



HAL
open science

**Du soliton hydrodynamique à la vague scélérate :
reproduire optiquement les ondes non-linéaires pour
mieux les comprendre et les maîtriser**

Christophe Finot, Kamal Hammani, Bertrand Kibler, John M. Dudley, Guy
Milot

► **To cite this version:**

Christophe Finot, Kamal Hammani, Bertrand Kibler, John M. Dudley, Guy Milot. Du soliton hydrodynamique à la vague scélérate : reproduire optiquement les ondes non-linéaires pour mieux les comprendre et les maîtriser. uB Sciences, 2009, 3 (4), pp.16-22. hal-00469896

HAL Id: hal-00469896

<https://hal.science/hal-00469896>

Submitted on 2 Apr 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.

DU SOLITON HYDRODYNAMIQUE

A LA VAGUE SCÉLERATE :

REPRODUIRE OPTIQUEMENT LES VAGUES NON-LINEAIRES
POUR MIEUX LES COMPRENDRE ET LES MAITRISER

» CHRISTOPHE FINOT

» KAMAL HAMMANI

» BERTRAND KIBLER

» GUY MILLOT

Institut CARNOT Bourgogne, UMR 5209 CNRS-
Université de Bourgogne,
Département Optique-Interaction Matière
et Rayonnement,
Equipe Solitons Lasers
et Communications Optiques
www.icb.u-bourgogne.fr/OMR/SLCO

» JHON M. DUDLEY

Institut FEMTO-ST, UMR 6174 CNRS-
Université de Franche-Comté, Besançon

Résumé :

» DELPHINE GOSSET

DES VAGUES EXTRAORDINAIRES MISES EN LUMIÈRE

Des chercheurs percent les mystères des vagues solitaires et des vagues scélérates en étudiant des phénomènes équivalents dans les fibres optiques.

Si une vague normale se déplace en s'élargissant et en perdant progressivement de l'amplitude, certaines vagues se propagent sans se déformer : les vagues solitaires, ou solitons. Il existe aussi des vagues extrêmement hautes qui apparaissent de façon inattendue sur une mer relativement calme. Ces vagues rarissimes sont dites « scélérates » car elles sont parfois à l'origine de naufrages.

Ces événements inhabituels sont difficiles à prédire et à étudier, en laboratoire comme sur le terrain. Ils sont le fruit de phénomènes physiques non-linéaires. On parle de non-linéarité quand deux effets superposés produisent quelque chose de plus complexe que la simple somme de ces effets. Les comportements non-linéaires des ondes qui se propagent dans l'eau peuvent être transposés aux ondes lumineuses. On sait reproduire l'équivalent des solitons dans certaines fibres optiques. L'équipe Solitons, lasers et communications optiques de l'Institut Carnot de Bourgogne les étudie ainsi depuis quinze ans.

L'analogie optique de la vague scélérate, quant à lui, n'a été observé dans une fibre optique que très récemment. Des pics d'intensité lumineuse extrême sont apparus au cours d'une expérience consistant à élargir la gamme des couleurs produite par une source lumineuse. Tout comme les vagues scélérates, ces pics de grande amplitude n'apparaissent que très rarement. Cependant, en optique, on peut répliquer l'expérience des milliers de fois et donc les étudier beaucoup plus facilement.

Grâce à ces expériences, les chercheurs ont pu élaborer des modèles numériques qui reproduisent de façon fiable, sur ordinateur, la propagation de la lumière dans une fibre optique. Ces travaux ont permis de mieux cerner les conditions d'apparition des ondes scélérates. En transposant à nouveau ces modèles aux ondes qui se propagent dans l'eau, on entrevoit aujourd'hui la possibilité de prédire l'apparition des vagues scélérates océaniques.

Ces recherches ont également des applications dans les télécommunications optiques. La capacité du soliton optique à voyager sur de longues distances, sans perdre en amplitude et sans se déformer, s'avère très utile pour transmettre de l'information. Les ondes scélérates, au contraire, sont responsables de perturbations lors des transmissions. On les étudie donc pour mieux les éviter. Les travaux menés à Dijon ont montré que plusieurs effets physiques peuvent initier et amplifier ces ondes extrêmes. Les chercheurs ont alors déterminé lesquelles des technologies utilisées dans les fibres optiques étaient les plus susceptibles de les faire apparaître.

INTRODUCTION

Dans la nature, il est envisageable de transporter de l'énergie sans forcément déplacer de la matière. Ceci est notamment possible grâce aux ondes, un concept fondamental des sciences dont les manifestations sont aussi diverses que quotidiennes. Sans en être toujours conscients, nous vivons ainsi entourés d'ondes que cela soit des ondes radio, des ondes lumineuses ou bien encore des ondes sonores. L'exemple le plus visuel d'onde reste sûrement l'onde hydrodynamique, c'est-à-dire la vague. Si le cliché de vacances est la douce vague venant mourir paisiblement sur la plage, il en existe d'autres aux caractéristiques bien plus surprenantes, comme le mascaret capable de remonter les courants dans les estuaires, les vagues déferlantes, ou bien encore le tsunami ou le soliton hydrodynamique. Le comportement de toutes ces vagues ne peut s'interpréter correctement qu'en ayant recourt à une autre notion physique, à savoir la non-linéarité.

