Analyse statistique d'un écoulement turbulent

Nikita Allaglo

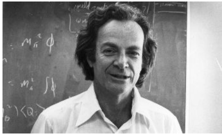
Soutenance orale de mon stage du 2 mai au 4 juillet sous la supervision de Caroline Nore

3 juillet 2023

université PARIS-SACLAY
LISN LABORATOIRE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES DU NUMÉRIQUE

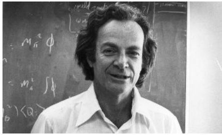
Motivation

Recherche fondamentale



Richard Feynman (1964)

La turbulence est le problème non résolu le plus important de la physique classique.

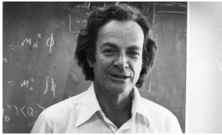


Richard Feynman (1964)

La turbulence est le problème non résolu le plus important de la physique classique.

Problèmes du prix du millénaire

Clay Mathematics Institute
Dedicated to increasing and disseminating mathematical knowledge



Richard Feynman (1964)

La turbulence est le problème non résolu le plus important de la physique classique.

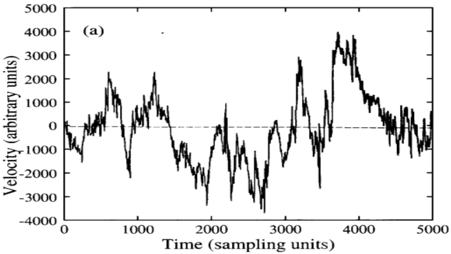
Problèmes du prix du millénaire

Clay Mathematics Institute
Dedicated to increasing and disseminating mathematical knowledge

Pour 3 dimensions spatiales et une temporelle, étant donné un champ de vitesse initial, existe-il un champ de vitesse ainsi qu'un champ scalaire de pression partout continus et définis qui résolvent les équations de Navier-Stokes ?

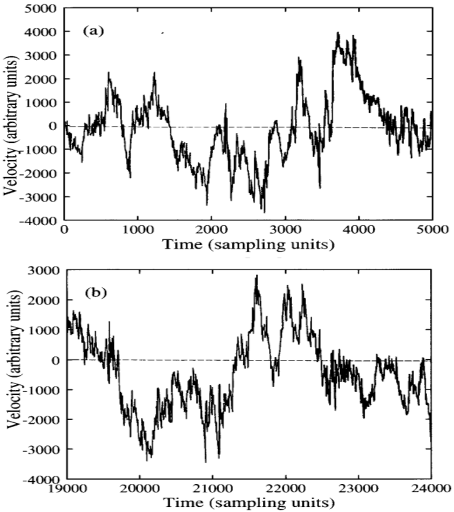
Motivation

Aspects statistiques (Figures tirées de U. Frisch, *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov* (1995))



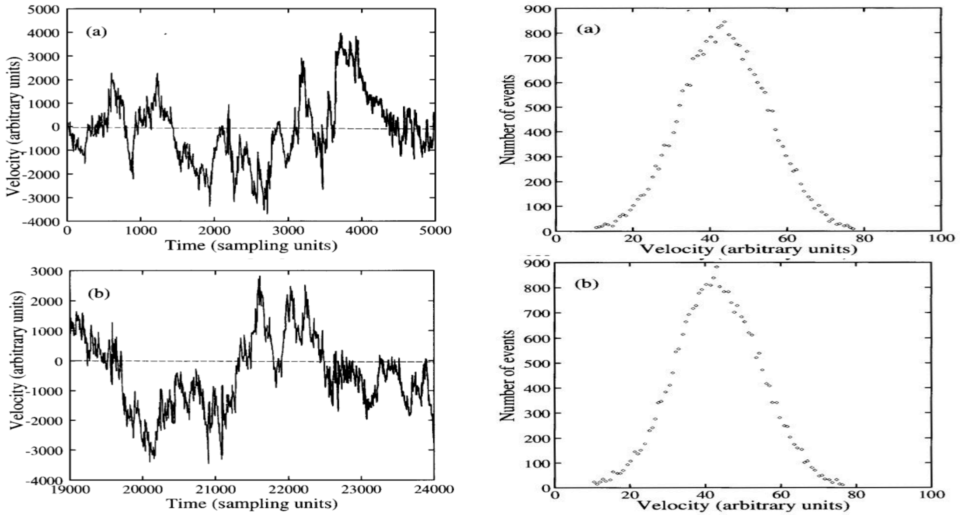
Motivation

Aspects statistiques (Figures tirées de U. Frisch, *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov* (1995))



Motivation

Aspects statistiques (Figures tirées de U. Frisch, *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov* (1995))



Plan de la présentation

1. La turbulence hydrodynamique
   - Nombre de Reynolds
   - Dissipation anormale
   - Formulation faible
2. Problématique du stage
   - Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques
   - Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)
   - Tâches assignées
3. Résultats
   - Comparaison des probabilités jointes numériques
   - Comparaison des probabilités jointes numériques et expérimentales
   - Comparaison entre $\mathscr{D}_\ell^u$ et $\mathscr{D}_\ell^I (= \mathscr{D}_\ell^{\mathrm{DR}})$

Plan de la présentation

1. La turbulence hydrodynamique
   - Nombre de Reynolds
   - Dissipation anormale
   - Formulation faible
2. Problématique du stage
   - Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques
   - Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)
   - Tâches assignées
3. Résultats
   - Comparaison des probabilités jointes numériques
   - Comparaison des probabilités jointes numériques et expérimentales
   - Comparaison entre $\mathscr{D}_\ell^u$ et $\mathscr{D}_\ell^I (= \mathscr{D}_\ell^{\mathrm{DR}})$

Nombre de Reynolds

Équation de Navier-Stokes adimensionnée

$$\partial_t \boldsymbol{u} + (\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{\nabla} p + \frac{1}{\mathrm{Re}} \boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{u} + \frac{L}{U^2} \boldsymbol{f}, \tag{1}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \tag{2}$$

avec $\boldsymbol{u}$ la vitesse, p la pression (adimensionnées), $\boldsymbol{f}$ les forces externes par densité massique; ν étant la viscosité du fluide et U, L la vitesse et la longueur caractéristiques de l'écoulement.

Nombre de Reynolds

Équation de Navier-Stokes adimensionnée

$$\partial_t \boldsymbol{u} + (\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{\nabla} p + \frac{1}{\mathrm{Re}} \boxed{\boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{u}} + \frac{L}{U^2} \boldsymbol{f}, \tag{1}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \tag{2}$$

avec $\boldsymbol{u}$ la vitesse, p la pression (adimensionnées), $\boldsymbol{f}$ les forces externes par densité massique; ν étant la viscosité du fluide et U, L la vitesse et la longueur caractéristiques de l'écoulement.

Nombre de Reynolds

Équation de Navier-Stokes adimensionnée

$$\partial_t \boldsymbol{u} + (\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{\nabla} p + \frac{1}{\mathrm{Re}} \boxed{\boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{u}} + \frac{L}{U^2}\boldsymbol{f}, \quad (1)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \quad (2)$$

avec $\boldsymbol{u}$ la vitesse, p la pression (adimensionnées), $\boldsymbol{f}$ les forces externes par densité massique; ν étant la viscosité du fluide et U, L la vitesse et la longueur caractéristiques de l'écoulement.

