

É. Falcon, M. Lefranc  
F. Pétrélis, C.-T. Pham  
Éditeurs

---

Résumés de la 19<sup>e</sup>  
Rencontre du Non-Linéaire  
Paris 2016

---

Université Paris Diderot  
Non-Linéaire Publications



19<sup>e</sup> RENCONTRE DU NON-LINÉAIRE  
 Université Paris Diderot, PARIS  
 15–17 Mars 2016

**Nous remercions vivement l’Institut des Systèmes Complexes-Paris Île-de-France (ISC-PIF), l’Université Paris Diderot, le laboratoire Matière et Systèmes Complexes, le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), pour leur soutien matériel et financier.**

Le comité scientifique est composé de :

José BICO PMMH — ESPCI  
 Éric FALCON MSC — Paris Diderot  
 David GÉRARD-VARET IMJ — Paris Diderot  
 Özgür GÜRCAN LPP — École Polytechnique  
 Mariana HARAGUS LMB — Univ. Franche-Comté  
 Xiaoping JIA Inst. Langevin – ESPCI  
 Kirone MALLICK IPhT — CEA Saclay  
 Philippe MARMOTTANT LIPhy — UJF Grenoble  
 François PÉTRÉLIS LPS — ENS  
 Chi-Tuong PHAM LIMSI — Paris-Sud  
 Stéphane RANDOUX PhLAM — Lille  
 Valérie VIDAL Lab. de Physique — ENSL

Les Rencontres annuelles du Non-Linéaire sont organisées par :

Éric FALCON MSC — Paris Diderot  
 Marc LEFRANC PhLAM — Lille  
 François PÉTRÉLIS LPS — ENS  
 Chi-Tuong PHAM LIMSI — Paris-Sud

Le colloque *Dualité onde-corpuscule à l’échelle macroscopique* est organisé par :

Antonin EDDI PMMH — ESPCI  
 François PÉTRÉLIS LPS — ENS

Ces Comptes-Rendus et ceux des années précédentes sont disponibles auprès de :

*Non-Linéaire Publications, Avenue de l’université, BP 12*  
 76801 Saint-Étienne du Rouvray cedex

Toutes les informations concernant les Rencontres sont publiées sur le serveur :

<http://nonlineaire.univ-lille1.fr/>

Renseignements :

[rnl@univ-lille1.fr](mailto:rnl@univ-lille1.fr)



## Table des matières

<b>Dualité classique : mémoire d’ondes et reflet du temps</b> <i>E. Fort</i> .....	1
<b>Predictive fluid dynamics models of wave-droplet interactions</b> <i>P. A. Milewski</i> .....	2
<b>Quantum-like statistics of deterministic wave-particle interactions in a circular cavity</b> <i>T. Gilet</i> .....	3
<b>Gouttes marcheuses en présence d’obstacles</b> <i>R. Dubertrand, M. Hubert, P. Schlagheck, N. Vandewalle, T. Bastin, J. Martin</i> .....	4
<b>Métamatériaux localement résonants : polaritons et physique du solide à l’échelle macroscopique</b> <i>Lemoult Fabrice, Kaina Nadège, Fink Mathias, Lerosey Geoffroy</i> .....	5
<b>Walking droplets in confined geometries</b> <i>B. Filoux, M. Hubert, N. Vandewalle</i> .....	6
<b>Vagues à l’approche du littoral : raidissement, déferlement et génération de vorticité</b> <i>David LANNES</i> .....	7
<b>Front d’écoulement granulaire : expériences et prédictions</b> <i>Deboeuf, Sainquier, Lagrée</i> .....	8
<b>Mise en suspension de particules immergées par injection d’air</b> <i>Clément Picard, Valérie Vidal, Sylvain Joubaud</i> .....	9
<b>Pénétration d’une tige flexible dans un milieu granulaire dense</b> <i>Algarra, Kolb, Vandembroucq, Lazarus</i> .....	10
<b>Érosion d’un lit granulaire par une plaque oscillante : comment les poissons plats s’enfouissent dans le sable?</b> <i>C. Morize, A. Sauret, G. Quibeuf, P. Gondret</i> .....	11
<b>Ondes de choc et implosion d’un faisceau optique Gaussien se propageant dans un cristal liquide à non-linéarité focalisante.</b> <i>Louis Hélène et al.</i> .....	12
<b>Ponts de bifurcation dans un laser en anneau soumis à un feedback optique</b> <i>Gaetan Friart, Mulham Khoder, Guy Van der Sande, Guy Verschaffelt, Thomas Erneux</i> .....	13
<b>Evènements extrêmes spatio-temporels dans un laser spatialement étendu</b> <i>Cristina Rimoldi, Stephane Barland, Franco Prati, Giovanna Tissoni</i> .....	14

<b>Evènements extrêmes soutenus par chaos spatio-temporel dans un laser à micro-cavity</b> <i>Coulibaly, Selmi, Loghmari, Clerc, Barbay</i> .....	15
<b>Faraday wave lattice as an elastic metamaterial</b> <i>L. Domino, M. Tarpin, S. Patinet, A. Eddi</i> .....	16
<b>Transport de particules par ondes internes.</b> <i>Sylvain Joubaud, Ernesto Horne, Diane Micard, Philippe Odier</i> .....	17
<b>Propagation d'une onde de cavitation</b> <i>EL AMRI, ARGENTINA, BOURET, NOBLIN</i> .....	18
<b>Relation de dispersion des vagues paramétriquement forcées</b> <i>Jean Rajchenbach<sup>1</sup> et Didier Clamond<sup>2</sup></i> .....	19
<b>L'hierarchie des modèles de Maxwell-Vlasov non-linéaires pour la verification des codes gyrocinétiques.</b> <i>Natalia Tronko, Alberto Bottino, Tobias Goerler, Eric Sonnendruecker</i> .....	20
<b>Réduction fluide des équations cinétiques en physique des plasmas : approche hamiltonienne</b> <i>M. Perin, C. Chandre, P.J. Morrison, E. Tassi</i> .....	21
<b>Logarithmic discretization and systematic derivation of shell models for turbulence</b> <i>Ö. D. Gürçan</i> .....	22
<b>Turbulence in 2D Spinodal Decompositions</b> <i>P. H. Diamond, X. Fan</i> .....	23
<b>On the dynamics of laminar-turbulent patterns in plane Couette flow</b> <i>Paul Manneville</i> .....	24
<b>Global stability analysis of microcombustion</b> <i>Michele Alessandro Bucci, Jean-Christophe Robinet, Sergio Chibbaro</i> .....	25
<b>Dissipation d'énergie globale et locale dans un écoulement de von Kármán turbulent</b> <i>Kuzzay, et al.</i> .....	26
<b>Turbulence en rotation dans une cavité stator/rotor à haut nombre de Reynolds</b> <i>Lachize Cécile, Verhille Gautier, Le Gal Patrice</i> .....	27
<b>Un gabarit pour tous les attracteurs d'un diagramme de bifurcation du système de Rössler</b> <i>M. Rosalie</i> .....	28
<b>Effets du couplage non linéaire dans un système de sine-Gordon modifié</b> <i>R. Alima, S. Morfu, B. Bodo, P. Marquié, B. Z. Essimbi</i> .....	29
<b>Toward new general-purpose processor with nonlinear transient computing</b> <i>Bogdan Penkovsky, Laurent Larger</i> .....	30
<b>Soil Evaporative Efficiency modeled with the global modeling technique</b> <i>V. Stefan, S. Mangiarotti, O. Merlin, A. Chanzy</i> .....	31

<b>Une expérience modèle de l'oscillation quasi-biennale</b> <i>Benoît Semin, Giulio Facchini, François Pétrélis, Stephan Fauve</i> .....	32
<b>Instabilité interfaciale sous érosion granulaire</b> <i>Jop, Lefebvre, Merceron</i> .....	33
<b>Génération et renversement d'un écoulement moyen dans un verre de bière en translation circulaire</b> <i>Frédéric Moisy, Wietze Herreman</i> .....	34
<b>Subcritical instabilities destabilized by kinetic nonlinearities in hot plasmas</b> <i>M. Lesur</i> .....	35
<b>Effet du milieu poreux sur la désorganisation d'un écoulement de Taylor dans un canal millifluidique</b> <i>Marion Serres, Régis Philippe, Valérie Vidal*</i> .....	36
<b>Boxing Leidenfrost drops</b> <i>Laurent Maquet, Stéphane Dorbolo</i> .....	37
<b>Une interprétation dynamique de l'hystérésis de l'angle de contact</b> <i>Hugo Perrin, R. Lhermerout, K. Davitt, E. Rolley, B. Andreotti</i> .....	38
<b>Chaos modeling applied to crops classification (Berambadi basin, South of India)</b> <i>S. Mangiarotti, A. K. Sharma, M. Sekhar, S. Corgne, L. Ruiz, L. Hubert-Moy, Y. Kerr</i> .....	39
<b>A chaotic model for the West Africa Ebola virus outbreak</b> <i>M. Huc, S. Mangiarotti</i> .....	40
<b>Détection de dynamiques de basse dimension par analyse entropie-complexité</b> <i>Antoine Chrisment, Marie-Christine Firpo</i> .....	41
<b>Instabilité viscoélastique dans le régime Képlérien comme analogue de l'instabilité magnéto-rotationnelle</b> <i>Innocent MUTABAZI, Yang BAI, Olivier CRUMEYROLLE</i> .....	42
<b>Instabilités thermiques et hydrodynamiques des écoulements parallèles.</b> <i>Y. Requillé, S. Hirata, M.N. Ouarzazi</i> .....	43
<b>Modal stability analysis of mechanically-driven flows in rigid rotating ellipsoids</b> <i>Jérémie Vidal, David Cébron, Nathanaël Schaeffer</i> .....	44
<b>Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans l'hydrosphère de Ganymède</b> <i>S. Carpy, H. Mathis</i> .....	45
<b>A mathematical model for nonlinear viscoelastic materials</b> <i>Riccardo De Pascalis, I. David Abrahams, William J. Parnell</i> .....	46
<b>Observation du couplage entre ondes de surface et d'interface en turbulence d'ondes gravito-capillaires entre deux couches de fluides</b> <i>B. Issenmann, E. Falcon</i> .....	47
<b>Étude statistique de l'interaction entre un marcheur et une barrière de potentiel</b> <i>Hubert Maxime, Perrard Stéphane, Labousse Matthieu</i> .....	48
<b>Instabilité d'un anneau de vortacité au voisinage d'une surface libre</b> <i>M. Labousse, B. El-Hadj Maïga, I. Cantat, A. Saint-Jalmes, M. Roché</i> .....	49

<b>Relations de fluctuation en Turbulence</b> <i>Chibbaro S., Zonta F.</i> .....	50
<b>Structures non-linéaire dans un système périodique de particules, effets thermiques et interaction entre structures.</b> <i>Tommy Dessup, Christophe Coste, Michel Saint Jean</i> .....	51
<b>Empilements compacts (jammed) de sphères dures et équilibre de Nash : Indépendantes mais solidaires.</b> <i>Nicolas Rivier</i> .....	52
<b>Influence de vibrations mécaniques sur la friction granulaire</b> <i>Valérie Vidal, Henri Lastakowski, Jean-Christophe Gémard</i> .....	53
<b>Experimental measurements of granular friction</b> <i>Cristobal Oliver, Germán Varas, Jean-Christophe Gémard, Valérie Vidal</i> .....	54
<b>Réorganisation d'un milieu granulaire autour d'une transformation localisée</b> <i>A. Merceron, A. Sauret, P. Jop</i> .....	55
<b>Contrôle du temps de relaxation d'un levier AFM</b> <i>Anne Le Cunuder, Ignacio Martinez, Artyom Petrosyan, Sergio Ciliberto, David Guéry-Odelin, Emmanuel Trizac</i> .....	56
<b>Collision et rebond d'une sphère sur une surface texturée dans un fluide</b> <i>T. Chastel, A. Mongruel, P. Gondret</i> .....	57
<b>Génération d'harmonique et conjugaison de phase d'une onde acoustique avec un plan de bulles.</b> <i>Lombard, Barrière, Leroy</i> .....	58
<b>Acoustic time reversal in granular media</b> <i>M. Harazi, Y. Yang, M. Fink, A. Tourin, X. Jia</i> .....	59
<b>La danse des Funam-Bulles</b> <i>Alexis Duchesne, Charles Dubois, Hervé Caps</i> .....	60
<b>Chaos quantique et micro-lasers</b> <i>M. Lebental, J. Zyss, E. Bogomolny, C. Ulysse, D. Decanini, S. Bittner</i> .....	61
<b>Dynamique d'imbibition d'une mousse aqueuse spongieuse par de l'huile et de l'eau</b> <i>Élise LORENCEAU</i> .....	62
<b>Nonlinear elasticity and dynamic triggering of earthquake slip</b> <i>Paul JOHNSON</i> .....	63
<b>Instabilité de stick-slip lors du pelage d'un ruban adhésif</b> <i>V. De Zotti, L. Vanel, P.-P. Cortet, S. Santucci</i> .....	64
<b>Intermittence, synchronisation et ondes de déformation plastique lors de l'effet Portevin-Le Chatelier</b> <i>M.A. Lebyodkin, T.A. Lebedkina</i> .....	65
<b>Enroulement élasto-capillaire pour la création de fibres ultra-extensibles</b> <i>Paul Grandgeorge, Arnaud Antkowiak, Sebastien Neukirch</i> .....	66



<b>Un nouveau mécanisme d'érosion d'une interface stratifiée</b> <i>J. Herault, M. Le Bars</i> .....	67
<b>New experiment in transition to turbulence in plane couette-poiseuille flow</b> <i>Lukasz Klotz , Idalia Frontczak , Grégoire Lemoult , Matthew Chantry, José Eduardo Wesfreid ...</i>	68
<b>Croissance de poches turbulentes dans l'écoulement de Couette plan</b> <i>Couliou, Monchaux</i> .....	69
<b>Critical Transitions in Turbulence : "2D, or not 2D..."</b> <i>BENAVIDES, ALEXAKIS</i> .....	70
<b>Numerical investigation into the choice of gait parameters in 2D anguilliform swimmers</b> <i>David Gross, Médéric Argentina, Yann Roux</i> .....	71
<b>Phase locking and pattern formation in tandem fish swimming</b> <i>I. Ashraf, R. Godoy-Diana, J. Halloy, B. Thiria</i> .....	72
<b>Coques nageuses</b> <i>Adel Djellouli, Catherine Quilliet, Gwennou Coupier, Philippe Marmottant</i> .....	73
<b>Oscillations Prédateur-Proie dans les Plasmas Magnétisés</b> <i>P. Morel, S. Kobayashi, P. Donnel, C. Honoré, V. Pisarev, P. Hennequin, Ö.D. Gürçan</i> .....	74
<b>Analyse expérimentale de l'évolution non-linéaire de la dérive collisionnelle électrique des ions dans une colonne de plasma magnétisée</b> <i>Thiéry PIERRE</i> .....	75
<b>Instabilité magnéto-rotationnelle et origine des vents de disques astrophysiques</b> <i>Méheut, H., Fromang, S.</i> .....	76
<b>The theory of chaos applied to study and model the discharge of three karstic springs (Doubs, Touvre and Lez)</b> <i>Y. Zhang, S. Mangiarotti, M. Leblanc</i> .....	77
<b>Détection d'arythmie cardiaque à partir de la reconstruction dans l'espace de phase.</b> <i>Mahamat Hassan Adam, Jacquir Sabir, Binczak Stéphane</i> .....	78
<b>Comment l'horloge biologique du foie se synchronise-t-elle à l'alternance des repas et des jeûnes ?</b> <i>Aurore Woller, Hélène Duez, Bart Staels, Marc Lefranc</i> .....	79
<b>Internal gravity wave, from absolute and convective instability to beam stability and transient growth.</b> <i>G.Lerisson, J-M.Chomaz, S.Ortiz</i> .....	80
<b>Observation de la reformation d'une onde solitaire hydrodynamique après destruction par une marche immergée</b> <i>Florence Haudin, Michaël Berhanu, Eric Falcon</i> .....	81
<b>Solitons capillaires à la surface d'un liquide en lévitation</b> <i>Charles Duchêne, Stéphane Perrard, Luc Deike, Chi-Tuong Pham</i> .....	82
<b>Distorsion d'un tourbillon par des vagues : le régime non-linéaire de l'interaction ondes-vorticité.</b> <i>T. Humbert, B. Galllet, S. Aumaître</i> .....	83

<b>Observation de Superregular Breathers en optique et en hydrodynamique</b> <i>B. Kibler, A. Chabchoub, A. Gelash, N. Akhmediev, V. Zakharov</i> .....	84
<b>Séismes en laboratoire : la longueur est déterminée par la mécanique de la fracture.</b> <i>Elsa Bayart, Ilya Svetlizky, Jay Fineberg</i> .....	85
<b>Étude de la réflexion d'une onde de surface grâce à l'acoustique</b> <i>Guillaume Michel, François Pétrélis, Stéphan Fauve</i> .....	86
<b>Régime chaotique verrouillé en fréquence d'un oscillateur opto-hyper.</b> <i>Aurélien Thorette, Marco Romanelli, Marc Brunel, Marc Vallet</i> .....	87
<b>Identification en turbulence intégrable de structures cohérentes de type onde scélérate par une méthode de diffusion inverse</b> <i>S. Randoux, P. Suret, G. El</i> .....	88
<b>Expériences de propagation d'ondes partiellement cohérentes : comparaison entre optique et hydrodynamique</b> <i>R. EL KOUSSAIFI, Miguel ONORATO, Stephane RANDOUX, Alexey TIKAN, Pierre SURET</i> ..	89
<b>Coherent structures generated from random initial conditions in the one-dimensional Nonlinear Schrödinger Equation</b> <i>A. Tikan, S. Bielawski, R. El Koussaifi, C. Evain, M. Le Parquier, S. Randoux, C. Szawaj, P. Suret</i>	90
<b>Comparaison des approches en EEM et LES/DNS pour une flamme mince plissée bidimensionnelle plane-en-moyenne</b> <i>Yves D'Angelo, Lancelot Boulet</i> .....	91
<b>Turbulence-induced self-focusing and filamentation</b> <i>D. Eeltink, N. Berti, N. Marchiando, S. Hermelin, M. Brunetti, J.P. Wolf, J. Kasparian</i> .....	92
<b>Kraichnan-Kazanstev dynamos in 2.5D flows</b> <i>Kannabiran SESHASAYANAN, Alexandros ALEXAKIS</i> .....	93
<b>Un outil mathématique pour la physique : l'analyse non linéaire MinPlus et l'intégrale de chemin MinPlus</b> <i>Michel Gondran, Alexandre Gondran</i> .....	94
<b>Un modèle heuristique de particule étendue compatible avec la mécanique quantique</b> <i>Alexandre Gondran, Michel Gondran</i> .....	95
<b>Tumbling in an extensional flow</b> <i>Plan,, Vincenzi</i> .....	96
<b>Déformation de goutte posée excitée par des Ondes Acoustiques de Surface</b> <i>Nicolas Chastrette, Laurent Royon, Michael Baudoin, Philippe Brunet, Régis Wunenburger</i> .....	97
<b>début du titre</b>	
<b>fin du titre</b> <i>Combriat Thomas, Thibault Pierre, Marmottant Philippe</i> .....	98
<b>Écoulement et stabilité d'un rideau liquide viscoélastique.</b> <i>Antoine Gaillard, Laurent Limat, Luc Lebon, Julien Beaumont, Henri Lhuissier</i> .....	99
<b>Etude Magnétohydrodynamique des écoulements soumis à un forçage électromagnétique</b> <i>M.Pereira, C.Gissing, S. Fauve</i> .....	100

<b>Une dynamo équatoriale en écoulement de Taylor-Couette sphérique.</b> <i>F. Marcotte, C. Gissinger</i> .....	101
<b>Instabilities in electrically conducting fluids driven by rotating magnetic fields</b> <i>K. Sandeep Reddy, Christophe Gissinger, Stephan Fauve</i> .....	102
<b>Instabilité d'une suspension de particules non browniennes oscillant horizontalement.</b> <i>Y.L. Roht, J-P. Hulin, G. Gauthier, D. Salin, R. Chertcoff, H. Auradou, I. Ippolito.</i> .....	103
<b>Destabilisation et cratérisation d'un lit granulaire immergé par force de bouée</b> <i>Eric Herbert, Cyprien Morize, Aurelie Louis-Napoleon, Alban Sauret, Christophe Goupil, Yves D'Angelo</i> .....	104
<b>Incorporation de fluide dans un matériau granulaire sec en écoulement</b> <i>Guillaume Saingier, Alban Sauret, Pierre Jop</i> .....	105
<b>Instabilités grande échelle d'écoulements hélicitaires</b> <i>Alexandre Cameron, Alexandros Alexakis, Marc-Étienne Brachet</i> .....	106
<b>Instabilités secondaires dans la convection de Rayleigh-Bénard pour un fluide non-Newtonien</b> <i>T. Varé, C. Nouar</i> .....	107
<b>The influence of fluid viscoelasticity on steady streaming generated by an oscillating cylinder</b> <i>Seyed-Amir Bahrani, Maxime Costalonga, Laurent Royon, Philippe Brunet</i> .....	108
<b>Contrôle de la force musculaire par une commande non-linéaire</b> <i>Maillard A., Bakir T., Binczak S.</i> .....	109
<b>Propagation non linéaire d'une bulle d'embolie dans le réseau hydraulique des feuilles</b> <i>Bienaimé Diane, Marmottant Philippe</i> .....	110
<b>Acoustique et vibration des mousses liquides</b> <i>Elias, Pierre, Derec, Guillermic, Kosgodagan, Saint-Jalmes, Drenckhan, Gay, Dollet, Leroy</i> .....	111
<b>Un modèle mathématique d'interaction liquide-vapeur</b> <i>F. James, H. Mathis</i> .....	112
<b>Signalisation hydraulique et gravitropisme chez les plantes : de la poroélasticité aux suspensions actives</b> <i>FORTERRE Yoël</i> .....	113

## Dualité classique : mémoire d'ondes et reflet du temps

E. Fort<sup>1</sup>

Institut Langevin, ESPCI Paris, 1 rue Jussieu, 75238 PARIS Cedex 05, France.  
[emmanuel.fort@espci.fr](mailto:emmanuel.fort@espci.fr)

Some three centuries ago, Newton suggested that corpuscles of light generate waves in an aethereal medium like a skipping stone generates waves in water, their motion then being affected by these waves. Today, light corpuscles are known as photons, and the notion of aether has been abandoned. Nevertheless, in certain features of Newton's metaphor live on in some theories in which particles are guided by their own wave.

I will discuss the behavior of a macroscopic object composed of a material particle dynamically coupled to a wave packet. The particle is a droplet bouncing on the surface of a vertically vibrated liquid bath, its pilot-wave is made of the superposition of the surface waves it excites. Above an excitation threshold, this symbiotic object, designated as a *walker* becomes self-propelled. Such a walker exhibits several features previously thought to be specific to the microscopic realm. The unexpected appearance of both uncertainty and quantization behaviors at the macroscopic scale originates in the essence of this "classical" duality. I will present experiments that are the analog of quantum experiments (diffraction and Young's double slit experiment, orbital quantization, tunneling,...

The dynamics of the droplet depends on previously visited spots along its trajectory through the surface waves emitted during each bounce. This path memory dynamics gives a walker an intrinsic spatio-temporal non-locality. I will discuss the characteristics of these objects that encode a wave memory. In particular, I will introduce the concept of temporal mirrors to interpret the backward propagating waves.

## Predictive fluid dynamics models of wave-droplet interactions

P. A. Milewski<sup>1</sup>

Department of Mathematical Sciences, University of Bath, Bath BA2 7AY UK

[P.A.Milewski@bath.ac.uk](mailto:P.A.Milewski@bath.ac.uk)

I will describe recent work that is yielding new fluid dynamics based models for the wave-droplet problem which are both accurate and efficient to compute. Recent work has resulted in models which allow us to predict the details and stability of various complex states including promenades, orbiting drops, trajectories under force fields, etc...

## Quantum-like statistics of deterministic wave-particle interactions in a circular cavity

T. Gilet<sup>1</sup>

Microfluidics Lab, Dept. Aerospace & Mech. Eng., University of Liege, Belgium  
[Tristan.Gilet@ulg.ac.be](mailto:Tristan.Gilet@ulg.ac.be)

A deterministic low-dimensional iterated map is here proposed to describe the interaction between a bouncing droplet and Faraday waves confined to a circular cavity. Its solutions are investigated theoretically and numerically. The horizontal trajectory of the droplet can be chaotic : it then corresponds to a random walk of average step size equal to half the Faraday wavelength. An analogy is made between the diffusion coefficient of this random walk and the action per unit mass of a quantum particle. The statistics of droplet position and speed are shaped by the cavity eigenmodes, in remarkable agreement with the solution of Schrödinger equation for a quantum particle in a similar potential well.

## Gouttes marcheuses en présence d'obstacles

R. Dubertrand & M. Hubert, P. Schlagheck, N. Vandewalle, T. Bastin, J. Martin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département de Physique, Université de Liège, 4000 Liège, Belgique  
remy.dubertrand@ulg.ac.be

### Résumé.

Nous sommes intéressés à une goutte rebondissante sur un bain vibrant. À cause de l'instabilité de Faraday, une onde de surface est créée à chaque impact et constitue une *onde pilote* pour la goutte. Ces deux éléments forment une goutte marcheuse, aussi appelée « marcheur ». Depuis l'expérience du groupe d'Y. Couder [1] il y a eu un effort particulier pour reproduire les résultats expérimentaux. Le résultat le plus surprenant est probablement le motif de diffraction et d'interférence pour les trajectoires de marcheurs en champ lointain après passage sur une simple ou double fente. Ceci pose la question si ce système macroscopique peut reconstituer la dualité onde/corpuscule propre à une particule quantique. Ce système est d'autant plus stimulant qu'il a été étudié par plusieurs groupes dans des géométries différentes [2,3,4,5].

