

Rapport de Travaux Pratiques

Turbulence, Méthodes et Applications

Méthodes Expérimentales Avancées :
CLA, THI, Gong et Spray

Rédigé par :

Garga YAKOUB

Formation :

Master 2 TMA

Encadrant :

Christophe BRUN
LEGI/MEIGE, UGA

Année universitaire :

2025-2026

Résumé

Ce rapport présente quatre travaux pratiques réalisés au sein du LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels) dans le cadre du module de méthodes expérimentales avancées, portant sur différents aspects de la turbulence. L'étude principale se concentre sur la couche limite atmosphérique avec une campagne de mesures in situ sur le massif de Belledune visant à caractériser ses propriétés thermiques et turbulentes en conditions hivernales. Des instruments variés ont été déployés : thermocouples et anémomètre sonique. L'analyse porte sur le cycle diurne, les profils de température, les spectres d'énergie, la dissipation turbulente, la longueur de Monin-Obukhov et l'énergie cinétique turbulente. Les résultats sont confrontés aux théories classiques de la turbulence atmosphérique pour discuter de la stabilité de la couche limite observée. Trois autres expériences sont présentées de manière synthétique : l'étude de la turbulence homogène isotrope générée par une grille, permettant d'observer la décroissance de l'énergie turbulente en aval ; l'analyse de la turbulence d'ondes à l'aide d'un gong, illustrant le couplage non-linéaire des modes de vibration ; et la caractérisation d'un spray produit par atomisation d'un jet liquide, mettant en évidence les mécanismes de fragmentation. Ces travaux complémentaires illustrent la diversité des phénomènes turbulents et l'importance des approches expérimentales pour leur compréhension.

Mots-clés : Atomisation, Couche limite atmosphérique, Turbulence, Turbulence homogène isotrope, Turbulence d'ondes.

Abstract

This report presents four practical projects carried out at LEGI (Laboratory of Geophysical and Industrial Flows) as part of the advanced experimental methods module, focusing on different aspects of turbulence. The main study focuses on the atmospheric boundary layer with a series of in situ measurements on the Belledune massif aimed at characterising its thermal and turbulent properties in winter conditions. Various instruments were deployed, including thermocouples and a sonic anemometer. The analysis covers the diurnal cycle, temperature profiles, energy spectra, turbulent dissipation, Monin-Obukhov length and turbulent kinetic energy. The results are compared with classical theories of atmospheric turbulence to discuss the stability of the observed boundary layer. Three other experiments are presented in summary form: the study of homogeneous isotropic turbulence generated by a grid, allowing the decay of turbulent energy downstream to be observed; the analysis of wave turbulence using a gong, illustrating the non-linear coupling of vibration modes; and the characterisation of a spray produced by the atomisation of a liquid jet, highlighting the mechanisms of fragmentation. This complementary work illustrates the diversity of turbulent phenomena and the importance of experimental approaches to understanding them.

Keywords: Atomisation, Atmospheric boundary layer, Turbulence, Isotropic homogeneous turbulence, Wave turbulence.

Table des matières

1	Introduction et théorie générale	1
2	TP 1 Principal : Couche Limite Atmosphérique	3
2.1	Introduction	3
2.2	Description de l'expérience	3
2.3	Stabilité thermique de la CLA	4
2.4	Résultats et discussion	5
2.5	Conclusion du TP	5
3	TP 2 : Turbulence Homogène et Isotrope	7
4	TP 3 : Turbulence d'Ondes (Gong)	8
5	TP 4 : Spray (Jet Liquide)	9
6	Discussion Générale et Conclusion	11

1 Introduction et théorie générale

La turbulence représente l'un des phénomènes les plus fascinants et complexes de la mécanique des fluides, caractérisée par des mouvements désordonnés et chaotiques s'étendant sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Depuis les travaux pionniers de Kolmogorov en 1941, notre compréhension de ce phénomène s'est considérablement enrichie, bien que de nombreuses questions demeurent ouvertes. La théorie de Kolmogorov a introduit un concept révolutionnaire : celui de la cascade énergétique, où l'énergie injectée aux grandes échelles se transfère progressivement vers les plus petites structures tourbillonnaires avant d'être finalement dissipée en chaleur par viscosité.

Ce rapport rassemble les résultats de quatre travaux pratiques réalisés au Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) dans le cadre du module de méthodes expérimentales avancées. Ces investigations explorent différentes manifestations de la turbulence, depuis les écoulements atmosphériques jusqu'aux vibrations de structures élastiques, en passant par la fragmentation de jets liquides. L'objectif est double : d'une part, caractériser expérimentalement ces phénomènes turbulents dans leurs spécificités ; d'autre part, identifier les concepts théoriques fondamentaux qui unifient ces systèmes malgré leur diversité apparente.

L'étude principale se concentre sur la **couche limite atmosphérique** lors d'une campagne de mesures in situ menée sur un site du massif de Belledonne à Grand Colon environ 1170 m d'altitude. Un ensemble d'instruments sont utilisés (thermocouples et anémomètre sonique) a permis d'acquérir simultanément les données de l'étude. L'analyse porte sur le cycle diurne, les profils verticaux de température, les spectres d'énergie, la dissipation turbulente, ainsi que sur les paramètres caractéristiques de la couche limite stratifiée.

Trois expériences complémentaires viennent enrichir cette investigation : **Turbulence homogène isotrope**, générée en aval d'une grille en soufflerie, cette configuration permet d'observer la décroissance spatiale de l'énergie turbulente et de vérifier les prédictions de la théorie classique de Kolmogorov concernant la cascade inertielle. **Le gong vibré** : en turbulence d'ondes, l'excitation d'un gong métallique, une plaque vibrante, révèle un régime de turbulence radicalement différent, gouverné par des interactions non-linéaires entre modes de vibration et caractérisé par des cascades énergétiques directe et inverse. **Atomisation et fragmentation d'un jet liquide**, la déstabilisation d'un jet par cisaillement aérodynamique illustre les mécanismes de rupture primaire et secondaire conduisant à la formation d'un spray polydisperse.

