAVAUX PRATIQUES METHODES EXPERIMENTALES AVANCEES

Rédigé par : Dieu-Huyen TRUONG

Formation : Master 2 TMA

Encadrant : Christophe BRUN, LEGI/MEIGE, UGA

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
ABSTRACT	1
INTRODUCTION	2
THEORIE COMMUNE	2
TP2 : GRID_TURBULENCE HOMOGENE ET ISOTROPE	3
1. INTRODUCTION.....	3
2. CONTEXTE THEORIQUE	3
3. DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE	4
4. INSTRUMENTATION ET PRINCIPE DE MESURE	5
5. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.....	5
6. METHODE D'ANALYSE DES DONNEES	5
7. ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX	6
8. CONCLUSION	8
TP1 : SILLAGE TURBULENT EN SOUFFLERIE	10
TP4 : PLATEFORME CORIOLIS – COURANT DE BORD OUEST INTENSIFIE.....	12
TP6 : TURBULENCE DES ONDES DANS LES GONGS	16
DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSION & PERSPECTIVES	18
CONCLUSION	19
PERSPECTIVES.....	19
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE.....	20

RESUME

Ce rapport regroupe quatre travaux pratiques consacrés à l'étude expérimentale de la turbulence et des écoulements complexes. Les expériences portent sur différentes situations, allant des écoulements en soufflerie aux écoulements géophysiques et à la turbulence des ondes. L'objectif principal est d'étudier comment l'énergie est injectée dans l'écoulement, comment elle se transmet entre les différentes échelles, et comment elle est dissipée, à l'aide d'analyses statistiques et spectrales.

Les expériences en soufflerie concernent la turbulence incompressible dans des configurations simples et bien connues. Le sillage turbulent derrière un cylindre circulaire montre la présence simultanée de structures organisées, comme la rue de tourbillons de von Kármán, et d'un transfert d'énergie vers les petites échelles conforme à la loi de Kolmogorov en $-5/3$, malgré une anisotropie importante. L'étude de la turbulence homogène et isotrope produite par une grille active montre que ce dispositif permet d'atteindre des niveaux de turbulence plus élevés et une meilleure séparation des échelles que la grille passive, ce qui rend la gamme inertielle plus clairement identifiable.

Les expériences sur les écoulements géophysiques sont réalisées sur la plateforme Coriolis et visent à reproduire un courant de bord ouest similaire au Gulf Stream. Les mesures PIV mettent en évidence un écoulement intensifié près du bord, résultant d'un équilibre entre l'inertie, l'effet de Coriolis et la dissipation turbulente. En dehors de la couche limite, la vorticité potentielle est approximativement conservée, en accord avec les modèles théoriques de Stommel et Munk.

Enfin, le travail pratique consacré à la turbulence des ondes dans les gongs étudie un régime dominé par les interactions non linéaires entre les modes de vibration. L'analyse acoustique montre des spectres composés principalement de modes discrets. Lorsque l'excitation augmente, le spectre s'élargit, ce qui suggère l'apparition d'un régime de turbulence d'ondes faible.

ABSTRACT

This report brings together four laboratory experiments focused on the experimental study of turbulence and complex flows. The experiments cover different configurations, ranging from classical wind-tunnel flows to geophysical flow analogues and wave turbulence. The main goal is to study how energy is injected into the flow, how it is transferred across scales, and how it is dissipated, using basic statistical and spectral analysis tools.

The wind-tunnel experiments deal with incompressible turbulent flows in simple and well-known configurations. The turbulent wake behind a circular cylinder shows both organized flow structures, such as the von Kármán vortex street, and an energy cascade toward smaller scales that follows Kolmogorov's $-5/3$ law, despite a strong directional asymmetry. The study of homogeneous and isotropic turbulence generated by an active grid shows that this method produces higher turbulence levels and a wider range of scales than a passive grid, making the inertial range easier to observe.

The geophysical flow experiments are carried out on the Coriolis platform and aim to reproduce a laboratory model of a western boundary current similar to the Gulf Stream. PIV measurements show a strengthened boundary current resulting from a balance between inertia, Coriolis effects, and turbulent dissipation. Outside the boundary layer, potential vorticity is approximately conserved, which is consistent with the theoretical models of Stommel and Munk.

Finally, the experiment on wave turbulence in gongs explores a different regime dominated by nonlinear interactions between vibration modes. Acoustic measurements show spectra mainly composed of discrete modes. As the force increases, the spectrum becomes broader, suggesting the onset of a weak wave turbulence regime.

INTRODUCTION

La turbulence est un phénomène omniprésent dans les écoulements naturels et industriels, caractérisé par une dynamique fortement non linéaire, multi-échelles et imprévisible. Malgré cette complexité apparente, de nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont montré l'existence de propriétés statistiques robustes et de lois d'échelle universelles, en particulier dans les régimes à grand nombre de Reynolds. La compréhension de ces mécanismes constitue un enjeu central en mécanique des fluides, en géophysique et en physique des ondes.

Les travaux pratiques présentés dans ce rapport s'inscrivent dans cette problématique générale et visent à illustrer, par l'expérimentation en laboratoire, différentes manifestations de la turbulence. Les configurations étudiées couvrent des écoulements canoniques de soufflerie (sillage turbulent, turbulence de grille), des analogues d'écoulements géophysiques soumis à la rotation (courant de bord ouest intensifié), ainsi qu'un système vibratoire mettant en jeu des interactions non linéaires entre ondes (turbulence des gongs). Cette diversité permet d'explorer la turbulence sous des angles complémentaires, tout en mettant en évidence des mécanismes communs de transfert d'énergie entre échelles.

L'objectif principal de ce rapport est double. D'une part, il s'agit de mettre en œuvre et de maîtriser des techniques expérimentales avancées telles que l'anémométrie à fil chaud, la vélocimétrie par images de particules (PIV) et l'analyse acoustique. D'autre part, le travail vise à analyser les données expérimentales à l'aide d'outils statistiques et spectraux afin de confronter les résultats aux cadres théoriques de référence, notamment la théorie de Kolmogorov pour la turbulence incompressible et les modèles classiques des écoulements géophysiques.

THEORIE COMMUNE

Malgré la diversité des systèmes étudiés, l'ensemble des travaux pratiques repose sur un socle théorique commun lié à l'analyse des fluctuations et au transfert d'énergie entre échelles. Dans le cas des écoulements turbulents incompressibles, la décomposition de Reynolds permet d'écrire la vitesse instantanée comme la somme d'une composante moyenne et d'une fluctuation. L'énergie cinétique turbulente est principalement injectée aux grandes échelles, soit par les conditions aux limites (grille, obstacle), soit par un forçage externe, puis transférée vers les petites échelles par un processus de cascade non linéaire.

Dans le cadre de la turbulence développée à grand nombre de Reynolds, la théorie de Kolmogorov (1941) postule l'existence d'une gamme inertielle universelle, indépendante des mécanismes d'injection et de dissipation. Dans cette gamme, la densité spectrale de puissance de la vitesse suit une loi de puissance en $-5/3$, traduisant un transfert d'énergie conservatif entre échelles. L'identification expérimentale de cette gamme repose principalement sur l'analyse spectrale des signaux temporels, généralement réalisée à l'aide de transformées de Fourier et de méthodes de moyennage telles que la méthode de Welch, permettant de réduire la variance des estimateurs spectraux.

Pour les écoulements géophysiques, la dynamique est profondément modifiée par la rotation et par les effets de vortacité planétaire. Les équilibres de type Sverdrup, Stommel ou Munk introduisent un lien entre forçage, inertie et dissipation, conduisant à l'émergence de structures cohérentes à grande échelle, telles que les courants de bord ouest intensifiés. L'analyse de ces écoulements nécessite l'étude conjointe des champs de vitesse, de vortacité et de vortacité potentielle.

Enfin, dans les systèmes vibratoires comme les gongs, la turbulence prend la forme d'une turbulence d'ondes, où l'énergie est transférée entre modes fréquentiels via des interactions non linéaires. Bien que le cadre théorique diffère de celui de la turbulence hydrodynamique, l'analyse spectrale demeure un outil central pour caractériser la redistribution de l'énergie et identifier les signatures de régimes turbulents.

