

La génération et la décroissance de la turbulence dans le système de Taylor-Couette arrêté brusquement

H. SINGH^a, A. PRIGENT^a, I. MUTABAZI^a

a. Laboratoire des Ondes et Milieux Complex (LOMC) CNRS UMR 6294, Université Le Havre, 75
Rue Bellot, Le Havre 76600, France. Email :harminster.singh@univ-lehavre.fr

Résumé

Cette étude présente une approche novatrice de la génération et de la décroissance de la turbulence dans l'écoulement de Taylor-Couette, l'écoulement entre deux cylindres coaxiaux en rotation. A partir d'un écoulement initialement laminaire, les cylindres sont soumis à un arrêt brutal qui génère l'apparition de turbulence transitoire. Deux approches expérimentales complémentaires, les visualisations et les mesures de vitesse par stéréo-PIV, ont été utilisées pour mieux comprendre le phénomène présenté pour plusieurs vitesses initiales de rotation correspondant toujours à un écoulement laminaire. Trois configurations différentes peuvent être distinguées : rotation du cylindre extérieur seulement, co-rotation et contra-rotation. Lorsque seul le cylindre extérieur est en rotation, le seuil d'apparition de la turbulence correspond à un nombre de Reynolds extérieur initial $Re_o = 606$. En co- ou contra- rotation, ce seuil diminue jusqu'à une valeur minimale de $Re_o = 433$. Dans tous les cas, le retour à l'écoulement laminaire est plus lent qu'en stoppant le système à partir d'un écoulement turbulent. Contrairement à l'étude de Verschoof *et al.* [12], une décroissance auto-similaire de la turbulence n'a pas été observée.

Abstract

This study presents an innovative approach towards the generation and decay of turbulence in the Taylor-Couette system. The cylinders were brought to an abrupt stoppage that generated turbulence in the system, which was initially in the laminar flow region. Two complementary experimental approaches, namely visualizations and stereo-PIV measurements, were used to better understand the presented phenomenon for three different configurations at multiple rotation rates but always starting in the laminar flow region : only external cylinder, co-rotation and counter-rotation. For only external cylinder rotation, the lowest threshold limit of outer Reynolds number to was found to be $Re_o = 606$, which could be lowered with co- or counter-rotation to a minimal value of $Re_o = 433$. Nevertheless, the return to the laminar state is much slower in comparison to an abrupt stoppage from a turbulent state. In contrast to the study of Verschoof *et al.* [12], self-similar decay of turbulence was not observed.

Mots clefs : Turbulence decay, Taylor-Couette, Stéréo-PIV, Visualization

1 Introduction

Taylor [1] en 1935, en présentant sa théorie de la décroissance de la turbulence de grille dans une soufflerie, a créé un fort intérêt dans la communauté scientifique. Sa théorie a servi de base aux études théoriques sur la turbulence isotrope homogène de Karman et Howarth [2], Kolmogorov [3] et Batchelor et Townsend [4], [5]. Au début des années quatre-vingt-dix, George [6] a présenté une théorie générale de la décroissance de la turbulence qui coïncidait avec les théories antérieures présentées par Karman et Howarth, Kolmogorov et Batchelor et Townsend, lorsque les hypothèses correspondantes étaient prises en compte. George [6] a démontré que l'énergie cinétique, dont la décroissance suit une loi de puissance au cours du temps, et la micro-échelle de Taylor, qui augmente comme la racine carrée du temps, devraient être utilisés pour représenter toutes les échelles de mouvement. George [6] a fortement suggéré l'importance des conditions initiales dans la détermination de la constante du taux de décroissance, qu'il ne trouvait pas universelle, hormis dans la limite du nombre de Reynolds infini.