Bien que ces systèmes relèvent de domaines physiques distincts, ils partagent des caractéristiques communes qui justifient une approche théorique unifiée. Ces travaux expérimentaux soulignent l'importance fondamentale des techniques de mesure de pointe pour caractériser quantitativement les phénomènes turbulents et confronter les observations aux modèles théo-

riques.

L'analyse des écoulements turbulents nécessite une approche statistique en raison de leur nature chaotique et de leur extrême sensibilité aux conditions initiales. La contribution majeure de Kolmogorov (1941) réside dans l'identification d'une structure auto-similaire de la turbulence aux échelles intermédiaires, situées entre l'échelle d'injection d'énergie et l'échelle de dissipation visqueuse [? ?]. Dans cette zone inertielle, le spectre d'énergie ne dépend que du taux de dissipation ε et du nombre d'onde k : $E(k) = C_K \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$ où $C_K \approx 1,6$ est la constante de Kolmogorov, observée expérimentalement dans une grande variété d'écoulements turbulents. Cette loi en puissance $k^{-5/3}$ traduit le transfert conservatif d'énergie à travers les échelles dans la zone inertielle. Le mécanisme physique sous-jacent peut se comprendre par une cascade de Richardson : les grandes structures tourbillonnaires, instables, se fragmentent en tourbillons de taille décroissante, chacun transmettant son énergie aux échelles inférieures sans dissipation significative. Ce n'est qu'aux plus petites échelles, caractérisées par la longueur de Kolmogorov $\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$, que la viscosité moléculaire ν devient suffisamment importante pour dissiper l'énergie en chaleur. La théorie introduit également plusieurs échelles caractéristiques. Le temps de retournement des tourbillons $\tau_\eta = (\nu/\varepsilon)^{1/2}$ définit la dynamique aux petites échelles, tandis que l'échelle intégrale L caractérise les plus grandes structures énergétiques. Le nombre de Reynolds turbulent $Re_\lambda = u'_{\text{rms}} \lambda / \nu$, basé sur la micro-échelle de Taylor λ , quantifie la séparation d'échelles : pour $Re_\lambda \gg 1$, une large zone inertielle se développe où la loi en $k^{-5/3}$ est observable. La classification des régimes d'écoulement repose sur plusieurs nombres adimensionnels caractérisant le rapport entre forces en compétition. Le nombre de Reynolds $Re = UL/\nu$ compare les forces d'inertie aux forces visqueuses et gouverne la transition vers la turbulence. Au-delà d'une valeur critique Re_c (dépendant de la géométrie), les écoulements deviennent instables et évoluent vers un état turbulent pleinement développé.

Malgré leur diversité, ces systèmes turbulents partagent plusieurs propriétés fondamentales constituant l'essence de la turbulence : **Cascade multi-échelle** : transfert d'énergie des grandes vers les petites échelles (cascade directe) ou inversement (cascade inverse en turbulence d'ondes), gouverné par des lois de conservation. **Auto-similarité statistique** : existence d'une zone inertielle où les propriétés statistiques suivent des lois en puissance, indépendantes des détails du forçage et de la dissipation. **Imprévisibilité déterministe** : sensibilité extrême aux conditions initiales rendant indispensable une description statistique, même si l'évolution est déterministe. **Dissipation localisée** : l'énergie est ultimement dissipée aux petites échelles par viscosité moléculaire (fluides), dissipation structurale (solides) ou création de surface (interfaces). Les approches expérimentales développées, anémométrie fil chaud, profilométrie optique et granulométrie laser permettent de caractériser quantitativement ces régimes et de confronter observations et prédictions théoriques, révélant souvent des écarts significatifs qui soulignent les limites des modèles actuels et motivent la poursuite des recherches.

2 TP 1 Principal : Couche Limite Atmosphérique

2.1 Introduction

La couche limite atmosphérique (CLA) désigne la partie inférieure de la troposphère directement influencée par la surface terrestre, c'est-à-dire qui répond aux forçages générés par cette dernière en moins d'une heure [3]. Les caractéristiques de la CLA évoluent considérablement au cours d'un cycle diurne. En journée, le réchauffement de la surface par le rayonnement solaire génère une convection thermique qui favorise le mélange vertical et augmente l'épaisseur de la couche limite, créant ainsi une couche convective Kaimal and Finnigan [4]. La nuit, le refroidissement radiatif du sol induit un flux de chaleur sensible dirigé vers la surface, ce qui établit un fort gradient thermique près du sol et conduit à la formation d'une couche limite stable, caractérisée par une turbulence atténuée et une stratification thermique marquée [3]. La partie basse de la CLA est couramment appelée couche de surface, parfois désignée comme couche à flux constant car les flux turbulents y varient de moins de 10 % autour de leur intensité moyenne [5]. Les objectifs de ce TP sont multiples : prendre en main le système expérimental de mesure et sa logistique, effectuer des mesures météorologiques classiques (température, humidité, pression et bilan radiatif au sol) pour reconstituer le cycle diurne. L'analyse de ces données permettra de caractériser les variables clés de la CLA, d'examiner les profils de température dans le contexte d'une couche limite stable hivernale, et d'explorer les propriétés statistiques et spectrales de la turbulence atmosphérique, notamment la loi de Kolmogorov et les mécanismes de dissipation turbulente.