☞ Re ≪ 1: domination de la dissipation visqueuse

Nombre de Reynolds

Équation de Navier-Stokes adimensionnée

$$\partial_t \boldsymbol{u} + \boxed{(\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u}} = -\boldsymbol{\nabla} p + \frac{1}{\mathrm{Re}} \boxed{\boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{u}} + \frac{L}{U^2} \boldsymbol{f}, \tag{1}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \tag{2}$$

avec $\boldsymbol{u}$ la vitesse, p la pression (adimensionnées), $\boldsymbol{f}$ les forces externes par densité massique; ν étant la viscosité du fluide et U, L la vitesse et la longueur caractéristiques de l'écoulement.

☞ $\mathrm{Re} \ll 1$: domination de la dissipation visqueuse

Nombre de Reynolds

Équation de Navier-Stokes adimensionnée

$$\partial_t \boldsymbol{u} + \boxed{(\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u}} = -\boldsymbol{\nabla} p + \frac{1}{\mathrm{Re}} \boxed{\boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{u}} + \frac{L}{U^2} \boldsymbol{f}, \tag{1}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \tag{2}$$

avec $\boldsymbol{u}$ la vitesse, p la pression (adimensionnées), $\boldsymbol{f}$ les forces externes par densité massique; ν étant la viscosité du fluide et U, L la vitesse et la longueur caractéristiques de l'écoulement.

- ☞ $\mathrm{Re} \ll 1$: domination de la dissipation visqueuse
- ☞ $\mathrm{Re} \gg 1$: domination de la convection (**non-linéarités**)

Dissipation anormale

Zéroième loi de la turbulence

La puissance injectée moyenne (ou le taux moyen de variation de l'énergie cinétique) au sein d'un fluide tend vers une constante non-nulle à viscosité rigoureusement nulle.

Dissipation anormale

Zéroième loi de la turbulence

La puissance injectée moyenne (ou le taux moyen de variation de l'énergie cinétique) au sein d'un fluide tend vers une constante non-nulle à viscosité rigoureusement nulle.

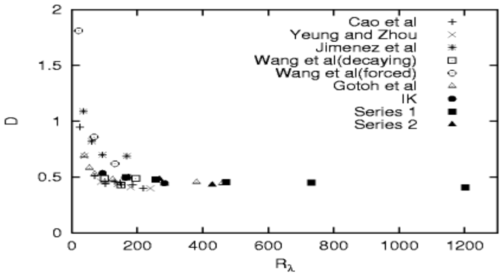
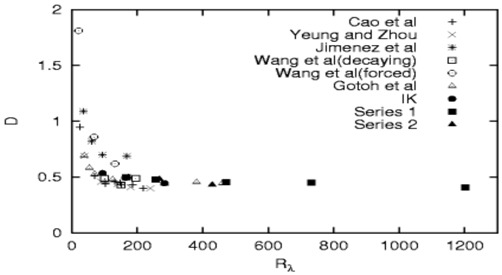


Figure tirée de Kaneda *et al.*, Physics of Fluids **15**, 2 (2003)

Dissipation anormale

Zéroième loi de la turbulence

La puissance injectée moyenne (ou le taux moyen de variation de l'énergie cinétique) au sein d'un fluide tend vers une constante non-nulle à viscosité rigoureusement nulle.



$$(\omega = |\boldsymbol{\nabla} \wedge \boldsymbol{u}|) \tag{3}$$

$$\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial t} = \rho \nu \left\langle \omega^2 \right\rangle \tag{4}$$

$$\tag{6}$$

Figure tirée de Kaneda *et al.*, Physics of Fluids **15**, 2 (2003)

Dissipation anormale

Zéroième loi de la turbulence

La puissance injectée moyenne (ou le taux moyen de variation de l'énergie cinétique) au sein d'un fluide tend vers une constante non-nulle à viscosité rigoureusement nulle.

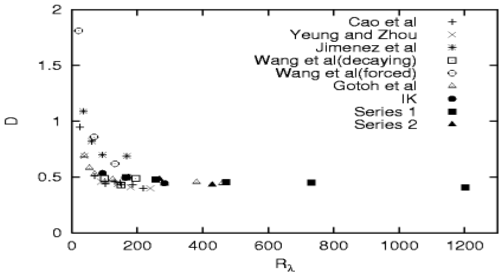


Figure tirée de Kaneda *et al.*, Physics of Fluids **15**, 2 (2003)

$$(\omega = |\boldsymbol{\nabla} \wedge \boldsymbol{u}|) \tag{3}$$

$$\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial t} = \rho \nu \left\langle \omega^2 \right\rangle \tag{4}$$

$$\underset{\nu \longrightarrow 0}{\longrightarrow} C \tag{5}$$

(6)

Dissipation anormale

Zéroième loi de la turbulence

La puissance injectée moyenne (ou le taux moyen de variation de l'énergie cinétique) au sein d'un fluide tend vers une constante non-nulle à viscosité rigoureusement nulle.

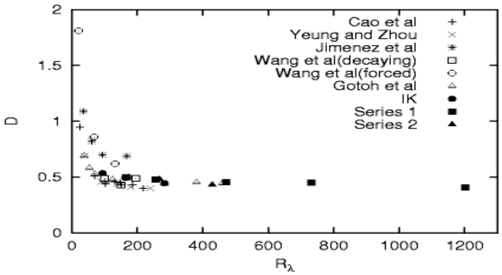


Figure tirée de Kaneda *et al.*, Physics of Fluids **15**, 2 (2003)

Conjecture d'Onsager (1949)

$$(\omega = |\boldsymbol{\nabla} \wedge \boldsymbol{u}|) \tag{3}$$

$$\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial t} = \rho \nu \left\langle \omega^2 \right\rangle \tag{4}$$

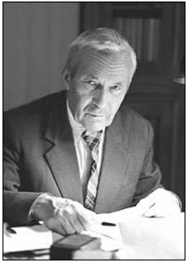
$$\underset{\nu \to 0}{\longrightarrow} C \tag{5}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\left\langle \omega^2 \right\rangle \underset{\nu \to 0}{\longrightarrow} \infty \ ?} \tag{6}$$

Théorie de Kolmogorov (1941)

- Existence d'une zone inertielle $\eta \ll \ell \ll L$ permettant les cascades énergétiques (η échelle de Kolmogorov, L échelle d'injection d'énergie)
- Captage des échelles à l'aide d'incréments $\delta u_\ell(\boldsymbol{x}) = \mathbf{e}_\ell \cdot (\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\ell}) - \boldsymbol{u}(\boldsymbol{\ell}))$
- Lois universelles autour de **fonctions de structure** $S_p(\ell) := \langle |\delta u_\ell|^p \rangle$
- Défauts: le cadre mathématique ne donne pas de sens aux singularités, turbulence statistiquement homogène et isotrope ...



Comment prendre en compte de potentielles singularités ?

Comment prendre en compte de potentielles singularités ?

Théorie des distributions

Comment prendre en compte de potentielles singularités ?