Cependant, la turbulence représente en elle-même le chaos et n'est donc généralement ni homogène ni isotrope. Par conséquent, ces dernières années, des recherches sur la décroissance de la turbulence ont été menées dans les géométries avec des parois pour considérer un point de départ plus réaliste, numériquement [7], [8] [9], [10] ou expérimentalement [11], [12]. Toutes ces études ont été menées dans différents types de géométries : écoulement de tuyaux [11], deux plaques [7], structures 2D [8], T-mixer [10] et système de Taylor-Couette (TC) [12], [9]. Chaque système géométrique a ses propres avantages, mais le système de TC, dans lequel le flux est contenu entre deux cylindres concentriques, se présente comme le système idéal, car il s'agit d'un système confiné et fermé à turbulence non homogène et anisotrope [?]. Le principal avantage du système de TC par rapport à l'écoulement de Poiseuille est sa taille modeste, ce qui facilite l'étude de la décroissance dans un environnement délimité par des parois accessibles à la fois expérimentalement et numériquement.

Verschoof *et al.* [12] ont étudié de manière expérimentale, à l'aide de PIV et de LDV, la décroissance de la turbulence en arrêtant le cylindre intérieur, tandis que le cylindre extérieur était au repos à partir du régime ultime de la turbulence lié à un nombre de Reynolds initial de 10^6 . Cependant, ils ont été confrontés à l'impossibilité pratique d'arrêter le cylindre instantanément, 12 secondes étant nécessaires pour arriver à l'arrêt complet. Pendant ce temps, ils n'ont pas pu mesurer la décroissance de turbulence. En conséquence, le groupe a fourni une étude numérique avec Ostilla *et al.* [9] dans laquelle le cylindre intérieur pouvait être stoppé brusquement. Comme décrit par Batchelor et Townsend, [4, 5], Ostilla *et al.* [9] ont également observé trois phases distinctes lors de la décroissance : une phase initiale, une phase intermédiaire puis une phase finale. Toutefois, hormis la phase finale dont le comportement est purement visqueux, les phases présentaient des caractéristiques différentes .

Dans ce manuscrit, un phénomène légèrement différent est présenté. Au lieu de partir d'un écoulement turbulent et d'étudier sa décroissance, nous sommes partis d'un écoulement laminaire. La rotation des cylindres a été fixée pour obtenir un écoulement laminaire et au bout de cinq minutes, les cylindres ont été arrêtés instantanément. Une génération de turbulence a été observée peu de temps après l'arrêt, qui a ensuite décliné du fait de l'absence de tout forçage supplémentaire du système. Par conséquent, ces travaux expérimentaux diffèrent considérablement des travaux expérimentaux de Verschoof *et al.* [12] selon les points suivants : 1) l'écoulement était à l'état laminaire avant l'arrêt instantané et non à l'état turbulent ; 2) le cylindre extérieur ou les deux cylindres en contra- ou en co-rotation étaient en mouvement avant l'arrêt et non, seulement, le cylindre intérieur ; 3) les cylindres ont été arrêtés instantanément plutôt que progressivement ; et 4) la génération et la décroissance de la turbulence sont étudiées et non, seulement,

la décroissance de la turbulence. Cette génération de turbulence et de décroissance est étudiée expérimentalement selon deux approches complémentaires : des visualisations avec du Kalliroscope et des mesures stéréo-PIV pour capturer les trois composantes de la vitesse.

2 Dispositif expérimental et Méthodes

Le système de TC est constitué de deux cylindres concentriques avec des rayons intérieur et extérieur de $r_i = 0,04m$ et de $r_o = 0,05m$, respectivement, ce qui donne un rapport de rayon de $\eta = r_i/r_o = 0,8$ et la distance entre les deux cylindres $d = r_o - r_i = 0,01m$. La hauteur maximale de l'espace annulaire est $L = 0,45m$ ce qui donne un rapport de longueur $\Gamma = L/b = 45$. L'eau déminéralisée et dégazée a été utilisée comme fluide de travail à une température constante de 20 °C maintenue par une circulation d'eau thermostatée dans le cylindre intérieur et dans la cuve autour du cylindre extérieur. Le cylindre intérieur (IC) est en aluminium avec une paroi anodisée noire pour éviter les reflets lors du travail avec les lasers. Le cylindre extérieur est en plexiglas pour permettre un accès optique axialement sur toute la largeur du gap entre les deux cylindres. Un accès optique est également disponible depuis la plaque supérieure pour capturer le plan $r - \theta$ pour des mesures 2D-PIV. L'espace annulaire est fermé en bas par un anneau fixé au cylindre extérieur à une distance de 0,5 mm du cylindre intérieur. Trois configurations différentes ont été utilisées à différentes vitesses de rotation : rotation du cylindre extérieur uniquement, co-rotation et contra-rotation. Dans chaque cas, les conditions d'écoulement étaient laminares avant d'arrêter brusquement le ou les cylindres.