TP2 : GRID_TURBULENCE HOMOGENE ET ISOTROPE

1. INTRODUCTION

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du Travaux Pratiques portant sur la « Turbulence générée par une grille active », réalisé au sein des installations du laboratoire LEGI.

La turbulence homogène et isotrope (THI) constitue un cadre idéalisé fondamental pour l'étude des propriétés statistiques de la turbulence. Malgré l'irréalisme dans les écoulements réels, ce modèle fournit une base théorique solide pour comprendre la cascade d'énergie décrite par Kolmogorov et pour tester expérimentalement les lois d'échelle associées, notamment la loi spectrale en $k^{-5/3}$. Ce TP avait pour objectif principal d'étudier expérimentalement la turbulence générée par une grille active (active grid) dans une soufflerie subsonique, puis d'analyser les spectres de vitesse obtenus par anémométrie à fil chaud à l'aide de la méthode de Welch. L'objectif scientifique était double :

- comparer la turbulence produite en mode « grille ouverte fixe » et en mode « triple-random » (grille active),
- rechercher la présence de la zone inertielle caractéristique de la théorie de Kolmogorov (loi en $f^{-5/3}$).

Dans un premier temps, nous présenterons les bases de l'analyse spectrale, en particulier la transformation de Fourier et la densité spectrale de puissance (PSD), permettant de passer du signal temporel au domaine fréquentiel et d'observer la cascade d'énergie de Kolmogorov, notamment la zone inertielle en $-5/3$.

Nous décrirons ensuite la méthodologie expérimentale et le traitement des données sous Python, en comparant les modes de fonctionnement de la grille (fixe et active) ainsi que l'évolution de la turbulence le long de l'axe d'écoulement. Enfin, les paramètres caractéristiques de la turbulence (ϵ , λ , Re_λ) seront estimés afin d'évaluer l'accord entre les résultats expérimentaux, la théorie de la turbulence de grille et l'effet de l'activation dynamique sur l'extension de la zone inertielle.

2. CONTEXTE THEORIQUE

2.1 Transformée de Fourier et densité spectrale de puissance (PSD)

La transformée de Fourier permet de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel. Pour un signal réel $x(t)$, on définit :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

La densité spectrale de puissance (Power Spectral Density – PSD) représente la distribution de la puissance moyenne du signal en fonction de la fréquence.

Dans la pratique, on utilise la méthode de **Welch** : découpage du signal en segments chevauchants, fenêtrage (généralement Hanning), calcul de la TFD de chaque segment, puis moyennage des densités spectrales (réduction de la variance).

2.2 Turbulence homogène et isotrope (HIT) – Loi de Kolmogorov

Dans le cadre de la turbulence développée à grand nombre de Reynolds, Kolmogorov (1941) propose une description universelle sur les petites échelles :

- **Zone d'injection** (grandes échelles) → énergie injectée à grande échelle
- **Zone inertielle** → transfert d'énergie sans dissipation visqueuse notable → loi universelle :

$$E(k) \propto \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$$

avec k nombre d'onde, ε taux de dissipation visqueuse d'énergie cinétique par unité de masse et de temps.

3. DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

Les mesures ont été réalisées dans la grande soufflerie subsonique du LEGI :

- Section de mesure : $\approx 0,75 \text{ m} \times 0,75 \text{ m}$
- Longueur : $\approx 4 \text{ m}$
- Gamme de vitesse : 3 à 50 m/s (laminaire possible sans grille)
- Utilisation d'une grille active installée en amont de la veine d'essai.

La turbulence est générée à l'aide d'une grille active composée de 16 axes rotatifs (8 horizontaux et 8 verticaux) équipés de pales carrées coplanaires. Deux configurations ont été étudiées :

- **Grille active (AG)** : fonctionnement en mode triple-aléatoire, avec des vitesses de rotation comprises entre 1 et 3 Hz et des changements aléatoires de direction sur des échelles de temps de 1 à 3 s. Cette configuration permet de produire une turbulence intense avec un nombre de Reynolds turbulent élevé.
- **Grille ouverte (OG)** : configuration statique, complètement ouverte, minimisant le blocage et générant une turbulence de faible intensité, associée à des valeurs plus faibles de Re_λ .



Figure 1 : Schéma de la soufflerie subsonique Lepinard et de son instrumentation.

1. Le Système de Génération d'Écoulement (La Soufflerie)

- **Le Collecteur** : Partie convergente en forme d'entonnoir située à l'entrée, permettant d'aspirer l'air et de stabiliser l'écoulement avant son passage à travers la grille.
- **La Grille Active** : L'élément central du dispositif, composé de 16 axes motorisés (8 horizontaux et 8 verticaux) sur lesquels sont montées des pales carrées. Ces axes tournent de manière aléatoire (mode *random*) pour générer une turbulence intense et homogène.

- **La Veine d'Essai** : Une section droite de 4 mètres de long où l'écoulement turbulent se développe et où les mesures sont effectuées.
- **Le Ventilateur / Divergent** : Situé à l'extrémité aval du système, il crée la dépression nécessaire pour maintenir une vitesse de vent moyenne U constante à l'intérieur de la veine.

2. Système de Mesure (Instrumentation)

- **La Sonde à Fil Chaud** : Un capteur composé d'un filament de Platine-Tungstène extrêmement fin, placé dans la veine d'essai pour mesurer la vitesse instantanée $u(t)$ avec une haute résolution temporelle.
- **Le Système de Déplacement (Chariot de traverse)** : Un châssis mécanique motorisé permettant de déplacer la sonde le long de l'axe longitudinal x (de 111 cm à 212 cm) afin d'étudier la décroissance (decay) de la turbulence.

4. INSTRUMENTATION ET PRINCIPE DE MESURE

4.1 Anémométrie à fil chaud (*Hot-Wire Anemometry – HWA*)

Les mesures de vitesse sont réalisées par anémométrie à fil chaud, en mode température constante (CTA). Le principe repose sur la convection forcée : le fil, porté à une température supérieure à celle de l'écoulement, est refroidi par le fluide, et la puissance électrique nécessaire pour maintenir sa température constante dépend directement de la vitesse locale. L'étalonnage du fil chaud est effectué à partir de la loi de King, reliant la tension mesurée e à la vitesse moyenne u :

$$e^2 = A\sqrt{u} + B.$$

Les coefficients d'étalonnage obtenus expérimentalement sont $A = 0,73$ et $B = 1,89$. Cette technique offre une résolution temporelle extrêmement élevée, indispensable pour capturer les plus petites échelles de la turbulence (échelles de Kolmogorov).

4.2 Calibration du fil chaud : Vitesse de référence mesurée par tube de Pitot.

5. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

- Durée d'acquisition : environ 3 minutes
- Conditions proches de HIT
- Vitesse amont $\bar{U}$: vers 5 m/s
- Deux configurations comparées : grille fixe vs grille triple-random
- Positions de mesure : Les données ont été acquises à différentes distances x en aval de la grille (allant de 73,8 cm à 246,3 cm) afin de caractériser la décroissance spatiale de la turbulence.

6. METHODE D'ANALYSE DES DONNEES

Le traitement des données est réalisé à l'aide d'un script Python, permettant de convertir les signaux temporels bruts de vitesse en grandeurs statistiques et spectrales pertinentes pour l'analyse de la turbulence.

L'estimation de la densité spectrale de puissance (PSD) est effectuée en privilégiant la méthode de Welch plutôt qu'une transformée de Fourier rapide (FFT) directe, afin de réduire la variance de l'estimation spectrale et d'atténuer l'influence du bruit de mesure. Le signal est découpé en segments de 4096 points, auxquels est appliquée une fenêtre de Hann afin de limiter les discontinuités aux frontières des segments. Un recouvrement de 50 % entre segments successifs est utilisé, améliorant la convergence statistique de la PSD sans dégrader excessivement la

résolution fréquentielle. Aucun suréchantillonnage spectral supplémentaire n'est introduit, la taille de la transformée étant fixée à $N_{FFT} = 4096$.

