

LES FIBRES OPTIQUES POUR SIMULER LES phénomènes hydrodynamiques avec la lumière

Bertrand KIBLER
Julien FATOME
Kamal HAMMANI
Guy MILLOT
Christophe FINOT
christophe.finot@u-bourgogne.fr

En exploitant l'analogie entre les mondes hydrodynamique et optique, les solitons optiques dans les fibres en verre de silice ont pu mimer les vagues solitaires. D'autres types de vagues peuvent bénéficier d'une telle analogie. Les vagues scélérates ou bien encore les mascarets ont ainsi trouvé leurs équivalents en optique guidée et ont été découverts grâce à des dispositifs utilisant les technologies des télécommunications optiques ultrarapides.

Dans la nature, l'énergie peut se propager sans forcément déplacer de la matière. C'est le concept d'onde dont les manifestations sont aussi diverses que quotidiennes. L'exemple le plus visuel

d'onde reste sûrement l'onde hydrodynamique. Si chacun a en mémoire la douce vague de ses vacances, il existe d'autres vagues aux caractéristiques bien plus surprenantes et parfois encore mystérieuses, comme

le mascaret capable de remonter les courants dans les estuaires, la vague solitaire ou bien encore les vagues scélérates. Le comportement de toutes ces vagues ne s'interprète correctement qu'en prenant en compte deux phénomènes physiques bien distincts : la dispersion et la non-linéarité. Ces deux ingrédients affectent également la lumière évoluant dans une fibre optique. Dès lors, il est possible de dresser des analogies entre ces deux domaines de recherche *a priori* très différents, l'un régi par les équations de Navier-Stokes, l'autre par les équations de Maxwell.

Des ondes non-linéaires hydrodynamiques et optiques

La première onde dont la nature intrinsèquement non-linéaire a été scientifiquement identifiée est le soliton (*figure 1*). Dès 1834, J.S. Russel rapportait l'existence d'une vague capable de se propager identique à elle-même sur plusieurs kilomètres. Ce comportement reproduit par Bazin en 1863 dans le bief du canal de Bourgogne résulte d'une compensation exacte de la dispersion par l'action de la non-linéarité. Une telle caractéristique a suscité l'intérêt de l'industrie des

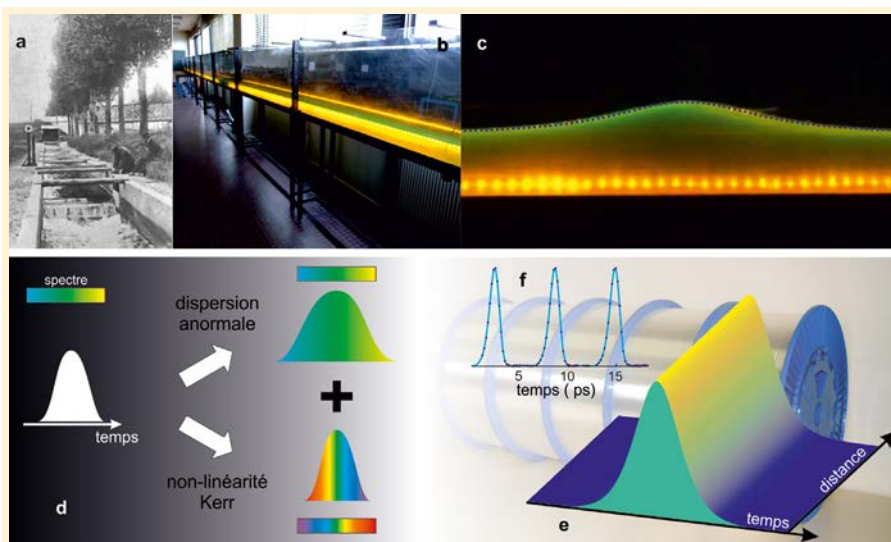


Figure 1. Solitons hydrodynamiques et optiques. (a) Expériences sur le soliton menées dans un bief du canal de Bourgogne à Dijon au XIX^e siècle. (b)-(c) Soliton hydrodynamique généré dans un canal de l'université de Bourgogne : le profil spatial de la vague caractéristique est correctement reproduit par une sécante hyperbolique (pointillé bleu). (d) Dans une fibre optique, la dispersion et la non-linéarité réorganisent la position des fréquences composant une impulsion : la dispersion anormale place ainsi les hautes fréquences en tête de l'impulsion désormais élargie temporellement et pousse les basses fréquences en queue, sans toutefois générer de nouvelles fréquences. La non-linéarité crée elle de nouvelles fréquences dans le spectre, les fréquences les plus basses apparaissant dans le front montant, les plus hautes dans le front descendant. (e) Évolution d'un soliton optique : dans ce cas particulier, les conséquences de la dispersion anormale compensent très exactement les effets de la non-linéarité. (f) Train de solitons à haute cadence.