Dans l'étude [6] nous proposons un modèle très polyvalent inspiré d'une approche de mécanique quantique pour étudier la forme de ces trajectoires. Ce modèle propose une alliance de perspectives entre un point de vue « mécanique des fluides » et un point de vue « dynamique quantique complexe ». Plus précisément il utilise un formalisme de fonction de Green et permet de traiter la dynamique d'un marcheur en géométrie arbitraire. Il permet surtout de reproduire de manière qualitative le profil de diffraction pour les trajectoires d'un marcheur derrière une simple fente.

### Références

1. Y. COUDER, AND E. FORT, Single-Particle Diffraction and Interference at a Macroscopic Scale, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 154101 (2006)
2. D. M. HARRIS, J. MOUKHTAR, E. FORT, Y. COUDER, J. W. M. BUSH, Wavelike statistics from pilot-wave dynamics in a circular corral, *Phys. Rev. E* **88**, 011001(R) (2013)
3. D. SHIROKOFF, Bouncing droplets on a billiard table, *Chaos* **23**, 013115 (2013)
4. T. GILET, Dynamics and statistics of wave-particle interactions in a confined geometry, *Phys. Rev. E* **90**, 052917 (2014)
5. B. FILOUX, M. HUBERT, N. VANDEWALLE, Strings of droplets propelled by coherent waves, *Phys. Rev. E*, **92** 041004(R) (2015)
6. R. DUBERTRAND, M. HUBERT, P. SCHLAGHECK, N. VANDEWALLE, T. BASTIN, J. MARTIN, Walking droplets in presence of obstacles, to be submitted to *New J. Phys.* (2016)

# Métamatériaux localement résonants : polaritons et physique du solide à l'échelle macroscopique

Lemoult Fabrice<sup>1</sup>, Kaina Nadège<sup>1</sup>, Fink Mathias<sup>1</sup> & Lerosey Geoffroy<sup>1</sup>

Institut Langevin, ESPCI Paris and CNRS UMR 7587  
fabrice.lemoult@espci.fr

En acoustique audible ou bien en électromagnétisme micro-ondes, les longueurs d'onde peuvent atteindre des distances métriques et il devient aisé d'étudier la propagation des ondes sur des dimensions sub-longueur d'ondes. C'est dans cette optique que nos recherches se sont concentrées sur l'étude de la propagation dans des milieux composés de résonateurs sub-longueur d'onde interagissant avec le continuum des ondes. Ainsi, nous mettons en évidence que la canette de soda, un résonateur d'Helmholtz en acoustique, et un fil métallique de longueur finie en électromagnétisme, sont des analogues d'un atome à deux niveaux vis-à-vis des ondes optiques. Le couplage entre une onde et ces résonateurs spatialement localisés donne naissance à un état hybride, bien connu en physique du solide sous le nom de polariton. Il s'agit d'une quasi-particule résultant du couplage entre un photon et un exciton. Aux échelles macroscopiques, il est difficile de concevoir une telle quasi-particule mais nous mettons en évidence que la propagation dans des milieux composés de tels résonateurs est régie par la même physique. Notamment, le couplage entre une onde incidente et ces atomes macroscopiques donne naissance à des bandes propagatives d'indice élevé ou à des bandes interdites, résultantes toutes deux d'interférences de Fano entre les continuum des ondes et l'onde diffusée par le résonateur. Chaque gamme spectrale de cette relation de dispersion présente son intérêt que nous illustrons expérimentalement. Nous montrons ainsi des résultats de focalisation en-dessous de la limite de diffraction en exploitant les interférences cohérentes entre l'onde incidente et les ondes réémises [1]. Puis, nous exploitons les interférences destructives pour montrer la possibilité de guider les ondes sur des échelles indépendantes de la longueur d'onde [2]. Enfin, nous abordons les nombreuses possibilités que ces dispositifs expérimentaux offrent afin d'étudier la physique du solide à l'échelle macroscopique, par exemple avec l'obtention d'un milieu à indice négatif [3].

## Références

1. F. Lemoult, G. Lerosey, and M. Fink, "Acoustic Resonators for Far-Field Control of Sound on a Subwavelength Scale," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 107, 064301, 2011
2. F. Lemoult, N. Kaina, M. Fink, and G. Lerosey, "Wave propagation control at the deep subwavelength scale in metamaterials," *Nat. Physics*, Vol. 9, 55-60, 2013
3. N. Kaina, F. Lemoult, M. Fink, and G. Lerosey, "Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials," *Nature*, Vol. 525, 77-81, 2015



## Walking droplets in confined geometries

B. Filoux, M. Hubert & N. Vandewalle

GRASP, Institute of Physics, B5a, University of Liège, B-4000 Liège  
boris.filoux@ulg.ac.be

Lorsqu'on dépose délicatement une goutte sur un bain vibré verticalement, sous certaines conditions, nous parvenons à éviter le phénomène de coalescence. La goutte rebondit alors de façon permanente. En augmentant l'accélération de forçage, la goutte atteint un régime dynamique lui permettant de se déplacer horizontalement à la surface du liquide, à vitesse constante [1,2]. En se mouvant ainsi, la goutte marcheuse laisse dans son sillage des sources d'ondes stationnaires résultant de ses impacts sur la surface. Ce sont ces ondes qui sont à l'origine de la marche. Ces dernières années ont vu l'apparition de techniques de confinement de gouttes dans une géométrie bidimensionnelle : cavité cylindrique, potentiel harmonique ou encore force de Coriolis [3,4]. D'autre part, les interactions entre deux marcheurs identiques ont également été caractérisées [5].

Au cours de notre exposé, nous montrons qu'il est possible de confiner un marcheur dans une géométrie quasi 1d en utilisant des cavités submergées. En premier lieu, nous présentons des expériences menées dans des cavités rectangulaires, de largeurs proportionnelles à la longueur d'onde de Faraday. L'étude des vitesses transversales et longitudinales des marcheurs au sein de ces cavités, nous permet de trouver un critère pour obtenir un confinement à 1d optimal. En s'intéressant aux ondes de Faraday émises dans la cavité, nous proposons ensuite une analogie avec les guides d'ondes pour rendre compte de l'évolution de la vitesse des marcheurs dans les cavités. Dans une seconde partie, nous utilisons des cavités annulaires afin d'étudier les interactions inter-gouttes et montrons qu'une quantification des interdistances apparaît. Nous étudions la vitesse de binômes de gouttes, l'interdistance entre les gouttes influe sur leur vitesse de groupe : ces gouttes se déplacent plus vite lorsqu'elles sont proches. Nous portons enfin notre intérêt sur les chaînes de gouttes. Ces dernières partagent la même onde cohérente qui tend à autopropulser le système à une vitesse supérieure à celle d'une goutte seule. Nous discutons de l'influence du nombre de gouttes, mais également de la distance entre ces dernières sur la vitesse d'une chaîne. L'évolution de la vitesse d'une chaîne est le résultat d'interférences constructives entre chaque onde émise par chaque goutte. Nous proposons enfin un modèle rendant compte de la quantification des distances et de l'évolution des vitesses selon les différents paramètres [6].

## Références

1. Y. Couder, S. Protière, E. Fort, and A. Boudaoud, *Nature* **437**, 208 (2005).
2. S. Protière, A. Boudaoud, and Y. Couder, *J. Fluid Mech.* **554**, 85 (2006).
3. S. Perrard, M. Labousse, M. Miskin, E. Fort, and Y. Couder, *Nat. Comm.* **5**, 3219 (2014).
4. M. Labousse and S. Perrard, *Phys. Rev. E* **90**, 022913 (2014).
5. C. Borghesi, J. Moukhtar, M. Labousse, A. Eddi, E. Fort, and Y. Couder, *Phys. Rev. E* **90**, 063017 (2014).
6. B. Filoux, M. Hubert, and N. Vandewalle, *Phys. Rev. E* **92**, 041004(R) (2015).

## Vagues à l'approche du littoral : raidissement, déferlement et génération de vorticité

David LANNES

IMB, CNRS/Univ. Bordeaux  
david.lannes@math.u-bordeaux1.fr

Le but de cet exposé est d'expliquer le comportement des vagues à l'approche des côtes. Pour cela, nous montrerons comment obtenir différents modèles asymptotiques à partir des équations d'Euler dans un cadre irrotationnel. Nous présenterons des simulations numériques basées sur ces modèles et qui permettent de prendre en compte les phénomènes de déferlement et d'annulation de la hauteur d'eau au rivage. En raison de ces deux derniers phénomènes, on observe (numériquement et physiquement) une génération de vorticité (les courants de ba nes ou rip-currents par exemple). Nous expliquerons alors à l'aide d'une démarche inspirée de l'étude de la turbulence comment les modèles précédents peuvent être généralisés au cas rotationnel, permettant ainsi de décrire des interactions vagues-courants non triviales.

## Front d'écoulement granulaire : expériences et prédictions

Deboeuf<sup>1</sup>, Saingier<sup>2</sup> & Lagrée<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut d'Alembert (UPMC/CNRS UMR 7190) 75005 Paris, France

<sup>2</sup> Surface du Verre et Interface (Saint-Gobain/CNRS UMR 125) 93303 Aubervilliers, France

sdeboeuf@dalembert.upmc.fr

L'écoulement de matériaux granulaires sur une topographie ou une géométrie complexe est une situation commune rencontrée en contexte géophysique ou industriel. Nous nous intéressons à la configuration modèle d'un écoulement granulaire dense de micro-billes sur un plan incliné rugueux (Pouliquen). En particulier, nous étudions la forme du front expérimentalement et théoriquement à partir des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement moyennées dans l'épaisseur (équations de Savage & Hutter en 1D). La rhéologie granulaire est prise en compte par le coefficient de friction variable  $\mu(I)$  proposé ces dernières années (GDR MiDi, DaCruz et al, Jop et al). Contrairement aux études précédentes qui supposent un écoulement uniforme dans l'épaisseur (écoulement de type bouchon), un coefficient dépendant de la forme du profil de vitesse (facteur de forme) est pris en compte. Ainsi, nous mettons en évidence un effet inertiel qui dépend du nombre de Froude (rapport inertie/gravité) et du facteur de forme. Cette étude soulève notamment la question des propriétés de l'écoulement dans le front.

### Références

DaCruz et al 2005  
GDR MiDi 2004  
Jop et al 2006  
Pouliquen 1999  
Savage & Hutter 1989

# Mise en suspension de particules immergées par injection d'air

Clément Picard, Valérie Vidal & Sylvain Joubaud

Laboratoire de Physique, Université de Lyon, École Normale Supérieure de Lyon - CNRS  
46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France  
clement.picard@ens-lyon.fr

Les écoulements triphasiques (liquide-grains-gaz) interviennent dans de nombreux procédés industriels et phénomènes naturels. En effet la présence de gaz dans des sédiments océaniques se révèle importante, notamment sous l'effet de fortes contraintes où le gaz est relâché et peut provoquer des fissures [1,2]. Dans le contexte industriel (pétrochimie, alimentaire...), ce type d'écoulement est très intéressant pour les réactions chimiques nécessitant trois phases. Dans le cas des réacteurs catalytiques, en particulier, le but est d'optimiser l'écoulement afin d'augmenter l'aire de contact mais aussi le transfert de masse entre les phases gazeuse et liquide [3].

Contrairement aux écoulements diphasiques liquide-grains ou gaz-grains [4], le cas triphasique reste peu ou mal compris, dû à la complexité de la dynamique de passage du gaz à travers le milieu granulaire immergé [5]. En effet, d'un point de vue fondamental, l'écoulement fait intervenir non seulement les trois phases, mais aussi leurs interactions à différentes échelles spatiales et temporelles : interactions grains/grains, couplage hydrodynamique entre le fluide, le gaz et le mouvement des particules, etc. Dans le cas particulier où les grains sont légèrement plus denses que le liquide environnant, la compétition entre la mise en suspension et la sédimentation est importante. Cette étude se focalise sur cette problématique.

Nous étudions expérimentalement le comportement d'un lit granulaire immergé dans une cellule de Hele-Shaw, dans laquelle l'air est injecté à la base du lit granulaire, au centre. Tout d'abord, le gaz percole à travers les grains, puis, en arrivant à la surface du lit, il forme des bulles qui remontent dans le liquide en entraînant des particules. Les particules sont ensuite redéposées sur les côtés de la cellule, à la surface libre du milieu granulaire, et avalanchent dans le cratère ainsi formé. Elles sont ensuite à nouveau entraînées par l'injection continue d'air au centre. On crée ainsi une suspension "dynamique".

Dans un premier temps, on observe l'existence d'un état stationnaire, résultant de l'équilibre entre le transport des particules et leur sédimentation. On quantifie alors la taille d'une "zone morte", une partie du milieu granulaire non affectée par l'écoulement d'air. Une étude plus détaillée de l'influence des différents paramètres de l'expérience (débit d'air, densité des particules, taille de la cellule...), met en évidence que les bulles, et plus particulièrement leur taille caractéristique, sont le principal paramètre de contrôle de cet écoulement triphasique.

## Références

1. Q. Kang, I. Tsimpanogiannis, D. Zhang, P. Lichtner, Numerical simulation of porescale phenomena during CO<sub>2</sub> sequestration in oceanic sediments, *Fuel Process. Technol.* **86**, 1647-1665 (2005).
2. I. Tsimpanogiannis, P. Lichtner, Pore-network study of methane hydrate dissociation, *Phys.Rev. E* **74**, 056303 (2006).
3. M. Dudukovic, F. Larachi, P. Mills, Multiphase catalytic reactors : A perspective on current knowledge and future trends, *Catal. Rev. Sci. Eng.*, **44**(1), 123-246 (2002).
4. F. Zoueshtiagh, A. Merlen, Effect of a vertically flowing water jet underneath a granular bed, *Phys.Rev. E* **75**, 056313 (2007).
5. C. Chevalier, A. Lindner, M. Leroux, Morphodynamics during air injection into a confined granular suspension, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **158**, 63 (2009).

## Pénétration d'une tige flexible dans un milieu granulaire dense

Algarra<sup>1</sup>, Kolb<sup>1</sup>, Vandembroucq<sup>1</sup> & Lazarus<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PMMH, CNRS UMR 7636, UPMC and Université Paris Diderot, ESPCI-ParisTech, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05, France

<sup>2</sup> Institut Jean Le Rond d'Alembert, CNRS UMR 7190, UPMC, F-75005 Paris, France  
 nicolas.algarra@espci.fr

Nous nous intéressons au problème de pénétration d'une tige flexible dans un milieu granulaire dense proche de sa transition de blocage. Cette expérience est un cas d'interaction fluide/structure un peu particulière où le fluide est un milieu granulaire. Plus largement, ce travail s'inscrit dans les problématiques d'écoulement de fluides autour d'objets flexibles qui adaptent leur forme pour être davantage profilés et minimiser leur force de traînée (« stratégie du roseau ») [1] [2] [3]. La tige élastique utilisée est une lame de mylar de longueur  $L$  et d'épaisseur  $t$  ajustables. Imposer ses dimensions géométriques revient à fixer la force caractéristique que la tige est capable de soutenir sans flamber, ou de façon équivalente la force typique de pénétration qu'elle peut exercer. Vu la dépendance de la force critique de flambage en  $L^{-2}$ , on s'attend à des mécanismes de pénétration très différents suivant la longueur de la tige. Mais d'un autre côté, on peut jouer sur la compacité  $\phi$  du milieu granulaire et donc sur la façon dont la tige est étreinte latéralement. Augmenter la compacité reviendrait à consolider latéralement la tige et à éviter sa déstabilisation. Dès lors, on peut se demander s'il n'y a pas une longueur de tige optimale qui minimiserait le travail nécessaire à la pénétration pour une compacité granulaire donnée. D'autre part, une autre question est de savoir quel sera le chemin emprunté par la tige et comment il dépendra de la distribution de tailles de pores entre les grains et de leur facilité à se réarranger.

Nous avons donc étudié la pénétration de tiges de différentes longueurs ( $L$  variant de 1 à 5 cm, soit de 2 à 10 diamètres de grains) dans des milieux granulaires 2 D de compacité  $\phi$  ( $\phi$  compris entre 79% et 83%) proche de la compacité de blocage, et pour une vitesse fixe  $V_0=5/6$  mm/s correspondant à un régime d'écoulement granulaire quasi-statique. A différents stades de pénétration, nous mesurons les forces et moments au point d'encastrement et déterminons par analyse d'images les déformées de la tige ainsi que les mouvements des grains. Nous avons identifié une transition d'un régime d'oscillation de l'extrémité libre de la tige à un régime de basculement où la tige ploie irréversiblement d'un côté. Cette reconfiguration de la tige est associée à une dissymétrisation de la compacité du milieu granulaire de part et d'autre de la tige, avec la création d'une cavité vide de grains en aval de la tige. La déformée expérimentale de la tige est comparée à différents profils obtenus par des simulations sur des poutres d'Euler-Bernoulli pour différentes répartitions d'efforts, de façon à comprendre le couplage entre la reconfiguration de la tige et la réorganisation des grains.

### Références

1. E de Langre, A Gutierrez, and J Cosse. On the scaling of drag reduction by reconfiguration in plants. *COMPTES RENDUS MECANIQUE*, 340(1-2) :35–40, JAN-FEB 2012.
2. S Alben, M Shelley, and J Zhang. Drag reduction through self-similar bending of a flexible body. *NATURE*, 420(6915) :479–481, DEC 5 2002.
3. L Schouveiler and A Boudaoud. The rolling up of sheets in a steady flow. *JOURNAL OF FLUID MECHANICS*, 563 :71–80, 9 2006.

# Érosion d'un lit granulaire par une plaque oscillante : comment les poissons plats s'enfouissent dans le sable ?

C. Morize<sup>1</sup>, A. Sauret<sup>1,2</sup>, G. Quibeuf<sup>1</sup> & P. Gondret<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire FAST, Univ. Paris-Sud, CNRS, Univ. Paris Saclay, F-91405 Orsay, France

<sup>2</sup> Surface du Verre et Interfaces, UMR 125, CNRS/Saint-Gobain, 93303 Aubervilliers, France

morize@fast.u-psud.fr

L'érosion et la resuspension de grains par un écoulement fluide est un phénomène qui intervient dans diverses situations naturelles et industrielles [1]. Dans certains cas, l'érosion est un phénomène passif, comme par exemple dans le cas du transport naturel de sable ou de sédiments par le vent dans l'air ou par l'eau dans le lit des rivières [2]. A l'inverse, certains processus d'érosion et de resuspension peuvent être recherchés et directement induits en générant un écoulement contrôlé. Ceci se produit, par exemple, pour certains poissons plats, comme les soles et les raies, qui sont capables de se recouvrir de sable en une fraction de seconde afin de se cacher et d'éviter les prédateurs. Plus précisément, en battant des nageoires au voisinage du lit granulaire, ces poissons génèrent des tourbillons qui érodent et soulèvent les particules de sable qui les recouvrent ensuite lorsque cesse le mouvement oscillant.

Afin de caractériser cette situation, nous avons développé une expérience modèle constituée d'un disque de diamètre  $D$ , situé à une distance moyenne  $H$  d'un lit granulaire. Ce disque oscille à une amplitude  $A$ , une fréquence  $f$  et génère périodiquement des tourbillons [3]. L'apparition de l'érosion est connue pour être gouvernée par le nombre de Shields,  $Sh = \tau_f / (\Delta \rho g d)$ , qui est construit comme le rapport de la contrainte hydrodynamique déstabilisante,  $\tau_f$ , à la force stabilisante liée au poids apparent des grains,  $\Delta \rho g d$  [4]. Dans notre situation tourbillonnaire, la contrainte hydrodynamique est d'origine inertielle :  $\tau_f \sim \rho_f U^2$ , où  $\rho_f$  est la densité du fluide et  $U$  la vitesse au niveau du lit granulaire. L'objectif de cette étude est de caractériser expérimentalement l'interaction complexe, entre le mouvement de la plaque, l'écoulement qui en résulte et son impact sur l'érosion du lit granulaire.

Des champs de vitesse obtenus par Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) ont permis de déterminer la taille et la vitesse caractéristiques des vortex générés par l'oscillation de la plaque. Le rayon du tourbillon est proportionnel à l'amplitude des oscillations et ne dépend ni du rayon de la plaque ni de la fréquence de battement tandis que la vitesse du vortex est directement proportionnelle à la vitesse maximale  $2\pi A f$  et au rayon  $R$  de la plaque. Des mesures systématiques par visualisations directes montrent une dépendance du seuil d'érosion avec la distance  $H$  de la plaque au lit de grains. Plus  $H$  est grand, plus l'oscillation de la plaque doit être importante pour éroder le lit granulaire. Par ailleurs, les mesures de la vitesse critique d'érosion ont mis en évidence une décroissance de la vitesse comme l'inverse de la distance à la plaque. Ces résultats permettent de caractériser l'évolution du nombre Shields critique  $Sh_c$  en fonction d'une distance adimensionnée  $(H - A)/R$  et de déterminer le mouvement nécessaire pour éroder le lit granulaire.

## Références

1. S. BADR, G. GAUTHIER & P. GONDRET, Erosion threshold of a liquid immersed granular bed by an impinging plane liquid jet, *Phys. Fluids*, **26**, 023302 (2014).
2. M. OURIEMI, P. AUSSILLOUS, M. MEDALE, Y. PEYSSON & E. GUZZELLI, Determination of the critical Shields number for particle erosion in laminar flow, *Phys. Fluids*, **19**, 61706–63100 (2007).
3. M. J. SHELLEY & J. ZHANG, Flapping and bending bodies interacting with fluid flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **43**, 449–465 (2011).
4. J. M. BUFFINGTON, The legend of A. F. Shields, *J. Hydraul. Eng.*, **125**, 376–387 (1999).

# Ondes de choc et implosion d'un faisceau optique Gaussien se propageant dans un cristal liquide à non-linéarité focalisante.

Louis Hélène *et al.*<sup>1</sup>

Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France  
[helene.louis@univ-lille1.fr](mailto:helene.louis@univ-lille1.fr)

Le raidissement de l'enveloppe d'un paquet d'ondes se propageant dans un milieu est un phénomène non linéaire rencontré fréquemment en physique. Lorsque ce raidissement (ou gradient du profil) devient infini, le profil de l'enveloppe devient abrupt (ou discontinu) et conduit à une onde de choc. L'effet est connu aussi sous le nom de "catastrophe du gradient". C'est le cas bien connu de la vague qui se raidit en arrivant sur la plage et qui finit par se briser.

En fonction du milieu dans lequel s'effectue la propagation, les ondes de choc présentent un front accompagné d'oscillations ou non. C'est le cas respectivement des chocs dissipatif et dispersif. En optique non-linéaire, la mise en évidence expérimentale d'ondes de choc dispersives spatiales a été réalisée il y a une dizaine d'années pour une non-linéarité défocalisante [1]. Le cas du milieu focalisant est plus délicat à appréhender principalement en raison de l'instabilité de modulation. En effet, sa présence complique l'observation des ondes de choc et empêche le développement des études analytiques. Des alternatives ont été proposées pour contourner ce problème dans le domaine spatial dont une expérience utilisant un faisceau partiellement cohérent [2]. Une étude numérique propose, elle, d'utiliser un milieu dont la réponse est non locale [3]. L'idée dans ces deux cas est de frustrer ou retarder l'apparition de l'instabilité modulationnelle.

Nous tirons parti ici de la réponse non locale des cristaux liquides nématiques ancrés pour explorer et étudier expérimentalement les phénomènes d'ondes de choc lorsque la non-linéarité Kerr est focalisante. Nous montrons que ce type de réponse retarde l'apparition de l'instabilité modulationnelle lors de la propagation d'un faisceau optique Gaussien et permet l'observation de la formation d'ondes de choc.

Nous mettons en évidence expérimentalement le phénomène de catastrophe du gradient lors de la propagation lumineuse dans un cristal liquide focalisant (E7) d'un faisceau Gaussien large initialement de quelques centaines de microns. Au cours de la propagation, les deux côtés du profil Gaussien se raidissent et convergent avant de se repousser. Une loi de puissance est retrouvée pour le point de convergence en fonction de la puissance injectée, comme pour le cas défocalisant [4].

Un profil optique initial en forme de créneau est aussi étudié. La moitié du faisceau gaussien est bloquée [2] ce qui conduit à de la diffraction de Fresnel non linéaire. Dans cette configuration, de multiples ondes de choc sont générées successivement et l'effet de la non-localité conduit à l'éjection d'une onde solitaire se propageant à travers le faisceau diffracté.

La modélisation du système par une équation de propagation pour le champ optique et une équation d'évolution temporelle stochastique non locale pour la non-linéarité du milieu Kerr reproduit fidèlement nos observations expérimentales. Les simulations numériques font clairement apparaître le caractère dispersif des ondes de choc émises. Ainsi, bien que notre système soit stochastique et que la réponse du milieu soit extrêmement lente par rapport à l'échelle d'évolution du champ optique, il constitue un excellent terrain de jeu pour l'exploration des ondes de choc.

## Références

1. W. Wan, S. Jia, and J. W. Fleischer, *Nat. Phys.* **3**, 46 (2007).
2. W. Wan, D. V Dylov, C. Barsi, and J. W. Fleischer, *Opt. Lett.* **35**, 2819 (2010).
3. G. Assanto, T. R. Marchant, and N. F. Smyth, *Phys. Rev. A* **78**, 1 (2008).
4. N. Ghofraniha, L. S. Amato, V. Folli, S. Trillo, E. DelRe, and C. Conti, *Opt. Lett.* **37**, 2325 (2012).