Nous décrivons dans cet article comment il est possible d'exploiter l'universalité des concepts d'onde et de non-linéarité pour reproduire en laboratoire et dans le domaine de l'optique des comportements similaires à ceux des vagues océaniques. Ainsi, après avoir présenté l'existence des solitons optiques analogues aux solitons hydrodynamiques, nous nous concentrerons sur un autre type d'onde, les vagues scélérates au potentiel destructeur redoutable. Des manifestations similaires seront décrites dans le domaine de l'optique.

Fig 1. La grande vague de Kanagawa, estampe japonaise de Hokusai réalisée en 1830

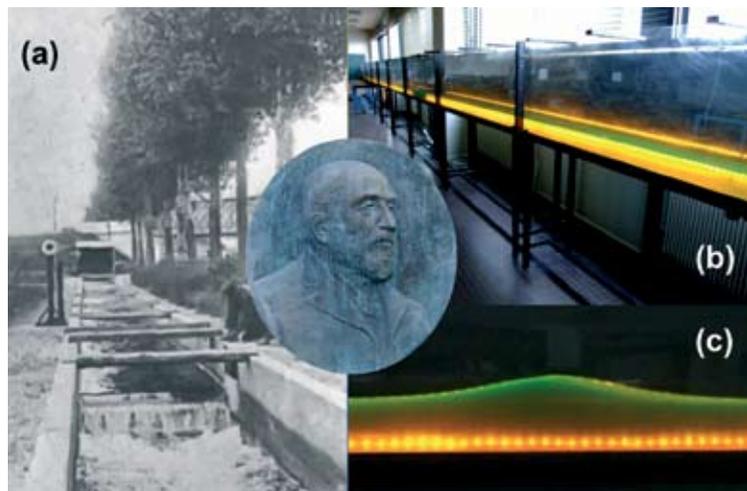


SOLITONS HYDRODYNAMIQUES ET SOLITONS OPTIQUES

Une vague traditionnelle de faible amplitude s'élargit progressivement au cours de sa propagation, réduisant d'autant sa hauteur. Au contraire de ce comportement dispersif, il existe d'autres vagues capables de se propager sans aucune déformation. Ces vagues spéciales s'appellent des vagues solitaires, ou encore solitons. Elles ont été pour la première fois observées en 1834 par l'ingénieur écossais John Scott Russell se promenant le long d'un canal : il a suivi à cheval pendant plusieurs kilomètres une vague qui ne semblait pas vouloir faiblir en remontant le courant [1]. Pour l'anecdote, la seconde observation des solitons a été réalisée à Dijon, dans le bief du canal de Bourgogne par Henri Bazin en 1863. Depuis, les secrets du soliton ont été percés et il a été montré théoriquement que leur existence et leurs propriétés remarquables étaient intimement liées à un comportement non-linéaire qui vient compenser l'élargissement naturel subi par toute vague. Cette non-linéarité fait que le comportement de la vague dépend désormais fortement de sa hauteur initiale. Dans ces conditions, l'évolution de deux vagues n'est pas forcément la somme des évolutions de chaque vague prise indépendamment l'une de l'autre. Cela ouvre alors la porte à toute une gamme de comportements insolites et mystérieux [2].

Nous disposons au département de Physique de l'Université de Bourgogne d'un canal miniature de 18 mètres de longueur nous permettant de reproduire ce type de soliton (Fig. 2b). Mais ce qui peut s'avérer encore plus passionnant, c'est de transposer à d'autres systèmes physiques ce concept initialement mis en évidence dans le domaine hydrodynamique. Ainsi, des solitons ont pu être générés dans des chaînes de pendules mécaniques, dans des lignes électriques, et même dans des systèmes biologiques [3]. Dans l'équipe Solitons, Lasers et Communications Optiques de l'Institut CARNOT de Bourgogne (Unité Mixte de Recherche 5209 UB-CNRS) nous nous sommes plus particulièrement intéressés depuis une quinzaine d'années à l'application des solitons dans le domaine de l'optique. En effet, il est possible de reproduire les conditions d'existence des ondes non-linéaires dans les fibres optiques [4], ces fils de verre d'une centaine de micromètres de diamètre qui peuvent transporter efficacement la lumière (Figure 3). Une telle "vague" optique capable de voyager sur de longues distances sans se déformer a stimulé des retombées extrêmement fructueuses dans les télécommunications de très grande capacité : la propagation de plusieurs centaines de milliards d'informations par seconde sur plusieurs centaines de kilomètres n'est ainsi plus une utopie [5, 6]. Autrement dit, il est possible de reproduire sur une simple table de laboratoire des expériences pour lesquelles de vastes canaux hydrauliques étaient auparavant indispensables. La fibre optique s'affirme donc indiscutablement comme un support d'étude exceptionnel permettant de démultiplier les configurations analysées et d'accélérer considérablement le rythme des recherches : grâce aux fibres optiques, les mystères des comportements solitoniques sont progressivement levés [7-10] et de nouveaux types d'ondes non-linéaires aux propriétés exotiques comme le similariton optique ont pu être découverts et étudiés [11].

Fig 2. [a] Rigole du canal de Bourgogne dans laquelle Henri Bazin a pu mener ses expériences hydrodynamiques (en médaillon, Henri Bazin, tel que représenté sur la fontaine Bazin de la place Saint-Michel à Dijon). [b] Dispositif du département de Physique de l'Université de Bourgogne dans lequel on peut observer le profil traditionnel du soliton hydrodynamique [c].



attesté de leur existence et de leurs effets destructeurs terrifiants comme l'éventration de coques de navires entraînant la mort de son équipage. Plus particulièrement, l'enregistrement du jour de l'an 1995 d'une vague déferlant sur la plateforme pétrolière norvégienne Draupner constitue la première preuve scientifique irréfutable de l'amplitude anormalement élevée de ces ondes par rapport au niveau moyen de la mer. Dans un tel contexte, plusieurs naufrages de navires jamais élucidés jusqu'à présent pourraient enfin trouver une explication rationnelle, notamment la disparition du MS München, navire long de 260 mètres, disparu en mer subitement en 1978.