2.2 Description de l'expérience

L'expérimentation mobilise deux types de capteurs principaux : anémomètres soniques, thermocouples, dont les modèles détaillés sont précisés dans la description. Le site d'étude est localisé dans le massif de Belledonne à plus de 1000 m d'altitude. Un anémomètre sonique 1a mesure les trois composantes de la vitesse du vent (u , v , w) à l'aide de trois paires de transducteurs ultrasoniques. Chaque paire émet et reçoit une onde ultrasonique dont le temps de trajet dépend de la vitesse du vent V_d le long de l'axe des transducteurs et de la vitesse du son dans l'air c . Pour deux transducteurs A et B séparés d'une distance d , les temps de trajet t_1 (de A vers B) et t_2 (de B vers A) s'expriment par [4] : $t_1 = \frac{d}{c + V_d}$; $t_2 = \frac{d}{c - V_d}$. La vitesse du vent et la vitesse du son sont alors déduites par : $V_d = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$; $c = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)$. La vitesse du son étant fonction de la densité de l'air, donc de sa température et de son humidité, on définit la température sonique T_s par : $T_s = \frac{c^2}{\gamma_d R}$ où $\gamma_d = 1.4$ est le rapport des chaleurs spécifiques de l'air sec à pression et volume constants, et R la constante des gaz parfaits pour

l'air sec. Le thermocouple est un capteur de température basé sur l'effet Seebeck : une différence de potentiel électrique est générée lorsque deux matériaux conducteurs différents sont soumis à des températures différentes. Les thermocouples de type E utilisés sont constitués de deux fils de 0.0762 mm de diamètre en chromel et constantan. La température de référence est mesurée par une sonde résistive PT100, permettant de déterminer la température de l'air par différence de potentiel.

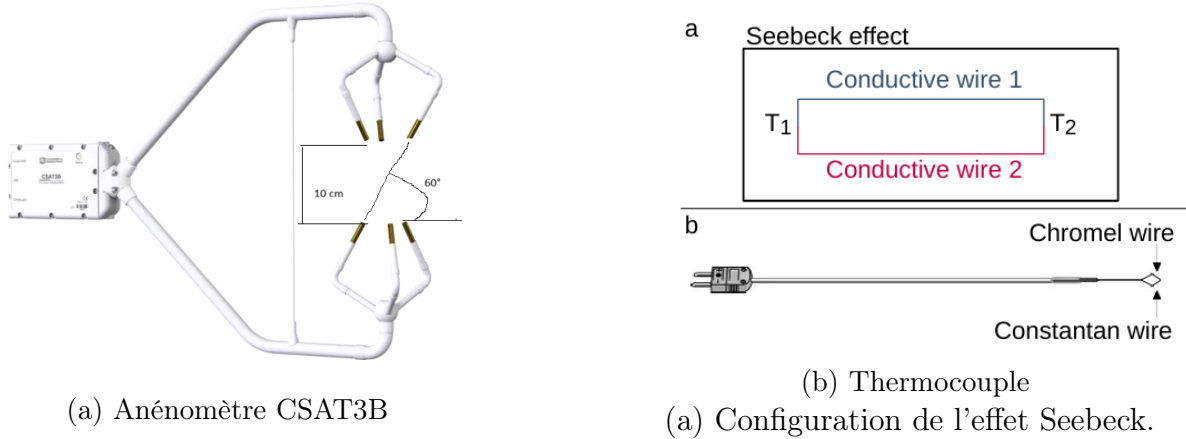


FIGURE 1 : Les dispositifs expérimentaux utilisés

2.3 Stabilité thermique de la CLA

La stabilité de la couche limite atmosphérique (CLA) est déterminée par le gradient vertical de température potentielle virtuelle $\gamma_\theta = \partial\theta_v/\partial z$, où θ_v représente la température virtuelle de l'air. Trois régimes de stabilité se distinguent :

CLA instable ($\gamma_\theta < 0$) : Se forme principalement de jour lorsque le rayonnement solaire chauffe intensément la surface. L'air proche du sol devient moins dense et s'élève, générant une convection et des mouvements verticaux turbulents importants favorisant le mélange atmosphérique.

CLA stable ($\gamma_\theta > 0$) : Se développe la nuit par refroidissement radiatif de la surface, créant une inversion thermique où l'air froid et dense reste piégé au sol. Les mouvements verticaux sont fortement réduits et la turbulence limitée. Ce régime est caractérisé par la fréquence de Brunt-Väisälä

CLA neutre ($\gamma_\theta = 0$) : Se produit lors des transitions jour/nuit ou lorsque les vents forts dominant les effets thermiques. La turbulence mécanique (frottement au sol) prédomine sur les effets convectifs, produisant un mélange atmosphérique modéré.

2.4 Résultats et discussion

Dans la couche à flux constant (variation de $\overline{u'w'}$ inférieure à 10%), le profil vertical de vitesse suit une loi logarithmique $U^+ = u/u_* = (1/\kappa) \ln(z/z_0)$, où z_0 représente la rugosité aérodynamique [5]. Le spectre d'énergie suit une loi en $f^{-5/3}$ dans la zone inertielle, où les gradients moyens n'affectent pas les propriétés de l'écoulement. Selon Pope [?], avec $K_s = 0.5$, la densité spectrale d'énergie s'écrit : $S_{uu} = K_s \varepsilon^{2/3} k_x^{-5/3}$. La dissipation d'énergie cinétique turbulente est exprimée sous la forme : $\varepsilon = \nu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2$. D'autres formules isotrope avec 3 composantes : $\varepsilon_{\text{iso}} = \frac{3\nu}{\bar{u}^2} \left[\left(\frac{\partial u'}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v'}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w'}{\partial t} \right)^2 \right]$, $\varepsilon_{\text{THI}} = \frac{15\nu}{\bar{u}^2} \left(\frac{\partial u'}{\partial t} \right)^2$ et la méthode par fonction de structure est défini par : $\varepsilon_{\text{str}} = \frac{1}{r} \left(\frac{\langle \delta u(r)^2 \rangle}{C_2} \right)^{3/2}$ $C_2 = 2$, pour la méthode par fonction de structure. L'échelle de Taylor λ marque la limite entre la zone inertielle et la zone dissipative, correspondant au maximum de la fonction $k^2 S_{uu}(k)$. Elle s'exprime par : $\lambda = \sqrt{\frac{15\nu}{\varepsilon}} u'^2$. Le nombre Reynolds turbulent : $Re_\lambda = \frac{u'\lambda}{\nu}$. La production mécanique P_M est défini par : $P_M = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ et le terme de la production par flottabilité : $P_B = \frac{g_i}{\theta} \overline{u'_i \theta'}$. La longueur de Monin-Obukhov L_{MO} a été définie sur sol plat ($\alpha = 0$) par : $L_{MO} = -\frac{\theta u_*^3}{\kappa g \overline{w' \theta'_s}}$ ou $L_{MO} = \frac{z}{R_i}$.