# Ponts de bifurcation dans un laser en anneau soumis à un feedback optique

Gaetan Friart<sup>1</sup>, Mulham Khoder<sup>2</sup>, Guy Van der Sande<sup>2</sup>, Guy Verschaffelt<sup>2</sup> & Thomas Erneux<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université libre de Bruxelles, Optique Nonlinéaire Théorique, Campus Plaine, C.P. 231, 1050 Bruxelles, Belgium

<sup>2</sup> Vrije Universiteit Brussel, Applied Physics Research Group (APHY), Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium  
gfriart@ulb.ac.be

Ces dernières décennies, l'étude des dynamiques non-linéaires à retard connaît un formidable essor dans de nombreux domaines scientifiques. Grâce à leur grande sensibilité au feedback optique retardé, les lasers à semi-conducteurs sont rapidement devenus un banc d'essai expérimental et théorique idéal pour la dynamique à retard [1]. Parmi les différents dispositifs étudiés, le laser en anneau soumis à un feedback est particulièrement attractif car il peut être aisément utilisé dans les circuits photoniques intégrés. Plusieurs applications prometteuses comme le contrôle précis de la longueur d'onde d'émission du laser sont actuellement développées grâce à des lasers en anneau avec feedback [2].

Dans cette contribution, nous nous intéresserons à la dynamique non-linéaire d'un laser en anneau soumis à un feedback optique. En particulier, nous mettons en évidence des branches de solutions périodiques connectant entre eux différents états d'intensité stationnaire. Ces branches, appelées ponts de bifurcation, apparaissent à une bifurcation de Hopf d'un premier état stationnaire et se terminent à une seconde bifurcation de Hopf d'un deuxième état stationnaire [3]. Ce mécanisme particulier de bifurcation nécessite des conditions spécifiques sur les paramètres du laser et n'avait jamais été observé expérimentalement de façon stable. Nous montrons que les lasers en anneau satisfont aux conditions théoriques nécessaires pour observer ce phénomène et nous présentons les résultats expérimentaux mettant en évidence ces ponts de bifurcation.

## Références

1. T. Erneux and P. Glorieux, "Laser Dynamics," Camb. Univ. Press, Cambridge UK (2010)
2. M. Khoder, G. Verschaffelt, R. M. Nguimdo, J. Bolk, X. J. M. Leijtens, and J. Danckaert, "Controlled multi-wavelength emission using semiconductor ring lasers with on-chip filtered optical feedback," *Opt. Lett.* **38**, 2608-2610 (2013)
3. D. Pieroux, T. Erneux, B. Haegeman, K. Engelborghs, and D. Roose, "Bridges of periodic solutions and tori in semiconductor laser subject to delay," *Phys. Rev. Lett.* **87**, 193901 (2001)



## Evènements extrêmes spatio-temporels dans un laser spatialement étendu

Cristina Rimoldi<sup>1</sup>, Stephane Barland<sup>1</sup>, Franco Prati<sup>2</sup> & Giovanna Tissoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Nice Sophia Antipolis, Institut Non Linéaire de Nice, CNRS UMR 7335, 1361 Route des Lucioles, F-06560 Valbonne, France

<sup>2</sup> CNISM, Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università dell'Insubria, Via Valleggio 11, I-22100 Como, Italy

[giovanna.tissoni@inln.cnrs.fr](mailto:giovanna.tissoni@inln.cnrs.fr)

Les phénomènes extrêmes sont définis par les conditions inhabituelles dans lesquelles ils se manifestent ou par leur ampleur. Cela va des événements géophysiques "catastrophiques" (tremblements de terre, tsunamis, glissements de terrain), jusqu'au phénomène des "vagues scélérates" qui se manifeste rarement mais qui peut occasionner des dommages sur les navires. Des analogues de vagues scélérates peuvent être observés autrement qu'à la surface de la mer, par exemple dans des dispositifs optiques où les ondes sont produites par des lasers, ce qui permet de les observer en laboratoire et donc de les étudier avec une grande précision. Le mécanisme par lequel ces ondes très particulières se forment est encore très mal compris. L'analogie entre les modèles des systèmes optiques non linéaires et les systèmes hydrodynamiques est connue depuis les années 80, mais ce n'est que très récemment qu'elle a été appliquée à l'étude des vagues scélérates [3,2].

Les microcavités à semiconducteur comme les VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) sont des candidats idéals pour explorer les mécanismes dynamiques qui sont à l'origine de phénomènes extrêmes du type vagues scélérates (rogue waves). Nous pensons que ces systèmes, qui sont intrinsèquement bidimensionnels, puissent être utiles pour individuer les mécanismes de la formation de vagues scélérates dans l'océan, mécanismes qui peuvent être absents dans les systèmes unidimensionnels. Ces cavités sont caractérisées par une longueur de l'ordre de la longueur d'onde optique et un diamètre transverse (par rapport à la propagation de la lumière) de plus de 200 microns. En outre, la rapidité extrême de ces systèmes peut permettre de recueillir et traiter la statistique d'un nombre très élevé de données (expérimentales ou numériques).

Nous étudions numériquement la formation des événements extrêmes dans un laser à semiconducteur à grande section transversale, avec un absorbant saturable intégré dans la cavité [3,4]. A différence de la littérature existante sur les vagues scélérates optiques dans les systèmes optiques transverses, nous avons développé une méthode numérique pour individuer les maxima spatio-temporels de l'intensité lumineuse dans le plan transverse : tous les maxima locaux sont suivis pendant leur évolution temporelle, et un "événement" n'est compté que quand il atteint sa valeur maximale aussi dans le temps [5]. Cette méthode permet une définition de "significant wave height", correspondant à la valeur moyenne de la hauteur (du minimum à la crête) du tiers le plus haut des "vagues" : la comparaison avec cette valeur permet de définir les événements extrêmes comme on fait en hydrodynamique.

### Références

1. D. R. Solli, C. Ropers, P. Koonath, and B. Jalali, Optical rogue waves, *Nature Lett.* **450**, 1054–1057 (2007); doi :10.1038/nature06402
2. John M. Dudley, Frédéric Dias, Miro Erkintalo and Goëry Genty, *Nature Phot.* **8**, 755–764 (2014).
3. F. Prati, G. Tissoni, L.A. Lugiato, K. Mahmoud Aghdami, and M. Brambilla, *Eur. Phys. J. D* **59**, 73 (2010)
4. H. Vahed, F. Prati, M. Turconi, S. Barland, and G. Tissoni, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **372** : 20140016 (2014). <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0016>
5. C. Rimoldi, S. Barland, F. Prati, G. Tissoni, in *Spatiotemporal Complexity in Nonlinear Optics (SCNO)*, 2015, pp.1-3, Aug. 31 2015-Sept. 4 2015 doi : 10.1109/SCNO.2015.7323997

# Evènements extrêmes soutenus par chaos spatio-temporel dans un laser à micro-cavity

Coulibaly<sup>1</sup>, Selmi<sup>2</sup>, Loghmari<sup>2</sup>, Clerc<sup>3</sup>, Barbay<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, LPN-CNRS UPR20, Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France

<sup>3</sup> Departamento de Física, Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Casilla 487-3, Santiago, Chile.

saliya.coulibaly@univ-lille1.fr

Les évènements dits extrêmes font désormais partie de la grande classe des structures qui peuvent être générées par les systèmes physiques portés hors équilibre, et font l'objet d'intenses études depuis quelques années. Cet intérêt est en grande partie motivé par le fait que les mécanismes qui sous-tendent la dynamique de ces structures sont diverses et qu'ils ne sont pas entièrement identifiés. En effet, ces structures ont tantôt été expliquées par des processus de collision, ou fission de structures localisées, tantôt par la présence de brisure de symétrie, encore par l'excitabilité du système considéré [1]. L'incohérence des conditions initiales a été utilisée pour mettre en évidence des évènements extrêmes. La plupart des exemples cités ici sont tirés de l'optique et cette liste est loin d'être exhaustive. En effet, la compréhension de ces phénomènes a d'abord été une problématique en hydrodynamique [2] avant de le devenir en optique [3], comme c'est le cas pour l'étude que nous proposons ici. Nous nous sommes intéressés à un système optique dissipatif et spatialement étendu : une microcavité lasers à semi-conducteur avec absorbant saturable. L'enregistrement de l'intensité émise par ce laser en fonction du temps montre que la proportion des évènements pouvant être considérés comme extrême présente un optimum. Les simulations numériques des équations modélisant le système conduisent aux mêmes conclusions avec les observations expérimentales. Suite à ces observations qui semblaient présenter une évolution chaotique nous avons opté pour une caractérisation quantitative du chaos dans le système. Ce dernier étant spatialement étendu, c'est l'ensemble du spectre de Lyapunov que nous avons alors calculé. Après avoir montré que le "désordre" dans le système, donné par la dimension de Yorke-Kaplan ou l'entropie de Sinai-Kolmogorov, était une fonction linéaire de sa taille nous avons pu conclure que notre système était spatio-temporellement chaotique. A taille fixée, nous avons montré que ce chaos spatio-temporel apparaît par le biais d'une bifurcation supercritique suivie d'une saturation donnant un plateau. Nous avons pu alors faire le lien entre la dynamique des évènements extrêmes et l'apparition du chaos spatio-temporel.

## Références

1. F. Selmi, S. Coulibaly, Z. Loghmari, I. Sagnes, G. Beaudoin, M. G. Clerc, and S. Barbay, Phys. Rev. Lett. **116**, 013901 (2016), et toutes les références incluses.
2. C. Kharif and E. Pelinovsky, Eur. J. Mech. B, Fluids **22**, 603 (2003).
3. D. R. Solli, C. Ropers, P. Koonath, and B. Jalali, Nature **450**, 1054 (2007).

## Faraday wave lattice as an elastic metamaterial

L. Domino<sup>1</sup>, M. Tarpin<sup>1</sup>, S. Patinet<sup>1</sup> & A. Eddi<sup>1</sup>

PMMM - ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris  
 lucie.domino@espci.fr

We use the Faraday instability to shape the fluid-air interface with a regular pattern. This hydrodynamic instability appears at the interface between two fluids subjected to a vertical oscillation [1]. Above a certain threshold of acceleration  $a_c$ , the surface shows a stationary deformation both stable in time and regular in space, with a Faraday wavelength  $\lambda_F$  defined by the inviscid gravity-capillary wave dispersion relation  $\omega_0^2 = (gk_F + \frac{\sigma}{\rho}k_F^3) \tanh(k_F h)$ , where  $k_F = (2\pi)/\lambda_F$  is the Faraday wavenumber,  $g$  is the acceleration of gravity,  $\sigma$  is the surface tension of the fluid,  $h$  the fluid depth and  $\rho$  its density.

Upon increasing the driving amplitude to about twice the threshold value, spontaneous oscillations of the square lattice appear [2]. We show that these oscillations are in-plane modulations of the pattern along its two main directions. They occur at a frequency  $f$  much lower than the Faraday frequency  $f_F$  whereas their spatial wavelength  $\lambda \simeq 2.0$  cm is 4 times larger than  $\lambda_F$ . In our experimental conditions and at this frequency  $f$ , the gravito-capillary dispersion relation gives a wavelength of  $\lambda_{gc} = 23.26$  cm much larger than  $\lambda$ . This means that the transverse standing wave responsible for the pattern oscillations is governed by a different physical mechanism that we identify by performing a new set of experiments.

We investigate all the oscillating modes of the Faraday wave pattern by locally forcing the vibrations of stable square patterns. We add to the vessel a custom-made forcing device consisting of a comb dipping into the liquid to a small depth. The comb oscillates horizontally in the reference frame of the container at frequencies ranging from 0.5 Hz to 5 Hz. We observe a transversal wave that propagates away from the forcing device at the forcing frequency  $f$ . From the experimental data we extract its wavenumber  $k_T$  for each value of  $f$ . The dispersion relation we obtain appears linear, with a phase speed equal to  $v_\varphi = 4.60$  cm.s<sup>-1</sup>. Such a linear dispersion relation reveals the elastic nature of the waves we observe.

We propose a physical mechanism combining surface tension with the Faraday structured interface. We consider the stable Faraday interface as a reference state. When this interface is sheared, its surface increases as well as its energy due to the surface tension  $\sigma$  of the fluid. By comparing this energy difference to the elastic energy of a sheared material, we are able to calculate an effective 2D shear modulus for our interface. The phase velocity we obtain is  $c_T = 4.84 \pm 0.63$  cm.s<sup>-1</sup>, which is in excellent agreement with the experimental result of 4.60 cm.s<sup>-1</sup>.

This means that we observe the emergence of a new physical property, namely an effective 2D elasticity, at the liquid-air interface. Our interpretation reveals that it is intimately related to the existence of a periodic pattern imprinted on the liquid interface. From this perspective, the Faraday wave pattern creates a mechanical metamaterial [3] at macroscopic scale.

### Références

1. M. Faraday, Phil. Trans. R. Soc. London 121, 299 (1831) ; S. Douady, J. Fluid Mech. 221, 383 (1990)
2. I. Shani, G. Cohen, and J. Fineberg, Phys. Rev. Lett. 104, 184507 (2010).
3. M. Kadic, T. Buckmann, R. Schittny, and M. Wegener, Reports on Progress in Physics 76, 126501 (2013)

## Transport de particules par ondes internes.

Sylvain Joubaud<sup>1</sup>, Ernesto Horne<sup>1,2</sup>, Diane Micard<sup>1,2</sup> & Philippe Odier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon, Université de Lyon, CNRS, Lyon, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, École Centrale de Lyon, CNRS, Écully, France  
sylvain.joubaud@ens-lyon.fr

Les ondes internes de gravité se propagent dans des fluides stratifiés en densité. L'océan et l'atmosphère sont des exemples naturels de tels fluides. Les ondes internes jouent un rôle important en géophysique. En particulier, les ondes internes non-linéaires participent non seulement au mélange océanique mais également du transport de nutriments et particules en suspension. La sédimentation de particules organiques ("neige marine") vers l'océan profond a un effet important sur les propriétés globales des océans et est nécessaire pour le développement de la biodiversité océanique. Les ondes internes peuvent générer un transport de cette neige marine et ainsi jouer un rôle dans le comportement des espèces marines. C'est par exemple le cas pour les baleines à bosse [1].

Nous étudions expérimentalement l'interaction entre des ondes internes et une colonne de particules en sédimentation. Ces expériences sont conduites dans une cuve quasi-bidimensionnelle ( $80 \times 40 \times 17 \text{ cm}^3$ ), remplie avec un fluide stratifié linéairement en densité. Les ondes internes sont des ondes planes obtenues grâce à un mécanisme composé de plaques oscillantes générant un profil modulable. Ce générateur, utilisé précédemment [2], a été amélioré pour cette étude afin de contrôler avec précision au cours du temps, la fréquence et l'amplitude de chaque plaque. Nous mesurons le champ de gradient de densité en utilisant une technique de strioscopie synthétique [3]. Par ailleurs, un dispositif d'injection de particules permet de former une colonne verticale de particules en sédimentation.

Le passage de l'onde interne induit un effet d'oscillation de la colonne à la fréquence de l'onde. De manière surprenante, cette oscillation reste présente longtemps après le passage de l'onde. Par ailleurs, nous montrons que, sous certaines conditions expérimentales, la colonne se déplace vers le générateur d'ondes. En particulier, la vitesse de déplacement de la colonne présente une résonance en fréquence. Nous présentons finalement un modèle expliquant le sens de déplacement de la colonne.

## Références

1. J. PINEDA, V. STARCZAK, J.C.B. DA SILVA, K. HELFRICH, M. THOMPSON AND D. WILEY, Whales and waves : Humpback whale foraging response and the shoaling of internal waves at Stellwagen Bank, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, **120**(4), 2555–2570 (2015).
2. M.J. MERCIER, D. MARTINAND, M. MATHUR, L. GOSTIAUX, T. PEACOCK AND T. DAUXOIS, New wave generation *Journal of Fluid Mechanics*, **657**, 308–334 (2010).
3. S.B. DALZIEL AND G.O. HUGHES AND B.R. SUTHERLAND Whole-field density measurements by synthetic schlieren *Experiments in Fluids*, **28**, 322–335 (2000).

## Propagation d'une onde de cavitation

EL AMRI<sup>1</sup>, ARGENTINA<sup>2</sup>, BOURET<sup>3</sup> & NOBLIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INLN 1361 route des Lucioles Sophia Antipolis F-06560 Valbonne, FRANCE

<sup>2</sup> INLN 1361 route des Lucioles Sophia Antipolis F-06560 Valbonne, FRANCE

<sup>3</sup> Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (LPMC) CNRS UMR 7336 Université de Nice-Sophia Antipolis Parc Valrose 06108 Nice cedex 2

ali.el.amri@inln.cnrs.fr, argentina@smail2.inln.cnrs.fr, yann.bouret@unice.fr, xavier.noblin@unice.fr

La cavitation est un phénomène observé dans le mécanisme d'éjection des spores de fougères par le sporange dans lequel ils se trouvent. L'équipe de X.Noblin a observé une propagation de la cavitation mise en évidence par deux expériences. L'une d'elle est une expérience biomimétique. Le dispositif de l'expérience est un hydrogel 2D : cette matière a la particularité de supporter des pressions très négatives. Dans l'hydrogel il y a des micro-cavités remplies d'eau. En laissant l'eau s'évaporer, des bulles de cavitations apparaissent. De plus l'équipe de X.Noblin a développé un programme de dynamique moléculaire modélisant à la fois la formation d'une bulle de cavitation et aussi la propagation d'une onde de cavitation entre deux micro-cavités. Les micro-cavités sont de volumes finis et très petits. Le liquide est donc confiné, et la compressibilité du liquide n'est pas négligeable. Le confinement a une influence sur la variation du rayon de la bulle de vapeur, l'obligeant à osciller autour d'un rayon d'équilibre, faisant vibrer la bulle.

Nous voulons modéliser cette propagation. Comme pour le programme de dynamique moléculaire, nous considérons deux micro-cavités. Dans la micro-cavité 1, nous imposons la nucléation d'une bulle et dans la micro-cavité 2 il n'y a que du liquide à la pression  $P_i < 0$ . Nous cherchons à faire propager la cavitation, en d'autres termes, à trouver sous quelles conditions la nucléation d'une bulle dans la micro-cavité 2 est provoquée par une autre bulle se trouvant dans la micro-cavité 1. Pour ce faire, nous augmentons la probabilité de nucléation dans la micro-cavité sans bulle. La seule manière d'y arriver est de diminuer sa pression la rendant inférieure à  $P_i$ .

Nous montrerons que le couplage de la membrane de séparation des deux micro-cavités et de celle de la vibration de la bulle permet, sous certaines conditions, de diminuer la pression dans la micro-cavité. En particulier, nous montrerons des conditions initiales nécessaires à la propagation de la nucléation en utilisant le cadre de la théorie classique de nucléation. Nous montrerons aussi que ces conditions ne sont pas toujours suffisantes. Enfin nous comparerons avec les simulations par dynamique moléculaire et avec les résultats dans les hydrogels.

## Références

1. E.H. Mansfield, *The bending and stretching of plates*, Cambridge University Press, 1989.
2. C. Brennen, *Cavitation and bubbles dynamics*, Oxford University Press, 1995.
3. O. Vincent, *Dynamique de bulle de cavitation dans de l'eau micro-confinée sous-tension*, Université de Grenoble, 2006.
4. O. Vincent, P. Marmottant and K. Ando, *The fast dynamics of cavitation bubbles within water confined in elastics solids*, *Soft Matter*, 2013, pp. 1455–1458.

## Relation de dispersion des vagues paramétriquement forcées

Jean Rajchenbach<sup>1</sup> et Didier Clamond<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (CNRS-UMR 6622),

<sup>2</sup> Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné (CNRS-UMR 6621)

Université de Nice – Sophia Antipolis, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2

Jean.Rajchenbach@unice.fr

Nous revisitons le problème des ondes de Faraday. Nous montrons que la relation de dispersion n'est pas celle des vagues libres (non-forcés), car l'amplitude du forçage et la viscosité interviennent ici de façon significative dans la relation de dispersion. Nous déterminons ensuite les seuils d'instabilité et le nombre d'onde sélectionné dans les deux cas des ondes courtes et des ondes longues. Nous montrons aussi que l'instabilité de Faraday peut être soit sur-critique, soit sous-critique, suivant la profondeur, ce qui explique de récents résultats expérimentaux [1].

### Références

1. J. Rajchenbach, D. Clamond, and A. Leroux, Observation of Star-Shaped Surface Gravity Waves. *Phys. Rev. Lett.* 110, 094502 (2013)

## L'hierarchie des modèles de Maxwell-Vlasov non-linéaires pour la vérification des codes gyrocinétiques.

Natalia Tronko<sup>1</sup>, Alberto Bottino<sup>2</sup>, Tobias Goerler<sup>2</sup> & Eric Sonnendruecker<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Numerische Methoden der Plasmaphysik, Max Planck Institut für Plasmaphysik, D-85748 Garching, Deutschland

<sup>2</sup> TOK, Max Planck Institut für Plasmaphysik, D-85748 Garching, Deutschland  
nataliat@ipp.mpg.de

La présence d'un fort champ magnétique qui caractérise les plasmas de fusion introduit la séparation des échelles de mouvement et permet de réaliser la réduction dynamique d'une manière systématique. Cette dernière portant le nom de la réduction gyrocinétique, est indispensable pour diminuer le temps de calcul dans les simulations numériques.

Afin de pouvoir prédire le comportement réel d'un plasma de fusion, l'interaction entre les modes MHD, la turbulence et les particules énergétiques doit être prise en compte. Ceci représente un défi numérique important, vu que les phénomènes aux grandes et aux petites échelles doivent être mis ensemble dans les simulations. Les capacités de la prédiction de comportement des plasmas de fusion dépendent de la validité des outils numériques qui sont utilisés pour la modélisation. À l'heure actuelle, la vérification des codes dans les régimes de paramètres qui correspondent aux scénarios avancés des réacteurs de fusion tels que ITER, a été faite d'une manière partielle uniquement.

Dans ce travail on présente la nouvelle procédure de vérification des codes gyrocinétiques qui prend en considération à la fois les modèles analytiques et les simulations spécifiques qui permettent de vérifier les schémas numériques, et par conséquent d'identifier la validité de domaine d'application d'un code.

La nouveauté principale de notre procédure de vérification au niveau analytique consiste en l'utilisation des méthodes variationnelles pour la dérivation des équations de codes. En plus, dans le premier temps, la vérification indirecte des schémas numériques est proposée à travers le Benchmark.

Un des plus grands avantages d'utilisation des méthodes variationnelles pour la dérivation de hiérarchie commune pour les modèles des codes, c'est qu'elle permet de dériver d'une manière systématique les lois des conservations exactes par la méthode de Noether [1] [2]. À son tour la connaissance des lois de conservation exactes puisse être utilisée pour la dérivation des diagnostics de code qui permettent de suivre la qualité des simulations, i.e. dans le cas de conservation de l'énergie.

Dans ce travail on considère deux codes électromagnétiques : ORB5 (PIC) [3], et GENE (Eulerien)[4]. On présente la hiérarchie des équations de Maxwell-Vlasov gyrocinétiques non-linéaires dérivées à partir de la principe variationnelle. On inclut les modèles de ORB5 et de GENE à l'intérieur de cette hiérarchie.

Au niveau des simulations numériques, la vérification détaillée des simulations électromagnétiques globales, basée sur les paramètres qui correspondent au cas de CYCLONE est réalisée. Ceci étant inclus : le  $\beta$ -scan paramétrique qui permet de visualiser la transition entre l'instabilité due au gradient de la température ionique (ITG) et les modes de ballooning cinétiques (KBM). On considère aussi les propriétés spécifiques des simulations pour le  $\beta$  qui correspond à la transition entre ces deux types d'instabilités.

### Références

1. B.D.Scott and J.Smirnov, Phys. Plasma 17,112302, (2010).
2. A.J.Brizard and N.Tronko, Phys.Plasma 18,082307, (2011).
3. S.Jolliet, A.Bottino, P.Angelino et al. Comp.Phys.Comm. 177, (2007).
4. T.Görler, X.Lapillonne, S.Brunner et al., J. Comp.Phys. 230, 7053 (2011).

# Réduction fluide des équations cinétiques en physique des plasmas : approche hamiltonienne

M. Perin<sup>1</sup>, C. Chandre<sup>1</sup>, P.J. Morrison<sup>2</sup> & E. Tassi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AIX-MARSEILLE Université, CNRS, CPT UMR 7332, MARSEILLE, FRANCE

<sup>2</sup> Department of Physics and Institute for Fusion Studies, The University of TEXAS at AUSTIN, AUSTIN, TX, USA

`maxime.perin@cpt.univ-mrs.fr`

La dynamique des plasmas faiblement collisionnels tels que ceux qui interviennent dans les domaines de la fusion nucléaire par confinement magnétique ou de l'astrophysique est décrite par les équations cinétiques de VLASOV-MAXWELL. Celles-ci donnent l'évolution de la fonction de distribution des particules couplée à celles des champs électromagnétiques. Cependant, ces équations ne sont généralement pas solubles analytiquement et leur résolution numérique pour des valeurs réalistes des paramètres physiques nécessiterait une puissance de calcul actuellement inaccessible. Il est par conséquent indispensable d'utiliser des modèles réduits afin de décrire la dynamique des plasmas non collisionnels.

La réduction fluide des équations cinétiques est une procédure récurrente dans le domaine de la physique des plasmas à l'origine de différents modèles tels que la magnétohydrodynamique. Il est cependant nécessaire, lors de ce processus de réduction, de préserver la structure du système original afin de satisfaire certaines contraintes physiques telles que les conservations de l'énergie, de l'entropie ou d'autres invariants issus des équations parentes. L'une des principales difficultés des réductions fluides des équations cinétiques provient du choix de la fermeture du système d'équations résultant. Cette fermeture s'exprime sous la forme d'une loi de comportement pour le plasma analogue à celles qui interviennent en rhéologie. On présente ici une méthode de fermeture basée sur la formulation hamiltonienne des équations de VLASOV-AMPÈRE qui constituent un modèle simplifié à une dimension des équations parentes de VLASOV-MAXWELL.

