



**HAL**  
open science

## Évènements extrêmes et turbulence optique

Kamal Hammani, Bertrand Kibler, Christophe Finot, Antonio Picozzi

► **To cite this version:**

Kamal Hammani, Bertrand Kibler, Christophe Finot, Antonio Picozzi. Évènements extrêmes et turbulence optique. 29<sup>èmes</sup> Journées Nationales de l'Optique Guidée, Oct 2010, Besançon, France. pp.104-106. <hal-00515129>

**HAL Id: hal-00515129**

**<https://hal.science/hal-00515129v1>**

Submitted on 31 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# EVENEMENTS EXTREMES ET TURBULENCE OPTIQUE

**Kamal Hammani, Bertrand Kibler, Christophe Finot et Antonio Picozzi**

*Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 5209 – CNRS - Université de Bourgogne,  
9 avenue A. Savary, 21078 Dijon, France*

Kamal.Hammani@u-bourgogne.fr

## RÉSUMÉ

Nous montrons l'impact de l'incohérence dans un système hamiltonien sur l'émergence d'événements extrêmes de types ondes scélérates, en analysant l'évolution à long terme du champ optique. Trois régimes sont identifiés: le premier (i) est caractérisé par des ondes persistantes, le second (ii) est marqué par des ondes intermittentes et le dernier (iii) par de rares ondes sporadiques.

**MOTS-CLEFS :** *cohérence ; optique statistique ; soliton ; événements extrêmes*

## 1. INTRODUCTION

Depuis 2007 et la première observation de statistiques analogues aux vagues scélérates [1] dans les fibres optiques [2], des études ont progressivement précisé le rôle joué par les effets de dispersion d'ordre 3 [3], d'instabilité de modulation [2], ou encore par les collisions de solitons [4] et de breathers [5], dans l'existence d'une distribution statistique extrême en optique. Nous proposons ici une approche nouvelle dans la compréhension des ondes scélérates optiques. Notre démarche repose sur l'étude de l'impact du degré d'incohérence dans le système non linéaire. Nous pouvons ainsi identifier trois régimes qui mènent à l'émergence d'ondes spécifiques.

## 2. MODELE NUMERIQUE

Nous considérons l'équation de Schrödinger non linéaire (ESNL) en présence de la dispersion d'ordre 3:

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + i\sigma \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} - |u|^2 u \quad (1)$$

Le problème est normalisé selon la longueur non linéaire  $L_0 = 1/\gamma P$  et le temps  $\tau_0 = (\beta_2 L_0)^{1/2}$ , avec  $\gamma$  la non-linéarité,  $P$  la puissance moyenne et  $\beta_2$  la dispersion d'ordre 2. Dans ce cas, la dispersion normalisée d'ordre 3 s'écrit  $\sigma = \beta_3 / (6 L_0^{1/2} \beta_2^{3/2})$ . Rappelons que l'ESNL conserve trois quantités importantes : la puissance normalisée  $N = \int |u(t)|^2 dt$ , la quantité de mouvement  $M = \int \omega |u(\omega)|^2$ , et l'énergie donnée par l'Hamiltonien  $H = H_L + H_{NL}$ , qui a une contribution linéaire (dispersive) dite cinétique  $H_L = \int k(\omega) |u(\omega)|^2 d\omega$  et une contribution non linéaire  $H_{NL} = -1/2 \int |u(t)|^4 dt$ , avec  $k(\omega) = \omega^2/2 - \sigma \omega^3$  qui est la relation de dispersion linéaire. Il est bien connu que cette équation admet des solutions de type (quasi-) solitons : en présence du terme de dispersion d'ordre 3, la solution standard de type soliton perd lentement son énergie *via* un processus analogue aux radiations de Cherenkov [6].

Un système d'ondes Hamiltonien *non intégrable* exhibe, en règle générale, un processus de thermalisation [7,8] caractérisé par une évolution irréversible de l'onde vers un état d'équilibre dans lequel un (quasi-)soliton reste immergé dans une mer de fluctuations de faible amplitude. Précisons qu'en général, la formation d'une structure cohérente est possible à condition que la quantité d'incohérence dans le système ne soit pas trop grande. Dans notre étude, une mesure naturelle de l'incohérence du système est donnée par l'Hamiltonien. Sur la base de travaux antérieurs sur la condensation d'ondes incohérentes [9], nous étudions ici la transition d'un régime soliton cohérent vers un régime totalement turbulent [8] par l'augmentation de « l'énergie » (Hamiltonien)  $H$  du système.

Nous avons donc mené des simulations numériques intensives de résolution de l'équation 1. Contrairement aux études précédentes qui regardent le système à une distance donnée pour différents bruits initiaux, nous nous sommes intéressés à l'évolution à long terme (typiquement  $z \sim 2000 L_0$ ).

