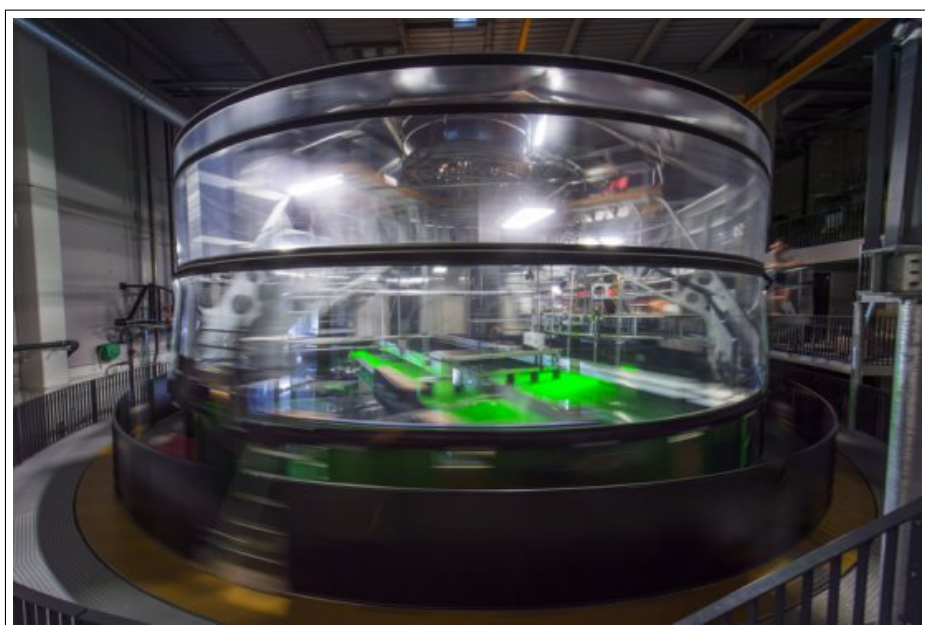


Méthodes expérimentales avancées

Rapport de travaux pratiques

Jean-Claude Lebreton



Université Grenoble Alpes
Master 2 Turbulences, Méthodes & Applications (TMA)

18 Janvier 2026

Résumé

Dans le cadre de l'UE Méthodes expérimentales avancées, nous avons effectué une série de travaux pratiques (TP) centrés sur la turbulence, dont voici une liste :

- Turbulence générée par une grille oscillante
- Turbulence en soufflerie générée par une grille
- Turbulence en couche limite atmosphérique
- Étude de la plateforme Coriolis

L'objectif global a été de mener des expériences (ou simplement d'exploiter des données récoltées dans le cas de Coriolis) afin de tester la validité de la théorie de la turbulence et analyser les conséquences pratiques de cette dernière. Différentes méthodes ont été utilisées : mesure anémométrique, analyse spectrale, relevé de températures, tracking par PIV ; le tout dans des endroits différents : LEGI, CEA et en extérieur, dans le massif de Belledonne. Nous avons ensuite consigné les résultats et exploité les données acquises avant de les retranscrire et les interpréter.

Charte IA : Durant l'analyse et l'exploitation de données, des IA du type ChatGPT ont été utilisées. Elles n'ont cependant servi qu'à optimiser le tracé de figures et améliorer la mise en page du rapport ici présent, le reste (explication et interprétation des données) est issu de l'humain.

Abstract

As part of the Advanced Experimental Methods course, we carried out a series of laboratory sessions focused on turbulence, listed below :

- Turbulence generated by an oscillating grid
- Wind-tunnel turbulence generated by a grid
- Turbulence in the atmospheric boundary layer
- Study of the Coriolis platform

The overall objective was to conduct experiments (or, in the case of the Coriolis platform, to analyse previously collected data) in order to test the validity of turbulence theory and to examine its practical implications. Various methods were employed, including anemometric measurements, spectral analysis, temperature measurements, and PIV tracking. These experiments were conducted in different locations : LEGI, CEA, and outdoors in the Belledonne mountain range. The results were then documented, and the acquired data were processed, transcribed, and interpreted.

AI Chart : During the analysis and processing of the data, AI tools such as ChatGPT were used. Their role was limited to optimising figure generation and improving the layout of the present report ; all explanations and data interpretations are the result of human work.

Table des matières

1	Turbulence générée par une grille oscillante	3
1.1	Description de l'expérience	3
1.2	Analyse & interprétation des résultats	4
1.3	Conclusion	6
2	Turbulence en soufflerie générée par une grille	7
3	Turbulence en couche limite atmosphérique	8
4	Plateforme Coriolis	9
	Conclusion et discussions	10

Introduction

Afin de bien comprendre les différents résultats et notions à travers ce compte-rendu, nous allons d'abord faire le point sur les grandes lignes de la théorie de la turbulence, commune aux différents cas abordés.

La turbulence se base sur les équations de Navier-Stokes, base essentielle de la mécanique des fluides. On rappelle leur expression ici :

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \\ \rho \left(\partial_t \vec{u} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} P + \nu \Delta \vec{u} + \rho \vec{g} \end{cases} \quad (1)$$

$$\quad (2)$$

De l'équation 2, on en tire une grandeur adimensionnée, appelée nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\|(\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}\|}{\|\nu \Delta \vec{u}\|} \quad (3)$$

Le nombre de Reynolds sert à mesurer le rapport entre le terme d'advection et le terme de viscosité. Une autre expression de base plus utilisée car plus pratique est la suivante :

$$Re = \frac{LU}{\nu} \quad (4)$$

Avec cette expression, nous pouvons facilement déterminer si un écoulement fluide est turbulent, selon la longueur L de référence, la vitesse U du fluide et la viscosité de ce dernier ν . De manière usuelle, dès lors que $Re > 3000$, on peut parler d'écoulement turbulent, mais il faut également prendre en compte d'autres paramètres, comme la géométrie de l'écoulement.