L'analyse spectrale vise ensuite à caractériser la cascade d'énergie conformément à la théorie de Kolmogorov (1941). Une attention particulière est portée à l'identification de la gamme inertielle, domaine de fréquences dans lequel l'énergie est transférée des grandes échelles vers les petites sans dissipation visqueuse significative. La validité de la loi de Kolmogorov est évaluée en vérifiant si la PSD suit une décroissance en loi de puissance proche de $PSD(f) \propto f^{-5/3}$. Cette analyse est complétée par l'étude du spectre compensé, obtenu en traçant $PSD(f) f^{5/3}$. La présence d'un plateau quasi horizontal dans cette représentation constitue un indicateur de l'existence d'une gamme inertielle bien développée, et permet d'estimer le taux moyen de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ϵ .

À partir de la vitesse quadratique moyenne des fluctuations u' et du taux de dissipation estimé ϵ , plusieurs grandeurs caractéristiques de la turbulence sont ensuite calculées. L'échelle de Taylor $\lambda = \sqrt{15 \nu u'^2 / \epsilon}$ fournit une mesure de l'échelle intermédiaire marquant la transition entre les grandes structures énergétiques et les échelles dissipatives. Le nombre de Reynolds basé sur l'échelle de Taylor, $Re_\lambda = u' \lambda / \nu$, constitue un paramètre clé pour quantifier le degré de développement de la turbulence et comparer les différents régimes expérimentaux. Enfin, l'échelle de Kolmogorov $\eta = (\nu^3 / \epsilon)^{1/4}$ est estimée afin de caractériser la taille des plus petites structures tourbillonnaires, où la dissipation visqueuse devient dominante.

7. ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

La figure 2 présente la densité spectrale de puissance (PSD) obtenue par la méthode de Welch pour un écoulement généré par la grille active, accompagnée d'une droite de référence correspondant à la loi de Kolmogorov en $-5/3$. Le spectre expérimental montre une décroissance continue de l'énergie avec la fréquence. Dans la gamme de fréquences intermédiaires, la pente du spectre est proche de $-5/3$, ce qui indique l'existence d'une gamme inertielle compatible avec les prédictions de la théorie K41.

Aux basses fréquences, le spectre est dominé par les grandes structures énergétiques injectées par la grille active. Aux hautes fréquences, on observe une déviation par rapport à la loi inertielle, marquée par un aplatissement et une remontée du bruit, traduisant l'influence combinée de la dissipation visqueuse et des limitations instrumentales du fil chaud (bruit électronique et résolution fréquentielle).

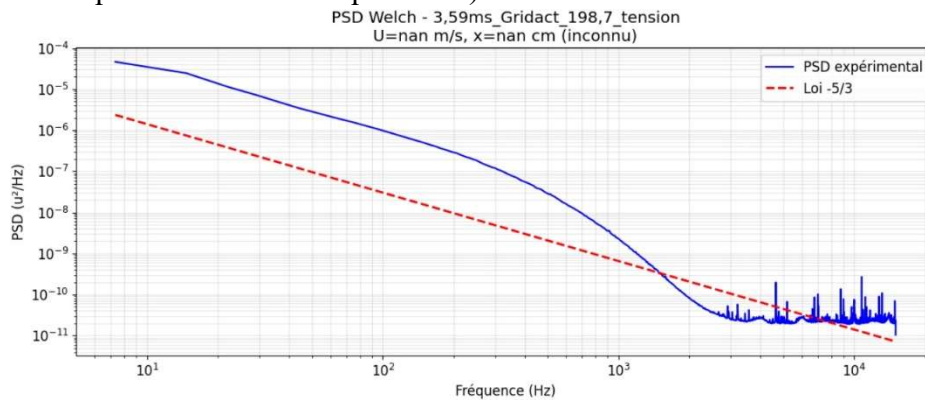


Figure 2 : PSD expérimentale et loi de Kolmogorov $-5/3$

La figure 3 montre le spectre compensé, utilisé pour identifier de manière plus robuste la gamme inertielle. Contrairement au spectre classique, cette représentation fait apparaître un plateau quasi horizontal sur une plage de fréquences intermédiaires. Ce plateau constitue une signature claire de la cascade d'énergie de Kolmogorov, indiquant que le transfert d'énergie entre échelles s'effectue sans dissipation significative dans cette gamme.

La valeur moyenne du plateau est directement reliée au taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε . La rupture du plateau aux hautes fréquences correspond à l'entrée dans la gamme dissipative, où les effets visqueux deviennent dominants.

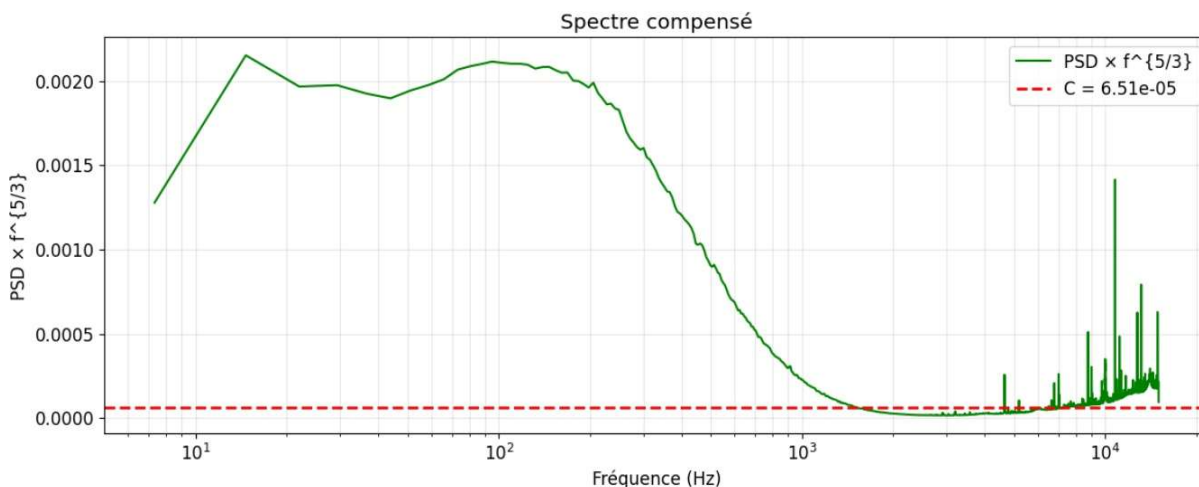


Figure 3 : Spectre compensé $PSD(f) f^{5/3}$

La figure 4 présente les spectres PSD mesurés en aval de la grille passive pour plusieurs distances x . On observe une décroissance globale de l'énergie avec la fréquence, mais la gamme inertielle y est nettement plus courte que dans le cas de la grille active.

Lorsque la distance à la grille augmente, l'amplitude globale des spectres diminue, traduisant la décroissance de la turbulence par dissipation visqueuse. Les spectres restent relativement proches les uns des autres, indiquant que la turbulence générée par la grille passive est faiblement intense et que la séparation d'échelles demeure limitée, ce qui restreint la validité de la loi de Kolmogorov.

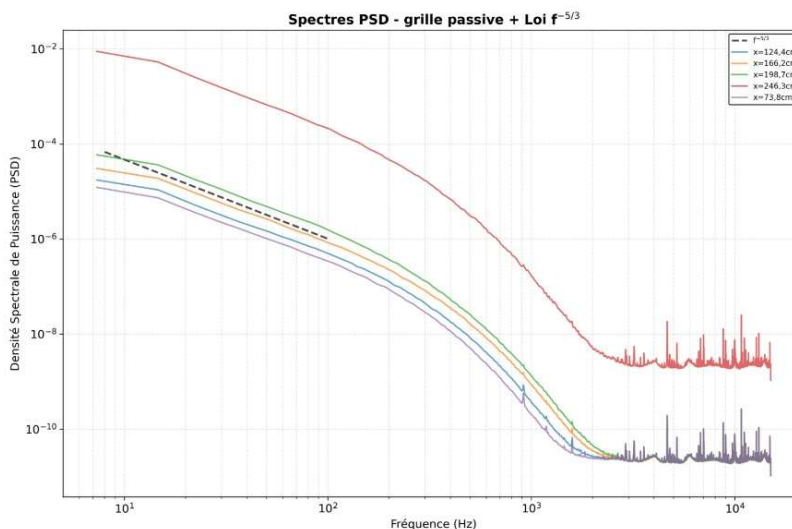


Figure 4 : Spectres PSD pour la grille passive (OG) à différentes positions x

La figure 5 montre les spectres PSD obtenus pour la grille active à plusieurs positions en aval. Comparativement au cas de la grille passive, les niveaux d'énergie sont nettement plus élevés sur l'ensemble des fréquences, en particulier aux basses fréquences, ce qui reflète une injection d'énergie plus efficace aux grandes échelles.