L'étude systématique par des moyens usuels de ces vagues qui apparaissent en plein océan se heurte néanmoins à leur probabilité d'apparition extrêmement ténue : en effet, comment se trouver au bon endroit et au bon moment pour enregistrer ces événements si imprévisibles et si dangereux ? Il a fallu un projet européen d'envergure, MaxWave [13], mettant notamment en jeu des mesures satellitaires de la hauteur des mers pour en connaître un peu plus. Les données récoltées semblent confirmer le rôle essentiel qui serait joué par la non-linéarité dans l'émergence de ces vagues océaniques scélérates.

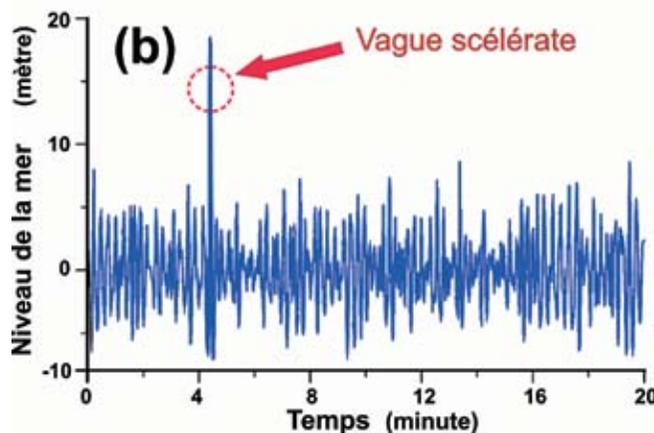


Fig. 4 [a] Navire marchand affrontant une vague scélérata dans le golfe de Gascogne [image wea00800 de la collection de la NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration]

[b] Enregistrement de la hauteur des vagues touchant la plateforme pétrolière norvégienne Draupner le 1er janvier 1995. Une vague dite « scélérata » d'une hauteur inhabituelle (près de 20 mètres) est alors mise en évidence.

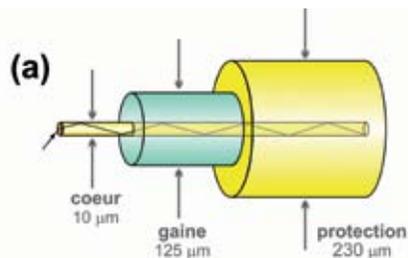
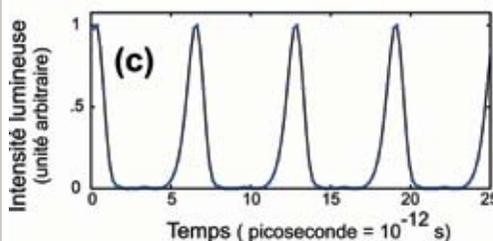
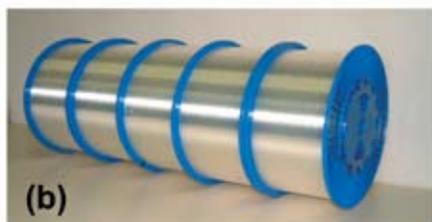


Fig. 3 [a] Principe d'une fibre optique : la lumière est transportée dans le cœur de la fibre dont le diamètre est de quelques millièmes de millimètres seulement.

[b] Bobines de fibres optiques [100 kilomètres] [c] Train d'impulsions soliton à très haut débit généré à l'Université de Bourgogne : 160 milliards de solitons sont générés par seconde [5, 6, 12].



ONDES SCÉLÉRATES OCÉANIQUES

Si l'apport des fibres optiques dans l'étude des solitons est maintenant solidement établi, il n'en est pas de même en ce qui concerne un autre type d'ondes, appelées ondes scélérates. L'existence de ces vagues dont la rareté n'a d'égale que l'intensité a ainsi longtemps été remise en cause au vu du peu de témoignages fiables disponibles. Ce n'est qu'à la fin du siècle dernier que des observations indiscutables ont définitivement