small components
 MASSIVE IMPACT


Fiber Optics

- Fiber Optical Couplers
- Collimators and Connectors
- Assembled Fibers

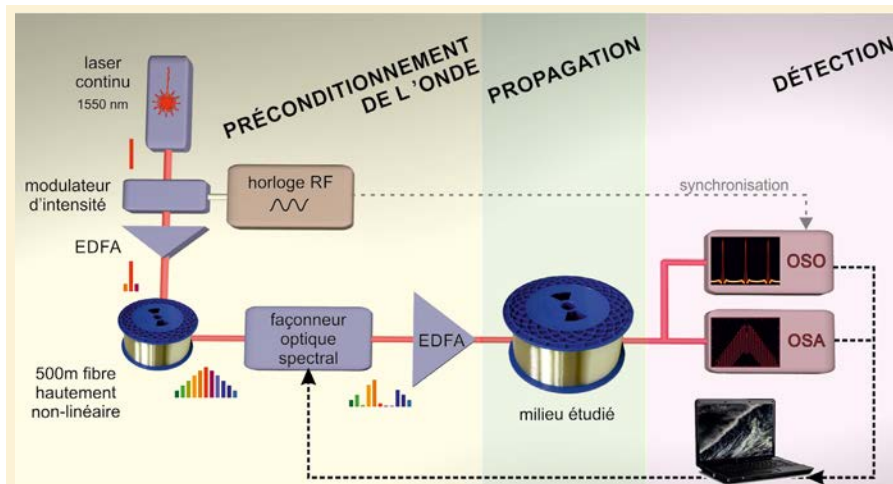


Figure 2. Dispositif expérimental typique basé exclusivement sur des éléments de l'industrie des télécommunications optiques. EDFA : amplificateur à fibre dopée erbium ; OSO : oscilloscope à échantillonnage optique ; OSA : analyseur de spectre optique.

télécommunications : prédits en 1973 comme solutions de l'équation de Schrödinger non-linéaire, les solitons optiques ont été observés en 1980 aux Bell Labs. Générés à des cadences de plusieurs dizaines de GHz, ils constituaient en effet un support idéal pour porter les bits d'informations.

Depuis, les derniers travaux de recherche ont été réorientés théoriquement sur de nouvelles familles de solutions jusque-là très peu explorées. Leur étude laisse entrevoir des pistes d'interprétations théoriques des phénomènes hydrodynamiques très difficiles à reproduire en laboratoire, *i.e.* les ondes scélérates dont la puissance destructrice n'a d'égale que leur rareté. La fibre optique constitue alors une plateforme expérimentale simplifiée de choix pour progresser sur ces problématiques.

Dispositif expérimental

Pour observer de nouvelles structures non-linéaires cohérentes et bénéficier des récents progrès des technologies optiques picosecondes, nous avons mis en œuvre le montage expérimental générique représenté à la *figure 2* qui ne fait appel qu'à des éléments déjà disponibles commercialement. Dans un premier temps, une onde continue est façonnée pour satisfaire les conditions initiales recherchées. Cette opération repose tout d'abord

sur une modulation à une cadence de quelques dizaines de GHz suivie d'un élargissement spectral réalisé dans une fibre hautement non-linéaire. Le peigne de fréquences ainsi formé subit ensuite un modelage en intensité et en phase de ses différentes composantes. La propagation s'effectue après amplification de l'onde mise en forme. La dernière étape consiste en la détection et l'analyse du signal propagé, dans le domaine spectral ou bien temporel. Pour résoudre convenablement les détails temporels de l'ordre de la picoseconde, le recours à des solutions photoniques de nouvelle génération, tel un oscilloscope à échantillonnage optique, est indispensable.