Afin de visualiser les structures d'écoulement, l'eau dégazée a été mélangée avec 1% de Kalliroscope ST-1000. Un plan $r - z$ a été éclairé avec un laser continu de classe 4 Dantec Dynamics Ray Power 2000 d'une puissance maximale de 4 W à une longueur d'onde de 532 nm. Ce plan $r - z$ a été capturé avec une caméra CMOS speed-sense de la série M avec une résolution de 4MP et une fréquence maximum d'acquisition de 800 Hz en utilisant un objectif de 105 mm. La version 6.0 de Dantec Dynamics studio a été utilisée pour capturer et exporter les images qui ont ensuite été traitées avec le logiciel Matlab R2018a pour obtenir les résultats présentés. Un maximum de 2 000 à 10 000 images ont été capturées selon la fréquence d'acquisition de 50 ou 200 Hz fixée en fonction du nombre de Reynolds initial.

Les mesures de Stéréo-PIV ont également été effectuées dans le plan $r - z$ à travers le cylindre extérieur transparent à l'aide de deux caméras CMOS speed-sense de la série M d'une résolution de 4MP et d'une fréquence maximum d'acquisition de 800 Hz avec un objectif de 105 mm. Les caméras ont été synchronisées avec un laser pulsé classe 4 Nd : YAG laser LPY 50-200 de Dantec Dynamics Litron ayant une puissance maximale de 200 mJ, une longueur d'onde de 532 nm et une fréquence maximale de 200 Hz. Toutefois, afin de capturer au moins 35 secondes du processus, une fréquence d'acquisition de 50 Hz ou 100 Hz (pour les nombres de Reynolds plus élevés) a été utilisée pour capturer entre 2500 et 3 800 paires d'images. Le fluide a étéensemencé avec des particules de rhodamine fluorescentes d'une taille moyenne comprise entre 5 et 20 μm . L'étalonnage des deux caméras a été effectué à l'aide de la méthode de pinhole de la méthode d'ajustement de modélisation d'image, à l'aide d'une mire à deux niveaux fabriquée par Dantec spécialement pour les mesures en stéréo-PIV dans ce système de TC. Les images capturées ont été analysées initialement avec la version 6.0 de Dantec Dynamics studio afin de calculer les champs de vecteurs à l'aide de la méthode PIV adaptative, avec une taille maximale de la zone d'interrogation de 64×64 , une taille minimale de la zone d'interrogation de 8×8 taille de pas de 4×4 . Ensuite, les calibrages des deux caméras ont été sélectionnés avec les champs de vecteurs des deux caméras pour créer les champs de vecteurs stéréo-PIV importés sous forme de fichiers *.txt et

traités avec le logiciel Matlab R2018a pour présenter les résultats suivants.

3 Résultats et Discussions

En premier, les résultats de visualisations avec Kalliroscope sont présentés sous forme de diagrammes spatio-temporels à différents nombres de Reynolds internes et externes dans la figure 1. Sur Fig. 1 a, on peut observer l'évolution de la génération de turbulence lorsque le cylindre intérieur est fixe avec une augmentation du nombre de Reynolds extérieur initial. Dans Fig. 1 b, la rotation du cylindre extérieur est maintenue constante, soit à co-courant, soit à contre-courant, alors que le nombre de Reynolds intérieur est modifié. Le seuil permettant la génération et la décroissance de turbulence a été trouvé à $Re_{oc} = \omega_o d / \nu u = 606$ sans rotation du cylindre interne. En co- ou contra-rotation, le seuil, auquel la génération de turbulence et la décroissance peuvent être observés, devient $Re_{oc} = 433$.