Théorie des distributions

Espace de fonctions tests: $\varphi > 0 \in \mathscr{C}^\infty$ à support compact dans $\mathbb{R}^3$ et s'intégrant à l'unité.

Comment prendre en compte de potentielles singularités ?

Théorie des distributions

Espace de fonctions tests: $\varphi > 0 \in \mathscr{C}^\infty$ à support compact dans $\mathbb{R}^3$ et s'intégrant à l'unité.

Lissage:

$$\varphi_\ell(\boldsymbol{\xi}) := \frac{1}{\ell^3}\varphi\left(\frac{\boldsymbol{\xi}}{\ell}\right)$$

$$\overline{X}^\ell(\boldsymbol{r}) = \int_{\mathbb{R}^3} \varphi_\ell(\boldsymbol{\xi}) X(\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{r}) \mathrm{d}^3\boldsymbol{\xi}$$

Comment prendre en compte de potentielles singularités ?

Théorie des distributions

Espace de fonctions tests: $\varphi > 0 \in \mathscr{C}^\infty$ à support compact dans $\mathbb{R}^3$ et s'intégrant à l'unité.

Lissage:

$$\varphi_\ell(\xi) := \frac{1}{\ell^3}\varphi\left(\frac{\xi}{\ell}\right)$$

$$\overline{X}^\ell(\boldsymbol{r}) = \int_{\mathbb{R}^3} \varphi_\ell(\xi) X(\xi + \boldsymbol{r}) \mathrm{d}^3\xi$$

Énergie pseudo-filtrée: $\tilde{E}_\ell := \rho \frac{\boldsymbol{u}\cdot\overline{\boldsymbol{u}}^\ell}{2}$

$$\boxed{\partial_t \tilde{E}_\ell + \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{J}_\ell^{\mathrm{NS}} + \mathscr{D}_\ell^\nu + \mathscr{D}_\ell^u = \mathcal{P}_\ell} \tag{7}$$

Comment prendre en compte de potentielles singularités ?

Théorie des distributions

Espace de fonctions tests: $\varphi > 0 \in \mathscr{C}^\infty$ à support compact dans $\mathbb{R}^3$ et s'intégrant à l'unité.

Lissage:

$$\varphi_\ell(\boldsymbol{\xi}) := \frac{1}{\ell^3}\varphi\left(\frac{\boldsymbol{\xi}}{\ell}\right)$$

$$\overline{X}^\ell(\boldsymbol{r}) = \int_{\mathbb{R}^3} \varphi_\ell(\boldsymbol{\xi}) X(\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{r}) \mathrm{d}^3\boldsymbol{\xi}$$

Énergie pseudo-filtrée: $\tilde{E}_\ell := \rho \frac{\boldsymbol{u}\cdot\overline{\boldsymbol{u}}^\ell}{2}$

$$\boxed{\partial_t \tilde{E}_\ell + \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{J}_\ell^{\mathrm{NS}} + \mathscr{D}_\ell^\nu + \mathscr{D}_\ell^u = \mathcal{P}_\ell} \tag{7}$$

Dissipation anormale

$$\mathscr{D}_\ell^u = \frac{\rho}{2}\left(\boldsymbol{u} \cdot \overline{u_i \partial_i \boldsymbol{u}}^\ell - u_i \boldsymbol{u} \cdot \partial_i \overline{\boldsymbol{u}}^\ell\right) \tag{8}$$

Plan de la présentation

Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques

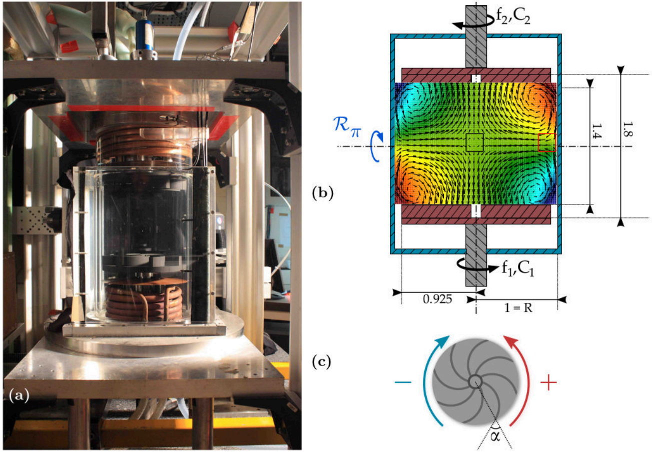
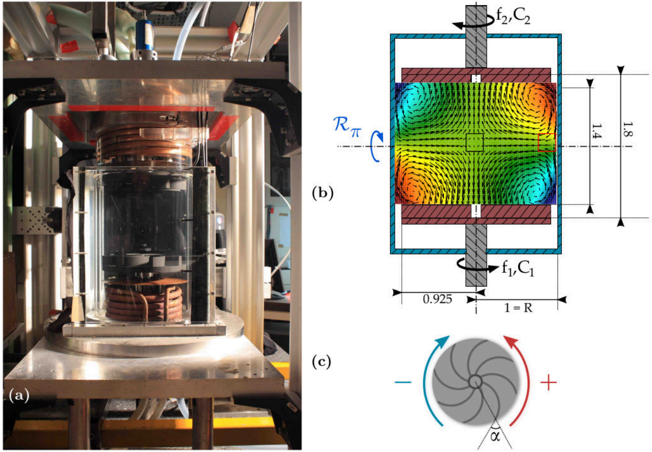


Figure tirée de Dubrulle, JFM **867**, 1 (2019)

Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques



Simulations numériques SFEMaNS

Figure tirée de Dubrulle, JFM **867**, 1 (2019)

Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques

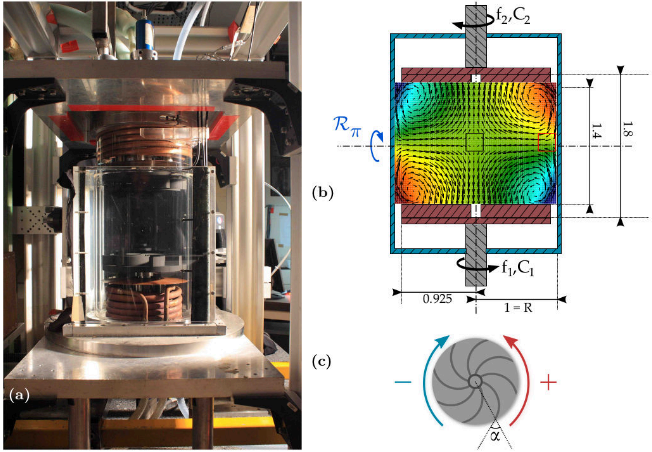


Figure tirée de Dubrulle, JFM **867**, 1 (2019)

Simulations numériques SFEMaNS:

☞ Résout Navier-Stokes ($\boldsymbol{u}$) et permet de calculer toutes les grandeurs d'intérêt dans l'écoulement (dissipations, vorticité, filtrages)

Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques

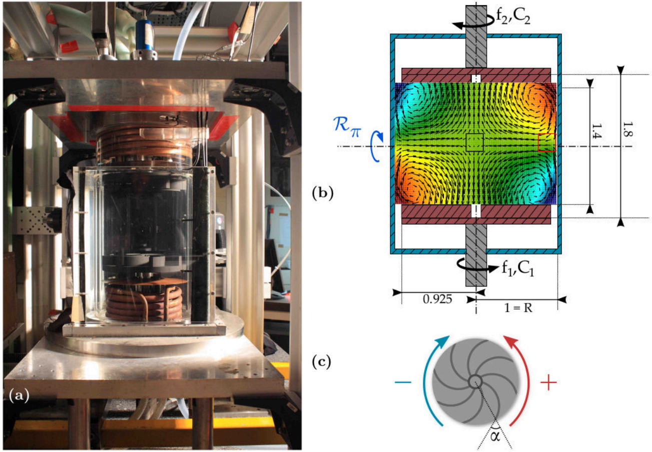


Figure tirée de Dubrulle, JFM **867**, 1 (2019)

Simulations numériques SFEMaNS:

- ☞ Résout Navier-Stokes ($\boldsymbol{u}$) et permet de calculer toutes les grandeurs d'intérêt dans l'écoulement (dissipations, vorticité, filtrages)
- ☞ code hautement parallèle (Fast Fourier Transform pour coordonnées angulaires, éléments finis pour (r, z))

Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques

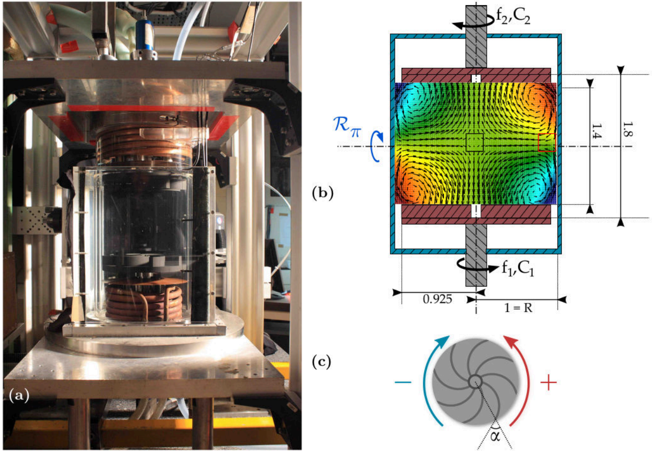


Figure tirée de Dubrulle, JFM **867**, 1 (2019)

Simulations numériques SFEMaNS:

- ☞ Résout Navier-Stokes ($\boldsymbol{u}$) et permet de calculer toutes les grandeurs d'intérêt dans l'écoulement (dissipations, vorticité, filtrages)
- ☞ code hautement parallèle (Fast Fourier Transform pour coordonnées angulaires, éléments finis pour (r, z))
- ☞ forte résolution **spatiale** mais limitations pour Re et snapshots

Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

Cas	F (Hz)	Points de grille	Re	ϵ(adim)	η(mm)	Δx(mm)
A	5	89×65	$3.1\ \ 10^5$	0.045	0.016	2.1
B	5	77×79	$3.1\ \ 10^5$	0.045	0.016	0.49
C	5	162×157	$3.1\ \ 10^5$	0.045	0.016	0.24
D	1	77×80	$4.1\ \ 10^4$	0.045	0.073	0.49
E	1.2	151×174	$5.8\ \ 10^3$	0.045	0.32	0.24
T-1	5	$149 \times 103 \times 20$	$3.1\ \ 10^5$	0.045	0.016	0.35
T-2	1	$139 \times 101 \times 20$	$6.3\ \ 10^4$	0.045	0.054	0.35
T-3	0.5	$148 \times 103 \times 20$	$3.1\ \ 10^4$	0.045	0.09	0.35
T-4	0.1	$149 \times 100 \times 20$	$6.3\ \ 10^3$	0.045	0.3	0.35
DNS	$\frac{1}{2\pi}$	$400 \times 800 \times 509$	$6\ \ 10^3$	0.045	0.37	0.1-0.4

Paramètres décrivant les données utilisées dans Faller *et al.*, JFM **914**, 2 (2021). F est la fréquence de rotation des turbines; Re est le nombre de Reynolds; ϵ est la dissipation énergétique totale adimensionnée ; η est l'échelle de Kolmogorov ; et Δx représente la résolution spatiale dans les expériences (dénotées de A à T-4) et les simulations numériques directes (dénotées DNS).

Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

Faller effectue en premier lieu une analyse statistique primaire de l' écoulement de von-Karman:

☞ il considère les événements simultanés de $\mathscr{D}_\ell^I = \dfrac{\rho}{2}\boldsymbol{\nabla}\cdot\left(\boldsymbol{u}\overline{u^2}^\ell - \overline{u^2\boldsymbol{u}}^\ell\right) + \mathscr{D}_\ell^u$ et $\omega = |\boldsymbol{\nabla}\wedge\boldsymbol{u}|$

Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

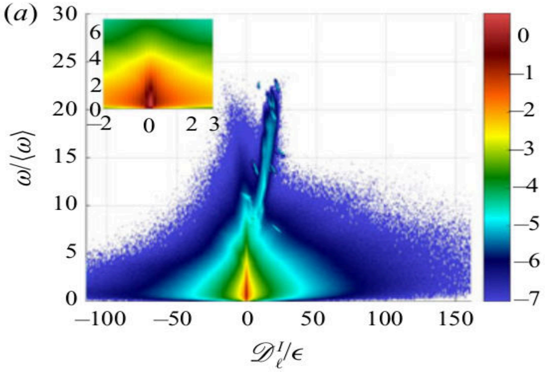
Faller effectue en premier lieu une analyse statistique primaire de l' écoulement de von-Karman:

- ☞ il considère les événements simultanés de $\mathscr{D}_\ell^I = \dfrac{\rho}{2}\boldsymbol{\nabla}\cdot\left(\boldsymbol{u}\overline{u^2}^{\ell} - \overline{u^2\boldsymbol{u}}^{\ell}\right) + \mathscr{D}_\ell^u$ et $\omega = |\boldsymbol{\nabla}\wedge\boldsymbol{u}|$
- ☞ pour les échelles de filtrage $\ell = 1.06\eta$ et $\ell = 26.5\eta$, il obtient un étrange jet de corrélations

Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

Faller effectue en premier lieu une analyse statistique primaire de l' écoulement de von-Karman:

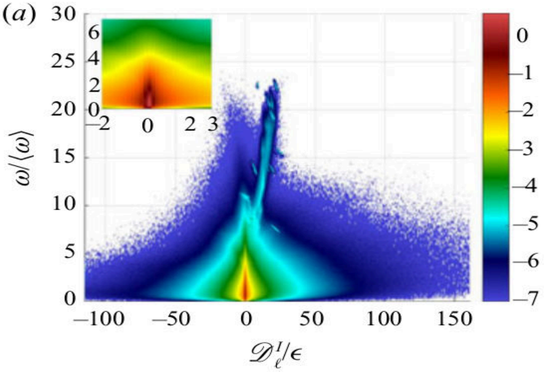
- ☞ il considère les événements simultanés de $\mathcal{D}_\ell^I = \frac{\rho}{2}\boldsymbol{\nabla}\cdot\left(\boldsymbol{u}\overline{u^2}^\ell - \overline{u^2\boldsymbol{u}}^\ell\right) + \mathcal{D}_\ell^u$ et $\omega = |\boldsymbol{\nabla}\wedge\boldsymbol{u}|$
- ☞ pour les échelles de filtrage $\ell = 1.06\eta$ et $\ell = 26.5\eta$, il obtient un étrange jet de corrélations
- ☞ Questionnements effectués par les auteurs:



Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

Faller effectue en premier lieu une analyse statistique primaire de l' écoulement de von-Karman:

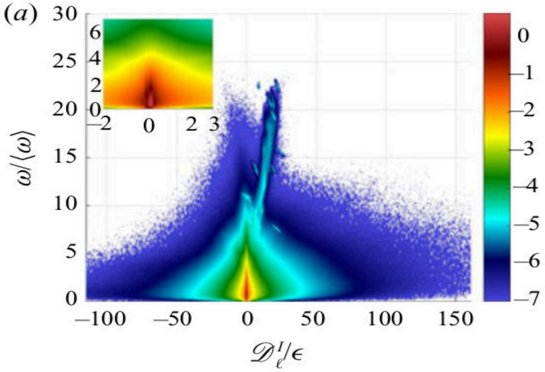
- ☞ il considère les événements simultanés de $\mathscr{D}_\ell^I = \frac{\rho}{2}\boldsymbol{\nabla}\cdot\left(\boldsymbol{u}\overline{u^2}^\ell - \overline{u^2\boldsymbol{u}}^\ell\right) + \mathscr{D}_\ell^u$ et $\omega = |\boldsymbol{\nabla}\wedge\boldsymbol{u}|$
- ☞ pour les échelles de filtrage $\ell = 1.06\eta$ et $\ell = 26.5\eta$, il obtient un étrange jet de corrélations
- ☞ Questionnements effectués par les auteurs:



❒ $\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{u} \neq 0$?

Faller effectue en premier lieu une analyse statistique primaire de l' écoulement de von-Karman:

- ☞ il considère les événements simultanés de $\mathscr{D}_\ell^I = \dfrac{\rho}{2}\boldsymbol{\nabla}\cdot\left(\boldsymbol{u}\overline{u^2}^\ell - \overline{u^2\boldsymbol{u}}^\ell\right) + \mathscr{D}_\ell^u$ et $\omega = |\boldsymbol{\nabla}\wedge\boldsymbol{u}|$
- ☞ pour les échelles de filtrage $\ell = 1.06\eta$ et $\ell = 26.5\eta$, il obtient un étrange jet de corrélations
- ☞ Questionnements effectués par les auteurs:

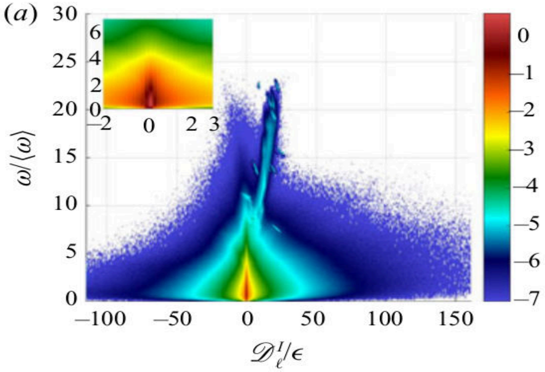


- ❒ $\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{u} \neq 0$?
- ❒ $\overline{\boldsymbol{u}}^\ell \underset{\ell\to 0}{\not\to} \boldsymbol{u}$ sur l'axe ?

Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

Faller effectue en premier lieu une analyse statistique primaire de l' écoulement de von-Karman:

- ☞ il considère les événements simultanés de $\mathcal{D}_\ell^I = \dfrac{\rho}{2}\boldsymbol{\nabla}\cdot\left(\boldsymbol{u}\overline{u^2}^\ell - \overline{u^2\boldsymbol{u}}^\ell\right) + \mathcal{D}_\ell^u$ et $\omega = |\boldsymbol{\nabla}\wedge\boldsymbol{u}|$
- ☞ pour les échelles de filtrage $\ell = 1.06\eta$ et $\ell = 26.5\eta$, il obtient un étrange jet de corrélations
- ☞ Questionnements effectués par les auteurs:

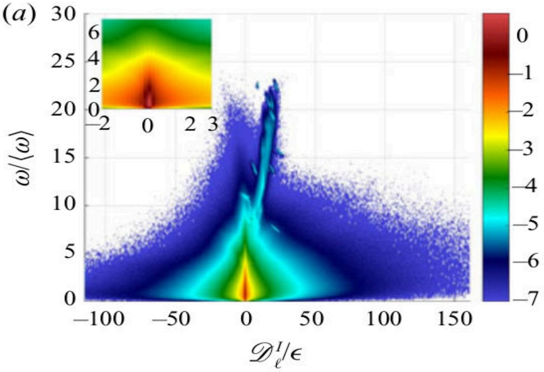


- ❒ $\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{u} \neq 0$?
- ❒ $\overline{\boldsymbol{u}}^\ell \underset{\ell\to 0}{\not\to} \boldsymbol{u}$ sur l'axe ?
- ❒ $\mathcal{D}_\ell^I$ vs $\mathcal{D}_\ell^u$?

Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

Faller effectue en premier lieu une analyse statistique primaire de l' écoulement de von-Karman:

- ☞ il considère les événements simultanés de $\mathscr{D}_\ell^I = \frac{\rho}{2}\boldsymbol{\nabla}\cdot\left(\overline{\boldsymbol{u}u^2}^\ell - \overline{u^2\boldsymbol{u}}^\ell\right) + \mathscr{D}_\ell^u$ et $\omega = |\boldsymbol{\nabla}\wedge\boldsymbol{u}|$
- ☞ pour les échelles de filtrage $\ell = 1.06\eta$ et $\ell = 26.5\eta$, il obtient un étrange jet de corrélations
- ☞ Questionnements effectués par les auteurs:



- ❒ $\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{u} \neq 0$?
- ❒ $\overline{\boldsymbol{u}}^\ell \underset{\ell\to 0}{\not\to} \boldsymbol{u}$ sur l'axe ?
- ❒ $\mathscr{D}_\ell^I$ vs $\mathscr{D}_\ell^u$?
- ❒ conditions aux limites strictes vs ouvertes ?

Tâches assignées

L'équipe dispose d'une nouvelle base de données SFEMaNS (1.1 TB) répliquant les calculs de Faller avec les correctifs.

Tâches assignées

L'équipe dispose d'une nouvelle base de données SFEMaNS (1.1 TB) répliquant les calculs de Faller avec les correctifs.

Mes réalisations ont principalement été les suivantes:

Tâches assignées

L'équipe dispose d'une nouvelle base de données SFEMaNS (1.1 TB) répliquant les calculs de Faller avec les correctifs.

Mes réalisations ont principalement été les suivantes:

✓ développer un module d'analyse statistique permettant de calculer les grandeurs d'intérêt en turbulence (moyennes, moments, probabilités, probabilités conditionnelles, corrélations)

Tâches assignées

L'équipe dispose d'une nouvelle base de données SFEMaNS (1.1 TB) répliquant les calculs de Faller avec les correctifs.