## Références

1. P. J. MORRISON, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 467 (1998)
2. M. PERIN, C. CHANDRE, P.J. MORRISON et E. TASSI, *Ann. Phys.* **348**, 50 (2014)
3. M. PERIN, C. CHANDRE, P.J. MORRISON et E. TASSI, *Phys. Plasmas* **22**, 092309 (2015)



## Logarithmic discretization and systematic derivation of shell models for turbulence

Ö. D. Gürçan<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), CNRS, Ecole Polytechnique  
ozgur.gurcan@lpp.polytechnique.fr

A detailed systematic derivation of a logarithmically discretized model for two dimensional turbulence and extension into three dimensions is given, starting from the basic fluid equations and proceeding with a particular form of discretization of the wave-number space. We show that it is possible to keep all or a subset of the interactions, either local or disparate scale, and recover various limiting forms of shell models used in plasma and geophysical turbulence studies. The method makes no use of the conservation laws even though it respects the underlying conservation properties of the fluid equations. It gives a family of models ranging from shell models with non-local interactions to anisotropic shell models depending on the way the shells are constructed. Numerical integration of the model shows that energy and enstrophy equipartition seems to dominate over the double cascade for two dimensions, which is unfortunately a common problem of two dimensional shell models.

## Turbulence in 2D Spinodal Decompositions

P. H. Diamond<sup>1</sup> & X. Fan<sup>1</sup>

University of California, San Diego, USA  
diamondph@gmail.com

We report on studies<sup>1</sup> of turbulence in 2D spinodal decompositions of symmetric binary mixtures. This study emphasizes a comparison and contrast of the physics of spinodal turbulence with that of 2D MHD turbulence. The basic equations and dissipationless invariants for these two systems have many similarities. Both cascades and spectral power laws are studied, as is transport of concentration and momentum. The equations for the two systems are analogous, with concentration difference  $\Psi$  corresponding to magnetic potential  $A$ , and the spinodal 'bubble' surface tension force acting as the counterpart of the  $J \times B$  force in the fluid equation of motion. Most importantly, both systems are 'elastic fluids', which possess a degree of memory. In this regard, the analogue of the Alfvén wave in MHD is a capillary wave produced by bubble surface tension. The competition of capillarity vs eddy straining defines the Hinze scale - at which the fluid elasticizes - an important mesoscale which joins the macroscale and the turbulent dissipation scale in defining the turbulent cascades. Finally, in the spinodal problem the dissipation of  $\Psi$  is nonlinear.

Studies of spinodal turbulence with relatively large Hinze scale (i.e. nearly elasticized) yield paradoxical but interesting results. The concentration fluctuation spectrum (analogous to  $\langle A^2 \rangle_{\mathbf{k}}$ ) suggests an inverse cascade of  $\langle \Psi^2 \rangle$ , corresponding to the case in MHD. However, the kinetic energy spectrum scales as  $\langle V^2 \rangle_{\mathbf{k}} \sim k^{-3}$ , as in the forward enstrophy cascade range for a 2D fluid (not MHD)! The resolution of this dilemma is that capillarity acts only at bubble boundaries, which become less dense as bubbles coalesce. Thus, as bubble merger progresses, the fluid 'cares less and less' that bubbles are present, thus explaining the outcome for the spectrum. Ongoing studies are concerned with cases with smaller Hinze scale. Detailed comparisons with MHD are ongoing, both for power laws and for transport coefficients. We will discuss the evident possibility that spatial representations - i.e. tracking contours of bubble surfaces - may be a more useful way of representing the turbulence physics than the traditional power law spectrum. Finally, we will discuss the relation of this problem to turbulent polymer hydrodynamics, another elastic fluid, which is central to the classic problem of drag reduction.

This material is based upon work supported by the U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fusion Energy Sciences, under Award Numbers : DE-FG02-04ER54738.

---

1. We thank L. Chacon, H. Li (LANL) for assistance with the computation.

## On the dynamics of laminar-turbulent patterns in plane Couette flow

Paul Manneville

Laboratoire d'Hydrodynamique, CNRS UMR 7646, École Polytechnique 91128 Palaiseau  
 paul.manneville@ladhyx.polytechnique.fr

The transition to turbulence in plane Couette flow is characterized by the presence of oblique bands, alternatively laminar and turbulent, over an interval  $R \in [R_g, R_t]$  with  $R_g \approx 325$  and  $R_t \approx 415$  [1]. The physical mechanisms producing these patterns are still not well understood but one can account for certain properties of the transitional regime over  $[R_g, R_t]$  in a phenomenological way similar to classical approaches in terms of envelopes designed for instabilities developing on laminar backgrounds, e.g. convection, with the randomness of the featureless regime at  $R \geq R_t$  treated as a tunable external noise [1].

In extended geometry, numerical simulations are expensive [2] but qualitatively realistic results can be obtained by decreasing the resolution in the cross-flow direction ( $y$ ) perpendicular to the plane of the flow ( $x, z$ ). The price to be paid is a downward shift of the transitional range. Using CHANNELFLOW with 15 Chebyshev polynomials along  $y$ , one gets  $R_t \approx 360$  and  $R_g \approx 273.5$  [3].

In this context we have studied the dynamics of the laminar-turbulent pattern obtained in a wide domain ( $432 \times 256$ ), optimally accommodating three oblique bands at  $R = 275 \gtrsim R_g$  [4]. From this pattern, we have been able to prepare an initial state with two unequally distributed parallel bands. We will present results of a numerical simulation starting from this state and showing that the wavelength modulation relaxes in a diffusive way (at least at the beginning) yielding a uniform 2-band pattern.

This observation supports the idea that, sufficiently far from pattern onset at  $R_t$ , the *amplitude* of the laminar-turbulent modulation remains saturated so that the dynamics can be reduced to that of the band position, i.e. the spatial *phase*, as would result from a naive application of the phase formalism for laminar dissipative textures [5] even though it develops from a turbulent background at decreasing  $R$ .

### Références

1. A. PRIGENT, G. GREGOIRE, H. CHATÉ, O. DAUCHOT, Long wavelength modulation of turbulent shear flows, *Physica D*, **174**, 100–113 (2003).
2. Y. DUGUET, P. SCHLATTER, D.S. HENNINGSON, Formation of turbulent patterns near the onset of transition in Couette flow, *J. Fluid Mech.*, **650**, 119–129 (2010).
3. P. MANNEVILLE, J. ROLLAND, On modelling transitional turbulent flows using under-resolved direct numerical simulations : the case of plane Couette flow, *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, **25**, 405–420 (2011)
4. P. MANNEVILLE, On the decay of turbulence in plane Couette flow, *Fluid Dyn. Res*, **43**, 065501 (2011).
5. Y. POMEAU, P. MANNEVILLE, Stability and fluctuations of a spatially periodic convective flow, *J. Physique - Lettres*, **40**, L-609–612.

# Global stability analysis of microcombustion

Michele Alessandro Bucci<sup>1</sup>, Jean-Christophe Robinet<sup>1</sup> & Sergio Chibbaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ENSAM, DynFluid, Arts et Métiers ParisTech, 151, Bd. de l'Hopital, 75013 Paris, France

<sup>2</sup> Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, UMR7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005 Paris, France

michele.bucci@ensam.fr

The improvement of the fabrication techniques has encouraged the miniaturization of mechanical and electro-mechanical devices, following the trend previously initiated by other technological areas, such as electronics or biomechanics. The reduction of the engine size brings new challenges that need to be specifically treated to improve the engine performance, such as increasing heat losses, flame instabilities or flame quenching [1]. In a recent work, it has been shown that a simple 2-D model successfully reproduces most of the physical features of combustion in small channels [2]. In particular, as in experiments, it has been highlighted the arise of complex instabilities above a certain gas speed. In this case, the flame starts a regime of repetitive extinction and ignition (FREI). We report on the numerical study of the global linear stability analysis of such system for the two stability threshold of the FREI condition.

First, the steady solution was found using the filtering method. We show that initializing the direct simulation of the complete nonlinear model with the basic state, the solution remains steady. Adding a noise to the basic state in a regime of unstable speed, the most unstable mode is pointed out. The time evolution shows an exponential increase of the oscillations amplitude of temperature and concentration. The growth rate is constant during the first time steps of the time evolution. Performing a Fourier analysis of the temperature and concentration signals, where the amplitude increases exponentially, only one mode is present.

Then, we carry out the linearization of the system and we solve the corresponding eigenvalue problem, computing the spectrum of the most relevant stable and unstable modes. Through the numerical simulations, we show that the spectrum exhibits just one unstable mode, when the system undergoes the FREI instability. The growth rate, which coincides with the real part of the unstable eigenvalue, turns out to be quite in agreement with that calculated via DNS of the complete system as shown in tab. 1. The pulsation of the oscillation is also computed and coincides with the imaginary part of the unstable eigenvalue. Moreover we show that the real part of the unstable mode increases linearly decreasing the speed, the bifurcation point is supercritical and there is a non-linear saturation of the amplitude oscillation of the flame position close to the threshold instability moving to the FREI regime.

	first bifurcation $U_0 = 37cm/s$		second bifurcation $U_0 = 9.955cm/s$	
	$\sigma$	$\omega$	$\sigma$	$\omega$
DNS	4.2	257	0.43	81.68
SA	4.189	256.8	0.427	82.64

**Table 1.**  $\sigma$  and  $\omega$  comparison obtained by different way : DNS and Stability Analysis

## Références

1. Kaisare, N.S., Vlachos, D.G., . Lagrangian temperature, velocity, and local heat flux measurement in rayleigh-bénard convection. *Prog. Energy Combust. Sci.* , 38, 321D359, 2012.
2. Bianco, F., Chibbaro, S., and Legros, G. Low-dimensional modeling of flame dynamics in heated micro-channels. *Chemical Engineering Science*, 122, 533-544, 2015.

## Dissipation d'énergie globale et locale dans un écoulement de von Kármán turbulent

Kuzzay<sup>1</sup>, *et al.*

denis.kuzzay@cea.fr  
denis.kuzzay@cea.fr

Le but de cette présentation est d'étudier les transferts d'énergie locaux et globaux dans un écoulement de von Kármán à partir de mesures de vélocimétrie par image de particule (PIV). Dans un premier temps, on utilise un modèle de "Large Eddy Simulation" (LES) pour calculer la puissance injectée et dissipée. Cette technique introduit un paramètre libre que nous calibrons en utilisant un bilan de moment cinétique [1]. Ensuite, nous estimons la puissance moyenne (en temps) dissipée localement et globalement pour un certain type de turbine, à différents nombres de Reynolds. Ces estimations, faites à partir des mesures de PIV, sont comparées avec des mesures directes de la puissance injectée, fournies par des mesures de couple au niveau des turbines. L'accord entre nos estimations et les mesures de couple varie en fonction de la topologie de l'écoulement. Dans les cas symétriques, nous sommes capable de capturer jusqu'à 90% de la puissance globale dissipée. Enfin, nous montrons qu'un très bon accord peut être obtenu en utilisant une nouvelle méthode de calcul des échanges d'énergie basée sur le travail de Duchon et Robert [2], qui généralise la relation de Kármán-Howarth aux écoulements non-isotropes et non-homogènes. En plus de n'introduire aucun paramètre à calibrer, cette méthode fournit de meilleures estimations de la puissance globale dissipée que la méthode LES, à condition que la plus petite échelle résolue se trouve dans le domaine inertiel.

### Références

1. Marié, L., Daviaud, F., Experimental measurement of the scale-by-scale momentum transport budget in a turbulent shear flow. *Phys. Fluids* **16**, (2004).
2. Duchon, J., Robert, R. Inertial energy dissipation for weak solutions of incompressible Euler and Navier-Stokes equations. *Nonlinearity* **13**, (2000) 249255.

# Turbulence en rotation dans une cavité stator/rotor à haut nombre de Reynolds

Lachize Cécile, Verhille Gautier & Le Gal Patrice

Aix Marseille Université - CNRS, Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre, Marseille, France  
legal@irphe.univ-mrs.fr

Cette communication fait état d'une étude expérimentale concernant un écoulement turbulent confiné dans une cavité rotor/stator à nombres de Reynolds élevés. Les expériences ont été réalisées en modifiant à la fois les vitesses de rotation du disque et la densité du fluide (hexafluorure de soufre à proximité de son point critique :  $T_c = 45.58$  °C,  $P_c = 37.55$  bar) en imposant la température et la pression à l'intérieur d'un container thermalisé et sous pression. Cette configuration permet d'obtenir des nombres de Reynolds aussi élevés que  $2 \cdot 10^7$  avec des effets de compressibilité potentiels car le nombre de Mach peut atteindre 0.5. Des mesures de pression révèlent que l'écoulement pleinement turbulent possède à la fois une cascade directe d'enstrophie et une cascade inverse d'énergie conformément à la conjecture de Kraichnan [1] et observé récemment dans des études de turbulence en rotation [2], [3]. Pour les nombres de Reynolds plus élevés, les spectres sont cependant dominés par des pics à basse fréquence impliquant des modes grandes échelles possédant des nombres d'onde azimutaux  $m = 1, 2, 3$  et 4. Nous interprétons ces modes comme des modes acoustico-inertiels pour lesquels nous avons calculé leur relation de dispersion en fonction du nombre de Mach. De plus, ces modes suivent un comportement non linéaire original que nous interprétons par un modèle d'équations d'amplitude de basse dimensionalité.

## Références

1. Kraichnan R. : Inertial Ranges in Two Dimensional Turbulence. Phys. Fluids 10 : 1417-1423, 1967.
2. Campagne A., Gallet B., Moisy F., Cortet P. P. : Direct and inverse energy cascades in a forced rotating turbulence experiment. Phys. Fluids 26(12) : 125112. 2014
3. Yarom E., Sharon E. : Experimental observation of steady inertial wave turbulence in deep rotating flows. Nature Physics 10(7) : 510-514. 2014

# Un gabarit pour tous les attracteurs d'un diagramme de bifurcation du système de Rössler

M. Rosalie

Univ. Bordeaux, LaBRI, UMR5800, F-33400, Talence, France  
martin.rosalie@labri.fr

Étudié à de nombreuses reprises depuis sa parution en 1976, le système de Rössler [1] présente les atouts d'un système chaotique simple tout en proposant des dynamiques riches qu'il reste à étudier. Les récents travaux sont des études des solutions de ce système lorsque les paramètres sont variés et donnent ainsi une représentation plus globale de ce système. Par exemple, Castro *et al.* [2] réalisent des diagrammes détaillant les valeurs du plus grand exposant de Lyapunov en fonction des paramètres. Les travaux de Barrio *et al.* [3] caractérisent les bifurcations lorsque les trois paramètres du système sont variés. Les auteurs mettent ainsi en évidence le fait qu'il existe deux attracteurs co-existants pour un même jeu de paramètres dans le système de Rössler. Récemment, Sprott et Li [4] ont trouvé un autre moyen d'obtenir ces attracteurs en reparamétrisant le système de Rössler.

La caractérisation topologique d'un attracteur chaotique est une méthode qui permet d'obtenir la structure détaillée d'un seul attracteur. Lorsqu'un paramètre change, la méthode doit à nouveau être appliquée pour obtenir la structure d'un autre attracteur. Dans cet article, nous proposons d'étudier la structure de huit attracteurs choisis dans le diagramme de bifurcation de Sprott et Li [4]. Une fois leurs gabarits obtenus, nous montrons qu'ils sont tous sous-gabarits d'un unique gabarit. La démonstration se fait schématiquement et algébriquement à l'aide des outils développés lors de nos précédents travaux [5] et [6]. Enfin, une régression linéaire nous permet de réaliser une partition du diagramme de bifurcation donnant ainsi une dynamique symbolique quelle que soit la valeur du paramètre du diagramme. Nous obtenons ainsi un *unique gabarit* décrivant la structure de *tous les attracteurs chaotiques* d'un diagramme de bifurcation. La présente méthode peut être employée pour étudier des systèmes plus complexes où les bifurcations modifient les mécanismes régissant la structure des attracteurs chaotiques.

## Références

1. O. E. RÖSSLER, An equation for continuous chaos, *Physics Letters A*, **57**(5), 397-398, 1976.
2. V. CASTRO, M. MONTI, W. B. PARDO, J. A. WALKENSTEIN & E. ROSA, Characterization of the Rössler system in parameter space, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **17**(3), 965-973, 2007.
3. R. BARRIO, F. Blesa & S. SERRANO, Qualitative analysis of the Rössler equations : Bifurcations of limit cycles and chaotic attractors, *Physica D : Nonlinear Phenomena*, **238**(13), 1087-1100, 2009.
4. J. C. SPOTT & C. LI, Asymmetric bistability in the Rössler system, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, submitted.
5. M. ROSALIE & C. LETELLIER, Systematic template extraction from chaotic attractors : I. Genus-one attractors with an inversion symmetry, *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*, **46**(37), 375101, 2013.
6. M. ROSALIE & C. LETELLIER, Systematic template extraction from chaotic attractors : II. Genus-one attractors with multiple unimodal folding mechanisms, *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*, **48**(23), 235101, 2015.

# Effets du couplage non linéaire dans un système de sine-Gordon modifié

R. Alima<sup>1,2</sup>, S. Morfu<sup>2</sup>, B. Bodo<sup>1</sup>, P. Marquié<sup>2</sup> & B. Z. Essimbi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Énergie, Systèmes électriques et électroniques Unité de Recherche et de Formation Doctorale en Physique et Applications Université de Yaoundé 1 - P.O. Box 812 Yaoundé-Cameroun.

<sup>2</sup> Université de Bourgogne Franche-Comté - Laboratoire LE2I UMR 6306 Aile des sciences de l'ingénieur BP 47870 21078 Dijon Cedex, France.

smorfu@u-bourgogne.fr

Lorsqu'une ligne de transmission non linéaire et discrète est excitée avec une fréquence prise dans le gap, elle transmet de l'énergie si et seulement si l'amplitude du signal excitateur est supérieure ou égale à un seuil. Ce phénomène est appelé supratransmission non linéaire. Il a été introduit par Geniet et Léon [1] lorsqu'ils ont observés une soudaine augmentation d'amplitude du signal transmis par une ligne électrique non linéaire excitée avec une fréquence de gap. Par la suite, plusieurs études théoriques et/ou numériques ont également montré l'existence de ce phénomènes dans plusieurs systèmes de lignes électriques non linéaires [2,3,4,5,6]. En effet, en considérant un milieu du type sine-Gordon excité dans le gap, des études ont montré que, quand l'amplitude de l'excitation excède un certain seuil, le milieu déclenche des modes non linéaires qui peuvent être du type Breather [7]. Cependant, ces études ont été réalisées dans un milieu de type sine-Gordon classique, c'est à dire en absence du couplage non linéaire. C'est l'objet de la présente communication. En effet, nous nous proposons d'exciter un milieu du type sine-Gordon modifié (à couplage mixte) dans le gap, et d'analyser les conditions d'apparition du phénomène de supratransmission non linéaire et aussi l'influence de la variation du coefficient du couplage non linéaire sur les conditions d'apparition de ce phénomène.

Remerciements : Les auteurs remercient le Conseil Régional de Bourgogne pour le soutien financier apporté (PARI - Convention 2014-9201AAO49S01401 (SSTIC 6)).

## Références

1. F. GENIET AND J. LEON, Energy transmission in the forbidden band gap of a nonlinear chain, *Physical review letters* **89** (13), 134102 (2002).
2. R. KHOMERIKI AND S. LEPRI AND S. RUFFO, Nonlinear supratransmission and bistability in the Fermi-Pasta-Ulam model, *Physical Review E* **70** (6), 066626 (2004).
3. J. E. MACÍAS-DÍAZ AND A. PURI, On the propagation of binary signals in damped mechanical systems of oscillators, *Physica D : Nonlinear Phenomena* **228** (2), pp. 112–121 (2007).
4. A. B. TOGUEU MOTCHEYO AND C. TCHAWOUA AND J. D. TCHINANG TCHAMEU, Supratransmission induced by waves collisions in a discrete electrical lattice, *Physical Review E* **88** (4), 040901 (2013).
5. A. B. TOGUEU MOTCHEYO AND C. TCHAWOUA AND M. SIEWE SIEWE AND J. D. TCHINANG TCHAMEU, Supratransmission phenomenon in a discrete electrical lattice with nonlinear dispersion, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **18** (4), pp. 946–952 (2013).
6. B. BODO, S. MORFU, P. MARQUIÉ AND M. ROSSÉ, A Klein-Gordon electronic network exhibiting the supratransmission effect, *Electron. Lett.* **46** (2), pp. 123-124, (2010).
7. F. GENIET AND J. LEON, Nonlinear supratransmission, *Journal of Physics : Condensed Matter* **15** (13), 2933 (2003).



# Toward new general-purpose processor with nonlinear transient computing

Bogdan Penkovsky & Laurent Larger

FEMTO-ST / Optics Dept., UMR CNRS 6174, University of Franche-Comté  
15B Avenue des Montboucons, 25030 Besançon Cedex, France  
[bogdan.penkovskyi@univ-fcomte.fr](mailto:bogdan.penkovskyi@univ-fcomte.fr)

Nowadays sustaining Moore's law requires new information processing methods to be developed. On the other hand, modern applications tend to deal more and more with complex, computationally heavy tasks in one or another way related to machine learning. With the growth of the number of smart devices, the volume of information, and thus, the demand of processing speed are dramatically increased. To address these and related technology challenges we propose a novel brain-inspired [1] architecture for general-purpose microprocessors.

The proposed architecture should comprise three components : arithmetical-logic unit (ALU), control unit (CU) and reservoir co-processor unit (RCU). The first two components are already part of today's CPUs. Their strengths are precision and ability to quickly operate on binary logic and numeric data. However, when dealing with images, sounds, time series and other kinds of fuzzy logic and data, CPU-based computers' performance falls considerably. On the contrary, reservoir computing refers to a generalized machine learning approach [4] for tasks of different complexity.

RCU is supposed to cooperate with CU on regular basis. This architecture will allow to free CPU from numerous complex and computationally intensive yet frequently encountered machine learning tasks. Relatively close analogy is GPU acceleration but for *non-linear* data. The unified architecture of smart RCU can drastically simplify machine learning workflow, thus, allowing developers to focus on their data and application.

Tasks reservoir co-processor is already capable of : high-speed pattern recognition and classification [2,3], forecasting and time series prediction [3], nonlinear control [3], DNA molecular computing [4]. That is making wide potential area of use : automotive, robotics, aerospace, security, medicine, data servers, communications, smart houses, personal computers and smartphones, entertainment and game industries.

## Références

1. R. Martinenghi, S. Rybalko, M. Jacquot, Y. Chembo, and L. Larger. Photonic Nonlinear Transient Computing with Multiple-Delay Wavelength Dynamics. *Phys. Rev. Lett.*, 244101(June) :1–4, 2012.
2. L. Larger, B. Penkovsky, and Y. Maistrenko. Laser chimeras as a paradigm for multistable patterns in complex systems. *Nature Communications*, 6 :7752, 2015.
3. M. Lukoševičius, H. Jaeger, and B. Schrauwen. Reservoir Computing Trends. *KI - Künstliche Intelligenz*, 26(4) :365–371, 2012.
4. A. Goudarzi, M. Lakin, and D. Stefanovic. DNA reservoir computing : A novel molecular computing approach. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8141 LNCS(1) :76–89, 2013.

## Soil Evaporative Efficiency modeled with the global modeling technique

V. Stefan<sup>1</sup>, S. Mangiarotti<sup>1</sup>, O. Merlin<sup>1,2</sup> & A. Chanzy<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CESBIO, UPS-CNRS-CNES-IRD, 18 av. Ed. Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France

<sup>2</sup> Faculté des Sciences Semlalia Marrakech (FSSM), Marrakech, Maroc

<sup>3</sup> Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Avignon, France

sylvain.mangiarotti@ird.fr

In Soil-Atmosphere transfer models, the climatic component is generally considered as an external forcing. In the present study, the global modeling technique [1,2] is applied to daily cycles of Soil Evaporative Efficiency in order to obtain an autonomous model for this variable. A four-dimensional model of Ordinary Differential Equations is obtained. Although converging to a limit cycle, the model exhibits a long chaotic transient which is consistent with the original data.

### Références

1. G. GOUESBET & C. LETELLIER, Global vector field reconstruction by using a multivariate polynomial  $L_2$ -approximation on nets, *Physical Review E*, **49** (6), 4955-4972, 1994.
2. S. MANGIAROTTI, R. COUDRET, L. DRAPEAU & L. JARLAN, Polynomial search and global modeling : two algorithms for modeling chaos, *Physical Review E*, **86**(4), 046205, 2012.

## Une expérience modèle de l'oscillation quasi-biennale

Benoît Semin<sup>1</sup>, Giulio Facchini<sup>1</sup>, François Pétrélis<sup>1</sup> & Stephan Fauve<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique, École Normale Supérieure, UPMC Univ Paris 06, Université Paris Diderot, CNRS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France

benoit.semin@lps.ens.fr

L'oscillation quasi-biennale est une oscillation du vent dans la basse stratosphère (16-50 km) [1]. Ce vent est dirigé parallèlement à l'équateur, il décroît rapidement lorsque la distance à l'équateur augmente, et sa vitesse vaut environ  $20 \text{ m.s}^{-1}$ . La période moyenne vaut environ 28 mois, et n'est pas liée de manière directe au cycle annuel. Deux ingrédients sont nécessaires pour expliquer cette oscillation : la génération d'un écoulement moyen par les ondes internes de gravité qui se propagent dans la stratosphère, et la rétroaction de cet écoulement moyen sur les ondes.

Nous avons mis en place une expérience de laboratoire qui reproduit ce phénomène, inspirée de celles de Plumb et McEwan [2] et d'Otobe et al.[3]. Dans notre dispositif, un fluide linéairement stratifié en densité (eau salée, fréquence de Brunt-Väisälä  $N = 1,5 \text{ s}^{-1}$ ) est contenu entre deux cylindres transparents, de diamètres respectif 400 mm et 600 mm et de hauteur totale 400 mm. Le fluide est ensemené de particules, et le champ de vitesse est mesuré par vélocimétrie par images de particules.