La période d'analyse correspond à l'intervalle suivant : 2025-10-12 12 : 00 : 00 – 2025-10-12 13 : 00 : 00 soit une durée totale de **1 heure**. Les composantes du tenseur de Reynolds obtenues sont : $\overline{u'u'} = 0.0256$, $\overline{v'v'} = 0.1052$, $\overline{w'w'} = 0.0404$, et $\overline{u'w'} = -0.0031$. l'énergie cinétique turbulente (TKE) : $e = 0.0856 \text{ m}^2/\text{s}^2$. La vitesse moyenne longitudinale : $U_{\text{mean}} = 0,161 \text{ m/s}$, Le Flux de chaleur vertical : $\overline{w'\theta'} = -0.0615$, Le Taux de dissipation (ε) : $\varepsilon = 3.7321 \times 10^{-3}$ avec une pente observée de 0,320 (pente théorique attendue : 0,667). l'Échelle de Taylor (λ) : $\lambda = 3,93 \text{ cm}$ le Nombre de Reynolds turbulent $Re_\lambda = 419$, Le Paramètres de Monin-Obukhov $u_* = 0,056 \text{ m/s}$ $L_{MO} = 0,2 \text{ m}$, soit $\frac{z}{L} = 4.8788$.

La figure 2 présente le cycle diurne, on observe la fluctuation de température avec des pics. La figure 4 montre la PSD des fluctuations de vitesse, à titre de comparaison, ceci est un résultat similaire de la cascade de kolmogorov [?] marquée par la présence d'une zone inertielle qui suit la loi de puissance en $f^{-5/3}$. La figure 5 ?? présente un résultat comparant les températures obtenues par thermocouples et par station météo ; on observe une bonne corrélation entre les deux méthodes de mesure et la figure 6 ?? montre les séries temporelles de vitesse (u, v, w) et température (T), révélant un régime turbulent avec couplage vitesse-température.

2.5 Conclusion du TP

Ce travail expérimental a permis une caractérisation de la couche limite atmosphérique turbulente à travers des mesures combinées par anémomètre sonique, station météo. Les résultats

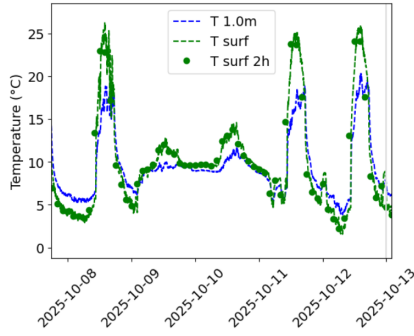


FIGURE 2 : cycle diurne

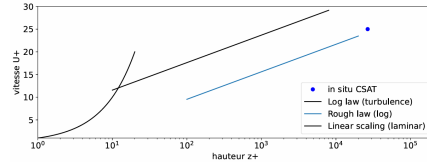


FIGURE 3 : profil log de vitesse

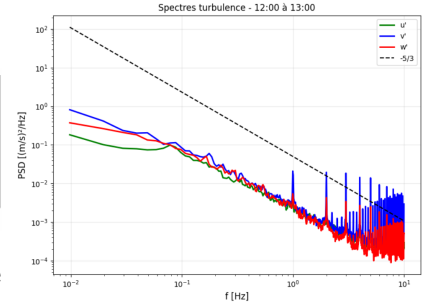
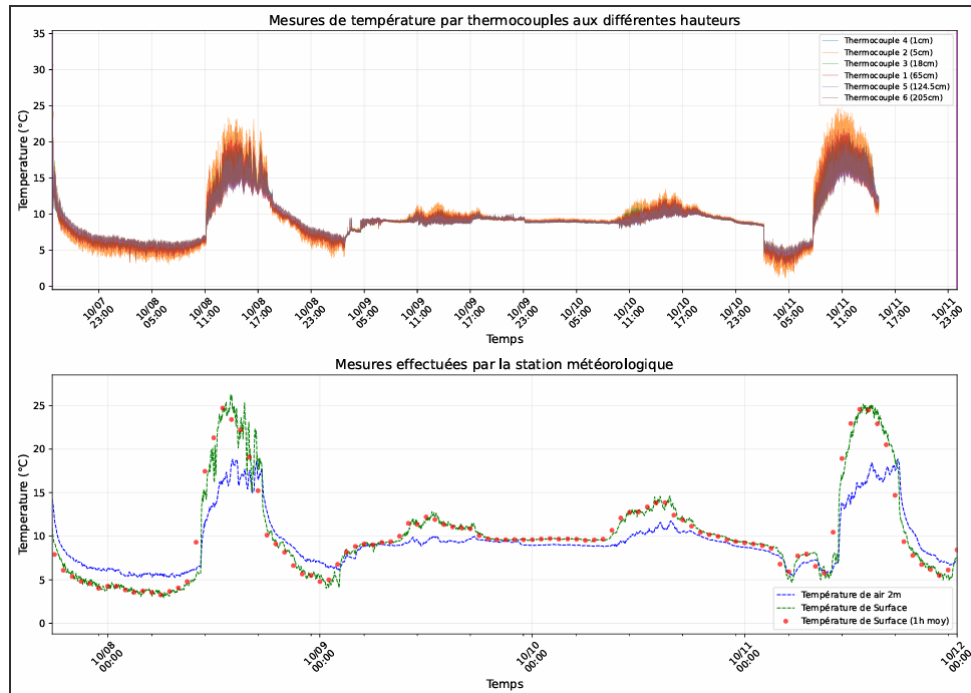