Mes réalisations ont principalement été les suivantes:

- ✓ développer un module d'analyse statistique permettant de calculer les grandeurs d'intérêt en turbulence (moyennes, moments, probabilités, probabilités conditionnelles, corrélations)
- ✓ pouvoir appliquer ce module sur des bases de données géantes

Tâches assignées

L'équipe dispose d'une nouvelle base de données SFEMaNS (1.1 TB) répliquant les calculs de Faller avec les correctifs.

Mes réalisations ont principalement été les suivantes:

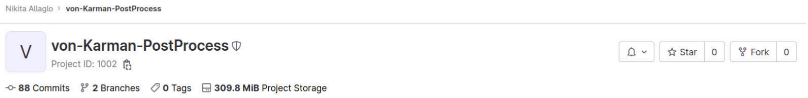
- ✓ développer un module d'analyse statistique permettant de calculer les grandeurs d'intérêt en turbulence (moyennes, moments, probabilités, probabilités conditionnelles, corrélations)
- ✓ pouvoir appliquer ce module sur des bases de données géantes
- ✓ déterminer l'origine du jet de corrélations chez Faller

Tâches assignées

L'équipe dispose d'une nouvelle base de données SFEMaNS (1.1 TB) répliquant les calculs de Faller avec les correctifs.

Mes réalisations ont principalement été les suivantes:

- ✓ développer un module d'analyse statistique permettant de calculer les grandeurs d'intérêt en turbulence (moyennes, moments, probabilités, probabilités conditionnelles, corrélations)
- ✓ pouvoir appliquer ce module sur des bases de données géantes
- ✓ déterminer l'origine du jet de corrélations chez Faller



2 branches permettant d'optimiser CPUs/GPUs.

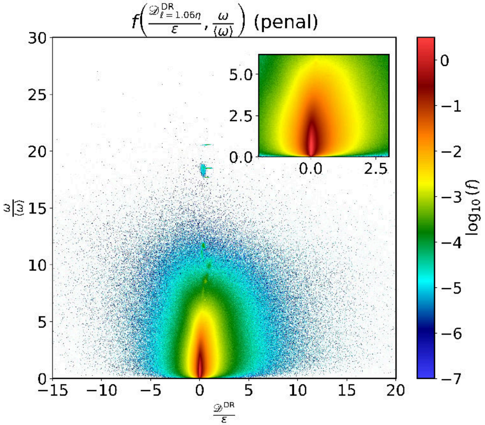
https://gitlab.lisn.upsaclay.fr/allaglo/von-karman-postprocess

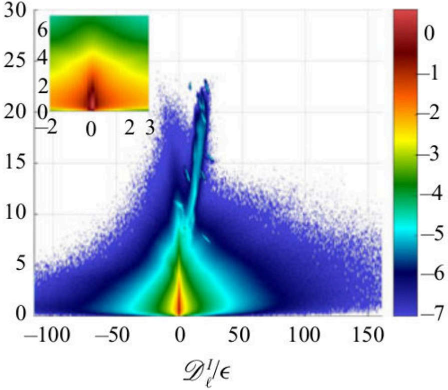
Plan de la présentation

1. La turbulence hydrodynamique
   - Nombre de Reynolds
   - Dissipation anormale
   - Formulation faible
2. Problématique du stage
   - Géométrie de l'écoulement de von-Karman et simulations numériques
   - Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)
   - Tâches assignées
3. Résultats
   - Comparaison des probabilités jointes numériques
   - Comparaison des probabilités jointes numériques et expérimentales
   - Comparaison entre $\mathscr{D}_\ell^u$ et $\mathscr{D}_\ell^I (= \mathscr{D}_\ell^{\mathrm{DR}})$

Comparaison des probabilités jointes numériques

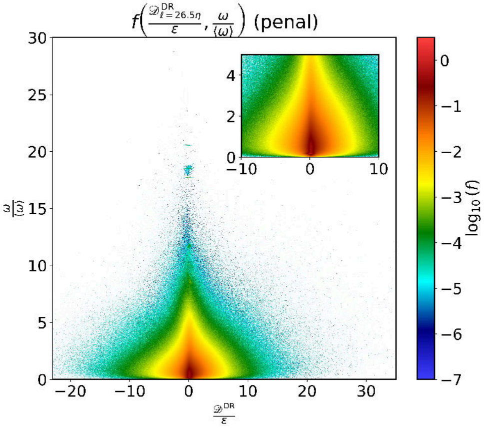
$\ell = 1.06\eta$ (GAUCHE: Allaglo; DROITE: Faller et al.)

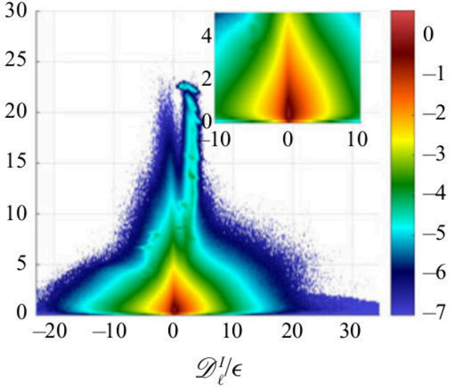




Comparaison des probabilités jointes numériques

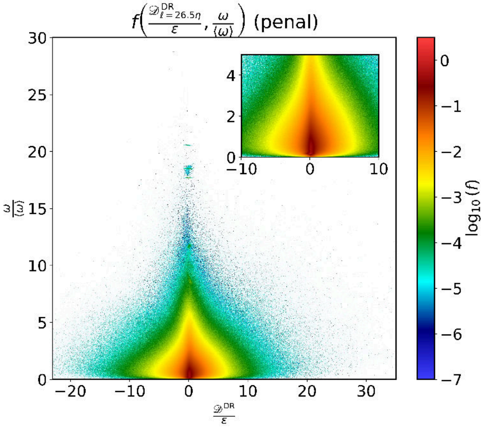
$\ell = 26.5\eta$ (GAUCHE: Allaglo; DROITE: Faller et al.)

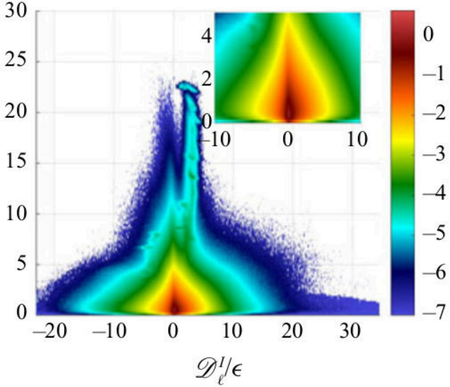




Comparaison des probabilités jointes numériques

$\ell = 26.5\eta$ (GAUCHE: Allaglo; DROITE: Faller et al.)