ONDES SCÉLÉRATES OPTIQUES DANS LES SUPERCONTINUA

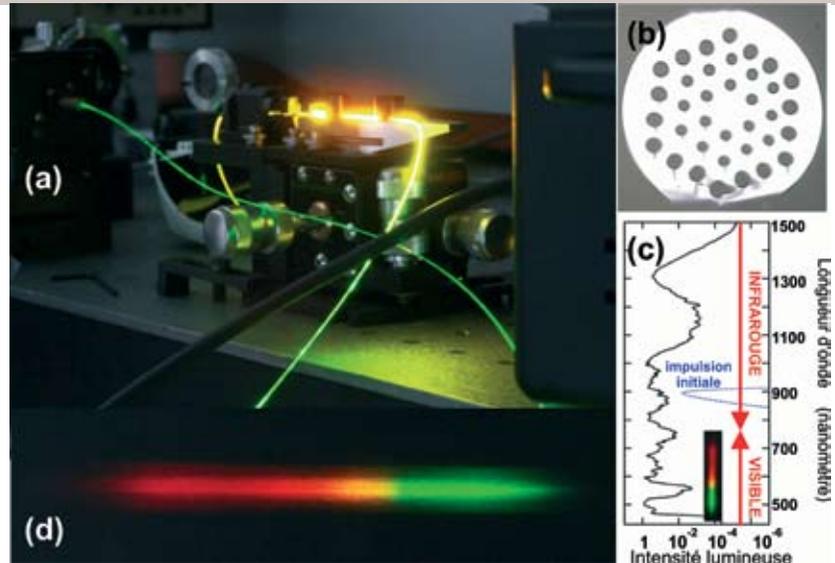
Étant donnée la faible quantité de données disponibles pour analyser et comprendre ces phénomènes scélétrats, les pistes d'explications demeurent encore relativement rares. Néanmoins, les travaux les plus récents commencent à s'accorder sur le rôle particulier joué par un effet non-linéaire, l'instabilité de Benjamin-Feir qui stimulerait l'apparition des vagues monstrueuses. Or justement, il existe un analogue optique à cette instabilité de Benjamin-Feir, analogue nommé instabilité modulationnelle et qui a été particulièrement étudié à Dijon [14-16] : en raison de cette instabilité, de faibles perturbations peuvent se voir considérablement amplifiées par la présence d'une onde continue. Basé sur cette équivalence, il a donc été montré très récemment que des manifestations analogues aux vagues scélétrates pouvaient être générées optiquement [17-20].

L'intérêt potentiel de reproduire à l'échelle d'une fibre optique ces phénomènes apparaît alors évident : un nombre considérable de données peuvent être collectées dans le domaine optique avec une rapidité et une facilité sans commune mesure avec le domaine hydraulique. Ainsi, multiplier les expériences permet d'effectuer une analyse statistique des résultats qui met en exergue la rareté des événements scélétrats. Il est à noter que leur probabilité d'apparition suit une loi spécifique qui dévie très significativement des lois gaussiennes souvent mises en jeux dans les phénomènes aléatoires.

La première expérience optique dans laquelle des ondes scélétrates ont été détectées est la génération de supercontinua qui consiste à élargir le spectre lumineux d'une source optique. Autrement dit, en utilisant la large gamme des effets non-linéaires qui influencent la propagation de la lumière dans une fibre optique, il est possible de créer de nouvelles longueurs d'ondes ['de nouvelles couleurs'] dans le spectre lumineux [21]. L'efficacité de ce processus repose en grande partie sur le type de fibre utilisée. Cette technique a ainsi connu des progrès fulgurants avec la mise au point de fibres optimisées [dites 'fibres microstructurées', un exemple est donné figure 5b dont la structure en nid d'abeille permet de confiner au maximum la lumière au centre de la fibre, accroissant donc la non-linéarité [22]. Il est devenu alors possible de transformer un spectre initial de quelques dizaines de nanomètres en un spectre qui s'étend du visible jusqu'au proche infrarouge [soit 1000 nm, figure 5c]. Les propriétés intrinsèques de cette nouvelle lumière lui ont immédiatement ouvert de nombreux débouchés couronnés de succès dans des domaines aussi divers que la métrologie de fréquences, la spectroscopie ou bien encore l'imagerie biologique.

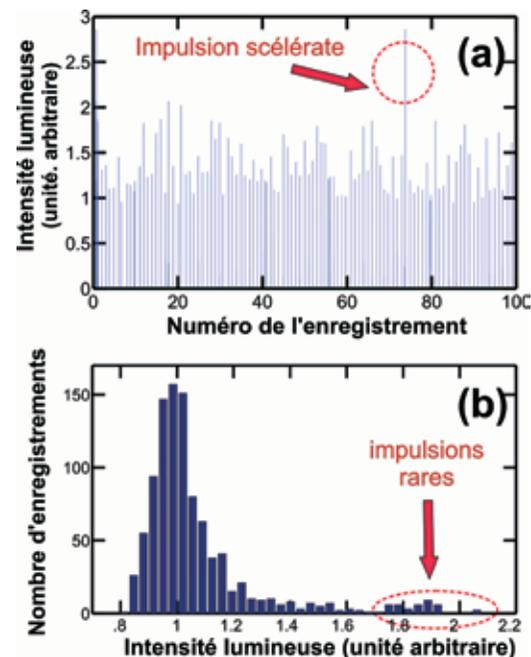
Fig. 5 [image en haut à droite] : [a] Montage expérimental utilisé pour la génération de supercontinuum optique : injection de la lumière dans une fibre à cristaux photoniques.

[b] Fibre à cristaux photoniques réalisée à l'Université de Bourgogne (fibre en verre de chalcogénure pour applications dans l'infrarouge, équipe SLCO, F. Smektala et al.) [c] Spectre typique d'un supercontinuum : l'impulsion initiale dans l'infrarouge s'est considérablement élargie pour couvrir une grande partie du visible et une partie du domaine de l'infrarouge [d] Partie visible du supercontinuum.



Sachant que le processus stimulant les premières étapes de la génération d'un supercontinuum est l'instabilité modulationnelle, la lumière obtenue va donc potentiellement présenter certaines caractéristiques typiques des ondes scélétrates. Notamment, en isolant les plus hautes longueurs d'ondes du spectre [1 200 à 1 400 nm], il a été possible de mettre en évidence des fluctuations importantes de l'intensité lumineuse des impulsions générées, avec des pics rares se distinguant nettement du comportement moyen (Fig. 6a). En répétant plusieurs milliers de fois la même démarche, il devient alors possible de dresser une image fidèle du comportement statistique du phénomène optique. La figure 6b montre ainsi clairement que la probabilité des événements les plus intenses diminue fortement. De plus, la forme globale de cette courbe fortement allongée suit le même type de loi statistique que celle des vagues redoutées.