On observe également une décroissance progressive de l'amplitude des spectres lorsque x augmente, caractéristique d'une turbulence homogène isotrope décroissante. Toutefois, la forme des spectres reste similaire, suggérant que la structure statistique de la turbulence est conservée au cours de l'évolution aval, malgré la perte d'énergie globale. La gamme inertielle y est plus étendue, signe d'un nombre de Reynolds turbulent plus élevé.

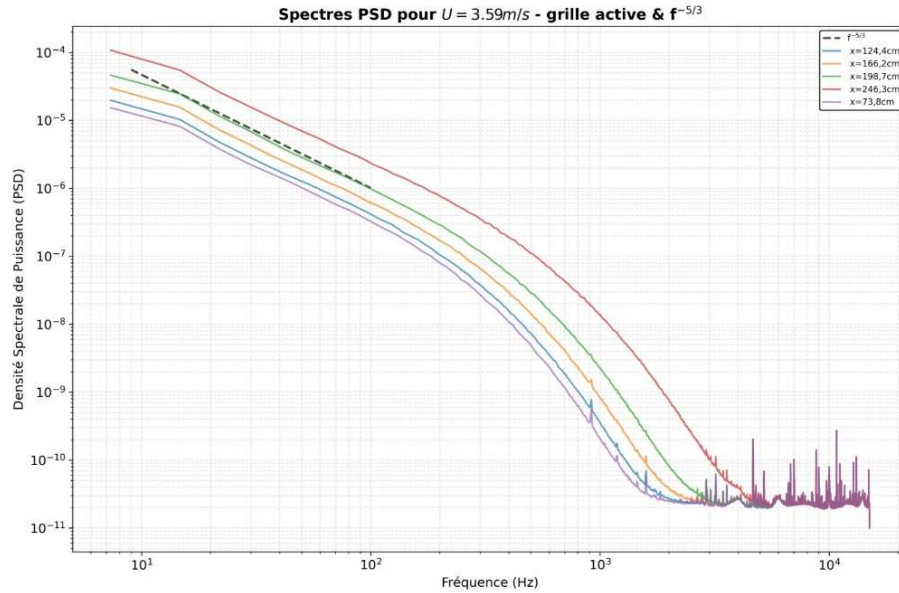


Figure 5 – Spectres PSD pour la grille active (AG) à différentes positions x

L'ensemble des figures montre de manière cohérente que la grille active permet de générer une turbulence plus intense, caractérisée par une meilleure séparation d'échelles, une gamme inertielle plus large et une loi de Kolmogorov en $-5/3$ plus clairement identifiable. La décroissance spatiale observée dans les spectres confirme le caractère homogène et isotrope décroissant de la turbulence en aval de la grille. À l'inverse, la grille passive conduit à un régime plus faiblement turbulent, pour lequel les hypothèses de la théorie K41 ne sont que partiellement satisfaites.

8. CONCLUSION

L'analyse spectrale réalisée par la méthode de Welch met clairement en évidence l'impact de l'activation de la grille sur la distribution de l'énergie turbulente.

Aux basses fréquences, correspondant aux grandes échelles de l'écoulement, la configuration à grille active présente une densité spectrale de puissance (PSD) nettement supérieure à celle obtenue avec la grille fixe. Ce comportement confirme que la grille active joue efficacement le rôle de mécanisme d'injection d'énergie, en alimentant les grandes structures turbulentes et en augmentant significativement l'intensité de la turbulence générée.

Dans les deux configurations, une zone fréquentielle est observée où la pente du spectre suit la loi de Kolmogorov en $-5/3$, indiquant l'existence d'une gamme inertielle. Toutefois, dans le cas de la grille active, cette zone s'étend sur une plage de fréquences plus large, ce qui traduit une meilleure séparation des échelles et un nombre de Reynolds turbulent plus élevé. Cette observation suggère que la turbulence générée par la grille active est plus proche d'un régime pleinement développé que celle produite par la grille fixe.

L'étude de la décroissance spatiale de la turbulence, menée à partir des PSD mesurées à différentes distances en aval de la grille (x variant de 73.8cm à 246.3cm), révèle une diminution progressive du niveau global des spectres. Cette baisse d'énergie traduit directement la décroissance de la turbulence : en l'absence d'injection d'énergie

supplémentaire, l'énergie cinétique turbulente est transférée vers les petites échelles par la cascade puis dissipée par les effets visqueux.

L'analyse du spectre compensé $PSD(f) f^{5/3}$ montre également que le plateau associé à la gamme inertielle tend à s'affaïsser et à se déplacer vers les basses fréquences lorsque la distance à la grille augmente. Ce comportement est cohérent avec une augmentation de l'échelle intégrale L et une diminution du taux de dissipation d'énergie ε , signatures classiques d'une turbulence homogène isotrope décroissante.

Enfin, l'analyse des paramètres caractéristiques permet de quantifier précisément l'état de développement de la turbulence. Le nombre de Reynolds basé sur l'échelle de Taylor, Re_λ , est significativement plus élevé dans le cas de la grille active, atteignant des valeurs souvent deux à trois fois supérieures à celles mesurées avec la grille fixe. Ce résultat valide l'intérêt de la grille active pour la génération en laboratoire d'écoulements fortement turbulents, représentatifs de situations atmosphériques ou industrielles.

De plus, l'échelle de Kolmogorov η augmente progressivement avec la distance en aval. Étant donné la relation $\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$, cette évolution confirme la diminution du taux de dissipation ε au cours de la décroissance de la turbulence, les structures tourbillonnaires devenant progressivement moins énergétiques.

TP1 : SILLAGE TURBULENT EN SOUFFLERIE

Dans ce travail pratique consacré à l'étude du sillage turbulent en aval d'un cylindre circulaire, l'objectif est d'analyser expérimentalement la dynamique multi-échelles de l'écoulement et de relier les signatures statistiques mesurées aux mécanismes physiques classiques décrits dans la littérature. Le cas du cylindre constitue un problème canonique de mécanique des fluides, caractérisé par l'apparition, pour des nombres de Reynolds suffisants, d'une rue de tourbillons de von Kármán et par le développement progressif d'instabilités de type Kelvin–Helmholtz dans les couches cisailées séparées. Plusieurs études de référence ont montré que ces structures cohérentes laissent une signature fréquentielle marquée, avec une fréquence basse associée au détachement périodique des tourbillons et des fréquences plus élevées liées aux instabilités de cisaillement, coexistantes avec une cascade inertielle conforme aux lois de Kolmogorov.

L'expérience a été réalisée dans la soufflerie à circuit fermé Lespinaud du LEGI (Université Grenoble Alpes), où un écoulement quasi uniforme est généré dans la section d'essai. Un cylindre circulaire en PVC, de diamètre $D = 30$ mm, est placé perpendiculairement à l'écoulement. La vitesse amont U_0 est déterminée à l'aide d'un tube de Pitot situé dans le convergent, permettant de fixer un nombre de Reynolds subcritique de l'ordre de $Re \approx 1,2 \times 10^4$, régime pour lequel le sillage est pleinement turbulent tout en conservant des structures cohérentes bien identifiées. Les mesures sont concentrées dans le sillage proche, à travers des acquisitions ponctuelles à haute fréquence et des profils spatiaux horizontaux et verticaux. Le principe général de l'expérience et l'instrumentation associée sont présentés sur la figure 1.1



Figure 1.1 : Dispositif expérimental de l'étude du sillage turbulent d'un cylindre circulaire

Les vitesses locales sont mesurées principalement à l'aide d'une sonde Pitot Cobra 3D, capable de reconstruire les trois composantes instantanées de la vitesse à partir de mesures de pression différentielle, selon le théorème de Bernoulli. Pour l'accès aux petites échelles turbulentes et à la dissipation, un fil chaud est également utilisé en complément, grâce à sa réponse fréquentielle élevée. Les signaux temporels sont acquis avec des fréquences d'échantillonnage allant jusqu'à 1 kHz, puis traités numériquement afin d'extraire les grandeurs statistiques usuelles : vitesses moyennes, fluctuations, intensité turbulente, densités spectrales de puissance et fonctions de structure.

