

# Observation d'ondes de Riemann aléatoires en turbulence intégrable : une expérience d'optique

F. Gustave<sup>1</sup>, G.A. El<sup>2</sup>, P. Suret<sup>1</sup>, S. Randoux<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France

<sup>2</sup> Centre for Nonlinear Mathematics and Applications, Department of Mathematical Sciences, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, United Kingdom

francois.gustave@univ-lille1.fr

La turbulence intégrable, introduite par Zakharov [1], traite de l'évolution statistique d'un ensemble d'ondes non-linéaires se propageant dans des systèmes décrits par des équations intégrables. Nous analysons ici la turbulence intégrable du point de vue de l'hydrodynamique dispersive en réalisant une expérience d'optique dans laquelle les effets non-linéaires dominent largement les effets linéaires dispersifs[2].

La propagation non-linéaire dans la fibre optique que nous utilisons est très bien décrite par l'équation (intégrable) de Schrödinger Non Linéaire à une dimension (NLS-1D) en régime défocalisant. Partant de NLS-1D, nous dérivons les équations hydrodynamiques d'ondes en eau peu profonde, transposant ainsi le problème optique à un problème d'hydrodynamique. Les variables hydrodynamiques  $\rho$  et  $u$  représentant respectivement la hauteur et la vitesse du fluide, correspondent alors à la puissance ( $\rho = |\psi|^2$ ) et la dérivée de la phase ( $u = \partial_t \phi$ ) de l'onde optique. En introduisant les invariants de Riemann  $r_{1,2} = u \pm \sqrt{\rho}$  [3] comme nouvelles variables, il est possible de réécrire le système d'équation sous la forme de deux ondes de Riemann faiblement couplées. Dans les conditions expérimentales, la condition  $u \ll \sqrt{\rho}$  est satisfaite tout au long de la propagation, ce qui nous permet de réécrire le système d'équation sous la forme de deux ondes de Riemann découplées :

$$\frac{\partial r_i}{\partial \xi} + \frac{r_i}{2} \frac{\partial r_i}{\partial \tau} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Les deux ondes de Riemann se propagent dans des directions opposées avec une vitesse dépendant de l'amplitude, impliquant un raidissement des fronts au cours de leur évolution suivant  $\xi$ . Bien que la statistique des variables hydrodynamiques évolue considérablement au cours de la propagation [4], celle des invariants de Riemann est presque stationnaire [5] durant l'évolution initiale, faisant de ces dernières des variables statistiques appropriées dans le contexte de la turbulence intégrable.

Afin de capturer expérimentalement ces comportements dynamiques et statistiques, nous avons réalisé une expérience dans laquelle une onde partiellement cohérente (aléatoire) est injectée dans une fibre optique en régime fortement non linéaire. Le système de détection alliant technique hétérodyne et multiplexage temporel nous permet de suivre l'évolution de l'onde entre l'entrée et la sortie de la fibre optique. Nous présentons ainsi la première observation d'ondes de Riemann aléatoires. Bien que les contraintes expérimentales limitent nos observations au début de l'évolution, les simulations numériques montrent que ces résultats sont valables jusqu'au *wave-breaking*, bien au delà des approximations utilisées pour obtenir le système (1), ouvrant la voie à de nouvelles études sur la théorie des ondes de Riemann aléatoires.

## Références

1. V.E. Zakharov, "Turbulence in Integrable Systems", Stud. Appl. Math. 122, 219-234 (2009)
2. S. Randoux *et al.*, "Observation of Optical Random Riemann Waves in Integrable Turbulence", arXiv :1702.00006 (2017)
3. G. B. Whitham, "Linear and nonlinear waves", vol. 42 (John Wiley & Sons, 2011)
4. S. Randoux *et al.*, "Nonlinear random optical waves : Integrable turbulence, rogue waves and intermittency", Physica D, 333(2016)
5. S. N. Gurbatov *et al.*, "Nonlinear random waves and turbulence in nondispersive media : waves, rays, particles", Manchester University Press (1991)