Les solitons de Peregrine et autres solitons sur fond continu

À partir de ce montage expérimental, nous avons démontré l'existence du soliton de Peregrine, prédit dès 1983 mathématiquement par le britannique H. Peregrine dans le contexte hydrodynamique mais jamais mis en évidence expérimentalement dans aucun milieu physique. Existant en régime de dispersion anormale (propagation focalisante), le soliton de Peregrine se distingue significativement du soliton usuel par la présence d'un fond continu avec

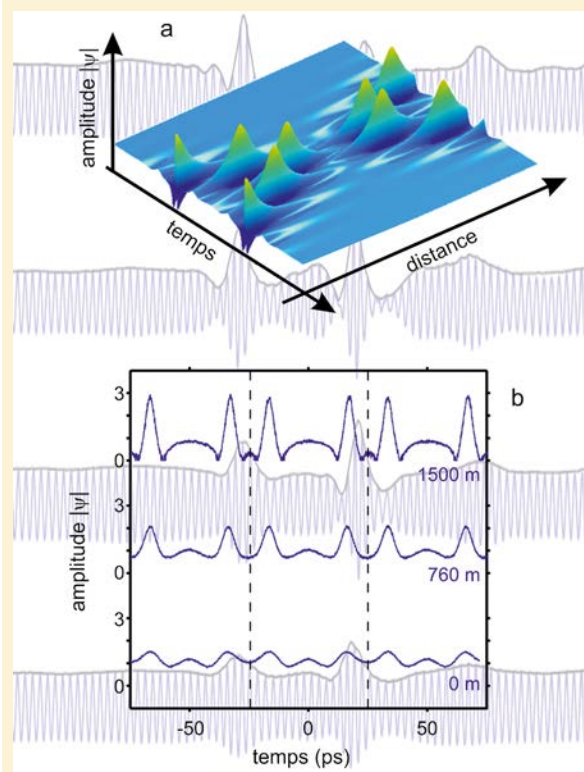
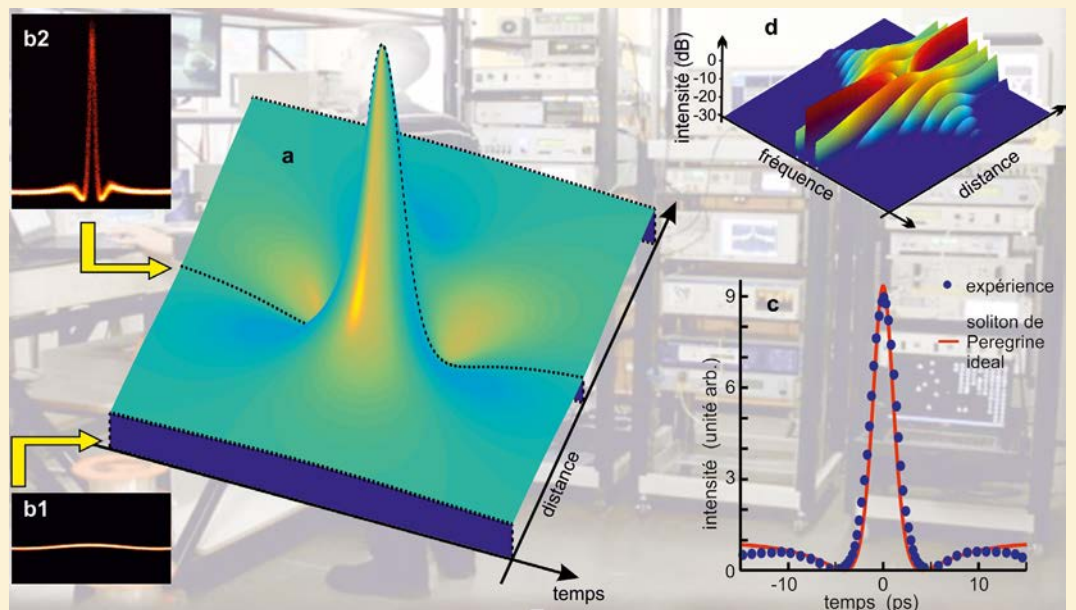
lequel il va échanger de l'énergie tout au long de sa propagation (figure 3). Ainsi, à l'image des ondes scélérates océaniques, loin d'évoluer identique à lui-même, le soliton de Peregrine semble apparaître de nulle part pour atteindre une intensité jusqu'à 9 fois celle du fond continu avant de disparaître sans laisser de trace. En 2010, les enregistrements expérimentaux réalisés ont reproduit ces propriétés avec un accord quantitatif remarquable

[2]. L'étude spectrale du soliton de Peregrine a également souligné une autre caractéristique générale des solitons dits à respiration, à savoir l'évolution symétrique par rapport au point de compression maximale, reliée à la récurrence de Fermi-Pasta-Ulam. D'autres structures non-linéaires comme le soliton de Kuznetsov-Ma ont également été mises en lumière. L'ensemble des solitons sur fond continu a inspiré un nouvel éclairage

sur le phénomène d'instabilité de modulation dans lequel une onde continue de forte puissance se brise en structures ultra-brèves et intenses.