L'une des plus grosses difficultés qu'impose la turbulence est son caractère chaotique. En effet, il est connu que les équations de Navier-Stokes ne sont (pour le moment) pas résolues, et il faut parfois faire des approximations ou des hypothèses réductrices pour pouvoir étudier convenablement les fluides. C'est pourquoi l'approche statistique est privilégiée. Elle consiste en un concept simple, la décomposition de Reynolds : on sépare le champ de vitesse que l'on étudie en deux composantes, une vitesse moyenne et une vitesse fluctuante turbulente :

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = \vec{u}(\vec{x}, t) + \vec{u}'(\vec{x}, t) \quad (5)$$

Cette décomposition est pratique, dans le sens où, injectée dans l'équation 2, elle permet d'écrire :

$$\overline{u_j \partial_{x_j} u_i} = -\frac{1}{\rho} \partial_{x_i} \overline{P} + \nu \partial_{x_j}^2 \overline{u_i} - \partial_{x_j} \overline{u'_i u'_j} \quad (6)$$

Cette équation est appelée équation de Navier-Stokes moyennée, ou plus communément RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes). Elle fait notamment apparaître le terme $\overline{u'_i u'_j}$, qui est le tenseur de Reynolds. C'est un tenseur de contraintes permettant de retranscrire le transport turbulent de quantité de mouvement : les termes diagonaux correspondent aux intensités turbulentes dans chaque direction, alors que les autres traduisent le cisaillement dans les directions de l'espace. Le tenseur de Reynolds n'est pas connu dans l'absolu, mais on peut créer des modèles, les éprouver et les garder s'ils arrivent à bien retranscrire un écoulement turbulent.

Les fluides ont fait l'objet de nombreuses études, mais c'est vraiment à partir du XIXe siècle que les choses se sont emballées, notamment sous l'impulsion de Reynolds. En 1941, Kolmogorov a ainsi établi sa célèbre théorie, applicable dans le cas de la turbulence homogène isotrope (donc incompressible, entre autres), permettant de modéliser l'évolution du spectre d'énergie d'un fluide turbulent dans un intervalle inertiel, dans lequel la dynamique est indépendante des mécanismes de forçage et de dissipation :

$$E(k) = C_k \varepsilon^{\frac{2}{3}} k^{-\frac{5}{3}} \quad (7)$$

avec ε le taux de dissipation et C_k une constante.

C'est cette théorie qui est à l'origine du concept de cascade d'énergie, qui stipule que l'énergie part des grandes échelles pour ensuite se développer à échelle constante jusqu'à des nombres d'onde suffisamment grands (on rappelle que $k = 1/L$) pour que la dissipation entre en jeu. L'échelle à laquelle se développe ce phénomène s'appelle l'échelle de Kolmogorov η , et est définie par :

$$\eta = \sqrt[4]{\left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)} \quad (8)$$

Et de cette échelle, on peut en déduire le temps et la vitesse caractéristiques associées :

$$\begin{cases} \tau_\eta = \sqrt{\left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)} & (9) \\ u_\eta = \sqrt[4]{(\varepsilon \nu)} & (10) \end{cases}$$

À cette échelle, il est par exemple pratique de souligner que le nombre de Reynolds est égal à 1.

Ajoutons également que la théorie K41 permet dès lors d'étudier la répartition en énergie de la turbulence en fonction de la fréquence : c'est l'analyse spectrale. Elle permet ainsi de visualiser la cascade d'énergie, dont font partie l'échelle inertielle et l'échelle de dissipation.

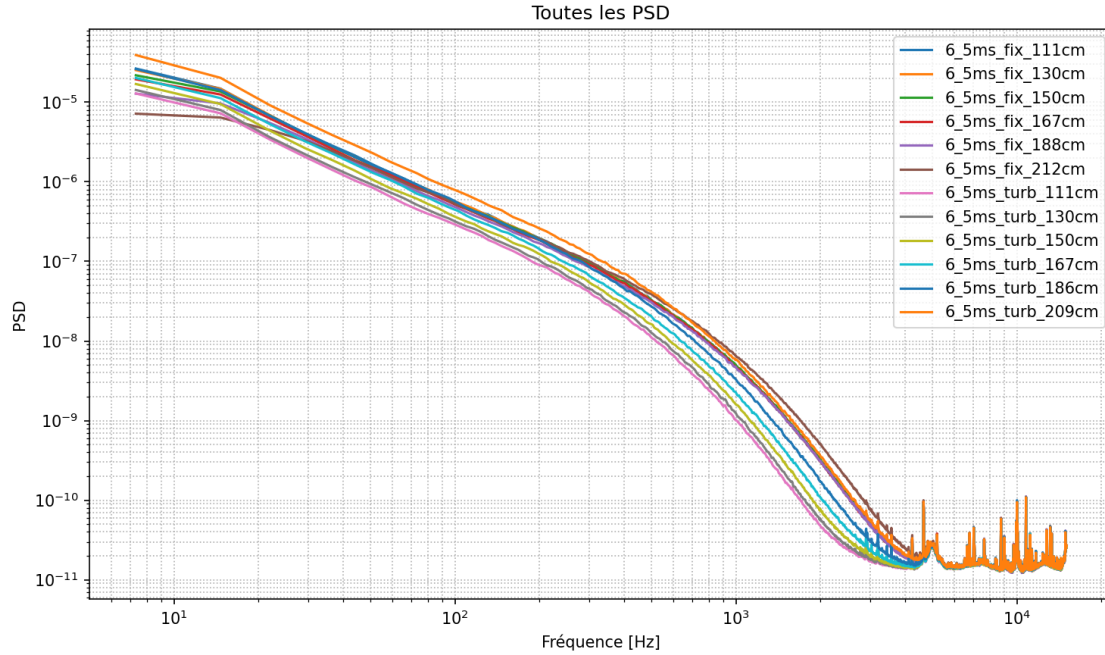


FIGURE 1 – Exemple de PSD. Nous pouvons délimiter les trois échelles : les grandes échelles à gauche, l'échelle inertielle formant une droite au milieu, et l'échelle dissipative à droite

De nos jours, la turbulence se calcule principalement, si ce n'est exclusivement, de manière numérique. En effet, les calculs sont complexes et suffisamment détaillés, surtout à l'échelle de Kolmogorov, pour rendre l'usage de la programmation indispensable. Malgré tout, ce n'est pas encore suffisant, car si l'on prétend à la précision, il faudrait avoir des capacités de calcul immense, dépassant largement les limites de l'informatique, sans compter le temps que cela prendrait. C'est pourquoi on utilise diverses méthodes numériques avancées, comme la LES (Large Eddy Scale), à mi-chemin entre la précision de la DNS (Direct Numerical Simulation) et le faible coût des RANS. Ce n'est cependant qu'un exemple parmi tant d'autres, non-universel et nécessitant d'être couplé à d'autres modèles voire d'être carrément remplacé quand il le faut.