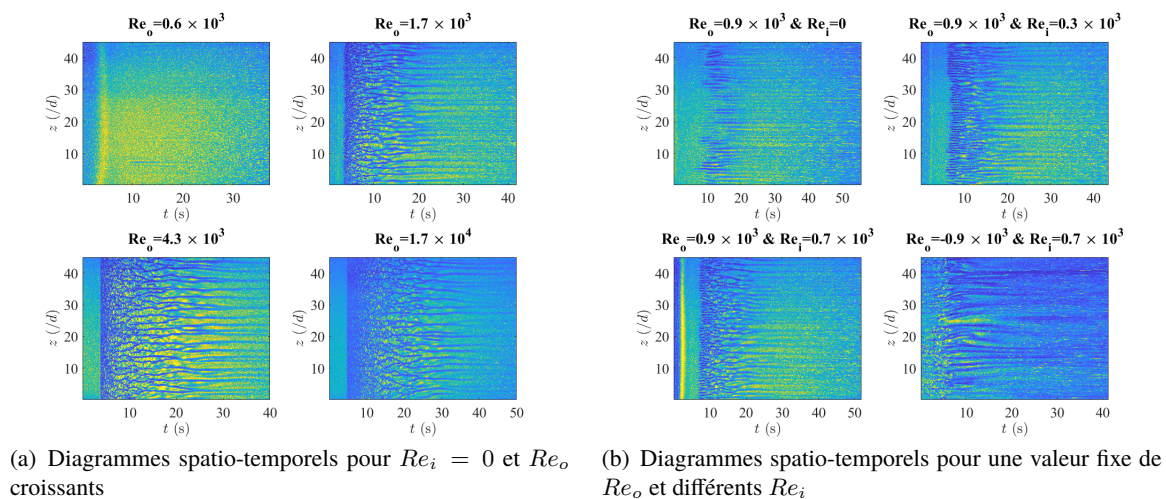


FIGURE 1 – Diagrammes spatio-temporels obtenus à différents Re_i et Re_o .

Pour des valeurs plus élevées de Re_o , le point d'arrêt génère instantanément de la turbulence sur toute la longueur axiale. La zone de turbulence et par conséquent le temps de décroissance augmente progressivement avec chaque augmentation du nombre de Reynolds. Au cours des expériences de visualisation, il a été observé que si l'état initial avant l'arrêt brusque était turbulent, la turbulence disparaissait en l'espace de quelques secondes (les résultats ne sont pas présentés ici). Verschoof *et al.* [12] dans leur étude expérimentale PIV et LDA et Ostilla-Monico *et al.* [9] dans leur étude numérique ont observé un temps de décroissance de 1000 secondes à partir d'un nombre de Reynolds intérieur initial $Re_i = 2 \times 10^6$ bien plus élevé que la valeur maximale $Re_i = 2,7 \times 10^4$ testée dans notre étude. Il convient également de noter que leur largeur de gap $d = 0,079$ m est 8 fois plus grande par rapport à la configuration actuelle de $d = 0,01$ m. La configuration géométrique et la valeur 100 fois plus élevée de Re_i pourraient être les principaux facteurs expliquant une telle divergence.