FIGURE 4 : PSD

FIGURE 5 : Vitesses (u , v , w) et température (T), révélant un régime turbulent

principaux confirment :

- L'établissement d'une zone logarithmique bien définie,
- La cascade énergétique de Kolmogorov avec une zone inertielle respectant la loi spectrale en $f^{-5/3}$,
- Une concordance satisfaisante avec la théorie classique de similarité de Monin-Obukhov afin de prendre une position sur la nature de la couche limite

Néanmoins, certaines difficultés ont été rencontrées lors de l'acquisition et du traitement des données, notamment lors de la simulation (NaN : données manquantes ou corrompues). Ces observations ouvrent les perspectives comme l'extension des mesures à différentes conditions de rugosité et de stabilité thermique ou encore la comparaison avec des autres résultats simulations

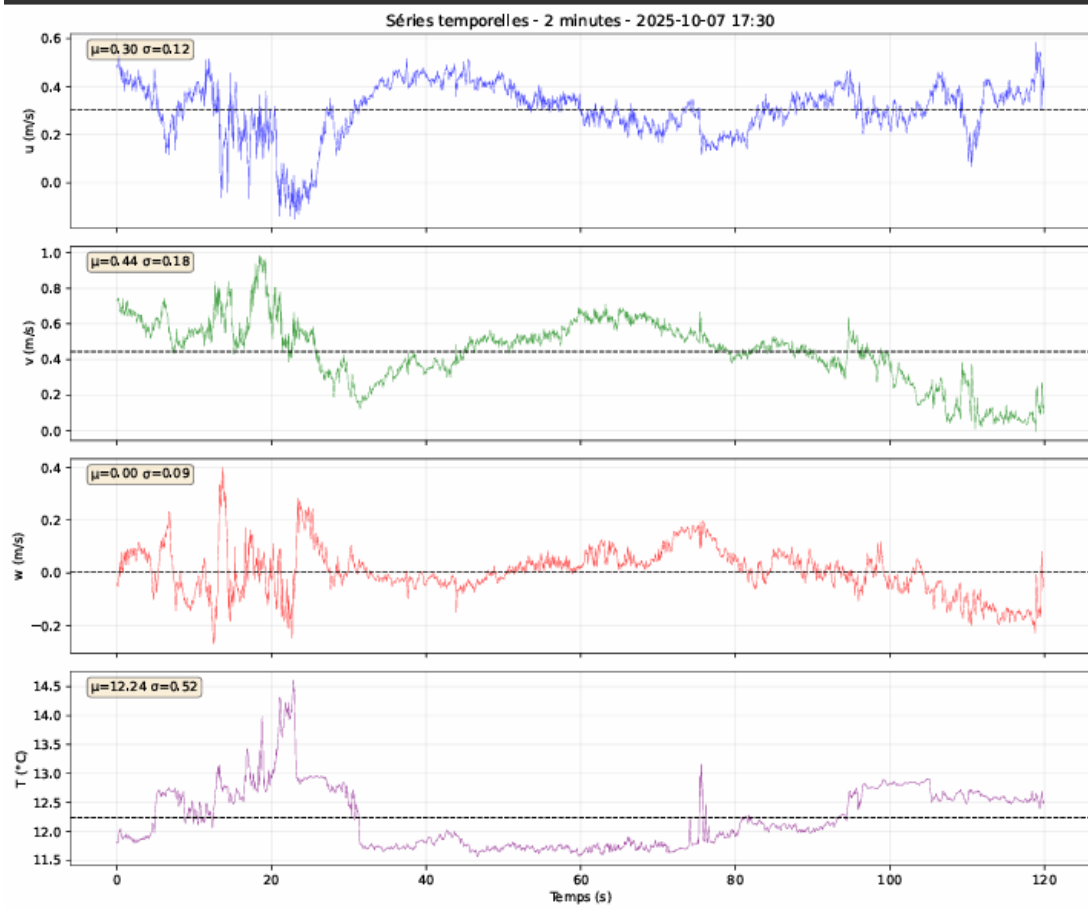


FIGURE 6 : Température thermocouples et station météo

numériques (LES, DNS) pour mieux affiner la compréhension des mécanismes de transfert turbulent dans la couche de surface atmosphérique.

3 TP 2 : Turbulence Homogène et Isotrope

La turbulence homogène et isotrope (THI) constitue le cas idéalisé le plus simple pour étudier les propriétés fondamentales de la turbulence, notamment la cascade d'énergie de Kolmogorov. La THI a été étudiée depuis les travaux pionniers de Batchelor [7] et [8]. Ce TP vise à générer expérimentalement une THI en aval d'une grille en soufflerie et à caractériser sa décroissance spatiale et spectrale. L'expérience a été réalisée dans la soufflerie subsonique de Lepinard au LEGI, disposant d'une veine d'essai de 4 m de longueur et d'une section carrée de $0,75 \times 0,75 \text{ m}^2$. Cette installation génère un écoulement laminaire avec des vitesses comprises entre 5 et 50 m/s. Le système de génération de turbulence est constitué d'une grille active comportant 16 axes rotatifs (8 horizontaux et 8 verticaux) équipés de pales carrées coplanaires [9]. Deux protocoles expérimentaux ont été employés : grille active, et grille passive. Le capteur utilisé est un fil chaud, il est piloté par un anémomètre à température constante StreamLine.