1 Turbulence générée par une grille oscillante

Parmi les méthodes expérimentales utilisées pour étudier la turbulence, le tracking lagrangien de particules occupe une place centrale. Contrairement à une description eulérienne, qui consiste à mesurer les grandeurs du fluide en des points fixes de l'espace, l'approche lagrangienne repose sur le suivi individuel de traceurs au cours du temps. Pour reprendre une analogie classique, il s'agit de suivre le mouvement d'une feuille flottant à la surface d'une rivière plutôt que d'observer le débit en un point donné.

Dans le cadre de l'étude de la turbulence, cette méthode présente un intérêt particulier : elle permet d'accéder directement aux statistiques des vitesses, accélérations et trajectoires des particules, et donc aux propriétés dynamiques des fluctuations turbulentes, notamment à petite échelle. En pratique, un grand nombre de particules est suivi simultanément afin d'obtenir des statistiques suffisamment convergées et représentatives du régime turbulent.

Ici, nous rapportons une série d'expériences menées au CEA, basées sur la génération de turbulence par une grille oscillante, et visant à caractériser les propriétés statistiques des champs de vitesse et d'accélération à partir de mesures lagrangiennes.

1.1 Description de l'expérience

Le principe expérimental repose sur l'oscillation périodique d'une grille immergée dans un fluide, créant un écoulement turbulent en aval de celle-ci. Ce type de dispositif est bien connu pour produire, dans certaines zones de la cuve, une turbulence faiblement anisotrope et proche de l'homogénéité, ce qui en fait un banc d'essai privilégié pour les études fondamentales.

Bien que l'expérience ait initialement été conçue pour fonctionner avec différents fluides - notamment l'hélium - des contraintes de coût et de sécurité ont conduit à son exploitation exclusive avec de l'eau. Celle-ci a été chauffée à 60 °, ce qui a pour effet de réduire sa viscosité cinématique et d'augmenter le nombre de Reynolds accessible.

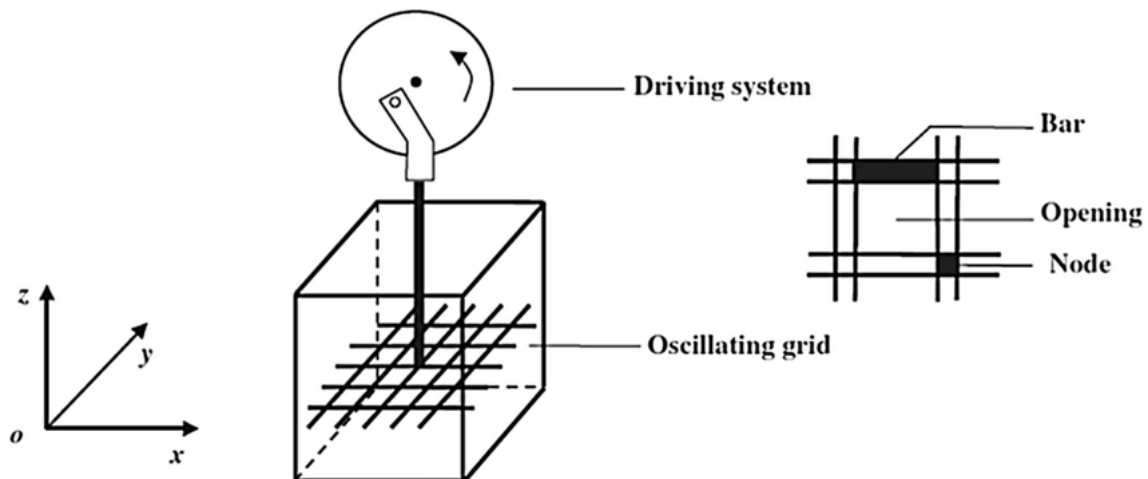


FIGURE 2 – Schéma simplifié du dispositif (source : [1])

La grille tourne ainsi grâce à un moteur dont la vitesse de rotation peut être réglée en jouant sur la tension. Nous avons ainsi effectué des mesures pour 4 valeurs (8, 10, 12 et 14 V), après avoirensemencé l'eau avec des particules sphériques. Elles n'ont pas été placées n'importe comment : l'idée est de les confiner dans un tunnel d'eau (de dimensions 114x114x300 mm) pour effectuer un tracking qualitatif.

En premier lieu, nous avons besoin de calculer le nombre de Reynolds, l'échelle de dissipation et l'échelle de Kolmogorov η . En effet, cela permet de savoir si les particules trackées seront assez petites pour pouvoir suivre même les plus petites structures, celles où la dissipation se produit. En prenant en compte la viscosité cinématique à 60°, et en estimant la vitesse quadratique à $u_{rms} = 30 \times 10^{-3} \text{m.s}^{-1}$ et l'échelle intégrale de longueur à $L = 10^{-2} \text{m}$, il vient :

$$\begin{cases} Re_L \simeq 7,5 \cdot 10^5 \\ \varepsilon \simeq 2,7 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \\ \eta \simeq 7,0 \cdot 10^{-5} \text{m} \end{cases}$$

Le calcul prédit donc un écoulement très turbulent.