En haut du fluide se trouve une couronne divisée en 16 portions. Une membrane flexible est attachée à chaque portion, et oscille verticalement de manière sinusoïdale de manière à engendrer des ondes internes, avec une amplitude  $M \in [1; 15]$  mm et une période  $T \in [15; 40]$  s. Deux types de forçages sont utilisés : un forçage où deux membranes successives sont déphasées de  $\varphi = \pi/2$ , ce qui permet d'engendrer une onde interne progressive dans la direction azimutale, et un forçage où deux membranes successives sont en opposition de phase, ce qui permet d'engendrer une onde interne stationnaire dans la direction azimutale. Le premier cas est le forçage le plus simple, et le second est le plus simple qui reproduit l'oscillation quasi-biennale.

Dans le premier cas ( $\varphi = \pi/2$ ), l'écoulement moyen, c'est-à-dire l'écoulement moyenné sur une période  $T$ , est toujours non nul et tend vers une valeur stationnaire. Pour les faibles amplitudes du forçage, l'amplitude de l'onde est proportionnelle à  $M$  et l'écoulement moyen est proportionnel à  $M^2$ . Ensuite, ces quantités augmentent nettement moins fortement avec  $M$ , à cause de la rétroaction de l'écoulement moyen sur l'onde. Comme l'établissement de l'écoulement moyen est lent comparé à la période de l'onde, il est aussi possible de mettre en évidence cette rétroaction en mesurant la diminution de l'amplitude de l'onde lorsque l'écoulement moyen s'établit.

Dans le second cas ( $\varphi = \pi$ ), l'écoulement moyen n'apparaît qu'au-dessus d'une valeur seuil de l'amplitude du forçage ( $M \sim 11$  mm). Dès que l'amplitude est supérieure de 1 mm à l'amplitude seuil, la vitesse moyenne est de l'ordre de 50% de la vitesse maximale des ondes, et la rétroaction de l'écoulement moyen sur l'onde est forte. L'écoulement moyen à une hauteur donnée est toujours oscillant, avec une période  $T_{\text{em}}$  très grande devant la période  $T$  de forçage (typiquement  $T_{\text{em}} \sim 7000$  s pour  $T = 15$  s). La structure spatio-temporelle de l'oscillation est semblable à celle de l'oscillation quasi-biennale atmosphérique : le signe de l'écoulement moyen n'est pas le même en haut et en bas de la cuve, et le point où l'écoulement moyen s'annule se déplace vers la zone de forçage. Une prochaine étape sera d'étudier le cas d'un forçage bruité, plus proche du cas de l'atmosphère.

## Références

1. M. Baldwin et al. *The quasi-biennial oscillation*. Rev. Geophys., **39** 179-229 (2001)
2. R. Plumb and A. McEwan *The instability of a forced standing wave in a viscous stratified fluid : a laboratory analogue of the quasi-biennial oscillation*. J. Atmos. Sci., **35** 1827-1839 (1978)
3. N. Otobe, S. Sakai, S. Yoden and M. Shiotani *Visualization and WKB analysis of the internal gravity wave in the QBO experiment*. Nagare : Japan Soc. Fluid Mech., **17** (1998)

## Instabilité interfaciale sous érosion granulaire

Jop<sup>1</sup>, Lefebvre<sup>1</sup> & Merceron<sup>1</sup>

Surface du Verre et Interfaces, CNRS/Saint-Gobain, 33 quai Lucien Lefranc, 93303 Aubervilliers  
pierre.jop@saint-gobain.com

L'érosion des sols par des ruissellements de surfaces est un phénomène couramment observé qui peut mener à des morphologies variées : cascades, ravines, gorges, bassins. Pour un éboulement de terrain, l'écoulement est constitué cette fois-ci d'un ensemble dense de blocs, de cailloux, de grains. Modéliser l'érosion du sol lors d'un tel événement est primordial pour déterminer la vitesse du front ou sa masse. Nous avons étudié expérimentalement l'évolution d'un tas modèle cohésif constitué de billes de verre en interactions capillaires soumis à un écoulement granulaire. Il en résulte une érosion lente du tas. Nous avons mis en évidence que cette érosion peut être régulière, en maintenant la pente initiale parallèle à elle-même si le débit ou la pente sont suffisamment faibles. Au contraire, pour des pentes ou des débits élevés, l'interface plane se déstabilise et une succession de marches apparaît. Cette série de marches continue de s'éroder plus lentement et migre vers l'amont. Leur morphologie est directement liée à la nature granulaire de l'écoulement. Cette instabilité est le pendant granulaire de celle qui mène à la formation des cascades des torrents. Nous montrons premièrement que le mécanisme de l'instabilité est inertiel et nous proposons un modèle pour caractériser l'évolution des taux de croissance. Deuxièmement, cette modélisation implique que le moteur de l'érosion lui-même est l'inertie de l'écoulement. Les perspectives de ce travail autoriseraient une meilleure quantification de l'érosion naturelle par des lits granulaires denses.

## Génération et renversement d'un écoulement moyen dans un verre de bière en translation circulaire

Frédéric Moisy<sup>1</sup> & Wietze Herreman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FAST, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, CNRS, Bât. 502, 91440 Orsay

<sup>2</sup> LIMSI, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Bât. 508, 91440 Orsay  
moisy@fast.u-psud.fr

Pour aérer un vin avant de le déguster, on imprime au verre un mouvement de translation circulaire [1]. En plus de créer une onde de surface se propageant circulairement (onde de ballonnement, ou *sloshing* [2,3]), il est bien connu que ce mouvement engendre une rotation du fluide, en général dans la même direction que la vitesse de phase de l'onde. A ce mouvement de rotation s'ajoute un mouvement de recirculation vertical qui amène le vin vers la surface, le mettant ainsi en contact avec l'air. Ces recirculations sont également mises à profit dans les mélangeurs industriels ou dans les bioréacteurs pour la culture de cellules.

La génération d'un tel écoulement moyen, ou redressé (*steady streaming*), induit par un écoulement oscillant d'amplitude finie est un effet non-linéaire classique mais subtil [4]. De façon surprenante, bien qu'un tel écoulement redressé dans un verre en translation circulaire puisse être observé quotidiennement, son amplitude et sa structure n'ont pas encore été décrits théoriquement ou expérimentalement à notre connaissance.

Si l'on réalise maintenant cette expérience simple avec un verre de bière, surprise : sous certaines conditions, la couche de mousse à la surface se met à tourner en sens inverse du liquide ! En plus de la dissipation accrue par la présence de la mousse [5], la friction entre la couche rigide de mousse entraînée par l'onde et la paroi du verre peut conduire à un phénomène de roulement de type train épicycloïdal, similaire à celui observé dans un ensemble de bille dans un récipient en translation circulaire [6]. La vitesse angulaire de la couche de mousse, et en particulier son sens de rotation, résultent alors d'une compétition entre l'entraînement par l'écoulement moyen (le plus souvent prograde) et la friction avec le bord (rétrograde).

Cet exposé long pourra faire l'objet d'une démonstration en direct.

### Références

1. C. NAVARRE, L'oénologie (Lavoisier, 2010)
2. R.A. IBRAHIM, Liquid sloshing dynamics : theory and applications (Cambridge University Press, 2005).
3. M. RECLARI, M. DREYER, S. TISSOT, D. OBRESCHKOW, F. M. WURM, AND M. FARHAT, Surface wave dynamics in orbital shaken cylindrical containers, *Phys. Fluids*, **26**, 052104 (2014).
4. N. RILEY, Steady Streaming, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **33**, 43–65 (2001).
5. A. SAURET, F. BOULOGNE, J. CAPPELLO, E. DRESSAIRE, AND H. A. STONE, Damping of liquid sloshing by foam, *Phys. Fluids*, **27**, 022103 (2015).
6. A. FELTRUP, K. HUANG, C.A. KRÜLLE, I. REHBERG, The rotation-reptation transition under broken rotational symmetry, *Eur. Phys. J. Special Topics*, **179**, 19–24 (2009).

# Subcritical instabilities destabilized by kinetic nonlinearities in hot plasmas

M. Lesur

Institut Jean Lamour, Université de Lorraine  
maxime.lesur@polytechnique.org

Subcritical instabilities (nonlinear instabilities, which grow despite being linearly damped), or sub-marginal turbulence, are ubiquitous in fluids and plasmas [1]. These include small-scale turbulence (e.g. pipe flow) and large-scale perturbations (e.g. Kelvin-Helmholtz instability). In collisionless plasmas in particular, it is known that in theory, linearly stable large-scale modes can be destabilized nonlinearly by the dynamics of structures in the phase-space (position/velocity) of particle distributions [2]. In this presentation, we will review the theories of subcritical instabilities, with an emphasis on those driven by kinetic nonlinearities such as particle-trapping in phase-space (as opposed to those driven by fluid nonlinearities, such as parametric or modulational coupling).

Going further, we will introduce our latest addition to the theory, which is applicable to large-scale electromagnetic modes driven by energetic (suprathermal) particles. A new mechanism of subcritical instability was found, where growth requires a sustained collaboration between kinetic and fluid nonlinearities [3]. This theory provides a viable interpretation for a surprising observation [4] of abrupt destabilization of large-amplitude, macroscale electromagnetic mode. The theory suggests that this is the first observation of a subcritical instability driven by kinetic nonlinearities. We will discuss how this involves synchronization phenomena, and how our theory contributes to the understanding of the long-lasting "trigger problem", concerning the onset of abruptly growing modes in general.

## Références

1. A. Yoshizawa, S.I. Itoh, and K. Itoh. *Plasma and Fluid Turbulence : Theory and Modelling*. Series in Plasma Physics and Fluid Dynamics. CRC Press, 2002.
2. T.H. Dupree, *Phys. Fluids* 25(2), 277–289 (1982).
3. M. Lesur *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116, 015003 (2016).
4. T. Ido *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116, 015002 (2016).

## Effet du milieu poreux sur la désorganisation d'un écoulement de Taylor dans un canal millifluidique

Marion Serres<sup>1,2</sup>, Régis Philippe<sup>2</sup> & Valérie Vidal<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique, UMR 5672, CNRS – Ecole Normale Supérieure de Lyon, Université de Lyon, 46 Allée d'Italie, 69007 Lyon, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques, UMR 5285 CNRS – CPE Lyon, Université de Lyon, 43 boulevard du 11 novembre 1918, 69100 Villeurbanne, France

\*valerie.vidal@ens-lyon.fr

Les écoulements multiphasiques (en particulier, gaz-liquide) en milieu poreux présentent de nombreuses applications. En géosciences, le développement de nouvelles sources d'énergie (récupération assistée du pétrole, exploitation des hydrates de gaz [1]), ou la compréhension de phénomènes naturels comme la remontée de gaz dans les sédiments marins [2] nécessitent une compréhension fine des écoulements gaz-liquide (G-L) dans différents types de milieux poreux. Elle permettrait, par exemple, d'estimer la quantité de gaz libérée en fonction de la structure des sédiments ou bien la zone d'invasion du gaz entre la source et la surface [3,4]. D'autres domaines tels que l'industrie chimique sont confrontés à des écoulements similaires. C'est le cas, en particulier, des réactions catalytiques qui peuvent faire intervenir trois phases, gaz, liquide, solide (G-L-S) avec une phase solide libre (grains dont le mouvement est couplé avec l'écoulement G-L) ou contraint (milieu poreux rigide) [5]. Souvent, un réactif se trouve en phase gazeuse et doit diffuser dans la phase liquide pour réagir avec le catalyseur déposé sur la phase solide. L'optimisation des transferts et de la réaction elle-même passe, encore une fois, par une compréhension fine de l'hydrodynamique de l'écoulement G-L-S [6].

Le dispositif étudié ici est un canal dans lequel un écoulement de Taylor (alternance gaz/liquide) est envoyé à l'entrée d'un milieu poreux occupant toute la section du canal ( $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ) sur une longueur de 16 cm. L'écoulement de Taylor est généré à l'aide d'une jonction en T sur laquelle on envoie du liquide (éthanol) et du gaz (azote) à débits constants. Dans la gamme de débit explorée, on vérifie que l'écoulement est stable et stationnaire. On utilise deux milieux de porosité sensiblement différente : un lit de billes (75 – 150  $\mu\text{m}$  de diamètre, porosité 42%) ou une mousse métallique (porosité 96%). On suit au cours du temps, par fluorescence, la fraction volumique de liquide dans les différentes zones de l'écoulement (en amont et dans le milieu poreux). Ce signal temporel est caractérisé par son contenu fréquentiel (diagramme temps-fréquence) et par son asymétrie (skewness). Nous analysons l'effet du milieu poreux sur la désorganisation du signal périodique de Taylor en observant l'évolution de ces deux paramètres en fonction de la distance dans le milieu poreux et des différents débits de gaz et de liquide.

### Références

1. C. BOURRY *et al.*, Free gas and gas hydrates from the Sea of Marmara, Turkey : Chemical and structural characterization, *Chemical Geology* **264**, 197–206 (2009).
2. K.R. NEWMAN *et al.*, Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break, *Earth and Planetary Science Letters* **267**, 341–352 (2008).
3. A. GAY, M. LOPEZ, C. BERNDT, M. SÉRANNE, Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin, *Marine Geology* **244**, 68–92 (2007).
4. A. MAZZINI *et al.*, Complex plumbing systems in the near subsurface : Geometries of authigenic carbonates from Dolgovskoy Mound (Black Sea) constrained by analogue experiments, *Marine and Petroleum Geology* **25**, 457–472 (2008).
5. V. HESSEL, P. ANGELI, A. GAVRIILIDIS, H. LOWE, Gas-liquid and gas-liquid-solid microstructured reactors : Contacting principles and applications, *Industrial & Engineering Chemistry Research* **44**, 9750–9769 (2005).
6. M.T. KREUTZER, F. KAPTEIJN, J.A. MOULIJN, J.J. HEISZWOLF, Multiphase monolith reactors : Chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels, *Chemical Engineering Science* **60**, 5895–5916 (2005).

## Boxing Leidenfrost drops

Laurent Maquet & Stéphane Dorbolo

GRASP, Département de Physique, Allée du 6 août, 19, 4000 Liège, Belgique  
lmaquet@doct.ulg.ac.be

When a liquid drop is deposited on a solid substrate that is heated well above the boiling temperature of the liquid, it may evaporate so fast that a lubrication film made of the vapour isolates the drop from the substrate. This is the Leidenfrost effect. It has been showed that it happens even for an effective gravity of  $20g$  [1]. However, a huge centrifuge is not the only way to increase the gravity. Moreover, in that case, the effective gravity is constant. But one can also change it periodically, *e.g.* with a shaker. We heated an aluminium substrate at the temperature of  $400^\circ\text{C}$ , made it oscillate at a frequency  $\nu$  with an amplitude  $A$ , and then deposited on it a water drop. The substrate is slightly curved to confine the drop.

In the first part, we use a unique frequency  $\nu = 28.2$  Hz to box a drop with a radius  $R = 1.2$  mm. Even though no contact is observed between the drop and the substrate, we consider that the drop is in “contact” with the substrate when the thickness of the vapour film that is below the equilibrium thickness of a static drop of the same size on a substrate at the same temperature ( $\sim 100$   $\mu\text{m}$ ). Practically, it corresponds to the absence of light between the drop and the substrate on our movies. We observe that the drop bounces even for a small reduced acceleration, *i.e.*  $\Gamma = A(2\pi\nu)^2/g \simeq 0.25$ . In most analog systems where an object is vibrated with a shaker, the condition  $\Gamma > 1$  is required for bouncing [2]. However, it has already been seen in the case of a drop bouncing on an oscillated liquid bath that that condition is not necessary when a lubrication film is involved [3].

In our case, for  $\Gamma < 1$ , the time between successive rebounds is stable. However, transitions occur between 1 and 1.5, and between 1.5 and 2, the drop bounces in a mix of two modes : the mode (1, 2) where the drop bounces once each two oscillations, and the mode (2, 2) where the drop does two different bounces (a large and a small one) each two oscillations.

In the second part, we focus on the case of  $\Gamma = 0.5$ , and we vary  $\nu$ . We observe that the contact time is independent on the parameters of the oscillations,  $\Gamma$  and  $\nu$ . Indeed, the contact time is  $\tau_c = 2.6 (\rho R^3/g)^{1/2}$ , as in the case of the rebound of a drop on a static substrate [4]. But then, what happens if the period of the oscillation decreases until it reaches the contact time? We show that when the contact time becomes higher than half the period of the oscillation, the drop switches its mode to a mode (1, 2) (one rebound each two oscillations), and when it becomes higher than one complete oscillation, the mode becomes (1, 3), *etc.*

## Références

1. L. Maquet, M. Brandenbourger, B. Sobac, A.-L. Biance, P. Colinet and S. Dorbolo, *Europhys. Lett.* **110**, 24001 (2015)
2. S. Dorbolo, F. Ludewig and N. Vandewalle, *New J. Phys.* **11**, 033016 (2009)
3. S. Dorbolo, D. Terwagne, N. Vandewalle and T. Gilet, *New J. Phys.* **10**, 113021 (2008)
4. A.-L. Biance, F. Chevy, C. Clanet, G. Lagubeau and D. Quéré, *J. Fluid Mech.* **554**, 47–66 (2006)



## Une interprétation dynamique de l'hystérésis de l'angle de contact

Hugo Perrin<sup>1</sup>, R. Lhermerout<sup>2</sup>, K. Davitt<sup>2</sup>, E. Rolley<sup>2</sup> & B. Andreotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, UMR 7636 ESPCI -CNRS, Univ. Paris-Diderot, 10 rue Vauquelin, 75005, Paris, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, UPMC Univ Paris 06, Université Paris Diderot, CNRS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France

[hugo.perrin@espci.fr](mailto:hugo.perrin@espci.fr)

Lorsqu'une goutte de liquide coule sur une surface solide réelle, elle présente un angle de contact différent à l'avant et à l'arrière. Il est généralement accepté que cet hystérésis de l'angle de contact est dû au phénomène de dépiégeage de la ligne de contact et que les effets thermiques sont négligeables. Ici nous montrons que cette détermination expérimentale de l'hystérésis correspond en fait à une intersection de régimes dynamiques : entre un régime où le mouvement de la ligne de contact est limité par l'activation thermique sur un potentiel généré par les hétérogénéités de la surface et un régime où la dissipation visqueuse domine. Nous proposons une description théorique et une réalisation expérimentale qui unifient les effets de l'hydrodynamique, des hétérogénéités de surface et de l'activation thermique de la ligne de contact.

## Chaos modeling applied to crops classification (Berambadi basin, South of India)

S. Mangiarotti<sup>1</sup>, A. K. Sharma<sup>2</sup>, M. Sekhar<sup>3</sup>, S. Corgne<sup>2</sup>, L. Ruiz<sup>3</sup>, L. Hubert-Moy<sup>2</sup> & Y. Kerr<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CESBIO, UPS-CNRS-CNES-IRD, 18 av. Ed. Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France

<sup>2</sup> LETG-Rennes-COSTEL, UMR 6554 CNRS, Pl. Recteur H. Le Moal, CS 24307, 35043 Rennes cedex, France

<sup>3</sup> Indo-French Cell for Water Sciences, Indian Institute of Science, IRD, Bangalore, India

`sylvain.mangiarotti@ird.fr`

To understand the time evolution of ground water, it is important to be able to distinguish crops for which water demand is high. Numerous methods based on optical remote sensing dedicated to crop identification have been developed. However, their application remains difficult where plots do not exceed a few hectares, with a high heterogeneity in their distribution in time and space. This difficulty is emphasized in South India where the cloudy conditions during the monsoon season can disturb the detection of crops during plants growth.

A novel classification approach based on nonlinear dynamical systems is introduced here, with the aim to take advantage of such scarce signal. Ten different crops are considered in a catchment located in the Berambadi basin (South India). A bank of model is established using the global modeling technique [1,2] which is well adapted for modeling crops cycles [3]. These models are then used to identify the crops in time and space.

### Références

1. G. GOUESBET & C. LETELLIER, Global vector field reconstruction by using a multivariate polynomial  $L_2$ -approximation on nets, *Physical Review E*, **49** (6), 4955-4972, 1994.
2. S. MANGIAROTTI, R. COUDRET, L. DRAPEAU & L. JARLAN, Polynomial search and global modeling : two algorithms for modeling chaos, *Physical Review E*, **86**(4), 046205, 2012.
3. S. MANGIAROTTI, L. DRAPEAU, M. HUC & C. LETELLIER, Two chaotic global models for cereal crops cycles observed from satellite in Northern Morocco, *Chaos*, **24**, 023130, 2014.

## A chaotic model for the West Africa Ebola virus outbreak

M. Huc<sup>1</sup>, & S. Mangiarotti<sup>1</sup>

CESBIO, UPS-CNRS-CNES-IRD, 18 av. Ed. Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France  
sylvain.mangiarotti@ird.fr

The Ebola virus outbreak that spread into West Africa in 2014 was of unprecedented scope and unexpected. In such contexts of emergent disease, phenomenological approaches that could be applied to epidemics based on scarce data sets would be very useful. The global modeling technique is used to obtain sets of Ordinary Differential Equations of canonical form from single [1,2] time series. It was recently shown that the approach could also be applied to get coupling models from multiple time series [3].

In this study, a generalized formulation [4] of the global modeling technique is used to obtain a set of Ordinary Differential Equations for the dynamics of Ebola virus disease identified in 2014 in West Africa. Two observables are considered : the number of detected infections and the number of deaths due to Ebola virus. Based on this approach, a four-dimensional chaotic model that exhibits a complex dynamics is obtained and discussed.

### Références

1. G. GOUESBET & C. LETELLIER, Global vector field reconstruction by using a multivariate polynomial  $L_2$ -approximation on nets, *Physical Review E*, **49** (6), 4955-4972, 1994.
2. S. MANGIAROTTI, R. COUDRET, L. DRAPEAU & L. JARLAN, Polynomial search and global modeling : two algorithms for modeling chaos, *Physical Review E*, **86**(4), 046205, 2012.
3. S. MANGIAROTTI, Low dimensional chaotic models for the plague epidemic in Bombay (1896–1911), *Chaos, Solitons & Fractals*, **81**(A), 184-196, 2015.
4. S. MANGIAROTTI, Modélisation globale et caractérisation topologique de dynamiques environnementales : de l'analyse des enveloppes fluides et du couvert de surface de la Terre à la caractérisation topodynamique du chaos, Habilitation to direct Researches, Université de Toulouse 3, 2014.

# Détection de dynamiques de basse dimension par analyse entropie-complexité

Antoine Chrisment & Marie-Christine Firpo

Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS UMR 7648, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau  
 marie-christine.firpo@lpp.polytechnique.fr

Il y a quelques années, Rosso et ses collaborateurs [1] ont suggéré qu'il était possible d'envisager une classification du chaos des systèmes dynamiques via une analyse en entropie-complexité de leurs signaux temporels. Dans le plan entropie-complexité, les points accessibles occupent un croissant ayant pour coins des états de complexité nulle, le coin gauche correspondant à une entropie nulle (signaux monotones), le coin droit correspondant à une entropie maximale (réalisations du processus stochastique de bruit blanc). Utilisant les séries issus de mappings chaotiques bien connus et de différents processus stochastiques, ils ont constatés que les mappings chaotiques (chaos de basse dimension) étaient caractérisés par une forte complexité tandis que les processus stochastiques étaient caractérisés par une forte entropie et une complexité plus basse. Dans ce contexte, la question de la nature de l'information dynamique associée à la notion de "complexité" est un sujet de recherches actif.

Nous présentons ici une analyse en entropie-complexité [2] de la dynamique d'observables dans un modèle champ-moyen, prototype des systèmes à longue portée, le modèle HMF (Hamiltonian Mean Field) [3]. Les systèmes à  $N$ -corps globalement couplés sont connus pour posséder une dynamique non-triviale, où lorsque  $N$  est grand, les effets collectifs peuvent drastiquement réduire la dimension effective de la dynamique, rendant caduques les conditions d'ergodicité nécessaires pour l'applicabilité de la mécanique statistique d'équilibre. Le modèle HMF répulsif présente par exemple à basse énergie un état quasi-stationnaire hors équilibre à deux amas.

Dans ce travail, nous discutons

- de la très grande sensibilité de l'estimation de l'entropie et de la complexité d'un signal vis-à-vis de la fréquence d'échantillonnage, et du statut à donner à une telle dépendance ;
- d'une piste pour permettre de révéler les dynamiques hors-équilibre de basses dimensions dans une analyse entropie-complexité : le recours à une section de Poincaré.

Ces observations offrent des perspectives intéressantes pour l'approche entropie-complexité, en tant qu'indicateur dynamique d'emploi facile pour estimer les poids respectifs des modes collectifs/ de la turbulence dans des domaines tels que la dynamique des fluides ou la physique des plasmas.

## Références

1. O. A. Rosso, H. A. Larrondo, M. T. Martin, A. Plastino, et M. A. Fuentes, *Distinguishing Noise from Chaos*, Phys. Rev. Lett. **99**, 154102 (2007).
2. A. Chrisment et M.-C. Firpo, *Entropy-complexity analysis in some globally-coupled systems*, hal-01238068.
3. M. Antoni et S. Ruffo, *Clustering and relaxation in Hamiltonian long-range dynamics*, Phys. Rev. E **52**, 2361 (1995).