À partir du signal fluctuant $u'(t) = u(t) - \bar{u}$, la densité spectrale de puissance est estimée par transformée de Fourier rapide en utilisant la méthode de Welch (fenêtre de Hann, $nfft = 1024$). La représentation en échelle logarithmique permet d'identifier clairement les pics fréquentiels dominants ainsi qu'une gamme inertielle caractérisée par une pente proche de $-5/3$, signature de la cascade d'énergie turbulente. Les résultats principaux sont illustrés sur la Figure 2, où apparaissent un pic associé à la fréquence de von Kármán, correspondant à un nombre de Strouhal $St \approx 0,2$, ainsi qu'une plage fréquentielle étendue compatible avec la loi de Kolmogorov.

L'analyse est complétée par le calcul de la fonction de structure du second ordre $S_2(r)$, en invoquant l'hypothèse de Taylor pour relier les échelles temporelles aux échelles spatiales. Dans la gamme inertielle, la normalisation de $S_2(r)$ par $r^{2/3}$ met en évidence des plateaux à partir desquels la dissipation turbulente ε peut être estimée. Les valeurs obtenues se situent typiquement entre $1,5$ et $2,2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ selon la position dans le sillage. Les profils horizontaux, correspondant aux couches cisailées, présentent une dissipation plus élevée et plus stable ($\varepsilon \approx 1,8\text{--}2,0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$), tandis que les profils verticaux, situés plus en aval, montrent des plateaux plus courts et des valeurs légèrement plus faibles, traduisant la déstructuration progressive des tourbillons cohérents.

Les résultats expérimentaux révèlent un déficit de vitesse marqué dans le sillage, accompagné de niveaux de fluctuations maximaux dans les couches cisailées, où l'intensité turbulente dépasse 20 %. La comparaison entre les mesures obtenues par Cobra 3D et par fil chaud montre que la dissipation estimée à partir des fonctions de structure est globalement plus élevée, ce qui s'explique par l'anisotropie du sillage et par la sensibilité différente des instruments aux grandes structures organisées et aux petites échelles dissipatives. L'ensemble de ces observations est en bon accord avec les modèles physiques classiques du sillage de cylindre et avec les résultats de la littérature, confirmant la coexistence de structures cohérentes, de signatures fréquentielles bien définies et d'une cascade inertielle pleinement développée.

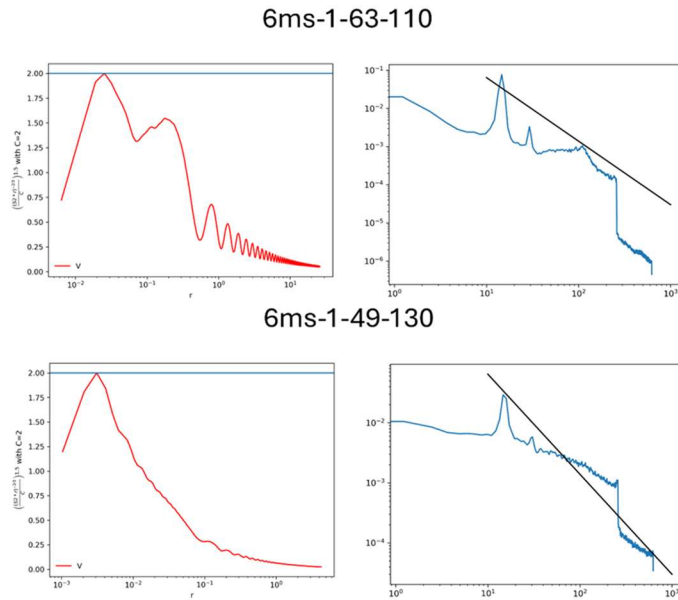


Figure 1.2 : Analyse spectrale et structurale des fluctuations de vitesse dans le sillage d'un cylindre circulaire pour une vitesse amont $U_0 = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Les figures correspondent à différentes positions (x, y) de la sonde dans le sillage. À gauche : fonction de structure du second ordre normalisée mettant en évidence un plateau inertiel compatible avec la loi de Kolmogorov ($C = 2$). À droite : densité spectrale de puissance montrant un pic associé à la fréquence de von Kármán et une gamme inertielle de pente $-5/3$.

TP4 : PLATEFORME CORIOLIS – COURANT DE BORD OUEST INTENSIFIE

Dans le cadre du projet GAPWEBS visant à modéliser expérimentalement le Gulf Stream comme un courant de bord ouest intensifié (Western Boundary Current, WBC), ce travail s'appuie sur les théories classiques de la circulation océanique à grande échelle. La théorie de Sverdrup (1947) décrit l'équilibre entre forçage éolien et vorticité planétaire gouvernant le transport méridien intégré, mais ne permet pas d'expliquer l'asymétrie est-ouest observée dans les bassins océaniques. Cette limitation est levée par Stommel (1948), qui introduit une friction linéaire de fond conduisant à une intensification du courant le long du bord ouest, puis par Munk (1950), qui généralise ce cadre en considérant une viscosité turbulente latérale A_H équilibrant l'effet β et la diffusion de vorticité. Ces approches constituent aujourd'hui encore le socle théorique de l'étude des WBC, comme le Gulf Stream (Vallis, 2017).

L'expérience est réalisée sur la plateforme Coriolis du LEGI (Grenoble), un bassin circulaire de 13 m de diamètre mis en rotation à période constante $T = 30$ s, imposant une fréquence de Coriolis uniforme $f = 4\pi/T$. Une pente topographique du fond $\Sigma_1 = 0,105$ est introduite afin de reproduire un β topographique analogue à la variation latitudinale du paramètre de Coriolis, défini par $\beta = fs/D$, où s est la pente et D la profondeur variant linéairement de 0,8 m   0,3 m sur une longueur caractéristique $L_s = 5$ m le long du bord ouest B_1 . Un pompage imposé dans le canal d'entrée génère un écoulement entrant de vitesse moyenne U au bord sud du bassin, calibrée par la relation $U = 0,0327Q^2 + 0,46Q - 0,28$ (en cm/s) pour des débits Q compris entre 2 et 8 unités. Les expériences EXP23   EXP26 sont réalisées sans gap afin d'isoler les effets inertiels et visqueux.

Les champs de vitesse sont mesurés par vélocimétrie par images de particules (PIV) dans un plan horizontal situé à environ 10 cm sous la surface libre. Cette technique permet d'accéder aux composantes horizontales de la vitesse (u, v) avec une résolution spatiale d'environ 3 mm et une cadence temporelle de 1 s. Chaque expérience fournit environ 1000 champs instantanés stockés au format netCDF, accessibles via le serveur servdap.legi.grenoble-inp.fr et traités sous Python (netCDF4, numpy, matplotlib). Le traitement inclut le calcul de moyennes temporelles, des contraintes de Reynolds $\overline{u'u'}$, $\overline{v'v'}$, $\overline{u'v'}$, de la vorticité relative $\zeta = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ et de la vorticité potentielle $\zeta + f + \beta y$, ainsi que l'extraction de profils transversaux $v(x)$ et $u(x)$ aux positions méridiennes $y = 1,5, 2,5$ et $3,5$ m.