L'étape suivante est cruciale, car c'est celle de l'enregistrement d'images pour l'exploitation ultérieure. Nous avons utilisé une caméra de haute résolution de 1024x1024 pixels, avec des pixels larges de 20x20 μm , et également dotée d'une lentille convergente et d'un éclairage LED. Ce dernier est très important, car il s'agit de pouvoir observer convenablement les particules ensemencant le fluide. C'est là qu'il faut faire preuve de rigueur, et ce dès la première étape, à savoir l'étalonnage de nos mesures. Pour cela, la taille des particules possède une importance cruciale. En effet, pour espérer pouvoir faire un tracking lagrangien, leur dimension doit pouvoir être comparable à l'échelle de Kolmogorov, et l'idéal serait d'avoir des traceurs plus petits afin de suivre les plus petites échelles dissipatives. Or, elles mesurent 100 μm de diamètre, ce qui n'est pas suffisant pour ce dernier cas - mais le tracking reste possible.

Une dernière étape consiste en une calibration de l'acquisition d'images. Il faut en effet s'assurer d'avoir une fréquence permettant d'obtenir un décalage entre deux images d'une particule inférieur à 5 %, et aussi un temps d'exposition permettant d'obtenir un flou minimal. Dans le premier cas, le calcul nous donne :

$$\Delta t = \frac{\eta}{u_{99}} \Rightarrow f_{cam} = \frac{5u_{99}}{\eta}$$

Ici, u_{99} désigne une vitesse représentative du quartile 99 % ; nous l'avons choisi à $u_{99} = 3u_{rms}$. Ainsi, nous obtenons une fréquence d'acquisition de la caméra de l'ordre du kHz. Quant au temps d'exposition, on le veut tel que la déviation ne dépasse pas $D/10$ m, avec D la taille apparente des traceurs. Dès lors, on trouve $t_{expo} \simeq 37\mu\text{m}$, ce qui est donc une valeur raisonnable pour une bonne acquisition avec peu de bruit.

1.2 Analyse & interprétation des résultats

Une fois l'expérience mise en place, nous avons filmé la cuve contenant la grille oscillante et les traceurs, pour une durée de 10 minutes pour chaque forçage¹. Les données ont été enregistrées en format .mat, pour une exploitation numérique. Étant encore bien bruitées, elles ont été lissées par convolution avec des noyaux gaussiens, compatible avec une analyse lagrangienne.

Le plus important est de s'assurer que les trajectoires obtenues soient suffisamment longues pour être statistiquement pertinentes. C'est pourquoi nous avons éliminé les trajectoires trop courtes par rapport à un seuil fixé arbitrairement. Notons également que nous ne nous sommes intéressés qu'aux vitesses horizontales, puisque les vitesses verticales correspondaient plus ou moins à la vitesse de forçage de la grille.

Dans un premier temps, concentrons-nous sur la vitesse. Voici les données relevées et calculées de la vitesse moyenne des traceurs, comparée à la vitesse quadratique, en fonction du forçage :

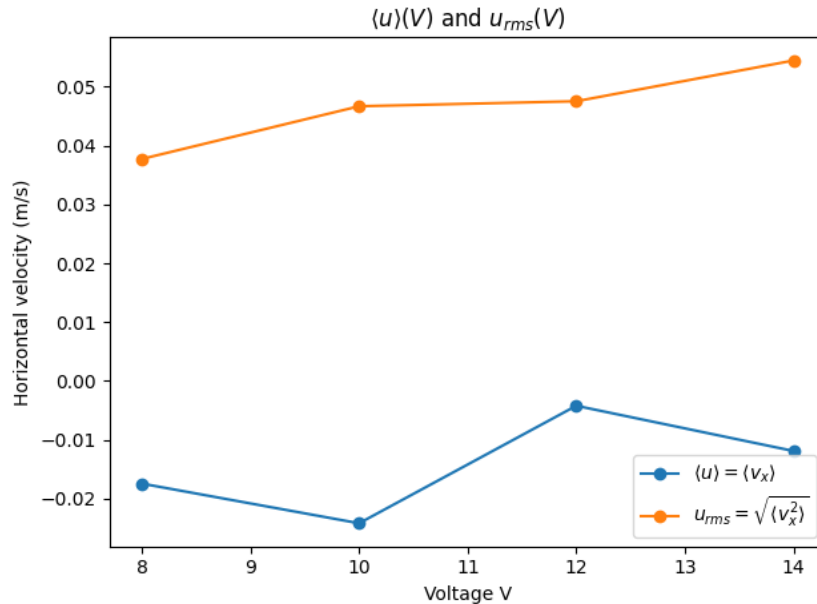


FIGURE 3 – Évolution et comparaison des vitesses en fonction du forçage de la grille

Pour les deux types de vitesse, on constate que les valeurs paraissent peu élevées, avec toutefois une tendance à la hausse, surtout pour la vitesse quadratique, ce qui est cohérent avec le fait que la

1. ce qui nous a permis par ailleurs de visiter certaines installations et expériences du CEA

grille oscillante doit produire au plan médian un écoulement sans vitesse moyenne. Cela démontre a priori une turbulence homogène isotrope, imparfaite mais bien présente.

Maintenant, étudions les distributions de vitesse. Nous avons produit une figure rassemblant les différentes PDF pour les 4 cas de forçage, avec une courbe permettant de comparer avec une loi normale :

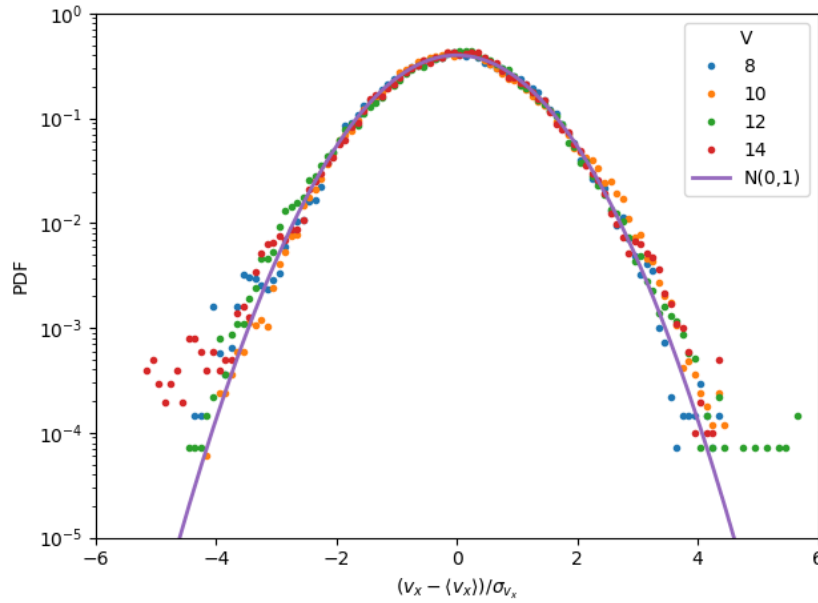


FIGURE 4 – Comparaison des PDF de vitesse et comparaison avec une loi normale $\mathcal{N}(0,1)$