# Instabilité viscoélastique dans le régime Képlérien comme analogue de l'instabilité magnéto-rotationnelle

Innocent MUTABAZI, Yang BAI & Olivier CRUMEYROLLE

Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR 6294, CNRS-Université du Havre, 76058 Le Havre Cedex  
 innocent.mutabazi@univ-lehavre.fr

L'instabilité magnéto-rotationnelle (MRI) d'un fluide conducteur dans un champ magnétique a fait l'objet de plusieurs études théoriques depuis que Balbus et Hawley [1] ont montré qu'elle était l'un des mécanismes susceptibles d'expliquer le transport de moment turbulent dans les disques d'accrétion en Astrophysique. De récents travaux d'Ogilvie et collaborateurs [2,3] ont ouvert une possibilité de réalisation d'une expérience analogique permettant d'illustrer cette instabilité en utilisant les liquides viscoélastiques. En effet, l'étirement de longues chaînes polymériques est équivalent à celui des lignes de champ magnétique; et les équations décrivant les écoulements des liquides viscoélastiques dans le modèle d'Oldroyd-B sont identiques à celles de la magnétohydrodynamique dans la limite des grands nombres de Weissenberg  $Wi$  et de Reynolds magnétique  $Rm$ . Boldyrev [4] ont mené une expérience préliminaire mais dans des conditions éloignées de la théorie développée par Ogilvie et al. [3].

Nous rapportons les résultats d'une étude systématique expérimentale et théorique de l'instabilité d'un liquide viscoélastique (de masse volumique  $\rho$  et de viscosité  $\mu_0$ ) dans le système de Couette-Taylor de longueur  $L$  et de largeur  $d$  lorsque les deux cylindres de rayons  $a$  et  $b = a + d$  sont en corotation de type Képlérien avec des vitesses angulaires  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  respectivement. Nous avons utilisé des solutions de polymères avec des temps de relaxation  $\lambda$  qui ont une viscosité totale quasi-constante vis-à-vis du cisaillement, mimant le modèle d'Oldroyd-B. Les paramètres de contrôle variables du système sont le nombre de Taylor  $Ta = [\rho|\Omega_1 - \Omega_2|ad/\mu] (d/a)^{1/2}$ , le nombre élastique  $E = \lambda\mu/(\rho d^2)$  et le rapport des viscosités  $S = \mu_p/mu_0$  où  $\mu_p$  est la contribution du polymère à la viscosité du solvant. L'expérience est réalisée dans un système de rapport d'aspect  $\Gamma = L/d = 45$  et de rapports de rayons  $\eta = a/b = 0.8$ .

Pour chaque solution de polymère, nous avons détecté l'apparition d'une instabilité et mesuré les principaux paramètres caractérisant le motif correspondant : valeur seuil de  $Ta$ , spectre de longueur d'onde et de fréquence. Une étude de stabilité linéaire a permis de déterminer les différents seuils d'instabilité pour différentes solutions étudiées et un diagramme d'états critiques  $Ta_c(ES)$  a été établi. Les principaux résultats obtenus sont les suivants : lorsque les cylindres sont en corotation Képlérienne, pour une valeur donnée de  $ES$ , l'écoulement devient instable et le seuil  $Ta_c$  décroît avec  $ES$ ; la nature de l'instabilité dépend de la valeur du produit  $ES$ . Pour de valeurs de  $E > 1$  quelque soit  $S$ , l'instabilité est de nature purement élastique avec un large spectre de nombres d'onde et de fréquences. Pour de faibles valeurs de  $E$ , l'instabilité se manifeste soit sous forme de vortex axisymétriques stationnaires ou de vortex non axisymétriques oscillants.

Une analyse théorique a permis d'étendre le modèle d'Ogilvie par la généralisation du critère de stabilité de Rayleigh aux fluides viscoélastiques, ainsi que la construction de champs de vecteurs à partir du tenseur de contraintes viscoélastiques. Ces champs de vecteurs jouent un rôle analogue à celui du champ magnétique. Cette extension a permis de considérer que les vortex axisymétriques observés dans l'expérience sont les analogues de l'instabilité magnéto-rotationnelle azimutale alors que les vortex non axisymétriques seraient les analogues de l'instabilité magnéto-rotationnelle hélicoédale [?].

## Références

1. S.A. BALBUS AND J.F. HAWLEY, *Rev. Mod. Phys.*, **70**, 1 (1998).
2. G.I. OGILVIE AND A. T. POTTER, *Phys. Rev.Lett.*, **100**, 074503 (2008).
3. G.I. OGILVIE AND M.R.E. PROCTOR, *J. Fluid Mech.*, **476**, 389 (2003).
4. S. BOLDYREV, D.HUYNH AND V. PARIEV, *Phys.Rev. E*, **80**, 066310 (2009).

# Instabilités thermiques et hydrodynamiques des écoulements parallèles.

Y. Requile, S. Hirata & M.N. Ouarzazi

Laboratoire de Mécanique de Lille, UMR CNRS 8107, Université Lille 1, BLd. Paul Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France  
 yjl.requile@ed.univ-lille1.fr

Ce travail réalisé dans le cadre d'une thèse porte sur l'influence de la dissipation visqueuse sur l'apparition d'instabilités convectives dans un fluide soumis à un gradient de température vertical et à un écoulement horizontal. Deux types d'écoulements parallèles sont considérés. La première configuration concerne l'écoulement de Poiseuille induit par la présence d'un gradient horizontal de pression, alors que la deuxième configuration consiste en un écoulement de Couette plan, obtenu par la mise en mouvement des plaques horizontales délimitant le milieu fluide. Ces deux configurations sont souvent reconnues dans la littérature comme le problème de Rayleigh-Bénard-Poiseuille (RBP) et celui de Rayleigh-Bénard-Couette respectivement.

Les équations qui régissent le problème sont les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible vérifiant l'approximation de Boussinesq et l'équation de conservation de l'énergie où apparaît le terme de dissipation visqueuse  $\Phi = \tau_{ij}u_{i,j}$  où  $\mathbf{u}$  est le vecteur vitesse et  $\tau_{ij}$  le tenseur des contraintes de cisaillement :

$$\rho_0 C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T + \Phi \quad (1)$$

En l'absence d'un gradient de température vertical induit par des conditions de température isotherme imposées sur les parois, les effets de la dissipation visqueuse sur les caractéristiques linéaires de l'instabilité ont été largement discutés dans [1] pour un écoulement de Poiseuille et dans [2] pour un écoulement de Couette. L'objectif de ce travail est l'extension de [1] et [2] avec prise en compte du gradient vertical de température dans l'état de base. Pour l'étude de stabilité de cet état de base, une transformation de Squire est introduite qui permet de déduire les propriétés linéaires des instabilités tridimensionnelles à partir de celles trouvées dans le cas du problème bidimensionnel. Cette transformation nous a permis de focaliser l'étude sur deux principales formes d'instabilités convectives : d'une part les rouleaux transversaux (RT) dont l'axe est perpendiculaire à l'écoulement principal et d'autre part aux rouleaux longitudinaux (RL) dont l'axe est parallèle à l'écoulement principal. La résolution numérique du problème aux valeurs propres montre que la dissipation visqueuse a un effet négligeable lorsque l'instabilité est structurée en RT. En revanche, les résultats ont mis en évidence un effet déstabilisant sur l'émergence des RL. Cette déstabilisation est d'autant plus forte que le nombre de Prandtl est élevé. Un résultat remarquable qui se dégage de cette étude est qu'au delà d'une valeur critique de la dissipation visqueuse, des structures convectives sous la forme de RL peuvent se développer, y compris dans la situation où le canal est chauffé par le haut. Les mécanismes physiques de ces instabilités ont été élucidés grâce à une analyse énergétique, qui montre qu'au fur et à mesure que l'écoulement principal s'intensifie, l'énergie thermique cédée par le gradient vertical imposé aux frontières observe une chute au profit d'une augmentation de l'énergie liée à la dissipation visqueuse. L'effet déstabilisant de la dissipation visqueuse se produit aussi bien dans la configuration de RBP que dans celle de RBC, tant pour un fluide newtonien que viscoléastique.

## Références

1. A. Barletta, M. Celli, D. A. Nield, On the onset of dissipation thermal instability for the poiseuille flow of a highly viscous fluid in a horizontal channel, *Journal of Fluid Mechanics* 681 (2011) 499-514.
2. A. Barletta, D. A. Nield, Convection-dissipation instability in the horizontal plane couette flow of a highly viscous fluid, *Journal of Fluid Mechanics* 662 (2010) 475-492.

# Modal stability analysis of mechanically-driven flows in rigid rotating ellipsoids

Jérémie Vidal<sup>1</sup>, David Cébron<sup>1</sup> & Nathanaël Schaeffer<sup>1</sup>

Université Grenoble Alpes, CNRS, ISTerre, Grenoble, France.  
jeremie.vidal@univ-grenoble-alpes.fr

Because of gravitational torques generated by their orbital partners, most of planets, moons and stars have ellipsoidal shapes. It also gives birth to mechanical forcings, which lead to time-dependent rotating angular velocities. For instance librations are periodic oscillations about a fixed, mean rotation rate of a body. The fluid response to the librational forcing through topographic coupling in ellipsoids can be important to understand the physics of an orbital body [Vantieghem et al., 2015]. It has also been proposed that librations can sustain self-sustained dynamos [Wu et al., 2013], by injecting a part of the huge rotational energy in the system to drive intense fluid flows. Thus librations (and more generally any mechanical forcing) may be a viable alternative to thermo-chemical convection as driving mechanism for planetary dynamos.

We investigate the hydrodynamic global stability of incompressible, inviscid fluids enclosed in rotating rigid ellipsoids. Following [Wu et al., 2011], three-dimensional perturbations upon a mechanically-driven base state are expanded onto a finite-dimensional polynomial basis, which is an invariant of the governing equation. By combining symbolic and numerical computations, we are able to get the growth rate and the velocity structure of any inertial instability in the linear growth. The method is valid for ellipsoids of arbitrary shape. We extend the work of [Wu et al., 2013] and perform the stability analysis of the experiment of [Grannan et al., 2014], considering spheroidal containers undergoing longitudinal librations. We predict new instabilities of high spatial complexity, some of them which may be observed in laboratory experiments. New instabilities are also found for other mechanical forcings.

Finally, we outline how to use the inertial modes to study the weakly non-linear saturation of any inertial instability. Indeed, the underlying mechanism of inertial instabilities is a triadic resonance between the mechanically-driven base flow and a pair of inertial modes of the system. With this new approach, we aim at giving a quantitative explanation of the saturation with a low-dimensional weakly nonlinear model of inertial instabilities, valid for both laboratory and numerical experiments. The method will be applied first to a given librational configuration [Grannan et al., 2014, Favier et al., 2015].

## Références

- [Vantieghem et al., 2015] Vantieghem, S., Cébron, D., and Noir, J. (2015). *Journal of Fluid Mechanics*, 771 :193–228.
- [Wu et al., 2013] Wu, C. C. and Roberts, P. H. (2013). *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 107 :20–44.
- [Wu et al., 2011] Wu, C. C. and Roberts, P. H. (2011). *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 105 :287–303.
- [Grannan et al., 2014] Grannan, A., Le Bars, M., Cébron, D., and Aurnou, J. (2014). *Physics of Fluids (1994-present)*, 26(12) :126601.
- [Favier et al., 2015] Favier, B., Grannan, A., Le Bars, M., and Aurnou, J. (2015). *Physics of Fluids (1994-present)*, 27(6) :066601.

# Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans l'hydrosphère de Ganymède

S. Carpy<sup>1</sup> & H. Mathis<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes, UMR 6112, CNRS, Université de Nantes, 2 chemin de la Houssinière, BP 92205, 44322 Nantes Cedex 3, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Mathématiques Jean Leray, UMR 6629, CNRS, Université de Nantes, 2 chemin de la Houssinière, BP 92205, 44322 Nantes Cedex 3, France.

sabrina.carpy@univ-nantes.fr

Ce travail concerne la modélisation et la simulation numérique des phénomènes de convection thermique et de transfert de masse dans l'hydrosphère de Ganymède, satellite de Jupiter. La mission Galiléo a permis de détecter la présence d'un océan (constitué de  $H_2O$  et probablement de  $NH_3$ ) situé entre un manteau supérieur de glace et une couche inférieure de glace hautes pressions[4]. Le champ magnétique de Ganymède induit de la conduction thermique qui s'évacue de la couche de glace hautes pressions vers le manteau supérieur en passant par l'océan. Il s'avère que la température de l'interface  $\Gamma$ , située entre l'océan et la couche de glace hautes pressions, est supérieure à la température de fusion. Le système est donc hors équilibre. La question est de déterminer l'évolution en espace et en temps de l'interface  $\Gamma$  et de décrire les instabilités qui s'y produisent.

On adopte un modèle bidimensionnel de Rubinstein [3] pour décrire le phénomène. Il consiste à décrire la solidification d'un mélange constitué d'eau  $H_2O$  et d'eau enrichie  $H_2O-NH_3$  dans un domaine  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ . Le front de solidification  $\Gamma(t)$ , au temps  $t > 0$ , sépare  $\Omega$  en une région solide  $\Omega_s(t)$  et une région liquide  $\Omega_l(t)$ , telles que  $\Gamma(t) = \Omega_s(t) \cap \Omega_l(t)$ , où les indices  $s$  et  $l$  correspondent aux phases solide et liquide. Les températures  $T_i(t, x)$  et les concentrations  $c_i(t, x)$ , pour  $x \in \Omega_i(t)$  et  $t > 0$ , dans chaque phase  $i = s, l$ , satisfont des équations de diffusion et la position de l'interface  $\Gamma(t)$  est donnée par des conditions de type Stefan : la vitesse de l'interface  $\Gamma(t)$  est définie comme le saut de gradient de température et de concentration à l'interface. Le modèle est complété par des conditions initiales et limites en accord avec la physique du phénomène. De plus on tient compte du transfert de masse qui s'opère à l'interface  $\Gamma(t)$  en imposant des lois d'état adéquates pour le mélange  $H_2O/H_2O - NH_3$ .

Puisque que le modèle se ramène à un problème à frontière libre, il est approprié de considérer une méthode numérique de ligne de niveau (*level set*). Il s'agit de localiser le front de solidification par le zéro d'une fonction de distance que l'on transporte selon les conditions de Stefan. On adapte l'approche développée dans [1] et [2] pour traiter la *level set* sur un maillage triangulaire quelconque. La méthode numérique est validée sur des solutions analytiques unidimensionnelles. On compare les résultats bidimensionnels à ceux obtenus pour un problème de Lamé-Clapeyron-Stefan diphasique avec prise en compte d'une zone boueuse [5].

## Références

1. C. BUI, CH. DAPOGNY AND P. FREY, An accurate anisotropic adaptation method for solving the level set advection equation, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **70**, 899–922 (2012).
2. CH. DAPOGNY AND P. FREY, Computation of the signed distance function to a discrete contour on adapted triangulation, *Calcolo*, **49**, 193–219 (2012).
3. L. I. RUBINSTEIN, *The Stefan problem* Translations of Mathematical Monographs, Amer. Math. Soc., Providence (1971).
4. F. SOHL, M. CHOUKROUN, J. KARGEL, J. KIMURA, R. PAPPALARDO, S. VANCE, AND M. ZOLOTOV, Subsurface water oceans on icy satellites : Chemical composition and exchange processes, *Space Science Reviews*, **153**, 485–510 (2010).
5. D. A. TARZIA, Neumann-like solution for the two-phase Stefan problem with a simple mushy zone model, *Computational and Applied Mathematics*, **9**, 201–211 (1990).



## A mathematical model for nonlinear viscoelastic materials

Riccardo De Pascalis<sup>1</sup>, I. David Abrahams<sup>2</sup>, William J. Parnell<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LMSC, Université Paris Diderot,  
10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75013 Paris, France  
LPMTM, UPR 9001, Institut Galilée, Université Paris 13,  
99, Av. J.B. Clement, 93430 Villetaneuse, France

<sup>2</sup> School of Mathematics, University of Manchester,  
Manchester, M139PL, United Kingdom

`riccardo.depascalis@gmail.com`

Obtaining an accurate yet tractable mathematical approach to the modelling of nonlinear viscoelastic materials remains a challenge. There is increasing urgency in achieving this objective as many engineering and biological materials exhibit large strains and viscoelastic behaviour under modest loads. This talk will offer a reappraisal of Fung's model for quasilinear viscoelasticity (QLV). A number of negative features exhibited in other published works, commonly attributed to the Fung approach, are merely a consequence of the way it has been applied to-date. The present approach yields improved behaviour, and offers a straightforward scheme for solving a wide range of models. For the case of imposed uniaxial loading, a straightforward numerical solution to a Volterra integral equation is required to obtain the resultant strain. Finally, application of the approach to homogenous and inhomogenous materials will be discussed.

### Références

1. De Pascalis, R., Abrahams, I. D., Parnell, W. J, *On nonlinear viscoelastic deformations : a reappraisal of Fung's quasi-linear viscoelastic model*, Proceedings of The Royal Society of London. Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 470 (2166), doi : 10.1098/rspa.2014.0058, 2014
2. De Pascalis, R., Abrahams, I. D., Parnell, W. J, *Simple shear of a compressible quasilinear viscoelastic material*, International Journal of Engineering Science, Vol. 88, Pages 64-72, DOI information : 10.1016/j.ijengsci.2014.11.011, 2015

# Observation du couplage entre ondes de surface et d'interface en turbulence d'ondes gravito-capillaires entre deux couches de fluides

B. Issenmann<sup>1,2</sup> & E. Falcon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, MSC, UMR 7057 CNRS - F-75013 Paris, France

<sup>2</sup> Institut Lumière Matière, UMR5306 Université Claude Bernard Lyon 1-CNRS, Université de Lyon - 69622 Villeurbanne cedex, France

bruno.issenmann@univ-lyon1.fr

Nous étudions expérimentalement la turbulence d'ondes gravito-capillaires à l'interface entre deux fluides, la surface du fluide supérieur étant libre. Nous mesurons localement la hauteur des ondes à l'interface entre les deux fluides à l'aide d'un vibromètre laser Doppler hautement sensible. Nous montrons que le domaine inertiel de la turbulence d'ondes capillaires augmente significativement lorsque la profondeur du fluide supérieur augmente : la transition entre les régimes de turbulence d'ondes de gravité et de capillarité décroît vers les basses fréquences tandis que la coupure dissipative du spectre augmente vers les hautes fréquences. Nous expliquons ces observations par le couplage entre les ondes se propageant à l'interface et celles à la surface libre, en utilisant la relation de dispersion complète des ondes gravito-capillaires à deux fluides de profondeurs arbitraires [1].

## Références

1. S. C. Mohapatra, D. Karmakar, T. Sahoo, *J. Eng. Math.* **71**, 253-277 (2011)

# Étude statistique de l'interaction entre un marcheur et une barrière de potentiel

Hubert Maxime<sup>1</sup>, Perrard Stéphane<sup>2</sup> & Labousse Matthieu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GRASP, Institute of Physics B5a, Université de Liège, B4000 Liège, Belgium, EU

<sup>2</sup> James Franck institute, Department of Physics, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA

<sup>3</sup> Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, CNRS - UMR 7162, 10 Rue A. Domon and L. Duquet, 75013 Paris, France, EU

maxime.hubert@ulg.ac.be

En 2009, Eddi *et al.* [1] ont étudié l'interaction entre un marcheur, une goutte couplée au champ d'onde qu'elle émet par ses impacts réguliers sur une surface liquide, et un obstacle sous-marin. Il a été montré que le passage de la goutte par delà l'obstacle était décrit de manière probabiliste et suivait les prédictions de la physique statistique. Une analogie avec un "effet tunnel macroscopique" a alors été suggéré.

Nous proposons aujourd'hui un modèle pour cette expérience consistant en une particule autopropulsée [2] interagissant avec un champ de force constant, sans autre ingrédient stochastique. Afin de rendre compte de la nature probabiliste du phénomène, les conditions initiales sont de nature aléatoire. Nous montrons alors qu'il est possible, sous ces hypothèses, d'obtenir une probabilité de franchir la barrière de potentiel qui est celle donnée par la physique statistique des systèmes hamiltoniens. Nous soulevons ensuite la question de la généralité d'un tel comportement en appliquant ce modèle à d'autres potentiels.

## Références

1. A. Eddi, E. Fort, F. Moisy & Y. Couder *Phys. Rev. Lett.* **102**, 240401 (2009)
2. M. Labousse & S. Perrard *Phys. Rev. E* **90**, 022913 (2014)

# Instabilité d'un anneau de vorticité au voisinage d'une surface libre

M. Labousse<sup>1</sup>, B. El-Hadj Maiga<sup>2</sup>, I. Cantat<sup>3</sup>, A. Saint-Jalmes<sup>3</sup> & M. Roché<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire MPQ, CNRS UMR 7162 and Université Paris Diderot, Paris, France

<sup>2</sup> Laboratoire MSC, CNRS UMR 7057 and Université Paris Diderot, Paris, France

<sup>3</sup> Institut de Physique de Rennes, CNRS UMR 6251 and Université Rennes 1, Rennes, France

matthieu.roche@univ-paris-diderot.fr

Nous présenterons ici une étude sur la relation entre les motifs observés sur la surface d'une couche d'eau pendant un écoulement de Marangoni stationnaire [1,2]. Nous montrerons que les structures tourbillonnaires bidimensionnelles qui se propagent à l'extérieur de l'écoulement de Marangoni résulte de la déstabilisation d'un anneau de vorticité existant à la limite entre la région Marangoni et l'extérieur par instabilité de Rayleigh-Plateau. Cet anneau est mis en évidence par des mesures de PIV dans le volume de la couche d'eau, et nous montrons que cet anneau tourbillonnaire est suffisamment intense pour déformer la surface de la couche d'eau. L'interface air/eau est alors localement courb e et l'inertie ainsi que la capillarité conduisent à la déstabilisation de cette région courb e, qui adopte une forme polygonale et conduit à l'émission des paires de tourbillons bidimensionnelles. Nous montrerons qu'un modèle développé [3] récemment permet de capturer les observations expérimentales avec un excellent accord.

## Références

1. M. Roché *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 208302 (2014).
2. S. Le Roux, M. Roché, I. Cantat, and A. Saint-Jalmes, *Phys. Rev. E* **93**, 013107 (2016).
3. M. Labousse and J. W. M. Bush, *EPJ E* **38**, 113 (2015)

## Relations de fluctuation en Turbulence

Chibbaro S.<sup>1</sup> & Zonta F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005, Paris, France

<sup>2</sup> Department of Elec., Manag. and Mechanical Engineering, University of Udine, 33100, Udine, Italy  
`sergio.chibbaro@upmc.fr`

Nous présentons des expériences numériques qui analysent les fluctuations de la production d'entropie dans un cas de convection thermique turbulente, qui représente une configuration physique prototype d'un système dissipatif hors-d'équilibre.

Nous estimons la production d'entropie à partir de mesures instantanées de la température et de la vitesses locales, obtenues en suivant un grand nombre de traceurs lagrangiens.

La production d'entropie ainsi définie est caractérisée par de larges fluctuations et devient souvent négative, ce qui représente une sorte de violation "à temps fini" du second principe de la thermodynamique, car la direction du flux d'énergie est opposée à ce qui est prescrit par les gradients extérieurs.

On montre clairement avec nos simulations que les fluctuations d'entropie observées dans le système pris en considération vérifient les relations de fluctuations développés en mécanique statistique des systèmes dynamiques microscopiques, même si le système est irréversible. Il est important de remarquer que un point essentiel est de trouver une échelle caractéristique d'énergie, que dans notre cas nous estimons grâce à la théorie de Kolmogoroff de la turbulence.

### Références

1. Evans, Cohen and Morris *Physical review letters*, 71, 1993.
2. Gallavotti and Cohen *Physical review letters*, 74, 1995.
3. Jarzynski *Physical Review Letters*, 78, 1997.
4. Marconi, Puglisi, Rondoni and Vulpiani *Physics Reports*, 461, 2008.
5. Ciliberto, Gomez-Solano, Petrosyani *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 235, 2013.

# Structures non-linéaire dans un système périodique de particules, effets thermiques et interaction entre structures.

Tommy Dessup<sup>1</sup>, Christophe Coste<sup>1</sup> & Michel Saint Jean<sup>1</sup>

Laboratoire "Matière et Systèmes Complexes" (MSC), UMR 7057 CNRS, Université Paris 7 Diderot, 75205 Paris Cedex 13, France

[tommy.dessup@univ-paris-diderot.fr](mailto:tommy.dessup@univ-paris-diderot.fr)

Nous nous intéressons à des systèmes périodiques de particules en interaction confinées dans une géométrie quasi-1D. De telles situations physiques se retrouvent dans des systèmes très différents comme des ions confinés dans un piège quadropolaire (Paul's trap) [1], des poussières dans des plasmas [2], des particules colloïdales [3] ou des billes millimétriques en interaction électrostatique [4].

Tout d'abord nous décrirons la transition structurelle du système en fonction de l'intensité du potentiel transverse confinant. La configuration stable du système passe d'une ligne homogène pour un fort confinement transverse à une répartition en quinconce des particules pour de faibles confinements (configurations zigzag ou zagzig). Cette transition est alors décrite par une bifurcation fourche surcritique.

Lorsque les particules sont de plus confinées longitudinalement dans un anneau, l'invariance par rotation induit l'existence d'un mode de fréquence nulle (mode de Goldstone) qui se couple au mode transverse mou à la transition. Nous avons développé un modèle non-linéaire continu qui tient compte du couplage entre les champs de déplacements longitudinaux et transverses, et qui montre que la bifurcation devient alors sous-critique. Une signature claire de cette sous-criticalité est l'apparition de structures cohérentes inhomogènes constituées d'une zone localisée, où les particules sont en zigzag, entourée de particules alignées. Notre modèle décrit ces structures comme des ondes solitaires appelées bulles avec un excellent accord quantitatif sans paramètre ajustable avec nos simulations numériques [6].

Nous montrerons ensuite que ces bulles restent stable en présence d'un bruit thermique et étudierons l'influence de la température sur cette bifurcation sous-critique [7]. Enfin leur diffusion et leur interaction lorsque plusieurs bulles coexistent seront examinées. Nous déterminerons notamment la force d'interaction entre les structures non-linéaires à l'aide d'une méthode générale développée par Elphick *et al.* [8] que nous avons adaptée aux équations issues de notre modèle décrivant la forme normale de la bifurcation sous-critique.