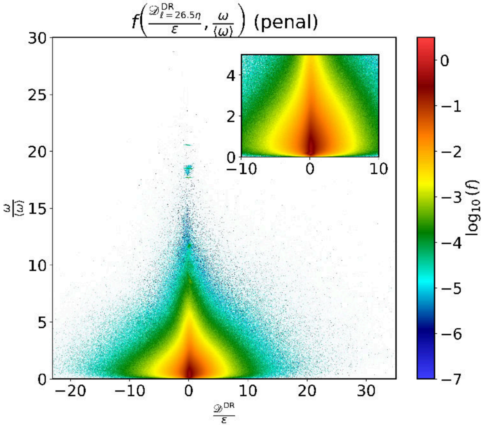


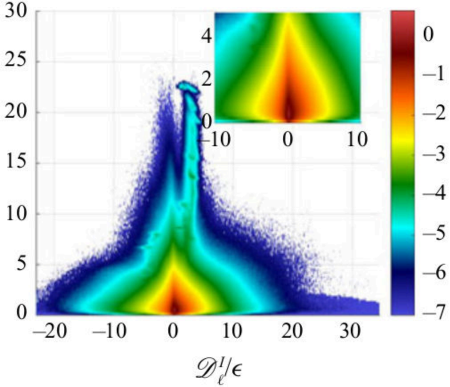


✓ Validation du module `von-Karman-PostProcess`

Comparaison des probabilités jointes numériques

$\ell = 26.5\eta$ (GAUCHE: Allaglo; DROITE: Faller et al.)

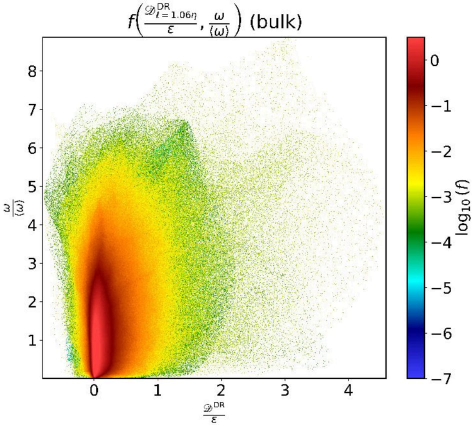


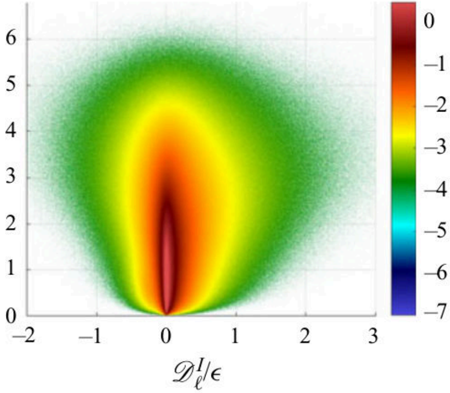


- ✓ Validation du module `von-Karman-PostProcess`
- ✓ $\overline{u}^\ell \not\to u$ sur l'axe

Comparaison des probabilités jointes numériques et expérimentales

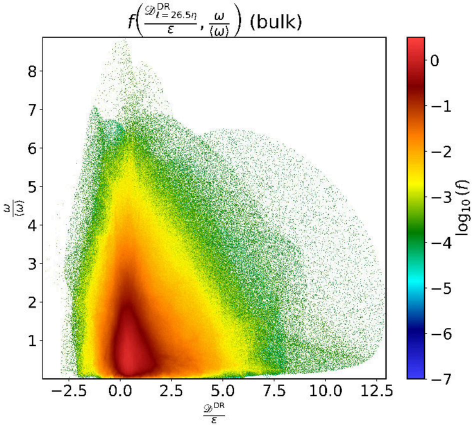
GAUCHE: Allaglo, $\ell = 1.06\eta$; DROITE: Faller et al., $\ell = 3.2\eta$

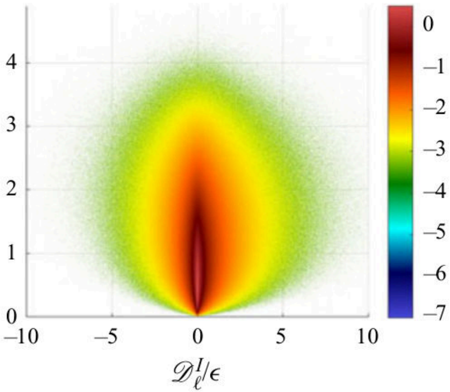




Comparaison des probabilités jointes numériques et expérimentales

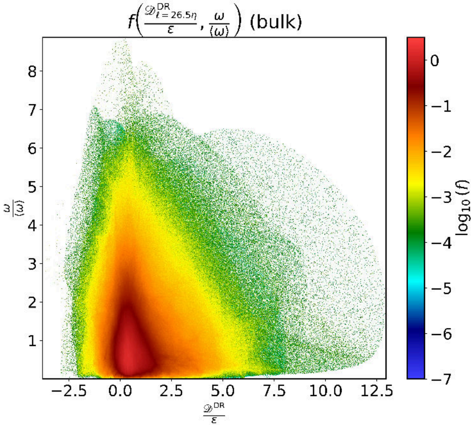
GAUCHE: Allaglo, $\ell = 26.5\eta$; DROITE: Faller et al., $\ell = 17.9\eta$

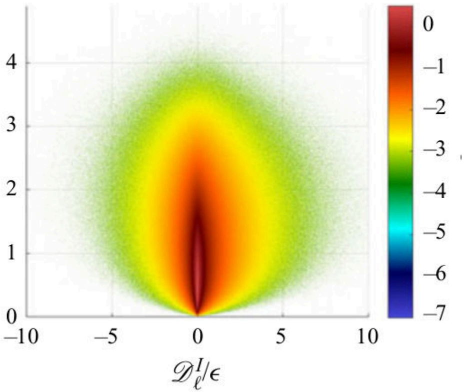




Comparaison des probabilités jointes numériques et expérimentales

GAUCHE: Allaglo, $\ell = 26.5\eta$; DROITE: Faller et al., $\ell = 17.9\eta$

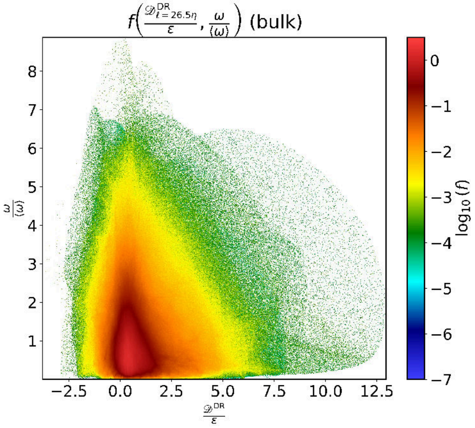


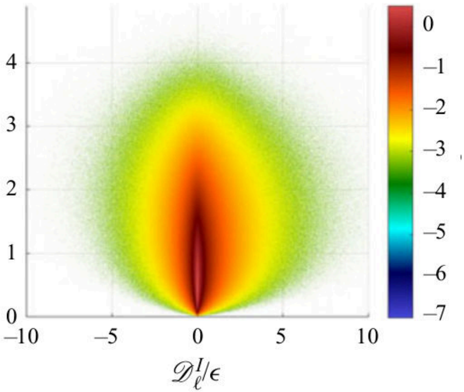


✓ Dissymétrie plus marquée à basses échelles pour num. et exp.