Pour être plus précis, il s'agit de PDF centrées et réduites, afin de pouvoir effectuer une véritable comparaison, indépendante de leur intensité.

Les PDF obtenues possèdent toutes un point commun : elles sont toutes décrivables par une gaussienne et s'ajustent plus ou moins bien avec la loi normale. Cela confirme donc bien que nous sommes dans un régime de turbulence pleinement développée, et que nous sommes dans un cadre homogène et isotrope. Remarquons toutefois un nombre non négligeable de valeurs extrêmes, formant des queues de PDF. Elles s'expliquent par des phénomènes d'intermittence, favorisées par la création de structures cohérentes dues par exemple à un apport d'énergie (par la grille) supplémentaire, et sièges de dissipation intense et contredisant le caractère homogène de la turbulence.

Dans la même logique, nous avons tracé les PDF des accélérations à forçage fixé (ici $V = 14$ V), avec une modification du kernel d'accélération utilisé lors du lissage des données :

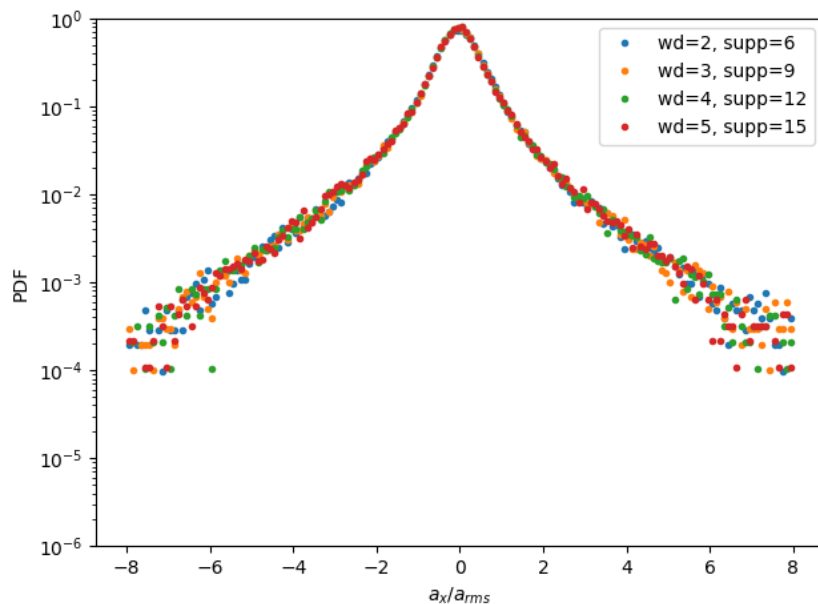


FIGURE 5 – Comparaison des PDF d'accélération en fonction du kernel d'accélération

Cette fois, nous avons des PDF clairement pas assimilables à des gaussiennes. Leurs queues sont cette fois bien prononcées. Nous avons donc ici une mise en lumière de l'intermittence plus prononcée qu'avec les vitesses. Cette dernière est donc bel et bien le fruit de structures physiques réelles, et non du simple bruit.

Les PDF ont été tracées en fonction de la largeur du noyau utilisé lors du lissage. Ce que nous pouvons observer, c'est que les queues restent bien présentes, malgré un certain resserrement à $wd = 5$. Nous pouvons donc être assurés de la robustesse de l'intermittence, ce qui confirme que les traceurs utilisés peuvent être améliorés, par exemple en étant choisis plus petits. Surtout, l'étude de l'accélération semble plus adaptée pour retracer l'intermittence que la vitesse.

1.3 Conclusion

L'étude de la grille oscillante nous a permis de bien mettre en évidence le phénomène de turbulence. Une étude de la vitesse et de l'accélération des traceurs a permis de déterminer que la grille injecte durant l'expérience une énergie qui cascade ensuite de manière non linéaire, contrairement à ce qui pourrait être prédit par la théorie de Kolmogorov 41 - cela se voit notamment avec les queues proéminentes sur les PDF d'accélération, confirmant par ailleurs la présence de phénomènes physiques. Ce phénomène d'intermittence est également mieux mis en évidence au fur et à mesure que le forçage de la grille augmente, en lien avec le nombre de Reynolds.

La question se pose alors de savoir comment mieux modéliser les phénomènes dont nous avons été témoins. Plusieurs paramètres peuvent être envisagés : la taille des traceurs, la largeur du kernel utilisé lors du lissage des données... De manière plus théorique, il faut également se poser la question du modèle à choisir, de préférence un modèle qui permet de réellement prendre en compte les fluctuations à petite échelle. D'un point de vue métrologique, nous avons également quelque chose de robuste par rapport au bruit, ce qui n'empêche pas d'essayer d'affiner les mesures, surtout si l'on a la prétention de modéliser le plus finement possible l'intermittence aux petites échelles.