### 3. OBSERVATION DE TROIS REGIMES DISTINCTS

Sur la Fig. 1(a), la moyenne des intensités crêtes maximums détectées dans la fenêtre temporelle sur les dernières longueurs non-linéaires de la propagation (c'est-à-dire environ  $500 L_0$ ) est représentée en fonction de l'énergie conservée  $H$ . Comme en condensation, il existe ici, un seuil  $H_c$  ( $\sim 15$ ) au delà duquel les quasi-solitons ne sont plus générés: *le système est 'trop chaud' pour pouvoir générer une structure cohérente quasi-soliton*. Trois régimes sont identifiables. Pour  $H \leq 5$ , nous retrouvons le régime connu du quasi-soliton (régime (i)) où un quasi-soliton de grande amplitude 'baigne' dans une mer turbulente. La Fig. 1(b) représente le diagramme espace-temps en intensité sur les 10 dernières longueurs non-linéaires. Les fonctions de distribution de probabilité (PDF) de l'intensité du champ et des maxima d'intensité sont représentées en Fig. 1(c). La statistique du champ dévie fortement d'une statistique gaussienne (i.e.,  $f_I(I) = \exp(-I)$  avec nos unités normalisées) du fait de la localisation de la puissance dans le quasi-soliton. Ceci est confirmé par la PDF des maxima d'intensité qui est centrée à 30 et présente une faible largeur et une forme symétrique confirmant ainsi le caractère persistant de la structure soliton.

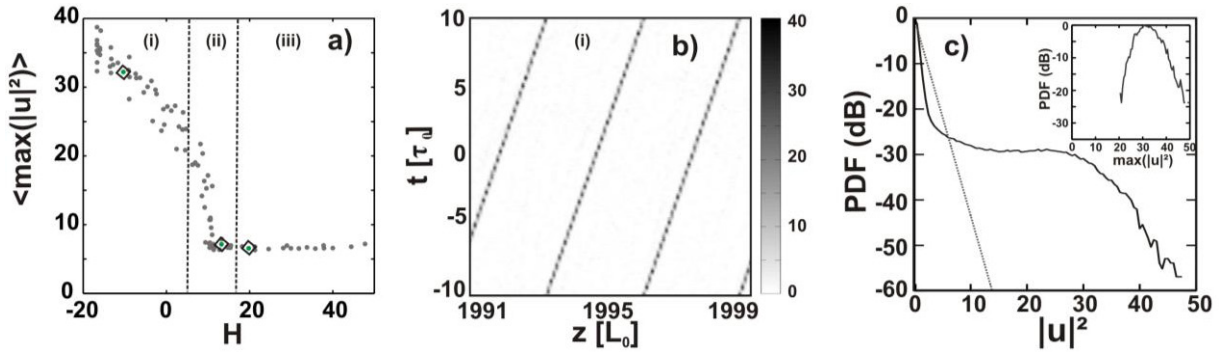


Fig. 1. (a) Moyenne des intensités crêtes maximums détectées sur les 500 dernières longueurs de propagation en fonction de l'Hamiltonien  $H$  pour  $\sigma = 0,02$ . Régime (i) : (b) diagramme temps-distance en intensité montrant un quasi-soliton se propageant pour  $H = -10,3$ . (c) PDF de l'intensité du champ et des maxima en intensité (en encadré). La droite grise représente la statistique d'un champ gaussien.

Pour  $H$  compris environ entre 5 et 15, le système entre dans le second régime (ii) dans lequel le quasi-soliton présente une dynamique intermittente. Ceci est clairement visible sur la Fig. 2(a1) où le quasi-soliton apparaît et disparaît durant la propagation. Notons que malgré le comportement intermittent, la trajectoire du quasi-soliton est encore clairement identifiable. Comme dans le régime (i), le champ ne présente pas une statistique gaussienne, Fig. 2(a2). Cependant, la PDF des maxima d'intensité devient relativement plus large et asymétrique. Ceci est dû à la non persistance de la structure qui subit de fortes fluctuations tendant à favoriser une queue vers les hautes intensités.

Enfin, pour  $H \geq 15$ , le système entre dans un régime (iii) fortement incohérent et faiblement non-linéaire. Le diagramme spatio-temporel associé en Fig. 2(b1) révèle que des événements rares et extrêmes et de courte durée de vie peuvent émerger du champ turbulent. Pour ce qui est de la statistique du champ, la Fig. 2(b2) montre qu'elle est proche d'une statistique gaussienne du fait de la forte incohérence du système. Toutefois une légère déviation à la statistique gaussienne est visible dans la pointe de la queue confirmant l'existence d'événements extrêmes. Ceci est corroboré par la PDF des maxima d'intensité en Fig. 2(b2) qui présente une forme asymétrique marquée. Notons qu'une telle PDF vérifie le critère hydrodynamique usuel qui définit une vague scélérate comme étant une vague au moins deux fois supérieure à la moyenne du tiers des plus hautes vagues.