Fig. 6 [a] Train d'impulsions issues du supercontinuum filtré. [b] Distribution statistique des intensités lumineuses crêtes des impulsions. 1000 enregistrements ont été effectués [20]



FLUCTUATIONS EXTRÊMES DANS LES AMPLIFICATEURS OPTIQUES

Les supercontinua optiques constituent donc un système physique plein de promesses pour mieux appréhender ces vagues et pour à terme mieux les maîtriser. Mais il est important de ne pas restreindre ces investigations à cette seule configuration. En particulier, une question à éclaircir est de savoir si les télécommunications à fibre optique peuvent également être affectées par ces fluctuations notables qui contribueraient à créer des erreurs dans la transmission du message désiré.

Nous avons alors analysé plus précisément au sein de notre équipe les différents éléments impliqués dans l'acheminement d'une information. La fibre optique sur laquelle se transmet passivement l'information sur des dizaines de kilomètres ne donne aucun signe laissant présager de l'émergence spontanée de structures optiques scélérates. Par contre, une phase plus critique dans le processus de transmission des données semble être l'amplification optique, étape indispensable pour compenser à intervalles réguliers les pertes d'énergie des impulsions dans les fibres passives. Dans les amplificateurs optiques, une onde dite pompe va ainsi céder son énergie au signal affaibli, ce qui permet de le réamplifier. Les performances du système seront guidées par la qualité de la pompe : si elle ne présente aucune fluctuation temporelle de son intensité, l'amplification sera proche de la perfection. Mais une telle pompe est coûteuse et délicate à utiliser sur le terrain. Il est donc indispensable d'évaluer les performances d'un système réel

dans lequel la pompe peut présenter des fluctuations notables. Dans ce cas, ces fluctuations pourront se retranscrire sur le signal à amplifier.

Suivant la technologie utilisée, les résultats obtenus sont alors très différents. Les fibres dopées terres-rares semblent assez immunes aux variations de puissance, du moment que ces variations se font très rapidement. Par contre, nos études montrent que ce n'est pas le cas pour les amplificateurs dits paramétriques [23]. Rien forcément d'étonnant car ces amplificateurs optiques à fibre reposent sur des fibres fortement non-linéaires et leur principe physique est très similaire à l'instabilité modulationnelle : les fluctuations initiales de la pompe seront ainsi non seulement transmises au signal, mais pire, elles seront exponentiellement amplifiées, causant au final une dégradation très dommageable de l'information codée.

Mais l'amplification paramétrique n'est pas la seule technique à être affectée par l'émergence d'événements rares de forte amplitude. Ainsi, les amplificateurs Raman (schéma expérimental de principe illustré par la figure 7) présentent eux aussi des caractéristiques similaires, même si aucune instabilité modulationnelle ne peut dans ce cas se développer. Nous avons notamment souligné que l'utilisation des fibres hautement non-linéaires qui permettent d'obtenir le coefficient d'amplification le plus favorable, peut malheureusement s'accompagner d'effets préjudiciables concernant la qualité du système [23]. Plus précisément, la pompe et le signal se propagent dans la fibre à la même vitesse. Par conséquent, en raison du gain exponentiel instantané de l'effet Raman, toute fluctuation de la pompe initiale se retrouve exacerbée sur le signal. Une illustration de ce processus est représentée sur la figure 8. La

pompe initiale présente des fluctuations assez marquées (Fig. 8a) alors que le signal initial est lui dénué de toute fluctuation (Fig. 8b). En sortie du dispositif, le signal amplifié a vu sa forme considérablement changer (Fig. 8c), avec désormais des pics qui s'affichent notablement et qui se situent à l'emplacement des fluctuations initiales de la pompe. Non seulement le signal n'a plus rien de continu, mais pire, on peut noter que l'amplitude des fluctuations du signal est bien plus importante que l'amplitude des fluctuations de la pompe. On distingue notamment un pic très important. La figure 8d illustre plus précisément la manière dont le signal est passé d'une nature continue à un tel pic durant sa propagation dans la fibre amplificatrice de 500 mètres de longueur. Remarquons également que ce pic lumineux a une durée très brève, quelques picosecondes seulement (une picoseconde = 10^{-12} seconde).

Les effets sont donc incontestables sur un signal continu et si on envoie à l'entrée du dispositif un signal impulsionnel, nous serons également affectés par des variations importantes du signal de sortie. Ainsi, si nous superposons les différents résultats de l'amplification d'un train d'impulsions ultrabrèves, nous obtenons ce que l'on dénomme un « diagramme de l'oïl » (Figure 9). Pour un signal sans fluctuation de puissance comme notre signal initial (Figure 9a), la superposition des réalisations conduit à un trait unique d'une couleur blanche assez uniforme. Par contre, si les fluctuations sont importantes, nous obtenons un dégradé de couleurs, ces dernières symbolisant la probabilité d'apparition d'un événement : un événement blanc sera très probable alors qu'au contraire, un événement vert ou bleu foncé sera considéré comme très peu probable ou rare.