L'anémométrie à fil chaud repose sur le principe de convection forcée : le fil surchauffé est refroidi par l'écoulement, et la variation du courant électrique nécessaire pour maintenir sa température constante permet de déterminer la vitesse locale. Pour étalonner le fil chaud, on utilise la relation tension-vitesse qui est donnée par la loi de King : $e^2 = A\sqrt{u} + B$, les valeurs obtenues sont : $A = 0,73$ et $B = 1.89$. Pour notre cas de TP, nous mesurons une vitesse d'entrée u et nous faisons varier la position $x(\text{cm})$ en aval de la grille entre $x = 73.8 \text{ cm}$ et $x = 246.3 \text{ cm}$. Pour les deux protocoles (grille fixe et mobile). L'analyse spectrale a été réalisée par la méthode de Welch (PSD - Power Spectral Density). Cette méthode divise le signal en segments, calcule la PSD de chaque segment puis effectue une moyenne, permettant une meilleure estimation globale du spectre et une réduction du bruit par rapport à la FFT classique. Les spectres obtenus 7a et 7b présentent une décroissance en loi de puissance proche de $-5/3$, validant la présence d'une turbulence développée dans la gamme de fréquences étudiée. En revanche, les mesures obtenues avec le protocole actif respectent bien la loi en $k^{5/3}$, confirmant que la grille active génère une turbulence plus fidèle à la théorie. Ce protocole s'avère donc mieux adapté à cette expérience, car il permet une observation plus précise de la turbulence. Les résultats sont cohérents avec les résultats de [9] pour des grilles similaires. Ce TP illustre les concepts fondamentaux de cascade énergétique et valide la théorie K41 dans un cas canonique.

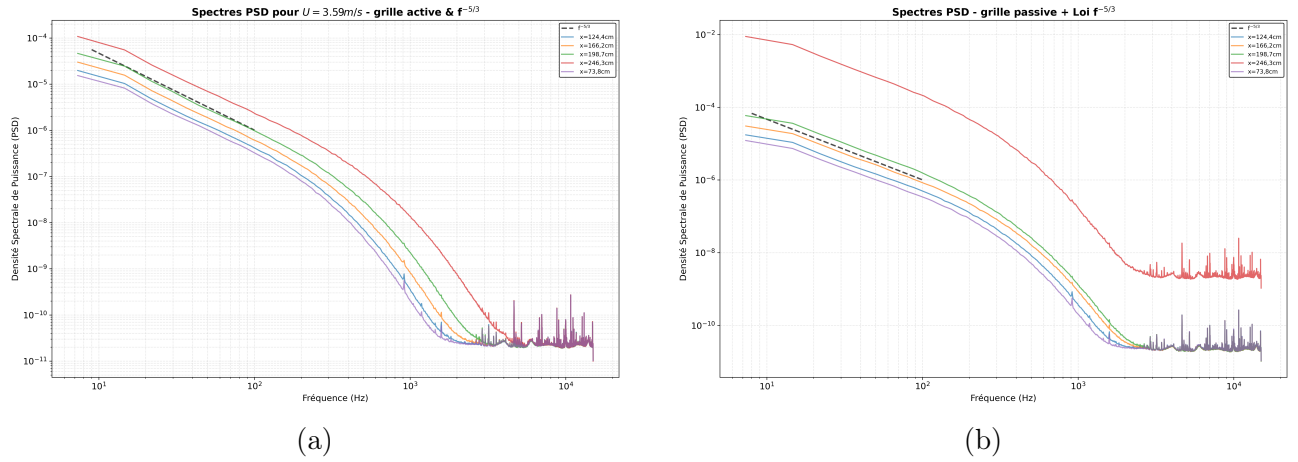


FIGURE 7 : PSD de la vitesse 3,59 m/s pour les positions variant entre $x = 73,8 \text{ cm}$ et $246,3 \text{ cm}$ pour les grilles active (a) et passive (b). La ligne en pointillés est une loi de puissance de $-5/3$.

4 TP 3 : Turbulence d'Ondes (Gong)

Ce TP explore expérimentalement la génération d'ondes par un gong et leur interaction turbulente, relevant de la théorie de la turbulence d'ondes faibles. La turbulence est générée par les vibrations d'une plaque élastique mince, s'écartant ainsi de la turbulence hydrodynamique

classique. Selon l'intensité de l'excitation, ces vibrations peuvent induire une turbulence faible ou forte. Les expériences sur les plaques élastiques minces menées pour confronter les prédictions théoriques ont donné des bons résultats [? ?]. Deux méthodes sont employées : une première par microphone et transformée de Fourier, et une seconde par profilométrie optique pour visualiser les déformations. Les spectres présentent des pics discrète plutôt qu'un spectre continu, révélant que l'énergie se concentre sur les modes propres de vibration du gong. En régime stationnaire 8a, l'enveloppe montre une cascade énergétique décroissante avec la fréquence, et les quatre courbes (s1-s4) d'intensités croissantes confirment la dépendance en puissance du forçage. En régime transitoire 8b, la décroissance temporelle de l'énergie révèle la dissipation, Contrairement à la prédiction théorique de turbulence faible. L'absence de zone inertielle claire et la dissipation distribuée à toutes les échelles, soulignées par [?], expliquent l'écart quantitatif avec la théorie.