2 Turbulence en soufflerie générée par une grille

En théorie de la turbulence, nous sommes introduits au concept de cascade d'énergie, dont l'étude permet de déterminer la manière dont l'énergie se disperse, et à quelles échelles. Dans le cas présent, nous avons effectué des mesures de vitesse d'un courant d'air avec un fil chaud au sein de la soufflerie du LEGI, en utilisant une grille. Deux séries d'expérience ont été faites : une première avec la grille fixe, et une seconde où elle passe en configuration "active" afin de générer des turbulences. Une fois les mesures faites, nous avons ensuite effectué une analyse spectrale, afin de pouvoir mettre en évidence (ou pas) la loi de Kolmogorov K41. Voici ce que nous avons obtenu pour différentes configurations incluant notamment la distance entre le fil chaud et la grille :

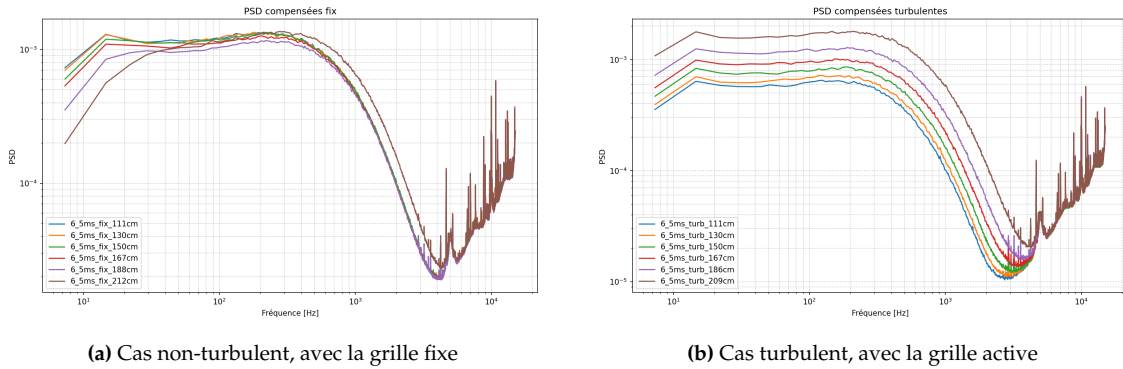


FIGURE 6 – PSD compensées pour différentes mesures à fil chaud

Nous avons fait le choix de tracer des PSD compensées par une loi en $k^{\frac{5}{3}}$, afin de mieux mettre en évidence le régime inertiel caractéristique d'une turbulence. Le moins que l'on puisse dire, c'est que dans le cas de la figure 6b, le plateau attendu est nettement visible et s'étend sur à peu près deux décades, chose plus difficile à voir avec une simple PSD. Notons également une augmentation de la PSD dans le régime inertiel proportionnel à la distance du fil chaud à la grille (plus le nombre est élevé, plus les deux sont proches). Cependant, dans le régime dissipatif, à haute fréquence, on constate une augmentation de l'énergie, mais c'est normal : puisque nous traçons des PSD compensées, les artefacts liés au bruit sont amplifiés. Notons au passage que dans le cas de la grille fixe, donc sans turbulence, les PSD sont relativement bien proches en régime inertiel, les variations pouvant être dues à des turbulences résiduelles, là où en régime turbulent, on visualise bien la différence en termes d'énergie en fonction de la distance.

De cette analyse spectrale, d'autres données peuvent être extraites. Parmi les plus significatives, nous avons le taux de dissipation d'énergie ε , permettant de quantifier la perte d'énergie en régime inertielle, l'échelle de Kolmogorov η qui permet de définir la plus petite échelle turbulente, là où la dissipation domine, et la skewness S , qui permet de mesurer l'asymétrie de la distribution des incréments de vitesse, ce qui permet de valider la présence de turbulences. Pour bien visualiser la chose, nous avons calculé ces termes dans le cas turbulent, d'abord loin de la grille puis proche d'elle, ainsi que dans un cas à grille fixe :

	Loin de la grille	Grille fixe	Proche de la grille
Taux de dissipation ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)	$2,67 \times 10^{-3}$	$6,06 \times 10^{-4}$	$7,19 \times 10^{-4}$
Échelle de Kolmogorov (m)	$1,89 \times 10^{-3}$	$1,54 \times 10^{-3}$	$1,47 \times 10^{-3}$
Skewness	-0,129	-0,73	-0,3

TABLE 1 – Comparaison des grandeurs caractéristiques selon la distance à la grille

De là, nous pouvons en tirer plusieurs résultats intéressants. Si l'on prend les deux cas turbulents, alors nous pouvons voir que la faible valeur pour le taux de dissipation indique une turbulence pleinement développée, et donc plus forte que proche de la grille, là où les turbulences ne se sont pas développées entièrement. Ce résultat est confirmé par la skewness, proche de 0 quand on s'éloigne de la grille et signe donc d'une turbulence proche de l'isotropie - alors que dans le cas fixe, sa valeur élevée dans l'absolu est plus due aux fluctuations résiduelles qu'à la cascade turbulente.

3 Turbulence en couche limite atmosphérique

En météorologie, la couche limite atmosphérique (CLA) est la partie la plus basse de l'atmosphère. Son étude est donc très intéressante, car ayant un impact direct sur la population et les infrastructures à échelle humaine. Ce qui fait de la CLA une zone importante, c'est notamment le fait qu'elle soit directement impactée par les rayonnements solaires et internes. L'objectif de ce TP est donc de constater expérimentalement l'évolution de la CLA, notamment par l'analyse de la température.

Pour ce faire, nous sommes allés dans le massif de Belledonne, à 1800 mètres d'altitude, afin d'installer différents appareils de mesure, notamment des thermocouples permettant de mesurer la température à plusieurs altitudes par rapport au sol



FIGURE 7 – Montage de l'expérience. Ici, nous voyons l'anémomètre sonique et l'alimentation par panneaux solaires, les thermocouples ayant été fixés plus bas

Nous avons laissé l'expérience tourner durant plusieurs jours, entre fin septembre et début octobre, avant de récolter les températures, relevées par les thermocouples, et les vitesses de l'air, relevées par l'anémomètre, le tout étant consigné dans un ordinateur. Voici par exemple ce que nous avons obtenu pour la température :