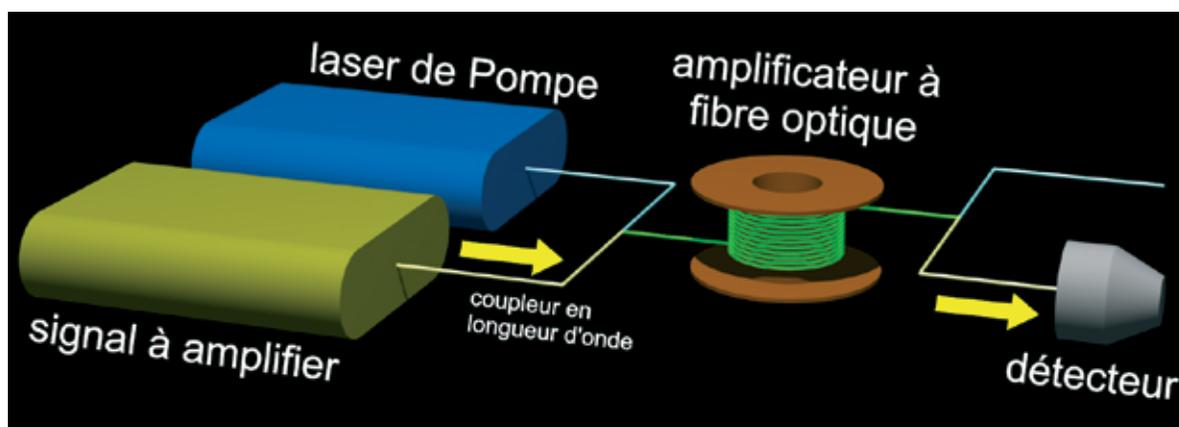


Fig. 7 : Montage expérimental typique pour les amplificateurs Raman. Le signal à amplifier est combiné avec la pompe issue d'un autre laser et les deux sont injectés dans la fibre optique amplificatrice. En sortie, le signal amplifié est isolé et envoyé sur le détecteur lumineux

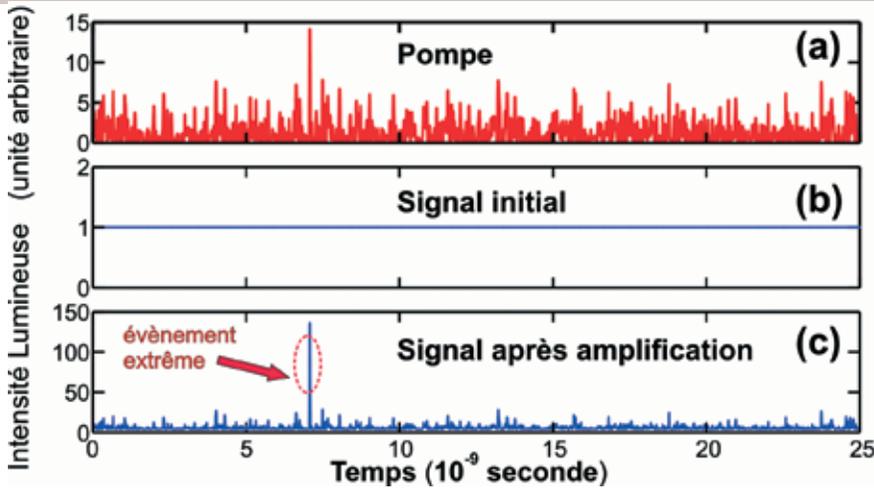
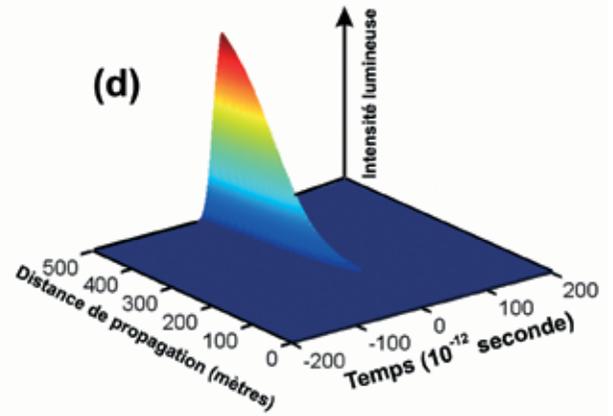


Fig. 8 : Génération de fluctuations importantes du signal amplifié (simulations numériques).

- (a) Fluctuations temporelles de la pompe initiale
- (b) Le signal initial ne présente pas de variations de son niveau
- (c) Après amplification, les fluctuations initiales de la pompe se sont retranscrites exponentiellement sur le signal
- (d) Évolution de l'intensité temporelle du signal dans l'amplificateur à fibre Raman



Il est intéressant de comparer ces résultats avec les résultats obtenus par simulations numériques. En effet, il est possible de reproduire de manière fiable sur ordinateur la propagation de la lumière dans une fibre optique et donc de modéliser et prédire l'impact des paramètres mis en œuvre dans le système. Nous constatons que notre modèle numérique donne de très bonnes indications quant à la distribution de probabilités que nous observons, ce qui valide notre outil numérique prédictif.