Comparaison des probabilités jointes numériques et expérimentales

GAUCHE: Allaglo, $\ell = 26.5\eta$; DROITE: Faller et al., $\ell = 17.9\eta$

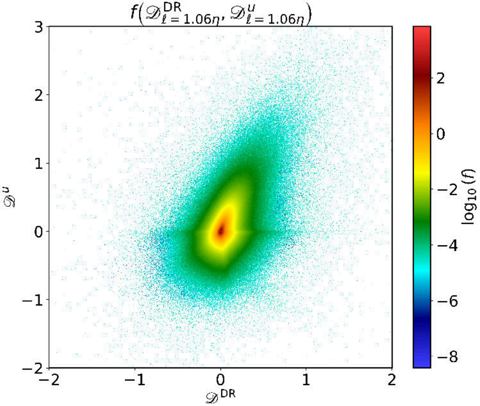


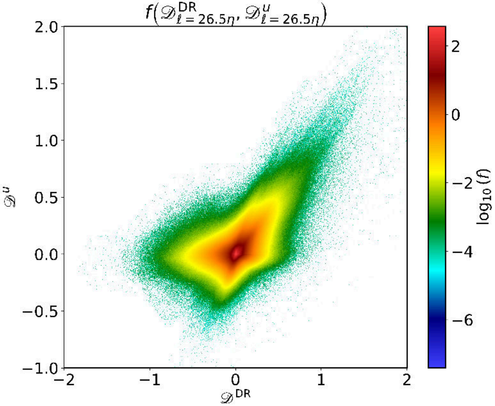


✓ Dissymétrie plus marquée à basses échelles pour num. et exp.

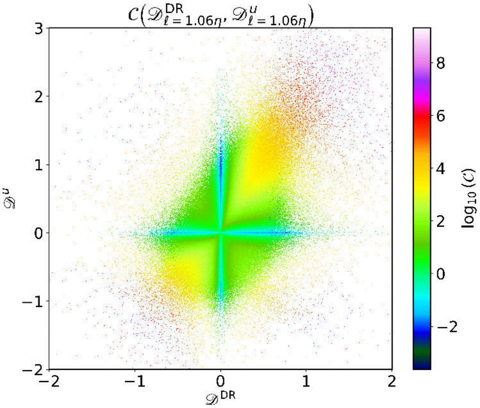
✓ Cascade mieux mise en évidence numériquement

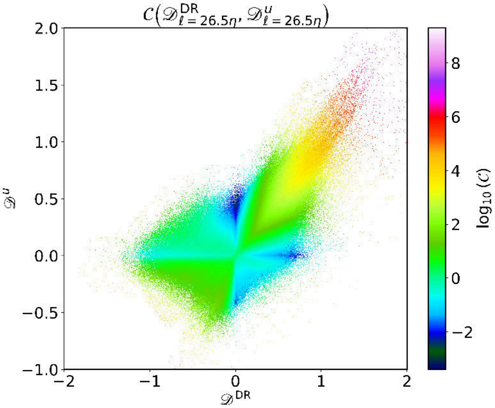
$\mathscr{D}_\ell^u$ vs $\mathscr{D}_\ell^I (= \mathscr{D}_\ell^{\mathrm{DR}})$ (probabilités)



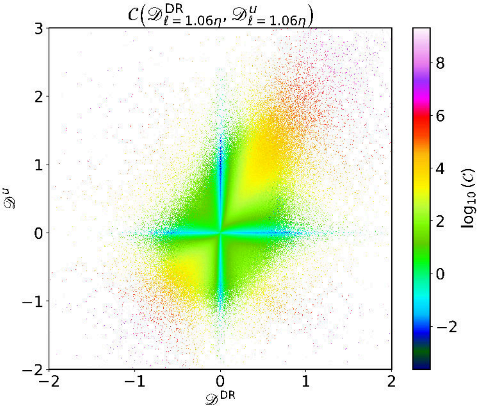


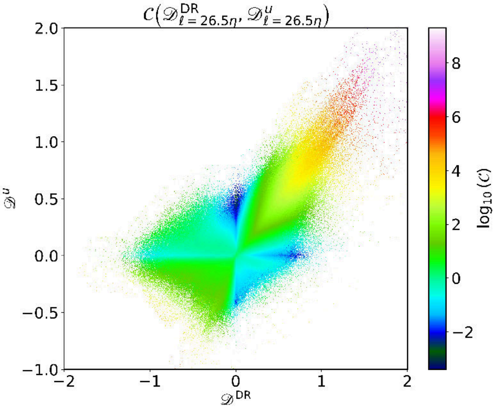
$\mathscr{D}_\ell^u$ vs $\mathscr{D}_\ell^I (= \mathscr{D}_\ell^{\mathrm{DR}})$ (corrélations)





$\mathscr{D}_\ell^u$ vs $\mathscr{D}_\ell^I (= \mathscr{D}_\ell^{\mathrm{DR}})$ (corrélations)





✓ Terme de divergence brouille les réels transferts

Conclusion

☞ Développement d'un module d'analyse statistique efficace et déployable sur de massives données SFEMaNS

Conclusion

- ☞ Développement d'un module d'analyse statistique efficace et déployable sur de massives données SFEMaNS
- ☞ Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021)

Conclusion

- ☞ Développement d'un module d'analyse statistique efficace et déployable sur de massives données SFEMaNS
- ☞ Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021):
  - ✓ Détermination d'une origine multifactorielle de l'étrange jet de corrélations

Conclusion

- ☞ Développement d'un module d'analyse statistique efficace et déployable sur de massives données SFEMaNS
- ☞ Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021):
  - ✓ Détermination d'une origine multifactorielle de l'étrange jet de corrélations
  - ✓ Meilleure mise en évidence de la cascade énergétique par les dissymétries

Conclusion

- ☞ Développement d'un module d'analyse statistique efficace et déployable sur de massives données SFEMaNS
- ☞ Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021):
  - ✓ Détermination d'une origine multifactorielle de l'étrange jet de corrélations
  - ✓ Meilleure mise en évidence de la cascade énergétique par les dissymétries
  - ✓ Confirmation de la pertinence de $\mathscr{D}_\ell^u$ vis à vis de l'usuelle dissipation anormale

Conclusion

- ☞ Développement d'un module d'analyse statistique efficace et déployable sur de massives données SFEMaNS
- ☞ Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021):
  - ✓ Détermination d'une origine multifactorielle de l'étrange jet de corrélations
  - ✓ Meilleure mise en évidence de la cascade énergétique par les dissymétries
  - ✓ Confirmation de la pertinence de $\mathscr{D}_\ell^u$ vis à vis de l'usuelle dissipation anormale
- ☞ Implémentation d'un nouvel outil statistique (corrélations) facilitant l'analyse

Conclusion

- ☞ Développement d'un module d'analyse statistique efficace et déployable sur de massives données SFEMaNS
- ☞ Faller *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **914**, 2 (2021):
  - ✓ Détermination d'une origine multifactorielle de l'étrange jet de corrélations
  - ✓ Meilleure mise en évidence de la cascade énergétique par les dissymétries
  - ✓ Confirmation de la pertinence de $\mathscr{D}_\ell^u$ vis à vis de l'usuelle dissipation anormale
- ☞ Implémentation d'un nouvel outil statistique (corrélations) facilitant l'analyse
- ☞ D'autres résultats à désormais analyser: $\mathscr{D}_\ell^u$ vs ω pour mieux étudier la conjecture d'Onsager

Remerciements

Merci de votre attention!