La figure 2 présente la décroissance de la vitesse azimutale avec le temps. La vitesse azimutale a été moyennée axialement sur 100 mm dans la région à mi-hauteur, radialement sur 1,7 mm au centre de l'entrefer et en temps pour chaque seconde. Les instantanés de visualisations présentés parallèlement à la décroissance de la vitesse démontrent l'évolution du processus de génération et de décroissance de la turbulence. Les estimations de la visualisation et de la vitesse par PIV ont été réalisées séparément

et ne représentent pas nécessairement l'évolution temporelle réelle mais plutôt la probabilité de son observation dans ce fuseau horaire. On constate qu'après l'arrêt, une fois commencée, la décroissance est beaucoup plus rapide que celle observée par Verschoof *et al.* [12] et Ostilla-Monico *et al.* [9]. Une fois encore, la configuration géométrique de pratiquement 8 fois la largeur de gap actuelle devrait être la principale raison de la décroissance beaucoup plus lente dans leur cas ou plus rapide dans notre cas en raison de seulement 10 mm de largeur de gap.

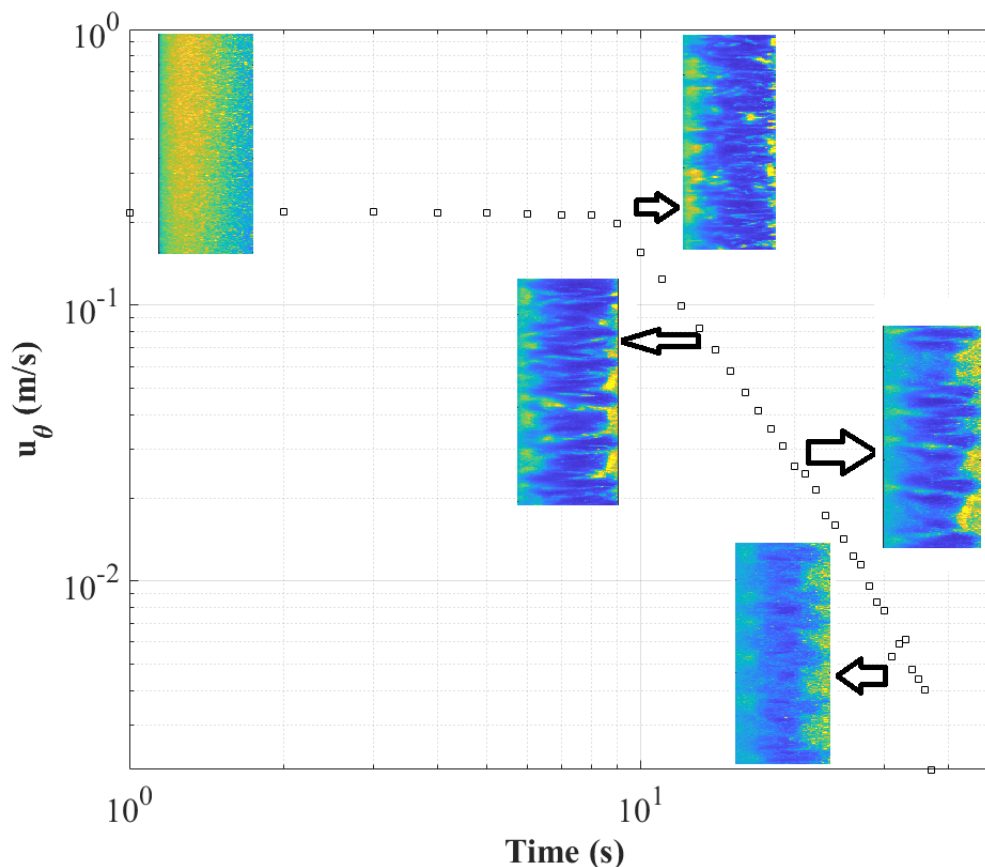


FIGURE 2 – Décroissance de la vitesse azimutale avec le temps. La vitesse est moyennée axialement, en temps pour chaque seconde et radialement au milieu du gap sur 1.7 mm. Les images instantanées des visualisations sont présentes pour illustrer l'état de l'écoulement correspondant.