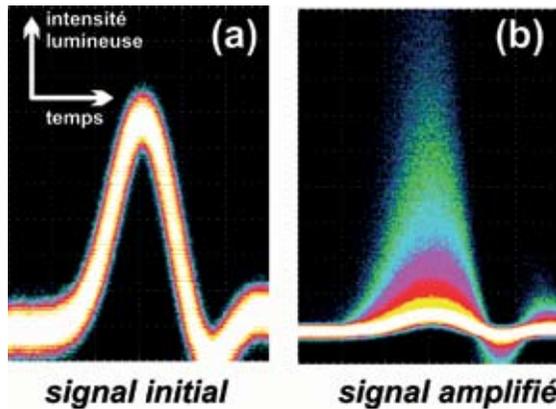


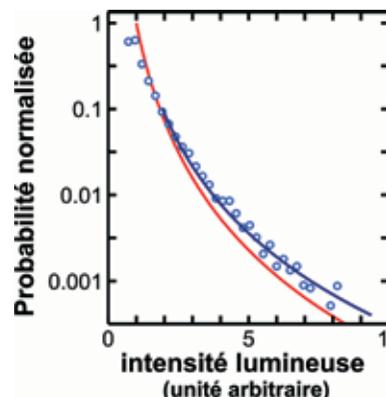
Fig.9 Diagrammes expérimentaux de l'œil du signal avant (a) et après amplification (b)

CONTRÔLE DES ONDES SCÉLÉRATES

Bien sûr, l'apparition de fluctuations extrêmes dans des signaux porteurs d'une information n'a absolument rien de souhaitable. Il est donc essentiel de comprendre et de limiter ce transfert des fluctuations de la pompe sur le signal. Or nous avons isolé comme condition essentielle que la pompe et le signal devaient se propager à vitesse identique. Si cette condition est enfreinte, c'est-à-dire si une certaine dispersion existe, les fluctuations de la pompe ne se retranscrivent plus aussi efficacement sur le signal. Le signal subira ainsi un moyennage des fluctuations de la pompe, ce qui atténue considérablement les fluctuations les plus fortes. Ce sera donc des amplificateurs reposant sur une fibre à forte dispersion chromatique qu'il faudra en pratique privilégier [23].

Des enregistrements plus précis nous permettent d'établir quantitativement la distribution de probabilité des puissances crêtes. Les résultats sont représentés sur la figure 10. Nous constatons alors que la distribution obtenue, quand elle est représentée sur une échelle logarithmique, présente une longue queue. Celle-ci est bien modélisée par une exponentielle décroissante, ce qui est une caractéristique commune à tous les phénomènes dit extrêmes, à l'image des vagues scélérates.

Fig. 10 Distribution de probabilité de l'intensité maximale des impulsions après amplification. Les intensités lumineuses et leur probabilité sont normalisées par rapport à la valeur moyenne. Les résultats expérimentaux (cercles) suivent une courbe décroissante exponentielle (sur une échelle logarithmique) caractéristique des phénomènes rares. Nos observations expérimentales sont comparées avec les prédictions numériques (courbe rouge).



Des études complémentaires menées sur les configurations super-continuum ont permis de confirmer une nouvelle fois l'impact de cette notion de vitesse de propagation et de dispersion : suivant les propriétés dispersives des fibres mises en œuvre, des statistiques très différentes pourront être enregistrées [20].

Pour mieux caractériser nos impulsions scélérates optiques, il peut également être intéressant d'isoler uniquement les ondes optiques de très forte intensité. Ceci peut se faire à l'aide d'un filtre optique spectral, dont la longueur d'onde centrale est décalée par rapport à la longueur d'onde initiale du laser utilisé. Cette méthode est illustrée sur la figure 11. Ainsi, le train d'impulsions obtenu en sortie de la fibre présente de grandes variations de puissance. Mais lorsque seule une partie du spectre est conservée, nous pouvons isoler uniquement les vagues les plus rares et les plus intenses.

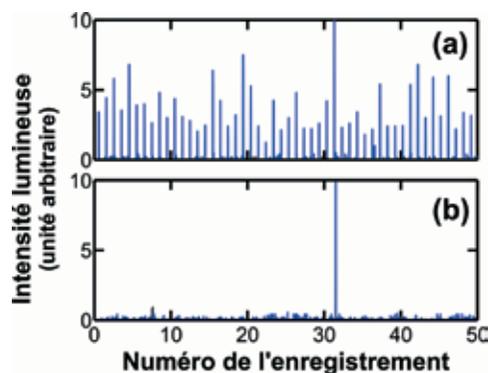


Fig. 11

Contrôle de ces vagues optiques par utilisation d'un filtrage spectral décalé.

(a) signal présentant des oscillations notables
(b) après filtrage, seule les impulsions d'amplitude la plus élevée sont conservées.

CONCLUSION

Les ondes non-linéaires possèdent des propriétés aussi variables que remarquables. Que ce soit pour le soliton hydrodynamique capable de se propager sur de grandes distances sans se déformer ou bien pour la redoutable vague scélérate, il est possible d'établir des correspondances entre les différents systèmes physiques et de proposer des analogies dans le domaine des fibres optiques.

L'utilisation de ce support optique permet une meilleure compréhension de tous ces phénomènes, notamment ceux stimulant la naissance des ondes scélérates optiques. Nous venons ainsi notamment de démontrer que plusieurs effets physiques pouvaient indépendamment les uns des autres initier et amplifier ces ondes extrêmes. Nos observations expérimentales sont alors confirmées par un travail minutieux de simulations numériques de la propagation de la lumière dans une fibre optique. Une fois éclaircie l'origine des ondes scélérate optiques, il a été possible de suggérer et de valider une méthode de contrôle optique adéquate.

REMERCIEMENTS, COLLABORATIONS ET SOUTIENS FINANCIERS

Nous remercions tous les membres de l'équipe Solitons, Lasers et Communications Optiques, et plus particulièrement Julien Fatome, Stéphane Pitois et Antonio Picozzi pour leurs remarques et suggestions fructueuses et leur soutien expérimental.

