

Transition de phase entre turbulence et écoulements zonaux

Pierre L. Guillon^{1,2}, Özgür D. Gürçan¹

¹ Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS, Ecole Polytechnique, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Observatoire de Paris, F-91120 Palaiseau, France

² École des Ponts, 77455 Marne-la-Vallée Marne-la-Vallée cedex 2, France
 pierre.guillon@lpp.polytechnique.fr

Le système de Hasegawa-Wakatani est un modèle simplifié de turbulence bi-dimensionnelle qui décrit l'évolution des fluctuations de potentiel électrostatique et de densité dans les plasmas magnétisés de tokamaks [1]. Dans ce système, une instabilité linéaire d'onde de dérive due à un gradient de densité génère de la turbulence 2D, qui peut s'auto-organiser en *écoulements zonaux* cisailés et uni-dimensionnels.

Les deux paramètres linéaires du modèle, à savoir le paramètre d'adiabaticité C qui couple les fluctuations de potentiel électrostatique à celles de la densité, et le gradient de densité κ , contraignent le régime dans lequel le système se trouve. Pour $C/\kappa \ll 1$, le système est proche de la turbulence 2D isotropique, un état désordonné "chaud". En revanche, pour $C/\kappa \gtrsim 1$, il est dominé par les écoulements zonaux et devient quasiment 1D. On peut alors l'apparenter à une structure cristalline "froide".

A l'aide de simulations numériques, nous étudions la transition de phase entre ces deux régimes, en identifiant C/κ comme paramètre de contrôle de la transition, et la fraction d'énergie cinétique contenue dans les écoulements zonaux Ξ_κ comme paramètre d'ordre [2]. Nous mettons en évidence une *hysteresis* que présente le système autour du point de transition, illustrée en Figure 1, ce qui suggère l'existence d'une *chaleur latente* nécessaire pour "détruire" la structure zonale, une fois celle-ci formée.

Nous développons ensuite un modèle réduit, constitué de 12 modes de Fourier, qui semble être le modèle minimal capable de reproduire cette transition, car il contient des mécanismes non-linéaires de transfert d'énergie vers les écoulements zonaux, mais aussi vers les grandes échelles turbulentes.

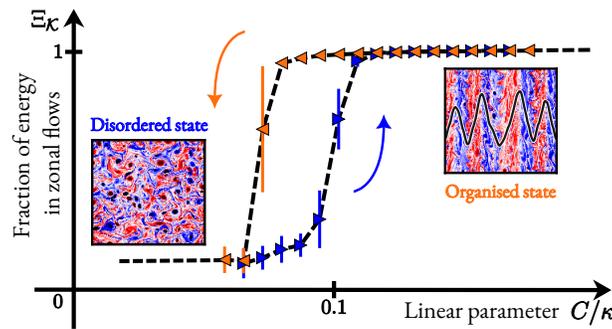


Figure 1. Figure synthétique de l'hysteresis observée lors de la transition de phase entre la turbulence 2D (état "chaud") et le système quasi-1D dominé par les écoulements zonaux (état "froid"). Le paramètre d'ordre est la fraction d'énergie contenue dans les écoulements zonaux Ξ_κ et le paramètre de contrôle est C/κ .

Références

1. A. HASEGAWA & M. WAKATANI, Plasma edge turbulence, (*Phys. Rev. Lett.*), **50**, 682 (1983).
2. P. L. GUILLON & Ö. D. GÜRÇAN, Phase transition from turbulence to zonal flows in the Hasegawa-Wakatani system, (*Phys. Plasmas*) , **32**, (1) : 012306 (2025).