Dans la figure 3, la décroissance de la vitesse azimutale à différents pas de temps est indiquée pour différentes configurations de nombre de Reynolds interne et externe dans des situations à co et à contre-rotation. La vitesse azimutale est moyennée axialement et en temps pour chaque seconde, et $R_d = (r - r_i)/d$. Quelques pas de temps ont été choisis pour présenter l'évolution du profil de vitesse lors de la décroissance de la turbulence. Dans tous les cas, l'arrêt s'est produit dans la première seconde mais pas toujours au même moment ; il en résulte que le profil moyen laminaire qui était présent avant l'arrêt a été influencé par l'arrêt près de la région du cylindre extérieur. Néanmoins, le profil de vitesse pour la 1ère seconde suit très bien le profil laminaire analytique présenté sous forme de trait pointillé, ce qui prouve la validité des estimations stéréoscopiques PIV.

Un autre désaccord concernant les résultats de Verschoof *et al.* [12] et Ostilla-Monico *et al.* [9] est que l'auto-similarité des profils de vitesse n'a pas été observée dans nos expériences quelle que soit

les instants considérés. Verschoof *et al.* [12] définissent les critères d’auto-similarité, tels que définis lorsque les profils de vitesse sont normalisés, la vitesse moyenne azimutale étant moyennée radialement et azimutalement, les profils se chevauchent. Ils ont observé une auto-similarité à l’état intermédiaire, mais nous n’avons observé aucune auto-similarité à aucun instant bien que la vitesse azimutale moyenne ait été moyennée axialement et radialement (le figure n’est pas présenté ici).

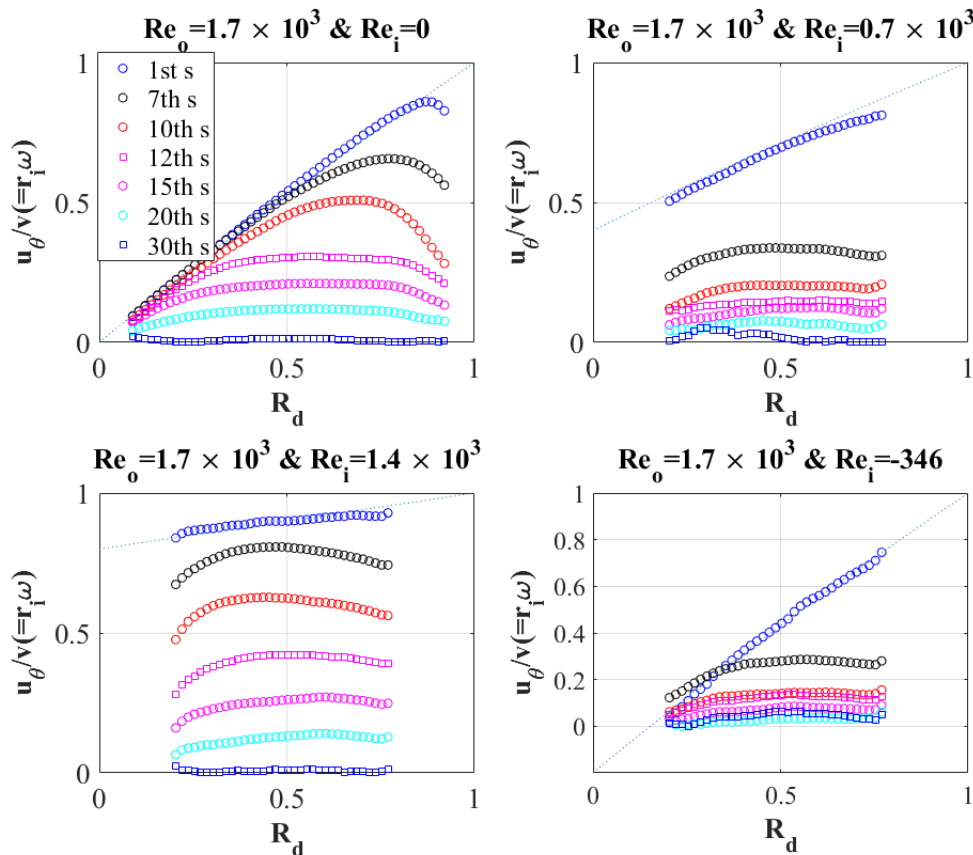


FIGURE 3 – Décroissance de la vitesse azimutale pour différentes configurations de rotation des cylindres sur plusieurs temps de vie. La ligne pointillée représente le profil analytique.