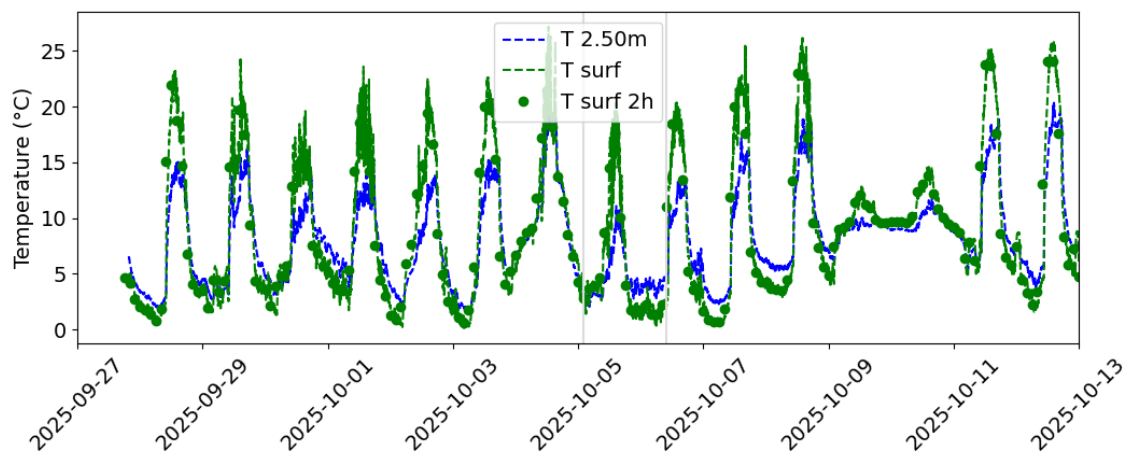


FIGURE 8 – Évolution de la température tout au long de l'expérience

L'évolution globale des courbes dénote bien le cycle jour/nuit, avec toutefois des variations intéressantes. En effet, la température en surface est plus élevée qu'en "altitude", ce qui dénote un gradient pouvant être expliqué par la turbulence due à des phénomènes de convection, et ce d'autant plus que les variations sont assez franches, brutales. Autre chose intéressante, nous pouvons relever des inversions thermiques durant la nuit, c'est-à-dire qu'il fait plus chaud en altitude qu'en surface, signe d'une turbulence certes présente mais atténuée, et signe d'une CLA stable.

Pour confirmer et ajuster nos observations et mesures, il serait intéressant d'approfondir en étudiant entre autres la vitesse de l'air, ou encore de faire une analyse spectrale afin de pouvoir observer par exemple une loi en $k^{-5/3}$.

4 Plateforme Coriolis

À Grenoble, le LEGI dispose de la plateforme Coriolis, sans doute l'une de ses plus grandes (au sens littéral du terme) réalisations. Mise en place depuis 2014, elle sert notamment à modéliser les courants océaniques ainsi que l'influence exercée par la rotation de la Terre. Cette dernière générant une force de Coriolis (d'où le nom), il n'est donc pas surprenant d'avoir affaire à différents phénomènes tels que les ondes internes ou encore les courants de gravité. De manière récurrente, plusieurs campagnes d'expérimentation sont effectuées, afin de se focaliser sur certaines parties du globe (détroit de Gibraltar, Gulf Stream...).

Dans ce cadre, après visite de la plateforme Coriolis, nous avons été amenés à étudier des jeux de données issus de la campagne WBC, focalisée sur le Gulf Stream. La technique utilisée a été la PIV (*Particle Image Velocimetry*), dont le principe repose sur la corrélation entre deux images successives dans un plan 2D. Ainsi, nous avons ainsi pu étudier les courants dans une zone bien déterminée, avec de nombreux fichiers par expérience mis à disposition permettant d'obtenir des résultats précis et pertinents.

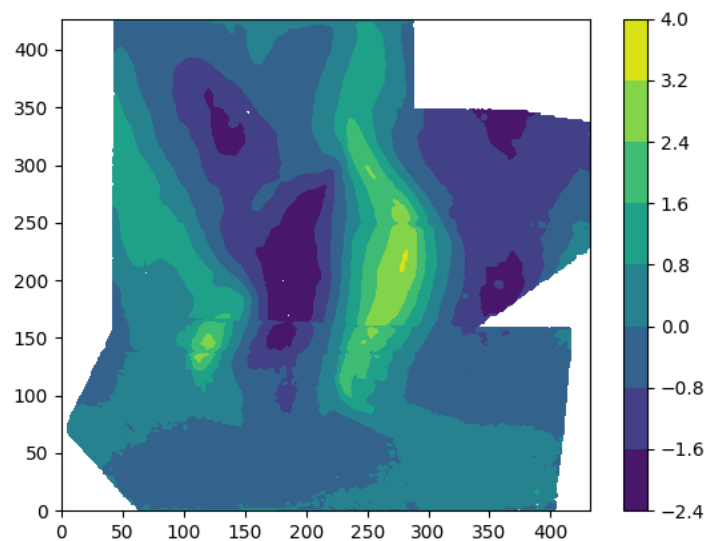


FIGURE 9 – Carte des vitesses horizontales du Gulf Stream

L'analyse de cette carte révèle plusieurs phénomènes clés :

- **Dynamique tourbillonnaire** : Les tourbillons que nous pouvons voir sur la figure découlent d'instabilités hydrodynamiques. La formation, l'évolution et la dissipation de ces instabilités influencent directement la circulation océanique à grande échelle au sein du Gulf Stream. Par exemple, les tourbillons anticycloniques (zones de vitesse positive) transportent des eaux chaudes et peu denses, tandis que les tourbillons cycloniques (zones de vitesse négative) portent au contraire des remontées d'eaux froides et riches en nutriments, ce qui crée un contexte favorable au développement de la vie marine ;
- **Gradients de vitesse et fronts océaniques** : Les isocontours particulièrement serrés correspondent à des fronts océaniques, où l'on assiste à des échanges thermiques particulièrement prononcés. Ces fronts jouent un rôle crucial dans la formation des masses d'eau et dans la variabilité climatique, notamment en modulant les flux air-océan.