## Références

1. M. Mielenz, J. Brox, S. Kahra, G. Leschhorn, M. Albert, T. Schaetz, H. Landa, and B. Reznik. Trapping of topological-structural defects in Coulomb crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 110 :133004, 2013.
2. TE Sheridan. Dusty plasma ring model. *Physica Scripta*, 80(6) :065502, 2009.
3. A. V. Straube, R. P. A. Dullens, L. Schimansky-Geier, and A. A. Louis. Zigzag transitions and nonequilibrium pattern formation in colloidal chains. *J. Chem. Phys.*, 139 :134908, 2013.
4. C. Coste, J.-B. Delfau, C. Even, and M. Saint Jean. Single file diffusion of macroscopic charged particles. *Phys. Rev. E*, 81 :051201, 2010.
5. T. Dessup, T. Maimbourg, C. Coste, and M. Saint Jean. Linear instability of a zigzag pattern. *Phys. Rev. E*, 91 :022908, 2015.
6. T. Dessup, C. Coste, and M. Saint Jean. Subcriticality of the zigzag transition : A nonlinear bifurcation analysis. *Phys. Rev. E*, 91 :032917, 2015.
7. T. Dessup, C. Coste, and M. Saint Jean. Hysteretic and intermittent regimes in the subcritical bifurcation of a quasi-one-dimensional system of interacting particles. *Phys. Rev. E*, 93 :012105, 2016.
8. C. Elphick, E. Meron, and E.A. Spiegel. Patterns of propagating pulses. *SIAM J. Appl. Math.*, 50(2) :490, 1990.

## Empilements compacts (jammed) de sphères dures et équilibre de Nash : Indépendantes mais solidaires.

Nicolas Rivier

IPCMS, Université de Strasbourg  
rivier@ipcms.unistra.fr

”La mécanique rationnelle, quand elle réduit les corps à de simples points matériels, l’économie pure, quand elle réduit les hommes réels à l’*homo oeconomicus*, se servent d’abstractions parfaitement semblables et imposées par des nécessités semblables.” [1]

Nous verrons ici que l’abstraction semblable n’est pas le point matériel, mais la sphère dure. Les mouvements géométriques d’une sphère sont fortement restreints par les autres sphères, sur lesquelles elle ne peut que rouler sans glisser. Notamment, quatre sphères en contact constituent un tétraèdre. La longueur des arêtes est bornée par le contact de deux sphères, mais trois sphères ne peuvent rouler sans glisser l’une sur l’autre sans perdre un contact. Sous cisaillement, le tétraèdre se déforme en un polygone (de Petrie) de quatre contacts et deux arêtes topologiques sans contact physique. Ces deux arêtes topologiques, opposées et orthogonales sur le tétraèdre, sont des déformations indépendantes qui bornent l’espace de phase. Elles en constituent la frontière de Pareto : Les configurations de compacité maximale (de volume minimal) se trouvent aux bords de l’espace de phase. Toute excursion vers l’intérieur de l’espace de phase est moins compacte. On montre qu’on a alors équilibre de Nash. La situation se généralise en dimensions  $D = N - 1 > 3$ . Le tétraèdre devient alors un simplexe de  $N$  hypersphères et l’espace de phase est borné par  $p = N - 2$  chemins orthogonaux et indépendants, sa frontière de Pareto. On prouve [2] que l’équilibre de Nash existe bien pour des hypersphères en dimensions  $D$  infinie ( $D + 1$  agents économiques identiques, avec  $p = D - 1$  chemins indépendants). L’équation d’état de ce fluide de sphères dures en équilibre de Nash a un seul, non-trivial coefficient du viriel [2] : Les sphères, ou agents économiques, en équilibre de Nash sont en interaction mais leur chemins sont indépendants. On a jeu ou fluide de champ moyen.

### Références

1. Pareto, V, 1963 Manuel d’Economie Politique, trad. A. Bonnet, Pichon, Paris, p.17
2. Wyler, D., Rivier, N., Frisch, H. L. 1987 Hard-sphere fluid in infinite dimensions, Phys.Rev.A **36** 2422-2431

## Influence de vibrations mécaniques sur la friction granulaire

Valérie Vidal, Henri Lastakowski & Jean-Christophe Géminard

Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon, Université de Lyon – CNRS,  
46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France  
valerie.vidal@ens-lyon.fr

Le déclenchement d'événements à grande échelle par des vibrations est un phénomène qui se rencontre dans de nombreuses situations, de l'utilisation d'une salière au déblocage des silos, en passant par le déclenchement dynamique des tremblements de terre [1,2,3]. Un système modèle pour étudier les caractéristiques de la friction granulaire consiste en un patin attaché à un ressort, ce dernier étant tiré à vitesse constante sur un lit de grains. À basse vitesse de traction ( $V < V_c$ ), le patin a un mouvement dit de *stick-slip*, présentant une alternance de phases de repos (*stick*) et de mouvement (*slip*). À haute vitesse de traction ( $V > V_c$ ), le patin glisse continûment sur le lit granulaire. Des travaux précédents ont montré qu'à basse vitesse, l'application de perturbations mécaniques au système pouvait provoquer la transition entre stick-slip et glissement continu. Ces études, essentiellement basées sur des modèles numériques, ont proposé l'accélération des vibrations imposées comme paramètre gouvernant la transition, avec une accélération critique de l'ordre de l'accélération gravitationnelle [4,5].

Nous avons étudié expérimentalement l'influence de vibrations mécaniques sur la friction granulaire. Le système est composé d'un patin et d'une lame-ressort, cette dernière étant tractée à vitesse  $V$  sur une couche de grains dont les propriétés (taille moyenne, polydispersité, forme, matériau) ont été variées. La vitesse est choisie telle que, sans vibration, le patin ait un mouvement de stick-slip ( $V < V_c$ ). On applique ensuite des vibrations mécaniques horizontales, transverses au mouvement du patin, au lit granulaire. L'amplitude  $A$  et la fréquence  $\omega$  des vibrations est mesurée in-situ, à la base de la couche de grains, par des accéléromètres placés sous la trajectoire du patin. Lorsque l'amplitude  $A$  ou la fréquence  $\omega$  des vibrations augmente, l'amplitude du stick-slip diminue, jusqu'à ce que le système transite vers un mouvement de glissement continu. Il est intéressant de noter que les coefficients de friction statique et dynamique diminuent tous les deux. Contrairement aux résultats de travaux précédents, nous montrons que ce n'est pas l'accélération  $A\omega^2$  des vibrations imposées qui gouverne les propriétés frictionnelles, mais la vitesse  $A\omega$  [6]. La vitesse critique pour laquelle le système transite vers un glissement continu est très faible, de l'ordre de  $100 \mu\text{m/s}$ , et semble indépendante des propriétés des grains utilisés. Lorsque le système est statiquement chargé, l'accélération typique des vibrations qui déclenchent le glissement est bien plus faible que l'accélération gravitationnelle. Ces résultats pourraient permettre de comprendre le déclenchement dynamique de tremblements de terre par de très faibles vibrations du sol [3].

### Références

1. A. JANDA, D. MAZA, A. GARCIMARTÍN, E. KOLB, J. LANUZA & E. CLÉMENT, Unjamming a granular hopper by vibration, *Europhysics Lett.* **87**, 24002 (2009).
2. P. A. JOHNSON & X. JIA, Nonlinear dynamics, granular media and dynamic earthquake triggering, *Nature* **437**, 871–874 (2005).
3. J. GOMBERG, P. REASENBERG, P. BODIN & R. HARRIS, Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes, *Nature* **411**, 462–466 (2001).
4. A. L. SELLERIO, D. MARI, G. GREMAUD & G. D'ANNA, Glass transition associated with the jamming of vibrated granular matter, *Phys. Rev. E* **83**, 021301 (2011).
5. M. PICA CIAMARRA, A. CONIGLIO, D. DE MARTINO & M. NICODEMI, Shear-and vibration-induced order-disorder transitions in granular media, *Eur. Phys. J. E* **24**, 411–415 (2007).
6. H. LASTAKOWSKI, J.-C. GÉMINARD & V. VIDAL, Granular friction : Triggering large events with small vibrations, *Sci. Rep.* **5**, 13455 (2015).



## Experimental measurements of granular friction

Cristobal Oliver<sup>1</sup>, Germán Varas<sup>1</sup>, Jean-Christophe Géminard<sup>2</sup> & Valérie Vidal<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Física, Ponticia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Universidad 330, Valparaíso, Chile.

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon, Université de Lyon – CNRS,

46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France

cristobal.oliver@gmail.com

Probing the rheological properties of granular matter by shearing a layer of grains is a classical method, which has been widely studied either experimentally [1,2,3,4], numerically [5,6] or analytically [7,8,9]. The system typically consists of a mass pulled by a spring, this latter being translated at constant velocity  $V$ . For small or moderated velocity  $V$ , the slider exhibits a periodic motion, referred to as *stick-slip* motion : it remains still as long as the tangential force  $F$  is smaller than a threshold force  $F_s$  ('*stick*'); it then exhibits a sliding dissipative motion ('*slip*') during which the dynamic friction force  $F_d$  is roughly constant. From this motion, one can infer the static and dynamic friction coefficient,  $\mu_s$  and  $\mu_d$ , respectively. Another classical experiment consists of measuring the grains avalanches in a rotating drum. In theory, the static and dynamic friction coefficients should be directly related to the starting angle of the avalanche,  $\theta_s$ , and to the dynamic angle of the avalanching grains,  $\theta_d$ , with the relationship  $\tan \theta = \mu$ . However, to our knowledge, these two experiments have never been compared directly.

We report the experimental study of granular friction based on the two experiments previously described. In the first experiment, a slider with a monolayer of grains stuck on its lower surface to ensure grain-grain friction is pulled over a granular bed of the same grains via a cantilever spring. In the second experiment, we measure the avalanche angle of a granular assembly in a rotating cylindrical drum. The study compares the friction coefficients obtained with both experiments. Several grain samples of different characteristic size and type of material (glass beads, ceramics) were analyzed. The effects of humidity and of bidisperse grain mixtures were also quantified. Our preliminary results show that the friction coefficients computed from both experiments exhibit a roughly linear trend, but with small shifts. These discrepancies are apparently independent of the humidity (below a given limit), but are dependent on the grains size and material.

## Références

1. S. NASUNO, A. KUDROLLI & J. P. GOLLUB, Friction in granular layers : hysteresis and precursors, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 949-952 (1997).
2. S. NASUNO, A. KUDROLLI, A. BAK & J. P. GOLLUB, Time-resolved studies of stick-slip friction in sheared granular layers, *Phys. Rev. E* **58**, 2161-2171 (1998).
3. J.-C. GÉMINARD & W. LOSERT, Frictional properties of bidisperse granular matter : Effect of mixing ratio, *Phys. Rev. E* **65**, 041301 (2002).
4. J. L. ANTHONY & C. MARONE, Influence of particle characteristics on granular friction, *J. Geophys. Res.* **110**, B08409 (2005).
5. E. AHARONOV & D. SPARKS, Stick-slip motion in simulated granular layers, *J. Geophys. Res.* **109**, B09306 (2004).
6. T. HATANO, Constitutive law of dense granular matter, *J. Phys. : Conference Series* **258**, 012006 (2010).
7. H. HAYAKAWA, Simple model for granular friction, *Phys. Rev. E* **60**, 4500-4504 (1999).
8. F. LACOMBE, S. ZAPPERI & H. J. HERRMANN, Dilatancy and friction in sheared granular media, *Eur. Phys. J. E* **2**, 181-189 (2000).
9. D. VOLFSO, L. S. TSIMRING & I. S. ARANSON, Stick-slip dynamics of a granular layer under shear, *Phys. Rev. E* **69**, 031302 (2004).

# Réorganisation d'un milieu granulaire autour d'une transformation localisée

A. Merceron<sup>1</sup>, A. Sauret<sup>1</sup> & P. Jop<sup>1</sup>

Surface du Verre et Interfaces, UMR 125 CNRS/Saint-Gobain, 39 quai Lucien Lefranc, 93300 Aubervilliers, France.

[aymeric.merceron@saint-gobain.com](mailto:aymeric.merceron@saint-gobain.com)

De nombreux procédés industriels requièrent la transformation d'un matériau granulaire dit réactif en un produit fini (la fabrication du verre, le procédé de frittage par exemple). Au cours de tels processus, un couplage fort apparaît entre la réponse de la microstructure granulaire et les transformations physico-chimiques qui affectent ses constituants. Celles-ci modifient le réseau de contacts et occasionnent des réorganisations de la structure granulaire. Elles peuvent être de plusieurs natures : des changements de volumes [1], des changements de phases par exemple. Plusieurs études récentes ont exploré des milieux granulaires réactifs mais il existe très peu de systèmes expérimentaux ([2],[3]). Dans cette étude nous simplifions un empilement granulaire entièrement réactif en étudiant la réponse d'un milieu granulaire soumis à une transformation localisée. Il s'agit d'un empilement de grains métalliques bidisperses au sein duquel un intrus est placé. L'intrus est ensuite retiré de l'empilement à vitesse constante. Par traitement d'images, nous analysons la dynamique des réarrangements et les évolutions structurelles à différentes échelles spatiales et temporelles. Les déplacements aux temps longs sont similaires à ceux de silos 2D quasi-statiques. Les réorganisations aux temps courts sont plus hétérogènes dans l'espace et dans le temps. Celles-ci semblent avoir des caractéristiques similaires aux systèmes présentant des dynamiques d'avalanches. Les évolutions structurelles laissent apparaître un unique mécanisme de réarrangement quelque soit l'amplitude des évènements.

## Références

1. Ludewig F., Vandewalle N., Dorbolo S., Pakpour M., Lumay G. : Bernal random loose packing through freeze-thaw cycling. *Physical Review E* 92, 010202 (2015).
2. Dorbolo S., Ludewig F., Vandewalle N., Laroche C. : How does an ice block assembly melt ? *Physical Review E* 85, 051310 (2012).
3. Turnbull B. : Scaling Laws for Melting Ice Avalanches, *Physical Review Letters* 107, 258001 (2011).

## Contrôle du temps de relaxation d'un levier AFM

Anne Le Cunuder<sup>1</sup>, Ignacio Martinez<sup>1</sup>, Artyom Petrosyan<sup>1</sup>, Sergio Ciliberto<sup>1</sup>, David Guéry-Odelin<sup>2</sup> & Emmanuel Trizac<sup>3</sup>

<sup>1</sup> laboratoire de physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon

<sup>2</sup> Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité, Université de Toulouse

<sup>3</sup> LPTMS, Paris-Sud, Université Paris-Saclay

anne.le-cunuder@ens-lyon.fr

Si on change soudainement la position d'équilibre d'un oscillateur harmonique, en appliquant une force externe par exemple, il faut un certain temps au système pour atteindre son nouvel état d'équilibre. Pendant ce régime transitoire, le système oscille avec une amplitude qui décroît progressivement jusqu'à ce qu'il soit complètement relaxé. Le temps de retour à l'équilibre  $\tau$  est une propriété intrinsèque du système. Cependant, si on applique une force externe très spécifique, on montre qu'on peut réduire de façon arbitraire le temps d'équilibration[1].

Pour certaines applications, il peut être très utile de contrôler ce temps de relaxation. En imagerie AFM, par exemple, si la position du levier change à cause d'une interaction avec la surface, il faut attendre plusieurs cycles pour que le levier atteigne son nouvel état d'équilibre. L'accélération de la relaxation des leviers AFM est à la base de techniques d'imagerie à haute vitesse. Plusieurs techniques ont été développées, comme l'utilisation de la rétroaction, ou la modification des propriétés viscoélastiques des leviers. Dans cette présentation, on montrera qu'en choisissant un forçage approprié, on peut contrôler directement le temps de retour à l'équilibre.

L'expérience consiste à appliquer une différence de potentiel entre le levier recouvert d'or et un échantillon doré. Le système se comportant comme un condensateur, la force électrostatique s'écrit :

$$F = 4\pi\epsilon_0 R V^2 / d \quad (1)$$

Si la force suit une évolution bien précise, les oscillations du levier sont amorties en un temps très court. Cependant, le fait de réduire le temps de relaxation a un coût énergétique. Même si le système dissipe très peu, puisqu'on fait l'expérience à viscosité très faible, on peut faire une étude intéressante des échanges énergétiques du système.

On peut imaginer le même type de protocole, où l'on utiliserait la force électrostatique pour moduler la raideur du levier, ce qui aurait des applications intéressantes pour améliorer la précision des courbes de forces.

## Références

1. IGNACIO A.MARTINEZ, Faster than Nature, Swift Engineered Thermalization, *arXiv :1512.07821*.

# Collision et rebond d'une sphère sur une surface texturée dans un fluide

T. Chastel<sup>1</sup>, A. Mongruel<sup>1</sup> & P. Gondret<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), UMR CNRS 7636 ; PSL - ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris, Sorbonne Université - UPMC, Univ. Paris 06 ; Sorbonne Paris Cité - UDD, Univ. Paris 07

<sup>2</sup> Laboratoire FAST, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay F-91405, Orsay  
gondret@fast.u-psud.fr

La collision de grains dans un fluide joue un rôle crucial sur la dynamique des écoulements multiphasiques. Lors de la collision d'une sphère immergée sur une paroi, le coefficient de restitution et le nombre de Stokes critique de rebond [1] présentent des variabilités non-négligeables en relation avec les aspérités des surfaces en présence [2]. Ceci a motivé des travaux analytiques et numériques prenant en compte la rugosité des surfaces [3], afin de mieux comprendre son influence sur le processus de collision. Nous présentons des résultats expérimentaux sur la dynamique de collision d'une sphère avec une surface texturée dans un fluide visqueux, et nous les interprétons à l'aide d'un modèle de contact non-linéaire prenant en compte la géométrie de la texture.

Une technique d'interférométrie laser à haute fréquence, dans laquelle la sphère joue le rôle de réflecteur, est utilisée pour la mesure des petits déplacements de la sphère avec une résolution spatiale d'environ  $0.2 \mu m$  et une résolution temporelle de  $0.01 ms$  [4] [5]. Les textures sont des réseaux de micro-piliers carrés dont nous avons fait varier la géométrie (hauteur  $e$  et fraction surfacique  $\phi$  des piliers). La sphère, de taille millimétrique, tombe par gravité vers la paroi texturée, dans une huile silicone de viscosité  $\eta = 1 Pa.s$ . Différents rayons et masses volumiques de sphères ont été testés. Dans ces expériences, nous nous situons juste au-dessus de la transition de rebond, et nous détectons et caractérisons les micro-rebonds de la sphère. La résolution spatio-temporelle du dispositif interférométrique nous permet de mesurer non seulement le temps de contact  $\tau$  de la sphère [6] mais aussi l'enfoncement maximal  $\delta_{max}$  dans les piliers pendant le processus de collision.

Pour modéliser la dynamique de collision entre une sphère et la surface texturée, nous avons considéré une sphère rigide impactant des piliers déformables. Le modèle non-linéaire développé ici est proche de celui de Hertz établi dans le cas de l'enfoncement d'une sphère dans un plan déformable [6]. Cependant, les lois de puissance reliant  $\delta_{max}$  et  $\tau$  avec la vitesse d'impact  $V_i$  de la sphère sont différentes du cas sphère-plan et dépendent notamment des paramètres géométriques du réseau de piliers ( $\phi$ ,  $e$ ). Bien que la dissipation visqueuse à travers le réseau de piliers ait été négligée dans un premier temps, un bon accord est observé entre le modèle et les résultats expérimentaux.

## Références

1. P. Gondret, M. Lance, and L. Petit, *Bouncing motion of spherical particles in fluids*, Physics of Fluids **14**, 643–652 (2002).
2. G. G. Joseph, R. Zenit, M. L. Hunt, and A. M. Rosenwinkel, *Particle wall collisions in a viscous fluid*, J. Fluid Mech. pp. 329–346 (2001).
3. E. Izard, T. Bonometti, and L. Lacaze, *Modelling the dynamics of a sphere approaching and bouncing on a wall in a viscous fluid*, J. Fluid Mech. pp. 422–446 (2014).
4. A. Mongruel, C. Lamriben, S. Yahiaoui, and F. Feuillebois, *The approach of a sphere to a wall at finite Reynolds number*, J. Fluid Mech. pp. 229–238 (2010).
5. T. Chastel and A. Mongruel, *Squeeze flow between a sphere and a textured wall*, Phys. Fluids. **28**, 023301 (2016).
6. E. Falcon, C. Laroche, S. Fauve and C. Coste *Behavior of one inelastic ball bouncing repeatedly off the ground*. Eur. Phys. J. B **3**, 45–57 (1998).

## Génération d'harmonique et conjugaison de phase d'une onde acoustique avec un plan de bulles.

Lombard<sup>1</sup>, Barrière<sup>2</sup> & Leroy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire MSC, Université Paris-Diderot, CNRS (UMR 7057), Paris, France

<sup>2</sup> Institut Langevin, Université Paris-Diderot, ESPCI ParisTech, CNRS (UMR 7587), Paris, France

[olivier.lombard@univ-paris-diderot.fr](mailto:olivier.lombard@univ-paris-diderot.fr)

Les bulles sont connues pour être de bons diffuseurs acoustiques avec un comportement non linéaire fort. Ces propriétés des bulles sont utilisées aujourd'hui en imagerie médicale [1] et certains phénomènes non linéaires comme la génération d'harmonique [2] ou la conjugaison de phase [3] ont été étudiés dans les liquides bulleux.

Nous avons développé un modèle de génération de seconde harmonique et réalisé des expériences sur un milieu bulleux particulier : un plan de bulles monodisperse piégé dans un fluide à seuil. Le piégeage des bulles dans un fluide à seuil permet d'effectuer des expérimentations sur des plans de bulles dont les grandeurs caractéristiques comme le rayon des bulles et la concentration en bulles sont parfaitement caractérisées. Le modèle et les expériences ont démontré l'existence d'une concentration optimale en bulles qui maximise l'amplitude de la seconde harmonique engendrée par le plan de bulles. L'existence de cette concentration optimale est le résultat du couplage entre la réponse non linéaire des bulles et la diffusion multiple dans le plan de bulles [4] et démontre donc l'observation de diffusion multiple en régime non linéaire.

Le caractère non linéaire du plan de bulles peut être utilisé pour observer de la conjugaison de phase : une onde sonde à la fréquence  $f$  et une onde pompe à la fréquence  $2f$  interagissent non linéairement sur le plan de bulles. Cette interaction non linéaire engendre une onde à la fréquence  $f$ . Le plan de bulles est donc un miroir à conjugaison de phase dont l'épaisseur est très petite devant la longueur d'onde de l'onde sonde. Nous avons étudié l'efficacité d'un tel miroir à conjugaison de phase en terme de directivité et d'amplitude de l'onde à la fréquence  $f$  engendrée.

### Références

1. J. Powers et al, *Medica Mundi* **44** (2000)
2. J. Wu et al, *J. Acoust. Soc. Am* **89** (6) (1991)
3. D. V. Vlasov et al, *Sov. Phys. Acoust.* **29** (1983)
4. O. Lombard et al, *EPL*, **112** (2015)

## Acoustic time reversal in granular media

M. Harazi<sup>1</sup>, Y. Yang<sup>1</sup>, M. Fink<sup>1</sup>, A. Tourin<sup>1</sup> & X. Jia<sup>1</sup>

ESPCI Paris, PSL Research University, CNRS, Institut Langevin, 1 rue Jussieu, 75005, Paris, France  
 xiaoping.jia@espci.fr

In a non-dissipative medium, the wave equation is symmetric in time. Therefore for every wave diverging from a pulsed source, there exists in theory a wave, the time-reversed wave, that precisely retraces all its original paths in a reverse order and converges in synchrony at the original source as if time were going backwards. In the early nineties, M. Fink proposed an original method for generating such a time-reversed wave from a surface named a Time Reversal Mirror (TRM) [1]. This method was first tested with ultrasound and then successfully extended to other types of waves such as microwaves, water waves, and even in optics. It has led to numerous applications including seismic source imaging [2]. Several studies have shown that time reversal wave focusing is very robust to disorder [3], including situations where perturbations occur between forward and back propagation steps [4,5]. Here we investigate time reversal (TR) of elastic waves propagating in fragile granular media consisting of glass beads under static compression. Pulsed elastic waves transmitted from a compression or a shear wave source are measured by a TRM, time reversed and back-propagated. The ability of the time-reversed wave to focus at the initial source is checked as a function of the source amplitude. We find that TR of the ballistic coherent wave is very robust to perturbations but provides poor resolution. By contrast, the short-wavelength scattered waves offer a finer TR focusing but are sensitive to rearrangements induced by the forward propagation wave itself : at large source amplitudes, time reversal focusing is broken. Experimental results are confronted with predictions from a numerical model in which the propagation medium is modelled by a percolating network of spherical balls interacting via linear springs.

### Références

1. M. FINK, Time Reversed Acoustics, *Physics Today*, **50** (3), 34–40 (1997).
2. C. LARMAT, J. MONTAGNER, M. FINK, Y. CAPDEVILLE, A. TOURIN, AND E. CLÉVÉDE, Time-reversal imaging of seismic sources and application to the great Sumatra earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19312 (2006).
3. A. DERODE, P. ROUX, AND M. FINK, Robust Acoustic Time Reversal with High-Order Multiple Scattering, *Phys. Rev. Lett.*, **75** (23), 4206–4209 (1995).
4. R.K. SNIEDER AND J.A. SCALES, Time-reversed imaging as a diagnostic of wave and particle chaos, *Phys. Rev. E*, **58** (5), 5668–5675 (1998).
5. A TOURIN, A. DERODE, AND M. FINK, Sensitivity to Perturbations of a Time-Reversed Acoustic Wave in a Multiple Scattering Medium, *Phys. Rev. Lett.*, **87** (27), 274301 (2001).