Les résultats montrent, pour l'ensemble des expériences EXP23   EXP26, la formation systématique d'un courant de bord ouest intensifié. La vitesse maximale du courant augmente de manière monotone avec le débit imposé, passant d'environ 0,02 m/s pour EXP23   près de 0,08 m/s pour EXP26. Les profils transversaux moyens $v(x)$ présentent une structure similaire pour toutes les expériences et toutes les positions en y , avec une vitesse maximale localisée près de la paroi ouest et une décroissance rapide vers l'intérieur du bassin, tandis que les profils instantanés révèlent des fluctuations importantes, témoignant d'un régime turbulent. La largeur observée du courant δ_{obs} , définie comme la zone où $v > 0,5v_{\text{max}}$, est comprise entre 10 et 30 cm, relativement indépendante de y mais croissante avec U . Les rapports $\delta_{\text{obs}}/\delta_I$, où $\delta_I = \sqrt{U/\beta}$ est l'échelle inertielle, sont compris entre 0,5 et 2, indiquant une dynamique dominée par l'inertie.

L'analyse de la vorticité met en évidence une forte variabilité dans la couche limite de bord ouest, où les contraintes de Reynolds et la dissipation turbulente sont maximales. En revanche, dans la région externe du courant, la vorticité potentielle est approximativement conservée pour l'ensemble des expériences, confirmant un régime quasi-inertiel. L'estimation de la viscosité turbulente latérale donne des valeurs $A_H \sim 10^{-4} - 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, nettement supérieures à la viscosité moléculaire $\nu \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. La largeur visqueuse de Munk $\delta_M = (A_H/\beta)^{1/3}$ est ainsi du même ordre de grandeur que δ_{obs} , contrairement à l'échelle moléculaire $\delta_v \sim 1 - 3 \text{ mm}$, négligeable devant les observations.

Ces résultats confirment expérimentalement que la structure et la largeur des courants de bord ouest sont contrôlées par un équilibre entre effet β , inertie et dissipation turbulente, en accord avec les cadres théoriques de Stommel et Munk. Malgré les limitations liées à la résolution PIV, l'ensemble des expériences EXP23   EXP26 montre une dynamique robuste et cohérente, faisant de cette configuration un analogue pertinent du Gulf Stream en laboratoire.



Figure 4.1 : Dispositif expérimental : plateforme Coriolis (LEGI, Grenoble)

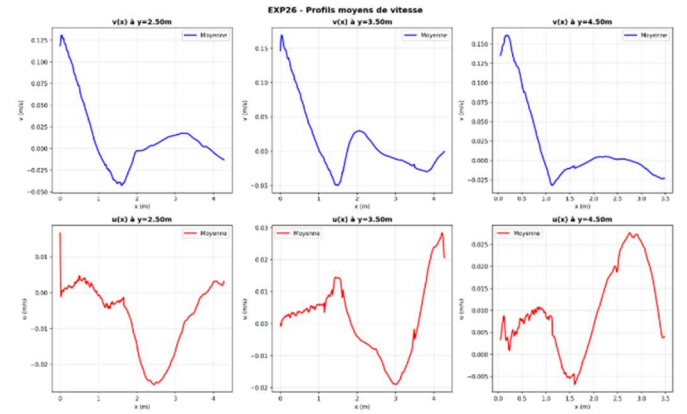
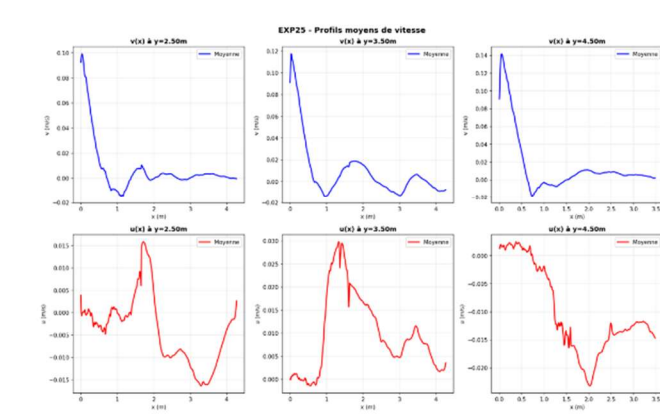
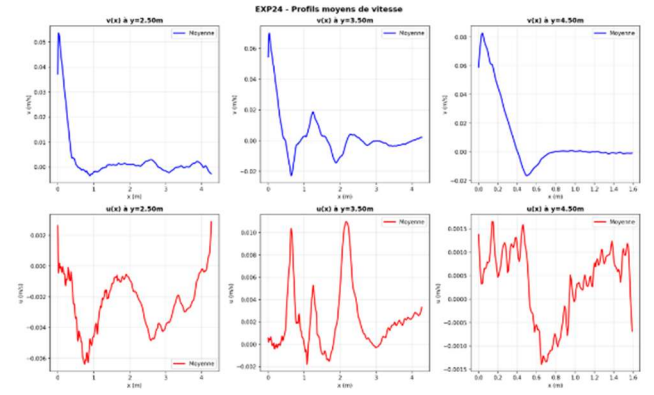
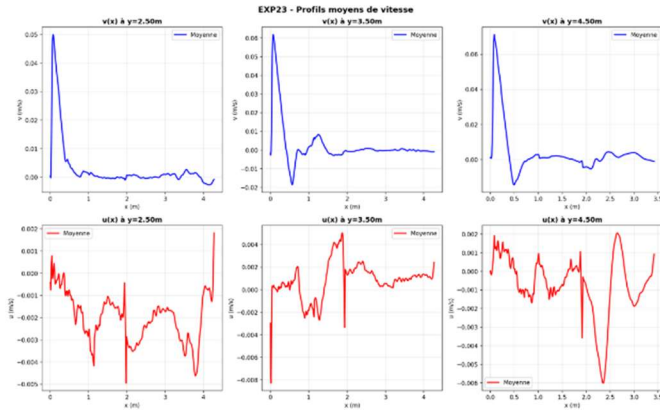


Figure 4.2 : Profils moyens de vitesse transversaux pour les expériences EXP23 à EXP26

Profils moyens des composantes de vitesse transversales $v(x)$ (en bleu) et longitudinales $u(x)$ (en rouge) pour les expériences EXP23, EXP24, EXP25 et EXP26, mesurés par PIV à différentes positions méridiennes ($y = 2,50, 3,50$ et $4,50$ m). L'intensification progressive du courant de bord ouest avec l'augmentation du débit imposé est clairement observée, avec une augmentation monotone de la vitesse maximale et une structure spatiale globalement conservée le long du bord ouest.