Ces structures dynamiques - tourbillons, fronts et gradients de vitesse - ne sont pas isolées, mais s'inscrivent dans un système plus vaste de circulation océanique. À ce titre, le Gulf Stream, en tant qu'acteur majeur du transport méridien de chaleur, illustre parfaitement cette complexité. Pourtant, les mécanismes fins régissant les variations de salinité et les échanges verticaux entre les couches océaniques restent encore partiellement élucidés. Dans ce contexte, les données issues de la PIV, enrichies par des mesures complémentaires (vitesse verticale, divergence, rotationnel), offrent une opportunité unique pour affiner les modèles numériques. En traçant ces paramètres, il devient possible d'identifier des zones de convergence ou de divergence, ainsi que des structures cohérentes (filaments, méandres), qui influencent directement la distribution des propriétés océaniques, telles que la température, la salinité ou encore l'oxygène dissous.

Conclusion et discussions

Tout au long du semestre, nous avons mené ou assisté à différentes expériences centrées sur la turbulence. Le panel a ratissé large, car nous avons exploré différentes facettes de la turbulence expérimentale : production de données en laboratoire, expériences sur le terrain, analyse et exploitation de données via l'informatique... autant d'éléments à la fois récurrents et essentiels. Le tout a été mené sur la même base théorique, avec le nombre de Reynolds, la théorie de Kolmogorov ainsi que l'échelle du même nom associée, démontrant par là la robustesse des théories sur le sujet, à la fois récentes et déjà bien établies.

La moitié des TP consignés dans ce rapport ont principalement concerné l'application, ou plutôt la mise à l'épreuve, de la théorie de Kolmogorov K41. Chaque expérience proposait cependant des résultats différents mais complémentaires : dans le cas de la turbulence de grille oscillante, il s'agissait avant tout de savoir repérer les mouvements du fluide à l'aide de traceurs et d'en extraire un jeu de données permettant de voir si les trajectoires étudiées étaient conformes aux prédictions de la théorie K41 ; pour la turbulence sur grille en soufflerie, il s'agissait cette fois d'examiner l'aspect énergétique de la turbulence et de visualiser la cascade d'énergie, dans un contexte homogène et isotrope. Le moins que l'on puisse dire, c'est que les résultats ont été dans l'ensemble probants, consolidant ainsi le travail fait en amont, et permettant de visualiser la turbulence de manière (relativement) précise et pertinente.

L'autre moitié des TP était plus axée sur la pratique en soi. La démonstration de la plateforme Coriolis a notamment été un prétexte pour nous présenter à l'analyse et l'exploitation de données basé sur une modélisation à grande échelle afin entre autres de prendre en compte l'hétérogénéité du relief océanique et les variations de salinité ; quant au TP sur la couche limite atmosphérique, il a permis de valoriser l'importance de l'aspect métrologique, avec une mise en place d'un appareillage destiné aux mesures de température, d'où a pu être tirée par exemple l'épaisseur de la CLA.

L'ensemble des TP proposés dans l'UE Méthodes expérimentales avancées, y compris ceux qui n'ont été traités que par d'autres condisciples, avait pour objectif de présenter la turbulence sous plusieurs aspects dans une perspective pédagogique, mais il s'agit quand même d'expériences mettant déjà un pied dans la recherche pure et dure, voire plus - l'exemple le plus éclatant étant le TP dédié à la CLA, où il fallait monter nous-même les dispositifs *et* avoir l'approbation de l'administration pour pouvoir louer le terrain nécessaire. Les problématiques abordées ont été les mêmes que pour des chercheurs chevronnés, la différence majeure étant bien évidemment l'expérience ainsi que le temps passé dessus - on ne tire pas les mêmes conclusions d'un TP de 3 heures par rapport à une série d'expériences sur plusieurs semaines.

À ce propos, il convient de noter qu'aussi riches aient pu être nos interprétations et explications quant aux TP, de nombreux choix ont dû être faits et ont mis de côté des éléments pourtant importants. Par exemple, si nous avons étudié la turbulence sur grille en soufflerie avec une analyse spectrale, il aurait pu en être de même pour le TP sur grille oscillante, sous réserve de pertinence. C'est là une problématique intéressante : doit-on tout faire ou choisir l'angle d'étude adéquat ? selon quels critères ? Aussi, les TP consignés ici ont été réalisés sous une hypothèse forte, à savoir celle d'écoulements incompressibles. Il faut donc voir à quel point il serait intéressant de refaire certaines manipulations avec des paramètres radicalement différents, comme par exemple étudier la turbulence en soufflerie avec des écoulements dépassant largement le critère d'incompressibilité.

Références

- [1] Chao LUO et al. « Effects of turbulence fluctuation intensity in bioreactor of sewage treatment on physical and chemical properties of biofilms ». In : *Bioprocess Biosyst. Eng.* 44.5 (sept. 2021). ISSN : 1615-7605. DOI : [10.1007/s00449-021-02566-y](https://doi.org/10.1007/s00449-021-02566-y).
- [2] Nathanael MACHICOANE et al. « Influence of steady and oscillating swirl on the near-field spray characteristics in a two-fluid coaxial atomizer ». In : *Int. J. Multiphase Flow* 129 (août 2020), p. 103318. ISSN : 0301-9322. DOI : [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103318](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103318).
- [3] Stephen B. POPE. *Turbulent Flows*. Cambridge, England, UK : Cambridge University Press, août 2000. ISBN : 978-0-52159886-6. URL : https://books.google.fr/books/about/Turbulent_Flows.html?id=HZsTw9SMx-0C&redir_esc=y.
- [4] Nicolas MORDANT, Alice M. CRAWFORD et Eberhard BODENSCHATZ. « Three-Dimensional Structure of the Lagrangian Acceleration in Turbulent Flows ». In : *Phys. Rev. Lett.* 93.21 (nov. 2004), p. 214501. DOI : [10.1103/PhysRevLett.93.214501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.214501).
- [5] Stefano PIERINI et al. « Laboratory experiments reveal intrinsic self-sustained oscillations in ocean relevant rotating fluid flows ». In : *Sci. Rep.* 12.1375 (jan. 2022), p. 1375. ISSN : 2045-2322. DOI : [10.1038/s41598-022-05094-1](https://doi.org/10.1038/s41598-022-05094-1).