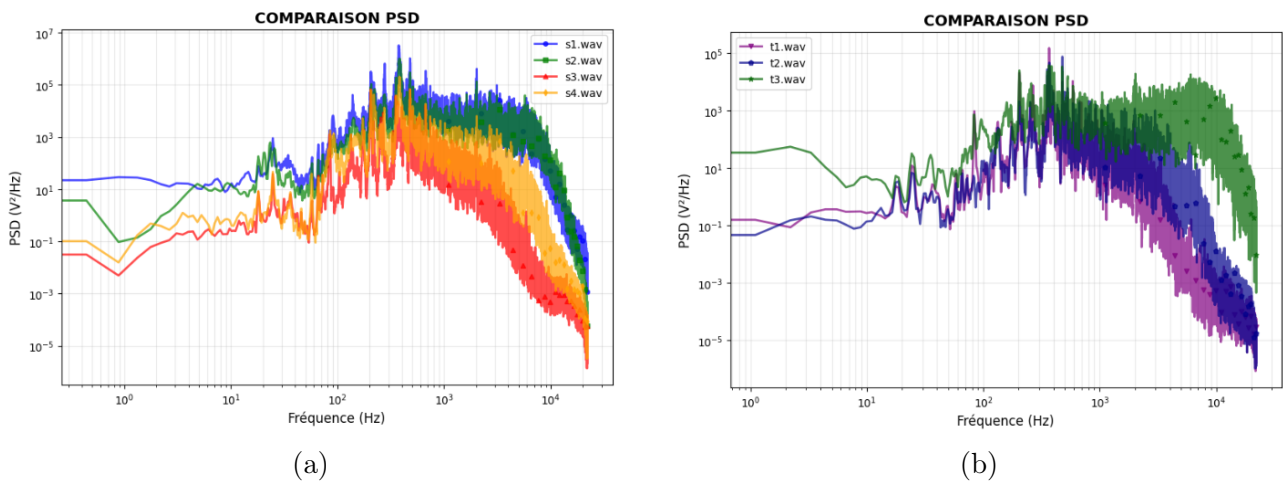


FIGURE 8 : PSD de la vitesse .

5 TP 4 : Spray (Jet Liquide)

L'atomisation diphasique joue un rôle important dans de nombreuses applications industrielles (propulsion, combustion, fabrication). La région proche de la sortie de l'atomiseur, appelée champ proche (near-field), détermine les caractéristiques du spray en champ lointain. Dans ce TP, on étudie expérimentalement un spray généré par injection d'eau dans l'air, caractérisant les mécanismes de rupture et la distribution de tailles de gouttes. les paramètres clés de l'expérience sont calculés à travers les valeurs de références. La figure 9 montre le schéma du dispositif expérimental. La figure 10a présente une PDF normalisée par le diamètre L_B , la distribution n'est pas gaussienne, avec une probabilité plus forte de valeurs élevées et moins de probabilité de valeurs faibles qu'un processus gaussien, Cette courbe présente une forme similaire à celle rapportée dans la référence [?]. Elles sont approximativement bien ajustées par des

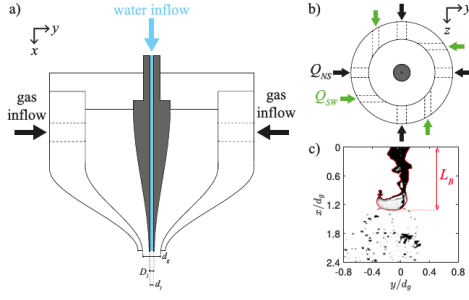
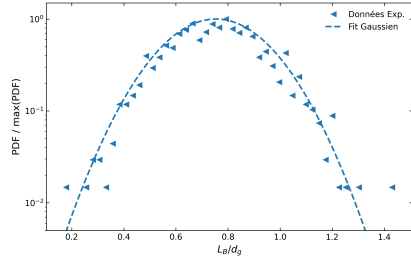
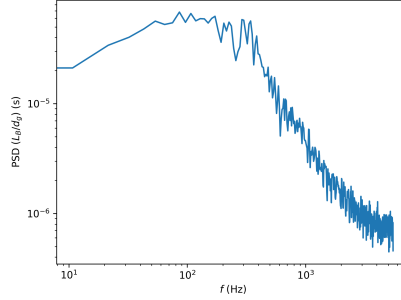
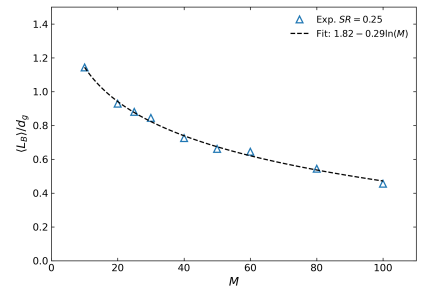


FIGURE 9 : Schéma du dispositif expérimental.

$$Re_l = \frac{u_l d_l}{\nu_l} = 1170, \quad Re_g = \frac{u_g d_{\text{eff}}}{\nu_g} = 34930,$$

$$M = \frac{\rho_g u_g^2}{\rho_l u_l^2} = 14.0, \quad We = \frac{\rho_g (u_g^2 - u_l^2) D}{\sigma} = 105,$$

$$m = \frac{\rho_l u_l A_l}{\rho_g u_g A_g} = 0.34$$

(a) PDF de L_B normalisée par le diamètre d_g (b) PSD de L_B/d_g (c) Moyenne L_B FIGURE 10 : Caractéristiques statistiques de la longueur du cœur liquide L_B

distributions log-normales, bien que les paramètres de l'ajustement diffèrent de la moyenne. La figure 10b montre une PSD de L_B/d_g , la PSD présente un plateau dans la plage des basses fréquences, ce qui signifie que le signal est complètement décorrélié à long terme. Aux hautes fréquences, la DSP présente approximativement la même décroissance en loi de puissance, on observe des pics aussi. Cette courbe montre un comportement qualitatif similaire à celui rapporté [?]. La figure 10c montre une diminution de la moyenne L_B lorsque M augmente même cas observé dans (machicoan et al.)

6 Discussion Générale et Conclusion

Ce rapport a présenté une investigation expérimentale de quatre manifestations distinctes de la turbulence, illustrant la richesse et la complexité de ce phénomène fondamental en mécanique des fluides. À travers l'étude de la couche limite atmosphérique, de la turbulence homogène isotrope, de la turbulence d'ondes dans un gong vibrant et de l'atomisation d'un jet liquide, nous avons pu observer et caractériser quantitativement différents régimes turbulents, chacun présentant des spécificités propres tout en partageant des propriétés statistiques universelles.

L'étude principale portant sur la couche limite atmosphérique à Grand Colon a permis de caractériser in situ les propriétés thermiques et dynamiques de l'atmosphère en conditions hivernales. L'analyse du cycle diurne, des profils verticaux de température et des spectres d'énergie turbulente a révélé la complexité des interactions entre stratification thermique, cisaillement du vent et production de turbulence. Le calcul de paramètres caractéristiques tels que la longueur de Monin-Obukhov et le taux de dissipation turbulente a permis de confronter nos observations aux théories classiques de la couche limite atmosphérique, mettant en évidence l'importance des conditions de stabilité dans la dynamique des écoulements géophysiques.