4 Conclusion

En conclusion, une étude de visualisation et stéréo-PIV est présentée pour l’arrêt instantané des cylindres du système de TC, qui conduit à la génération puis à la décroissance de la turbulence due à l’absence de tout forçage. Le seuil auquel ce phénomène a pu être observé est de $Re_{oc} = 606$ quand le cylindre interne est stationnaire et peut encore être abaissé à 433 en co- ou contra-rotation des cylindres. Dans tous les cas, l’écoulement était laminaire avant l’arrêt brusque. Après l’arrêt brusque, la vitesse décroît rapidement et aucune auto-similarité est observée, et il est important de rappeler que l’auto similarité de la décroissance de vélocité est une des principales suppositions dans le cas de la turbulence isotrope homogène. Néanmoins, de nombreuses différences ont été observées par rapport aux résultats de Verschoof *et al.* [12] et Ostilla-Monico *et al.* [9], qui sont très probablement dues à des différences géométriques très différentes ainsi qu’aux valeurs initiales des nombres de Reynolds. Ce ne sont là que quelques premières analyses et une étude plus détaillée est actuellement en cours de ce phénomène unique.

Remerciement

Nous souhaitons à exprimer notre sincère gratitude pour le soutien financier apporté par le projet BIOENGINE du CPER-FEDER.

Références

- [1] G. I. Taylor, Statistical Theory of Turbulence, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 151 (1935) 421–444.
- [2] T. de Karman & L. Howarth, On the Statistical Theory of Isotropic Turbulence, Physical Letters A, 164 (1938) 192–215.
- [3] A. N. Kolmogorov, On degeneration (decay) of isotropic turbulence in incompressible viscous liquid, Doklady Akademiia Nauk SSSR, 31 (1941) 538–540.
- [4] K. Batchelor Goerge, A. Townsend, G. I. Taylor, Decay of isotropic turbulence in the initial period, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 193 (1948) 539–598.
- [5] K. Batchelor Goerge, A. Townsend, G. I. Taylor, Decay of turbulence in the final period, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 194 (1948) 527–543 .
- [6] W. K. George, The decay of homogeneous isotropic turbulence, Physics of Fluids A, 4 (1992) 1492–1509.
- [7] H. Touil, J.-P. Bertoglio, L. Shao, The decay of turbulence in a bounded domain, Journal of Turbulence, 3 (2002) 1–12.
- [8] K. Schneider & M. Farge, Final states of decaying 2D turbulence in bounded domains : Influence of the geometry, Physica D : Nonlinear Phenomenon, 237 (2008) 2228–2233.
- [9] R. Ostilla-Mónico, X. Zhu, V. Spandan, R. Verzicco, D. Lohse, Life stages of wall-bounded decay of Taylor-Couette turbulence, Physical Review Fluids, 2 (2017) 114601.
- [10] T. Schikarski & M. Avila, T mixer a novel system to investigate decaying turbulence in a wall-bounded environment, 16th European Turbulence Conference, Stockholm, Sweden. 2017, pp.1.
- [11] J. Peixinho & T. Mullin, Decay of Turbulence in Pipe Flow, Physical Review Letters, 2 (2017) 114601 .
- [12] R. A. Verschoof, S. G. Huisman, R. C. A. van der Veen, C. Sun, D. Lohse, Self-similar decay of high Reynolds number Taylor-Couette turbulence, Physical Review Fluids, 1 (2013) 062402.
- [13] S. G. Huisman, R. C. A. Van der Veen, C. Sun, D. Lohse, Multiple states in highly turbulent TaylorCouette flow, Nature Communications, 5 (2014) 3820.