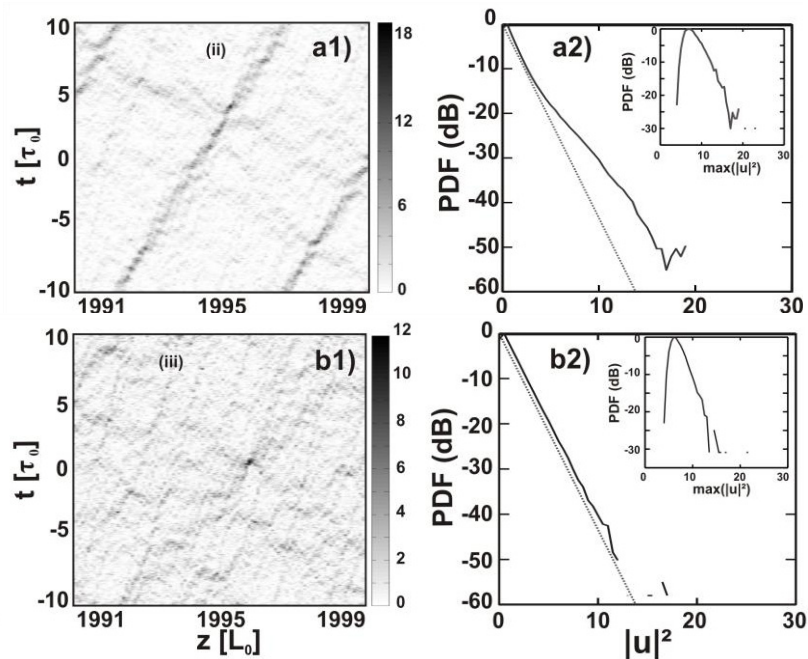


Fig. 2. Régime (ii) : a1) diagramme temps-distance en intensité montrant un quasi-soliton se propageant pour  $H=13,3$ . a2) PDF de l'intensité du champ correspondant et des maxima en intensité (en encadré). La droite grise représente la statistique d'un champ gaussien. Régime (iii) : b1) diagramme temps-distance en intensité pour  $H=19,5$ . b2) PDF de l'intensité du champ correspondant et des maxima en intensité (en encadré).

## CONCLUSION

En conclusion, nous avons montré l'émergence spontanée d'événements extrêmes à partir de fluctuations turbulentes. Selon le degré d'incohérence dans le système non linéaire étudié, il est possible de distinguer trois régimes distincts. Deux de ces régimes ont la particularité de présenter des structures soit intermittentes, soit sporadiques. Dans les deux cas, des ondes extrêmes sont observées et semblent présenter des propriétés analogues aux vagues scélérates. Nous présenterons également l'impact du paramètre de dispersion d'ordre 3 en faisant varier  $\sigma$ .

## REFERENCES

- [1] C. Kharif, E. Pelinovsky and A. Slunyaev, *Rogue Waves in the Ocean*, (Springer-Verlag, Heidelberg, 2009).
- [2] D. R. Solli, C. Ropers, P. Koonath and B. Jalali, "Optical rogue waves," *Nature* 450, 1054-1057 (2007).
- [3] M. Taki, A. Mussot, A. Kudlinski, E. Louvergnaux, M. Kolobov and M. Douay, "Third-order dispersion for generating optical rogue solitons," *Phys. Lett. A* 374, 691-695 (2010).
- [4] G. Genty, C.M. de Sterke, O. Bang, F. Dias, N. Akhmediev and J.M. Dudley, "Collisions and turbulence in optical rogue wave formation," *Phys. Lett. A* 374, 989-996 (2010).
- [5] N. Akhmediev, J.M. Soto-Crespo and A. Ankiewicz, "Extreme waves that appear from nowhere: On the nature of rogue waves," *Phys. Lett. A* 373, 2137-2145 (2009).
- [6] N. Akhmediev and M. Karlsson, "Cherenkov radiation emitted by solitons in optical fibers," *Phys. Rev. A* 51, 2602-2607 (1995).
- [7] A. Picozzi, "Towards a nonequilibrium thermodynamic description of incoherent nonlinear optics," *Opt. Express* 15, 9063-9083 (2007).
- [8] V. Zakharov, F. Dias and A. Pushkarev, "One-dimensional wave turbulence," *Phys. Reports* 398, 1-65 (2004).
- [9] C. Connaughton, C. Josserand, A. Picozzi, Y. Pomeau, and S. Rica, "Condensation of Classical Nonlinear Waves," *Phys. Rev. Lett.* 95, 263901 (2005).
- [10] K. Hammani, B. Kibler, C. Finot and A. Picozzi, "Emergence of rogue waves from optical turbulence," *Phys. Lett. A* (sous presse).