Les travaux concernant les ondes scélérate optiques bénéficient pour la période 2009-2012 d'un soutien de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) à travers le projet MANUREVA qui regroupe des mathématiciens (Centre de Mathématique et de Leur Applications - ENS Cachan ; Laboratoire de Probabilités et Modèles Aléatoires - Jussieu) et physiciens (Institut CARNOT Bourgogne et Institut FEMTO-ST). Ce projet MANUREVA permettra, nous l'espérons, de mieux comprendre le lien entre l'hydrodynamique et l'optique, ainsi qu'une meilleure interprétation des phénomènes statistiques observés.

Ces différents travaux ont également pu profiter du soutien de l'ANR aux projets SUPERCODE et SOFICARS. La plateforme de calculs numériques intensifs est soutenue par le projet PERSYST II.

La collaboration entre l'équipe SLCO et John Dudley de l'université de Franche-Comté est réalisée dans le cadre du Pôle de Recherches et d'Enseignement Supérieur PRES Dijon-Besançon, du groupe de recherche Phonomi2, et du COST 299.

RÉFÉRENCES

- 1. J. S. Russell, "Report on waves, Technical Report," in 14th meeting of the British association for the Advancement of Science, (1845),
- 2. M. Remoissenet, *Ondes et catastrophes: Du soliton au tsunami* (Books on Demand, 2008).
- 3. M. Remoissenet, *Waves called solitons : concepts and experiments*, Third Edition ed. (Springer, 2003).
- 4. L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, and J. P. Gordon, "Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers," *Phys. Rev. Lett.* 45, 1095-1098 (1980).
- 5. J. Fatome, S. Pitois, P. Tchofo-Dinda, and G. Millot, "Experimental demonstration of 160-GHz densely dispersion-managed soliton transmission in a single channel over 896 km of commercial fibers," *Opt. Express* 11, 1553-1558 (2003).
- 6. G. Millot, J. Fatome, S. Pitois, and P. Tchofo-Dinda, "Communications ultra-rapides à longue distance," *UB Sciences* 1.
- 7. S. Pitois, G. Millot, and S. Wabnitz, "Polarization domain wall solitons with counterpropagating laser beams," *Phys. Rev. Lett.* 81, 1409-1412 (1998).
- 8. A. Picozzi, M. Haelterman, S. Pitois, and G. Millot, "Incoherent solitons in instantaneous response nonlinear media," *Phys. Rev. Lett.* 92,

143906 (2004).

- 9. A. Picozzi, S. Pitois, and G. Millot, "Spectral incoherent solitons : a localized soliton behavior in the frequency domain," *Phys. Rev. Lett.* 101, 093901 (2008).
- 10. G. Millot and P. Tchofo-Dinda, "Physical origin and properties of optical fibre solitons," in *Encyclopedia of Modern Optics*, B. Guenther, D. Steel, and L. Bayvel, eds. (Elsevier Science, 2005).
- 11. J. M. Dudley, C. Finot, G. Millot, and D. J. Richardson, "Self-similarity in ultrafast nonlinear optics," *Nat. Phys.* 3, 597-603 (2007).
- 12. S. Pitois, J. Fatome, and G. Millot, "Generation of 160-GHz transform-limited pedestal-free pulse train through multiwave mixing compression of a dual frequency beat signal," *Opt. Lett.* 27, 1729-1731 (2002).
- 13. "The MaxWave project", retrieved <http://coast.gkss.de/projects/maxwave/>.
- 14. A. Sauter, S. Pitois, G. Millot, and A. Picozzi, "Incoherent modulation instability in instantaneous nonlinear Kerr media," *Opt. Lett.* 30, 2143-2145 (2005).
- 15. E. Seve, P. Tchofo-Dinda, G. Millot, M. Remoissenet, J. M. Bilbault, and M. Haelterman, "Modulational instability and critical regime in a highly birefringent fiber," *Phys. Rev. A* 54, 3519-3533 (1996).
- 16. J. Fatome, S. Pitois, and G. Millot, "Measurement of nonlinear and chromatic dispersion parameters of optical fibers using modulation instability," *Opt. Fiber. Technol.* 12, 243-250 (2006).
- 17. D. R. Solli, C. Ropers, P. Koonath, and B. Jalali, "Optical rogue waves," *Nature* 450, 1054 (2007).
- 18. J. M. Dudley, G. Genty, and B. J. Eggleton, "Harnessing and control of optical rogue waves in supercontinuum generation " *Opt. Express* 16, 3644-3651 (2008).
- 19. K. Hammani, C. Finot, and G. Millot, "Emergence of extreme events in fiber-based parametric processes driven by a partially incoherent wave," *Opt. Lett.* soumis(2009).
- 20. B. Kibler, C. Finot, and J. M. Dudley, "Soliton and rogue wave statistics in supercontinuum generation in photonic crystal fibre with two zero dispersion wavelengths," *European Journal of Physics in press*(2009).
- 21. J. M. Dudley, G. Genty, and S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Rev. Modern Physics* 78, 1135-1184 (2006).
- 22. P. S. Russell, "Photonic crystal fibers," *Science* 299, 358-362 (2003).
- 23. K. Hammani, C. Finot, J. M. Dudley, and G. Millot, "Optical rogue-wave fluctuations in fiber Raman amplifiers," *Opt. Express* 16, 16467-16474 (2008).