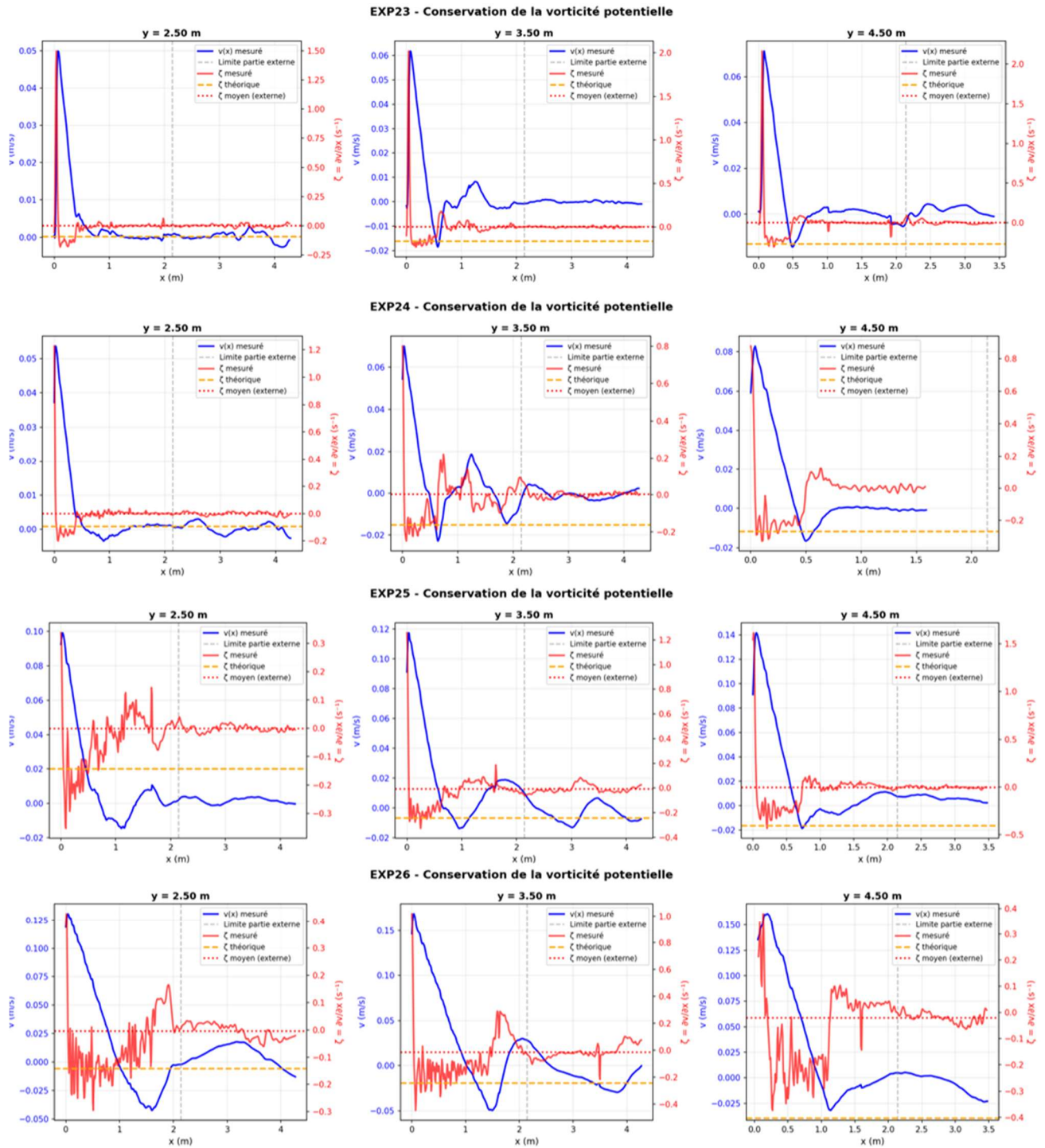


Figure 4.3 : Conservation de la vorticité potentielle pour les expériences EXP23 à EXP26

Profils transversaux de vitesse $v(x)$ (courbe bleue) et de vorticité relative $\zeta = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ (courbe rouge) pour les expériences EXP23 à EXP26, aux positions $y = 2,50, 3\{\}, 50$ et $4\{\}, 50$ m. La limite entre la couche de bord et la région externe est indiquée par la ligne verticale en pointillés. Dans la partie externe du courant, la vorticité potentielle est approximativement conservée, en accord avec la théorie inertielle gouvernée par l'effet β , tandis que de fortes variations de ζ sont observées dans la couche limite de bord ouest, traduisant le rôle dominant de la dissipation turbulente.

TP6 : TURBULENCE DES ONDES DANS LES GONGS

L'étude de la turbulence des ondes dans les gongs s'appuie sur des références théoriques en acoustique des plaques minces (Pierce, 1989) et en turbulence d'ondes (Nazarenko, 2011), ainsi que sur des travaux expérimentaux montrant la transition vers des régimes non linéaires dans des systèmes vibratoires forcés. L'objectif était d'enregistrer et d'analyser le son émis par un gong sous excitation mécanique quasi-stationnaire (frappes répétées à force constante) pour observer les caractéristiques spectrales des vibrations, en particulier la présence éventuelle d'un continuum spectral attendu en turbulence faible. L'expérience a consisté à frapper un gong plat (diamètre $\approx 50\text{--}65\text{ cm}$) avec un maillet à trois niveaux d'intensité croissante (faible, moyenne, forte), en enregistrant chaque séquence pendant une durée longue à l'aide du logiciel Audacity, exportée en fichiers .wav mono-canal à 44,1 kHz.

Trois fichiers principaux ont été analysés : `regime_permanent_0.wav`, `regime_permanent_1.wav` et `regime_permanent_2.wav`. L'instrumentation se limite à un microphone standard positionné à distance fixe du gong, connecté à un ordinateur, et au traitement numérique réalisé sous Python avec les bibliothèques SciPy (wavfile pour la lecture, fft et signal.welch pour l'analyse spectrale) et Matplotlib pour la visualisation. Les signaux temporels bruts montrent une superposition d'oscillations amorties et de transitoires d'impacts, avec une amplitude globale augmentant nettement avec la force d'excitation (figure 2 : superposition des trois signaux temporels normalisés).

Le spectre de puissance fréquentiel (calculé par la méthode Welch avec fenêtre Hanning) révèle un ensemble de pics discrets intenses autour de 100–600 Hz, correspondant aux modes propres du gong, suivis d'une décroissance rapide à hautes fréquences (figure 3 : spectre de puissance en échelle log-log). Le spectrogramme temporel-fréquentiel (figure 4) met en évidence une bande énergétique dominante autour de 200–300 Hz qui s'établit rapidement après le début du forcing et persiste pendant tout l'enregistrement, avec une énergie décroissante vers les hautes fréquences. Une coupe horizontale du spectrogramme (figure 5 : spectre moyen en fréquence) confirme la présence de pics principaux vers 220–280 Hz et une queue spectrale décroissant en loi de puissance approximative, signe d'un transfert d'énergie non linéaire vers les hautes fréquences, bien que le spectre reste dominé par des modes discrets plutôt que par un continuum large comme prédit par la théorie de la turbulence faible.

Ces observations s'expliquent par la taille finie du gong et ses conditions aux limites rigides, qui imposent un spectre modal discret, contrairement à une plaque infinie où un continuum spectral serait attendu. L'élargissement et l'enrichissement spectral observés à plus forte excitation indiquent néanmoins l'émergence d'interactions non linéaires (couplage entre modes), avec un début de cascade d'énergie vers les hautes fréquences. Des limitations expérimentales sont à noter : la durée d'enregistrement (environ 25–30 s par fichier) reste insuffisante pour une excellente résolution fréquentielle ($\Delta f \approx 0,04\text{ Hz}$), et le bruit de fond du microphone ainsi que les variations de force des impacts peuvent biaiser les basses fréquences. Pour aller plus loin, il serait pertinent d'augmenter le nombre de fenêtres Welch ($N_w > 25$), d'utiliser des enregistrements plus longs ($> 60\text{ s}$), ou de combiner avec une mesure spatiale (déplacements du gong) pour construire un spectre 3D $k\text{-}\omega$ et vérifier la relation de dispersion $\omega \propto k^2$ des ondes de flexion.

En conclusion, cette analyse acoustique simple via fichiers .wav permet de mettre en évidence les modes dominants du gong et les premiers signes de non-linéarité, mais le régime de turbulence pleinement développée reste difficile à atteindre avec un gong de taille laboratoire et un forcing manuel.

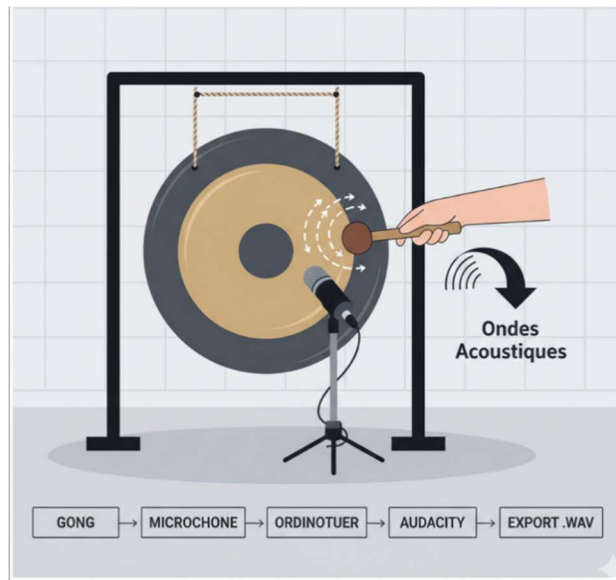


Figure 6.1 : Schéma du dispositif expérimental de mesure acoustique du gong

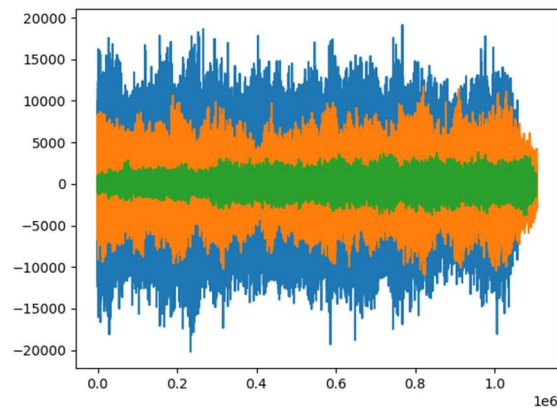


Figure 6.2 : Signaux temporels acoustiques superposés pour les trois régimes d'excitation (bleu : faible, orange : moyen, vert : fort).