Les trois expériences complémentaires ont enrichi notre compréhension de la diversité des phénomènes turbulents. L'étude de la turbulence homogène isotrope en soufflerie a confirmé la décroissance spatiale de l'énergie turbulente et l'existence d'une zone inertielle où le spectre d'énergie suit la loi de Kolmogorov en $k^{-5/3}$, validant ainsi le concept fondamental de cascade énergétique. L'analyse de la turbulence d'ondes dans un gong a révélé un régime radicalement différent, gouverné par des interactions non-linéaires entre modes de vibration. Ces résultats, en accord avec d'autres travaux, les prédictions de la théorie de turbulence faible, démontrent la persistance d'une structure ondulatoire malgré les interactions non-linéaires. Enfin, l'étude de l'atomisation d'un jet liquide a illustré les mécanismes complexes de fragmentation primaire et secondaire conduisant à la formation d'un spray polydisperse, mettant en jeu des instabilités interfaciales et des effets capillaires.

Au-delà de leur diversité apparente, ces quatre systèmes partagent des caractéristiques fondamentales qui constituent l'essence même de la turbulence : une cascade multi-échelle d'énergie, une auto-similarité statistique dans la zone inertielle, une imprévisibilité déterministe et une dissipation localisée aux petites échelles à l'exception des gongs vibrés. Cette unité conceptuelle, formalisée par la théorie de Kolmogorov pour la turbulence hydrodynamique et étendue à d'autres systèmes comme la turbulence d'ondes, souligne la puissance des approches théoriques universelles en physique.

Néanmoins, nos investigations ont également révélé des écarts entre observations expérimentales et prédictions théoriques. Dans le cas du gong, le spectre d'énergie spatial PSD ne

suit pas exactement la loi de puissance prédite par la théorie de turbulence faible, suggérant l'influence de mécanismes dissipatifs non négligeables à toutes les échelles ou d'effets de conditions aux limites. Ces déviations, loin d'invalider les modèles, mettent en lumière leurs limites et soulignent la nécessité de développements théoriques et expérimentaux complémentaires.

D'un point de vue méthodologique, ces travaux pratiques ont démontré l'importance des techniques de mesure avancées pour la caractérisation quantitative des phénomènes turbulents : anémométrie sonique pour les écoulements atmosphériques, anémométrie fil chaud pour la turbulence en soufflerie, profilométrie par transformation de Fourier pour les vibrations de structures, et granulométrie laser pour la caractérisation des sprays. La maîtrise de ces outils expérimentaux, couplée à une analyse statistique rigoureuse des données, constitue un prérequis essentiel pour toute investigation approfondie de la turbulence.

En perspective, plusieurs pistes d'approfondissement méritent d'être explorées. Pour la couche limite atmosphérique, une campagne de mesures prolongée permettrait de caractériser l'évolution saisonnière et l'influence des conditions météorologiques sur la structure de la turbulence. Pour la turbulence d'ondes, l'investigation de différents régimes de forçage permettrait de quantifier la dépendance de la déviation à la dispersion linéaire en fonction de la puissance injectée, comme suggéré par la théorie. L'analyse des statistiques multi-points et des corrélations spatio-temporelles pourrait également révéler des structures cohérentes dans ces écoulements turbulents.

Ces travaux expérimentaux illustrent finalement la richesse de la turbulence comme objet d'étude scientifique, à l'interface entre physique fondamentale et applications pratiques (prévision météorologique, aérodynamique, procédés industriels). Malgré les progrès considérables accomplis depuis les travaux fondateurs de Reynolds et Kolmogorov, la turbulence demeure l'un des derniers grands problèmes non résolus de la physique classique, justifiant la poursuite d'investigations expérimentales et théoriques approfondies.

Références

- [1] Kolmogorov, A. N. : The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 30, 301–305, 1941.
- [2] Frisch, U. : *Turbulence : The Legacy of A. N. Kolmogorov*, Cambridge University Press, Cambridge, 296 pp., 1995.
- [3] Stull, R. B. : *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666 pp., 1988.
- [4] Kaimal, J. C. and Finnigan, J. J. : *Atmospheric Boundary Layer Flows : Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, Oxford, 289 pp., 1994.
- [5] Charrondière, C. : Étude in-situ des écoulements catabatiques sur pente alpine forte en situation anticyclonique, Ph.D. thesis, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, 2021.
- [6] Pope, S. B. : *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, Cambridge, 771 pp., 2000.
- [7] Batchelor, G. K. : *The Theory of Homogeneous Turbulence*, Cambridge University Press, Cambridge, 197 pp., 1953.
- [8] Comte-Bellot, G. and Corrsin, S. : Simple Eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated, 'isotropic' turbulence, *J. Fluid Mech.*, 48, 273–337, <https://doi.org/10.1017/S0022112071001599>, 1971.
- [9] Mora, D. O., Muñiz Pladellorens, E., Riera Turró, P., Lagaureze, M., and Obligado, M. : Energy cascades in active-grid-generated turbulent flows, *Phys. Rev. Fluids*, 4, 104601, <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.104601>, 2019.
- [10] Mordant, N. : Are there waves in elastic wave turbulence?, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 234505, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.234505>, 2008.
- [11] Mordant, N. : Fourier analysis of wave turbulence in a thin elastic plate, *Eur. Phys. J. B*, 77, 1–9, <https://doi.org/10.1140/epjb/e2010-00229-8>, 2010.
- [12] Machicoane, N., Ricard, G., Osuna-Orozco, R., Huck, P. D., and Aliseda, A. : Influence of steady and oscillating swirl on the near-field spray characteristics in a two-fluid coaxial atomizer, *Int. J. Multiphase Flow*, 131, 103318, <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103318>, 2020.