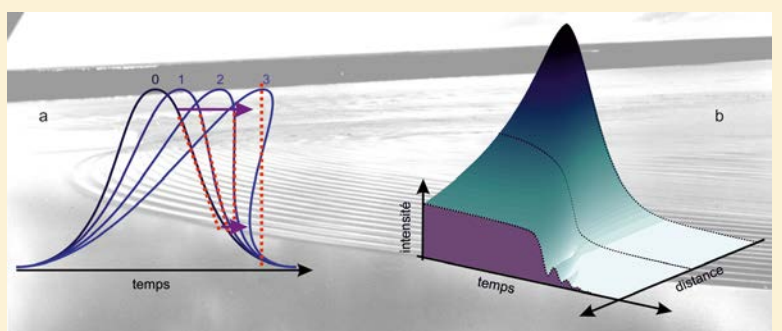
L'étape suivante était naturellement d'explorer l'interaction non-linéaire de plusieurs de ces solitons exotiques (figure 4). La maîtrise expérimentale fine des conditions initiales a ainsi permis de souligner toute la complexité et la richesse de ces interactions pouvant générer des super vagues scélérates

► **Figure 3.** Le soliton de Peregrine. (a) Évolution longitudinale théorique du profil temporel d'intensité du soliton de Peregrine. (b1) et (b2) représentent respectivement les profils expérimentaux injectés à l'entrée de la fibre et mesurés au point de compression maximale. Le détail de profil obtenu au point de compression optimal est donné en (c), confirmant l'excellent accord entre la prédiction analytique (rouge) et l'expérience (bleu). L'évolution longitudinale du spectre optique est quant à elle représentée en (d).



◀ **Figure 4.** Interaction complexe de solitons à respiration. (a) Exemple d'évolution théorique de l'interaction entre deux solitons à respiration. (b) Confirmation expérimentale : enregistrements expérimentaux à différentes distances. En fond, des mesures expérimentales menées en hydrodynamique où contrairement à l'optique, la porteuse est visible. Extrait de [3].

▽ **Figure 5.** Onde de choc optique. (a) Exemple de choc (dans le cadre de l'équation de Hopf) où le gradient du profil augmente progressivement jusqu'à tendre vers l'infini (2) et une catastrophe. (b) Illustration du phénomène similaire en optique où l'onde optique voit son gradient augmenter jusqu'à créer une catastrophe qui est ensuite régularisée par la dispersion. En fond, une photographie du phénomène hydrodynamique prise dans la rivière Araguari au Brésil. (Auteurs : Susan Bartsch-Winkler and David K. Lynch, U.S. Geological Survey Photographic Library, domaine public.)



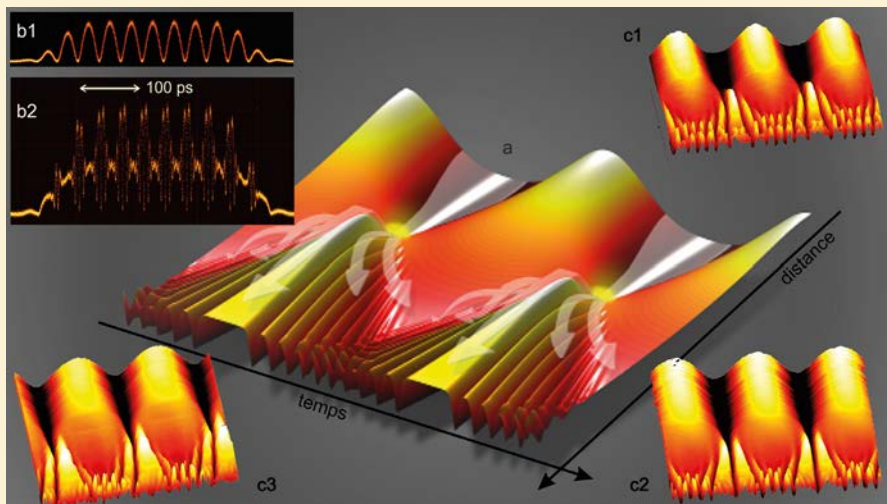


Figure 6. Mascarot optique. (a) Simulations représentant l'évolution d'un battement sinusoïdal dans une fibre optique à dispersion normale. (b) La modulation d'intensité initiale (b1) évolue en un motif complexe (b2). (c) Exemples de dynamiques expérimentales variées obtenues en jouant sur les caractéristiques de la modulation optique initiale.