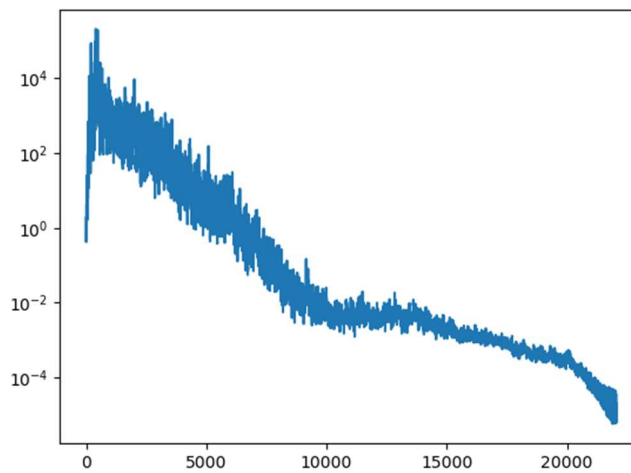


Figure 6.3 : Densité spectrale de puissance du signal acoustique (échelle log-log). Spectre obtenu par la méthode de Welch, mettant en évidence les modes propres dominants du gong.

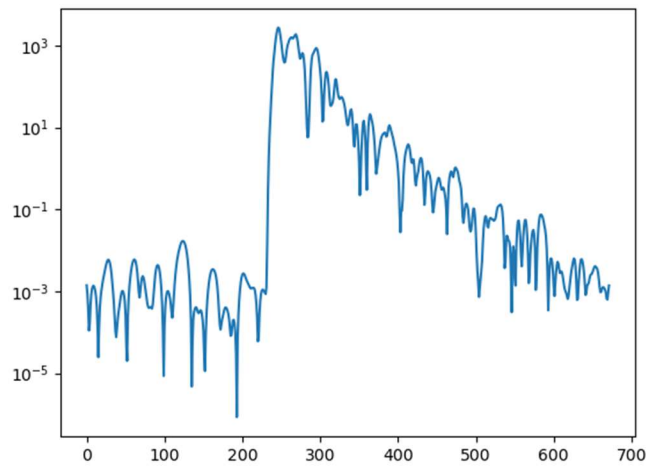


Figure 6.4 : Spectrogramme temps–fréquence du signal acoustique. Représentation de l'évolution fréquentielle de l'énergie acoustique au cours du temps.

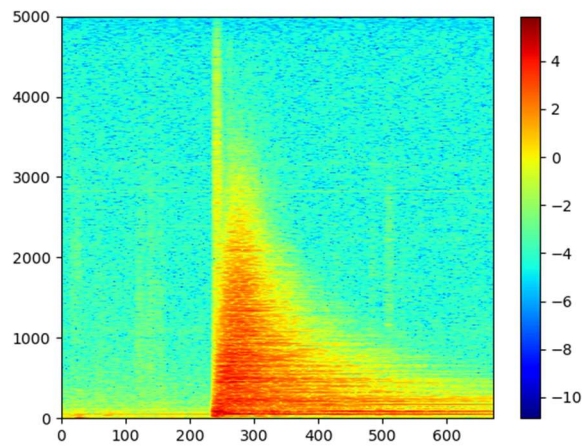


Figure 6.5 : Spectre moyen en fréquence issu du spectrogramme. Coupe fréquentielle moyenne montrant les pics dominants autour de 200–300 Hz et la décroissance de l'énergie aux hautes fréquences.

DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSION & PERSPECTIVES

Les différents travaux pratiques présentés dans ce rapport, bien que portant sur des systèmes physiques variés, partagent un socle méthodologique commun fondé sur l'analyse statistique et spectrale des fluctuations. Que l'on considère un sillage turbulent, une turbulence de grille, un courant de bord ouest ou un système vibratoire, la question centrale demeure la même : comment l'énergie est-elle injectée, transférée entre échelles et dissipée ?

Les expériences de soufflerie montrent que la validité des lois universelles de la turbulence, en particulier la théorie de Kolmogorov (1941), dépend fortement du degré de séparation d'échelles et du nombre de Reynolds atteint. La turbulence générée par une grille active apparaît nettement plus proche d'un régime pleinement développé que celle issue d'une grille passive ou d'un sillage anisotrope. Les écoulements géophysiques, quant à eux, mettent en évidence que la turbulence ne peut être comprise sans tenir compte des effets de rotation, de géométrie et de contraintes aux limites, qui modifient profondément la cascade d'énergie et la distribution de la vorticit  .

Le TP sur la turbulence des ondes souligne enfin que la notion m  me de turbulence peut s'  tendre    des syst  mes non fluides, o   les interactions non lin  aires entre modes remplacent les tourbillons comme m  canisme de

transfert d'énergie. Cette diversité de situations montre que la turbulence n'est pas un phénomène unique, mais un ensemble de régimes partageant certains traits universels.

CONCLUSION

En conclusion, l'ensemble des travaux pratiques a permis de relier concrètement les concepts théoriques de la turbulence et des écoulements géophysiques à des observations expérimentales réelles. Les mesures en laboratoire confirment la robustesse des cadres théoriques classiques, tout en mettant en évidence leurs limites lorsque les hypothèses d'homogénéité, d'isotropie ou de séparation d'échelles ne sont pas strictement satisfaites. L'utilisation conjointe de techniques de mesure à haute résolution (fil chaud, PIV, acoustique) et d'outils d'analyse spectrale avancés s'avère essentielle pour caractériser ces régimes complexes.

PERSPECTIVES

Plusieurs perspectives se dégagent naturellement de ce travail. D'un point de vue expérimental, l'augmentation des nombres de Reynolds accessibles, l'amélioration de la résolution spatiale et temporelle des mesures, ainsi que l'utilisation de diagnostics multi-points permettraient d'accéder plus finement aux mécanismes de transfert inter-échelles. D'un point de vue numérique, la comparaison systématique avec des simulations DNS ou LES constituerait un prolongement naturel pour mieux quantifier les effets de bruit, d'anisotropie et de conditions aux limites. Enfin, l'extension de ces approches à des systèmes plus proches des conditions naturelles, notamment en géophysique et en turbulence d'ondes, offrirait une passerelle directe entre laboratoire, modélisation et phénomènes réels.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

1. Kolmogorov, A. N., 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 30, 301–305.
2. Welch, P. D., 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73.
3. Pope, S. B., 2000. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
4. Mydlarski, L., 2017. A turbulent quarter century of active grids. *Fluid Dynamics Research*, 49, 061401.
- Mora, D. O., et al., 2019. Energy cascades in active-grid-generated turbulent flows. *Physical Review Fluids*, 4, 104601.
5. Brun, C., Aubrun, S., Goossens, T., and Ravier, P., 2008. Coherent structures in separated shear layers. *Flow, Turbulence and Combustion*, 81, 97–114.
6. Vallis, G. K., 2017. *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
7. Negretti, M. E., 2023. *TP04 Coriolis*. LEGI Grenoble (internal document).
8. Pierce, A. D., 1989. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Acoustical Society of America.
9. Nazarenko, S., 2011. *Wave Turbulence*. Springer.