Perspectives

À travers ces quelques exemples, nous soulignons tout l'intérêt présenté par l'optique non-linéaire fibrée ultrarapide pour l'étude et la compréhension des dynamiques non-linéaires. La maîtrise des conditions initiales du système et la mise en œuvre d'une détection spectro-temporelle performante ont ainsi permis de découvrir de nouvelles familles de structures cohérentes non-linéaires. La compréhension de ces structures génériques offre également de nouvelles pistes d'explications aux dynamiques turbulentes observées en présence de désordre temporel ou spatial. Si les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans le contexte d'une propagation passive scalaire, il est également possible d'exploiter les autres degrés de liberté de l'optique fibrée, comme l'existence de polarisations distinctes [6], d'un comportement multimodal ou bien d'un gain. Les configurations fibrées en cavité, qu'elles soient passives ou actives (*i.e.* un laser), ont également été explorées et ont démontré une grande richesse de comportements extrêmes [7].

Remerciements

Nous remercions les nombreux, passionnants et déterminants échanges tenus avec nos collègues J.M. Dudley, N. Akhmediev, S. Trillo, S. Wabnitz, A. Picozzi et A. Chabchoub. Les travaux présentés ici ont été soutenus par le conseil régional de Bourgogne et l'ANR (projets MANUREVA et OPTIROC) ainsi que par le Labex Action.

à l'intensité crête exaltée ou encore d'autres structures à pics multiples. Toutes les conclusions obtenues dans le domaine optique se sont vues reproduites dans des canaux hydrodynamiques d'une longueur de plusieurs dizaines de mètres, si bien que des recherches entre les deux domaines sont maintenant conjointement menées avec le concours de mathématiciens pour l'analyse théorique des phénomènes [3].

Les ondes de chocs dispersives

Les dynamiques non-linéaires sont toutes autres dans un régime de propagation défocalisant (*figure 5*). Loin de se concentrer pour former une vague géante, l'onde s'élargit et voit le gradient de son profil d'intensité croître jusqu'à l'infini. Cette divergence entraîne une catastrophe assimilable au problème de la rupture d'un barrage : l'onde se disloque et l'action de la dispersion conduit à l'apparition de nouvelles vaguelettes et à un élargissement accru. On parle alors d'un choc régularisé par la dispersion. Le mascarot constitue un autre exemple de ce type d'ondes existant en eaux peu profondes. De la même manière, toute impulsion optique évoluant dans une fibre optique en situation défocalisante (régime de dispersion normale)

voit son profil fortement altéré avec des oscillations rapides sur ses flancs.

Afin d'exploiter les analogies avec les phénomènes hydrodynamiques, nous nous sommes plus particulièrement concentrés sur l'évolution d'une série de quelques oscillations simples (*figure 6*). La dynamique défocalisante génère alors un motif complexe d'où émergent des trains de solitons sombres (*i.e.* des trous de lumière sur un fond continu). Là encore, le contrôle précis des conditions initiales permet de contrôler expérimentalement ce motif et d'observer directement dans le domaine temporel différents mouvements des constituants de ce mascarot optique [4]. D'autres équipes ont récemment étendu le champ d'études pour démontrer expérimentalement les caractéristiques d'un tsunami optique [5].

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] M. Remoissenet, *Waves called Solitons, concepts and experiments*, Springer (1999).
- [2] B. Kibler et al., The Peregrine soliton in nonlinear fibre optics, *Nat. Phys.*, 6 (2010) 790-795.
- [3] B. Kibler et al., Superregular breathers in optics and hydrodynamics: omnipresent modulation instability beyond simple periodicity, *Phys. Rev. X*, 5 (2015) 041026.
- [4] J. Fatome et al., Observation of optical undular bores in multiple four-wave mixing, *Phys. Rev. X*, 4 (2014) 021022.
- [5] B. Wetzal et al., Experimental generation of Riemann waves in optics: a route to shock wave control, *Phys. Rev. Lett.*, 117 (2016) 073902.
- [6] B. Frisquet et al., Optical dark rogue wave, *Scientific Reports*, 6 (2016), 20785.
- [7] J.M. Dudley et al., Instabilities, breathers and rogue waves in optics, *Nat. Photon.*, 8 (2014) 755-764.