## La danse des Funam-Bulles

Alexis Duchesne<sup>1</sup>, Charles Dubois<sup>1</sup> & Hervé Caps<sup>1</sup>

GRASP, Physics Department B5, University of Liège, B-4000 Liège, Belgium.  
alexis.duchesne@ulg.ac.be

Lorsque l'on chauffe un fil métallique dans un bain liquide au delà du point d'ébullition de ce dernier, des bulles de vapeur vont naturellement nucléer à la surface du fil. La théorie traditionnelle en matière d'ébullition prédit que les bulles générées depuis un site de nucléation actif vont grossir puis quitter la surface chauffée en raison de la poussée d'Archimède [1]. Néanmoins Wang *et al.* [2] ainsi que Lu & Peng [3] ont rapporté un scénario différent : des bulles glissant le long d'un fil horizontal. Selon leurs observations ces bulles peuvent également changer de sens au cours du temps (pas de sens privilégié) et éventuellement interagir entre elles (fusionner).

Nous avons réalisé de nouvelles expériences sur ce phénomène de bulles glissantes en utilisant un fil horizontal de 5 cm de constantan plongé dans un bain d'huile silicone (1,5 cS dans la plupart des cas) maintenu à température constante. Divers diamètres de fils ont été utilisés (entre 0,1 et 1 mm). Le fil est chauffé par effet Joule (les intensités injectées peuvent atteindre 60 A et la puissance dissipée 200 W).

Comme illustrés sur la vidéo [4], différents régimes peuvent être observés. A diamètre de fil et température de bain fixés, en augmentant progressivement la température du fil, on voit que :

- (i) Juste au-dessus de la température d'ébullition des bulles apparaissent. On peut alors constater que :
  - malgré la poussée d'Archimède les bulles restent "collées" à la surface (en dépit de l'utilisation d'huile silicone qui assure un mouillage total entre la fibre et le liquide environnant) ;
  - les bulles se déplacent le long du fil horizontal (plus de 100 mm/s pour des bulles millimétriques).
 On ne constate pas de sens préférentiel de déplacement ;
  - les bulles interagissent entre elles et peuvent rebondir l'une sur l'autre ou fusionner.

- (ii) En chauffant davantage, des clusters de bulles se forment le long du fil. Ces clusters sont fixes et, entre eux, des bulles isolées rebondissent. En augmentant encore la température du fil, il est possible de créer des clusters immobiles de la longueur du fil. Au delà de cette température critique, on observe à nouveau de petits clusters.

- (iii) La température augmentant, les clusters disparaissent et un régime similaire à (i) s'établit, bien que l'encombrement sur le fil soit beaucoup plus important.

- (iv) Enfin, pour les températures les plus élevées, on observe des phénomènes de caléfaction (le fil est entièrement couvert d'un film de vapeur) comme explorés et documentés par Lienhard & Wong [5].

Nous caractérisons ces différents régimes et nous proposons une interprétation du phénomène de mouvement de bulle en terme d'effet Marangoni. Les ordres de grandeurs obtenus sont en bon accord avec les expériences.

## Références

1. E. HAHNE & U. GRIGULL, *Heat transfer in boiling* Hemisphere Publ. Corp., Washington, USA (1977).
2. H. WANG, X. F. PENG, B. X. WANG & D. J. LEE, Bubble sweeping and jet flows during nucleate boiling of subcooled liquids, *International journal of heat and mass transfer*, **46**(5), 863–869 (2003).
3. J. F. LU, & X. F. PENG, Bubble slippage on thin wires during subcooled boiling, *International journal of heat and mass transfer*, **49**(13), 2337–2346 (2006).
4. A. DUCHESNE, C. DUBOIS & H. CAPS, The tightrope dancer bubbles, *Gallery of Fluid Motion, APS/DFD* (2015). <http://gfm.aps.org/meetings/dfd-2015/55e5c6c169702d060d760000>
5. J. H. LIENHARD & P. T. Y. WONG, The dominant unstable wavelength and minimum heat flux during film boiling on a horizontal cylinder, *Journal of Heat Transfer*, **86**(2), 220–225 (1964).

## Chaos quantique et micro-lasers

M. Lebental<sup>1</sup>, J. Zyss<sup>1</sup>, E. Bogomolny<sup>2</sup>, C. Ulysse<sup>3</sup>, D. Decanini<sup>3</sup> & S. Bittner<sup>4</sup>

<sup>1</sup> LPQM, ENS Cachan, CentraleSupélec, CNRS, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France.

<sup>2</sup> LPTMS, Université Paris Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France.

<sup>3</sup> LPN, CNRS, Université Paris-Saclay, 91460 Marcoussis, France.

<sup>4</sup> Applied Physics, Yale University, New Haven, United States.

`melanie.lebental@ens-cachan.fr`

Peu de systèmes ondulatoires sont intégrables. Ce constat est apparu évident dès les premières années qui ont suivi l'émergence de la physique quantique [1]. Il faut donc trouver des moyens de caractériser et prédire les propriétés ondulatoires de systèmes dont la limite classique est chaotique (ou mixte, ou pseudo-intégrable). C'est l'objet du domaine de recherche appelé " chaos quantique ", dont les outils développés depuis un siècle s'appliquent tout aussi bien en électromagnétisme, en acoustique et même récemment en gravité quantique [2].

Dans ce contexte, nous étudions des micro-lasers en polymère, dont la fabrication est aisée, peu onéreuse et permet d'atteindre des résolutions nanométriques [3]. La forme de la cavité résonante peut être choisie à volonté, afin de caractériser des systèmes intégrables (carré, disque), pseudo-intégrables (pentagone), mixtes (champignon) ou chaotiques (stade, cardioïde).

Durant la présentation nous donnerons un aperçu des études qui sont menées avec ces objets doublement non-linéaires : non-linéarité de l'effet laser et non-linéarité liée à la forme de la cavité. En particulier, nous illustrerons l'importance des orbites périodiques, ces trajectoires classiques qui structurent les propriétés ondulatoires [3,4].

### Références

1. A. D. Stone, *Einstein's unknown insight and the problem of quantizing chaotic motion*, Physics Today vol. 58, 8, p. 37-43 (August, 2005). Contient la référence aux traductions des articles originaux d'Einstein.
2. E. Bianchi and H. M. Haggard, *Discreteness of the Volume of Space from Bohr-Sommerfeld Quantization*, Phys. Rev. Lett. Vol. 107, 011301 (2011).
3. C. Lafargue, M. Lebental, A. Grigis, C. Ulysse, I. Gozhyk, N. Djellali, J. Zyss, and S. Bittner, *Localized lasing modes of triangular organic microlasers*, Physical Review E, vol. 90, 052922 (2014)
4. E. Bogomolny, N. Djellali, R. Dubertrand, I. Gozhyk, M. Lebental, C. Schmit, C. Ulysse, J. Zyss, *Trace formula for dielectric cavities II : Regular, pseudo-integrable, and chaotic examples*, Physical Review E, vol. 83, 036208 (2011).



## Dynamique d'imbibition d'une mousse aqueuse spongieuse par de l'huile et de l'eau

Élise LORENCEAU

CNRS/Université Marne-la-Vallée/EPFL  
elise.lorenceau@ifsttar.fr

Une mousse aqueuse est constituée de bulles de gaz séparées les unes des autres par un réseau liquide savonneux. Dans une mousse sèche (fraction volumique de liquide inférieure à 1

Nous discuterons la dynamique de cette imbibition dans différentes géométries. Puis, nous aborderons certains aspects associés au vieillissement de ces mousses chargées en huile, notamment lors d'un réarrangement topologique entre bulles ou de la coalescence d'un film de savon.

## Nonlinear elasticity and dynamic triggering of earthquake slip

Paul JOHNSON

Los Alamos National Laboratory, USA  
paj@lanl.gov

Do to communitation over geologic time, fault blocks shearing past one another in the earth develop granular material in their core. We hypothesize that the granular physics of this material, known as 'fault gouge' influences much of the physics of slip. In this presentation I will describe observations and simulation of granular materials under laboratory shear conditions, including acoustic emission, shear failure and dilation. I will discuss the primary indicators leading to failure observed in the gouge and relate these to earthquake processes. The dynamic wave experiments support widespread observations in the earth of 'dynamic earthquake triggering', a process whereby seismic waves from one earthquake trigger earthquakes nearby and from the triggering source.

## Instabilité de stick-slip lors du pelage d'un ruban adhésif

V. De Zotti<sup>1</sup>, L. Vanel<sup>2</sup>, P.-P. Cortet<sup>3</sup> & S. Santucci<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ Lyon, Ens de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France

<sup>2</sup> Univ Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Institut Lumière Matière, F-69622 Villeurbanne, France

<sup>3</sup> Université Paris Sud, CNRS, Laboratoire FAST, F-91405 Orsay, France

vincent.de\_zotti@ens-lyon.fr

Lorsqu'un ruban adhésif est détaché par pelage d'un substrat, la séparation peut alors se produire selon différents mécanismes : par rupture cohésive à l'intérieur de l'adhésif lui-même, par rupture adhésive à l'interface entre l'adhésif et le substrat, ou même parfois entre l'adhésif et le ruban support. La sélection du mécanisme de rupture dépend fortement de la vitesse de pelage. Dans une certaine gamme de vitesses, une dynamique de pelage instable apparaît, le front de pelage se propageant alors de manière saccadée en alternant une phase rapide et une phase lente.

La maîtrise de cette instabilité de stick-slip est importante dans un contexte industriel, car elle conduit à l'endommagement du revêtement adhésif et peut produire des niveaux de bruit particulièrement forts. Récemment, l'observation directe du front de détachement lors d'expériences de pelage à vitesse imposée a permis de mettre en évidence le rôle primordial de l'angle de pelage [1], de l'inertie du ruban [2] ainsi que le caractère multi-échelle de cette instabilité [3]. En effet, la phase rapide ("slip") est elle-même constituée d'avancées saccadées du front à des échelles temporelles et spatiales beaucoup plus courtes.

Nous poursuivons une telle étude expérimentale. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la transition entre les dynamiques de pelage régulières et saccadées. Nous avons observé que le front de pelage avance avec des oscillations quasi-sinusoidales en vitesse à proximité de cette transition. Nous avons également étudié comment la superposition de plusieurs couches de ruban adhésif au niveau du front de détachement affecte la dynamique de stick-slip. Enfin, nous nous sommes intéressés à l'évolution des différentes dynamiques de pelage en modifiant le niveau d'adhésion avec le substrat. Nous montrons qu'il est alors possible de provoquer des phases d'avancées saccadées en alternant différents niveaux d'adhésion.

### Références

1. M.-J. DALBE, S. SANTUCCI, L. VANEL, P.-P. CORTET, Peeling-angle dependence of the stick-slip instability during adhesive tape peeling, *Soft Matter*, **10**, 9637–9643 (2014).
2. M.-J. DALBE, R. VILLEY, M. CICCOTTI, L. VANEL, S. SANTUCCI, P.-P. CORTET, Inertial and stick-slip regimes of the instability of adhesive tape peeling, *Soft Matter*, soumis en 2016.
3. M.-J. DALBE, P.-P. CORTET, M. CICCOTTI, L. VANEL, S. SANTUCCI, Multiscale Stick-Slip Dynamics of Adhesive Tape Peeling, *Physical Review Letters*, **115**, 128301 (2015).

# Intermittence, synchronisation et ondes de déformation plastique lors de l'effet Portevin-Le Chatelier

M.A. Lebyodkin<sup>1</sup> & T.A. Lebedkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3), CNRS UMR 7239, Université de Lorraine, Ile du Saulcy, 57045 Metz, France

<sup>2</sup> Laboratory of Excellence on Design of Alloy Metals for low-mAss Structures (DAMAS), Université de Lorraine, Ile du Saulcy, 57045 Metz, France

mikhail.lebedkin@univ-lorraine.fr

L'écoulement plastique des solides est dû à la multiplication et au déplacement des défauts cristallins, les dislocations. Selon la vision conventionnelle de la plasticité, les fluctuations locales aléatoires de la distribution et de la mobilité des dislocations se compensent statistiquement pour produire un « écoulement régulier », ce qui réduit la transition « microscopique - macroscopique » en une simple opération de moyenne sur les interactions entre obstacles isolés et dislocations. Cependant, l'auto-organisation des défauts met en jeu des effets collectifs dus aux interactions entre dislocations, par exemple, la formation de structures spatiales ou l'intermittence de la déformation plastique, invalidant les opérations de moyenne. Les études menées lors des deux dernières décennies ont prouvé que l'auto-organisation des défauts est une propriété intrinsèque de la déformation plastique, même si dans la majorité des cas elle ne se manifeste pas à l'échelle macroscopique des courbes de déformation [3]. Ces dernières restent lisses le plus souvent, et l'observation des comportements collectifs nécessite des techniques à haute résolution. Notamment, des distributions en loi puissance ont été observées pour l'émission acoustique pendant la déformation de divers matériaux purs, menant à une conclusion sur l'intermittence inhérente aux processus plastiques. En même temps, les différentes méthodes permettant de mesurer le champ de déformations locales révèlent d'une façon persistante des modes de déformation ondulatoires.

Dans certain cas, notamment lors de l'instabilité plastique connue sous le nom de l'effet Portevin-Le Chatelier (PLC), des processus collectifs d'une puissance exceptionnelle se manifestent à une échelle macroscopique, conduisant à l'apparition de sauts sur les courbes de déformation et de bandes de déformation millimétriques. L'effet PLC fournit un exemple marquant des systèmes dynamiques non linéaires, caractérisés par des transitions entre divers régimes dynamiques, tels que le chaos déterministe, la criticalité auto-organisée ou la synchronisation [2,?].

L'exposé décrira brièvement plusieurs jalons sur l'étude de l'auto-organisation des défauts lors de la déformation plastique. Il se concentrera ensuite sur une présentation plus détaillée de l'étude des phénomènes collectifs associés à l'effet PLC, effet considéré ici en tant qu'un objet modèle. Les résultats obtenus mènent à une hypothèse d'existence de deux groupes de phénomènes associés à des échelles distinctes, qui doivent être distingués lors de l'étude du comportement collectif des défauts cristallins. En premier lieu, l'extensométrie locale et l'émission acoustique révèlent une concurrence entre des comportements ondulatoires et intermittents à une échelle mésoscopique, qui ne se manifeste pas au niveau des courbes de déformation. Une telle hétérogénéité est observée dans tous les matériaux étudiés. Bien que les mécanismes sous-jacents ne soient pas encore tout à fait compris, on peut suggérer que ces comportements sont de nature purement dynamique. D'un autre côté, l'instabilité macroscopique, telle que l'effet PLC, est contrôlée par des mécanismes spécifiques du matériau et manifeste différents « patterns ».

## Références

1. J. WEISS *et al.*, *Phys. Rev. B*, **76**, 224110 (2007).
2. M.S. BHARATHI *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 165508 (2001).
3. M.A. LEBYODKIN *et al.*, *Acta Mater.*, **60**, 3729–3740 (2012).

## Enroulement élasto-capillaire pour la création de fibres ultra-extensibles

Paul Grandgeorge<sup>1</sup>, Arnaud Antkowiak<sup>1</sup>, Sebastien Neukirch<sup>1</sup>

Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert  
paul.grandgeorge@upmc.fr

Aux petites échelles, les forces capillaires deviennent dominantes par rapport aux forces élastiques et de nombreux exemples de structures élastiques fortement déformées par la tension de surface ont été mis à jour [4,3,6,2,1]. Nous présenterons le cas d'une goutte posée sur une fibre droite. Si la fibre élastique est assez fine et que le liquide est suffisamment mouillant, l'attraction capillaire provoquera le flambage et l'enroulement de la fibre dans la goutte. Ce phénomène a été observé initialement sur des fils de toile d'araignée [5] et nous le reproduisons aujourd'hui sur des fibres synthétiques. Une expérience typique démarre avec une goutte liquide (de diamètre  $\sim 100\ \mu\text{m}$ ) déposée sur une fibre (de rayon  $\sim 10\ \mu\text{m}$ ) tendue. Puis, lorsque les extrémités de la fibre sont graduellement rapprochées, l'enroulement capillaire démarre et la goutte absorbe l'excédent de longueur de fibre. Grâce à l'action de la tension de surface, la fibre à l'extérieur de la goutte reste rectiligne : le système ne présente pas d'affaissement type "chaînette" que l'on rencontrerait en l'absence de goutte. Cette adaptation à la longueur imposée n'est pas sans rappeler l'auto-tension dans les films liquides. La goutte joue ainsi le rôle d'enrouleur de fil et nous permet de créer une nouvelle gamme de fibres composites liquide-solide ultra-extensibles.

### Références

1. HURE, J AND AUDOLY, B, Capillary buckling of a thin film adhering to a sphere, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **61**, 450–471 (2013).
2. JUNG, SUNGHWAN AND CLANET, CHRISTOPHE AND BUSH, JOHN W. M., Capillary instability on an elastic helix, *Soft Matter*, **18**, 3225–3228 (2014).
3. B. ROMAN AND J. BICO, Elasto-capillarity : deforming an elastic structure with a liquid droplet, *Journal of Physics : Condensed Matter*, **49**, 492101 (2010).
4. FARGETTE, AURÉLIE AND NEUKIRCH, SÉBASTIEN AND ANTKOWIAK, ARNAUD, Elastocapillary Snapping : Capillarity Induces Snap-Through Instabilities in Small Elastic Beams, *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 137802 (2014).
5. FRITZ VOLLRATH AND DONALD T. EDMONDS, Modulation of the mechanical properties of spider silk by coating with water, *Nature*, **340**, 305–307 (1989).
6. DUPRAT, C. AND PROTIERE, S. AND BEEBE, A. Y. AND STONE, H. A., Wetting of flexible fibre arrays, *Nature*, **482**, 510–513 (2012).

## Un nouveau mécanisme d'érosion d'une interface stratifiée

J. Hérault<sup>1,2</sup> & M. Le Bars<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IRSN, BP 3, 13115 St Paul lez Durance, France

<sup>2</sup> IRPHE UMR 7342, 49 rue F. Joliot-Curie, 13013 Marseille, France

herault@iphre.univ-mrs.fr

Le mélange turbulence à l'interface de deux fluides de densité différente est un processus physique complexe qui s'observe communément dans les phénomènes naturels (surface des océans, panache volcanique..) et les applications industrielles (sécurité nucléaire). Dans le cadre d'un accident nucléaire, l'hydrogène relâché par l'oxydation des canalisations doit être impérativement mélangé à l'air ambiant pour éviter les risques d'explosion. Une sous-estimation des procédures de mélange peut mener à des catastrophes comme ce fut le cas lors de l'explosion du plafond de l'enceinte d'un réacteur de Fukushima [1].

Il existe des modèles de mélange turbulent à l'interface mais ils supposent généralement la présence d'intenses structures tourbillonnaires ("engulfment model" [2]). Or on sait que l'érosion s'effectue même si ces tourbillons n'érodent pas directement l'interface [2,3,4]. Nous avons donc mené une étude expérimentale des processus d'érosion dans le cas où le nombre de Froude, comparant les forces inertiels aux forces gravitaires, est inférieur à un.

Nous avons mesuré les champs de densité et de vitesses dans une configuration où un jet turbulent impacte une interface. Nous montrons que l'érosion est principalement induite par le déferlement d'ondes de gravité à l'interface. Ce déferlement n'est possible que s'il existe un transfert d'énergie de l'écoulement moyen vers les ondes. Or l'interface est stable vis à vis des instabilités de cisaillement tels que Kelvin-Helmholtz ou Holmboe. Nous montrons donc pour la première fois des éléments expérimentaux indiquant la présence d'une couche critique où la vitesse de l'onde de surface égale celle de l'écoulement moyen [5]. Cette résonance entre écoulement moyen et l'onde permet la déstabilisation de l'onde qui déferle et induit du mélange.

Ce nouveau mécanisme permet d'expliquer l'érosion d'une interface par le déferlement d'ondes de surface, qui sont initialement amplifiées par une instabilité de couche critique [3].

### Références

1. Studer, E. and Brinster, J. and Tkatschenko, I. and Mignot, G. and Paladino, D. and Andreani, M. : Interaction of a light gas stratified layer with an air jet coming from below : Large scale experiments and scaling issues. Nuclear Engineering and Design, vol. 253, pp. 406-412, 2012.
2. Cotel, A. J. and Gjestvang, J. A. and Ramkhelawan, N. N. and Breidenthal, R. E. : Laboratory experiments of a jet impinging on a stratified interface. Exp. Fluids, 23(2),155-160, 1997.
3. Hérault, J. and Facchini, G. and LeBars, M. :Erosion of a sharp density interface by a turbulent jet at low Froude number. Submitted to J. Fluid Mech.
4. Shrinivas, A. B. and Hunt, G. R. : Unconfined turbulent entrainment across density interfaces. Journal of Fluid Mechanics 757, 573-598.
5. Miles, J. W. : On the generation of surface waves by turbulent shear flows. J. Fluid Mech 7(03) :469-478, 1960.

## New experiment in transition to turbulence in plane couette-poiseuille flow

Lukasz Klotz<sup>1</sup>, Idalia Frontczak<sup>1,3</sup>, Grégoire Lemoult<sup>2</sup>, Matthew Chantry<sup>1</sup> & José Eduardo Wesfreid<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), UMR CNRS 7636 ; PSL - ESPCI ; Sorbonne Université, Univ. Paris 06 ; Sorbonne Paris Cité - UDD, Univ. Paris 07 ; Paris, France

<sup>2</sup> Institute of Science and Technology ; Klosterneuburg, Austria

<sup>3</sup> Institute of Aeronautics and Applied Mechanics, Warsaw University of Technology ; Warsaw, Poland

lukasz.klotz@espci.fr

We present a new experimental set-up which enables us to create two dimensional shear flow with zero mean advection velocity. Our concept ([1]) is a generalization of classical plane Couette experimental set-up (see [2], [3]), where the base flow is generated by imposing the velocity of opposite sign at each wall of the test section.

We investigate a plane Couette-Poiseuille configuration, completing the first experimental results for this flow which had only been studied theoretically to-date ([4]). This configuration consists of a single loop of plastic belt, which imposes the speed at one wall (the second one remains stationary) and generates the pressure gradient in the streamwise direction.

The resulting plane Couette-Poiseuille flow can be considered as two subregions. The first one is parabolic (Poiseuille like) and occupies approximately two-thirds of the gap. In the second region the velocity profile can be approximated by a straight line, like in plane Couette flow. In addition the shear in the Couette region is much higher than that of the Poiseuille region.

Using flow visualizations we characterize subcritical transition to turbulence. For low Reynolds numbers the flow is globally laminar in the test section. When we increase the Reynolds numbers we observe a nearly stationary v-shaped turbulent spot which is very slowly advected through the test section. The coexistence of laminar and turbulent phases is observed. Finally for high enough Reynolds numbers the turbulent region occupies most of the test section.

To our knowledge this is the first time when turbulent spots in plane Couette-Poiseuille flow are observed and when the advection velocity of turbulent structures in a flow with non-zero pressure gradient is so drastically reduced.

Building on this, we also introduce a finite-size perturbation to investigate a forced transition to turbulence. We observe two different scales which are associated with the plane Couette and Poiseuille regions respectively. We also determine the evolution of streamwise and spanwise dimensions of turbulent spot as a function of Reynolds number.

### Références

1. Lemoult, G. Étude expérimentale de la transition vers la turbulence dans l'écoulement de Poiseuille plan. (PhD thesis, in french, 2013).
2. Daviaud, F., Hegseth, J., Bergé, P. Subcritical transition to turbulence in plane Couette flow. *Phys. Rev. Lett.* 69, 2511–2514 (1992).
3. Tillmark, N. and Alfredsson, P. H. Experiments on transition in plane Couette flow. *Journal of Fluid Mechanics* 235, 89–102 (1992).
4. Bergström, L. B. Nonmodal growth of three-dimensional disturbances on plane Couette–Poiseuille flows. *Physics of Fluids* 17, 014105 (2005).

# Croissance de poches turbulentes dans l'écoulement de Couette plan

Couliou<sup>1</sup> & Monchaux<sup>2</sup>

IMSIA, ENSTA-ParisTech/CNRS/CEA/EDF, Université Paris Saclay, 828 Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex, France

marie.couliou@mech.kth.se

L'écoulement de Couette plan, l'écoulement cisailé entre deux parois, est emblématique des transitions sous critique vers la turbulence dans les écoulements cisailés. Dans ce contexte, un des principaux enjeux est de comprendre comment l'état turbulent envahit l'état laminaire [1,2,3]. Les mécanismes alors mis à jour pourraient également permettre d'expliquer comment ces deux états peuvent cohabiter en motifs de bandes laminaires-turbulentes [4,5], autre enjeu majeur dans ce domaine.

Nous nous focalisons donc tout d'abord sur la croissance d'une poche turbulente selon la direction transversale. Des expériences et des simulations numériques directes permettent d'étudier la vitesse des fronts des poches et des tourbillons observés aux bords de ces poches. Ces tourbillons peuvent être interprétés comme la trace d'une croissance locale qui conduit à l'apparition de nouvelles stries de vitesse. A partir des simulations numériques directes, nous suivons la nucléation des stries de vitesse composant les poches turbulentes pendant la croissance de ces dernières. L'ensemble des résultats obtenus montre que deux mécanismes sont impliqués dans la croissance de poches turbulentes : un mécanisme de croissance local ayant lieu aux bords transversaux de la poche mais aussi, dans une proportion comparable, un mécanisme de croissance global induit par une advection due aux écoulements à grande échelle. Cette étude est détaillée dans la publication *Physical Review E* [6]. Nous établissons un lien fort entre la dynamique des fronts des poches, celle des tourbillons aux bords de la poche et celle des écoulements à grande échelle. Nous étudions enfin la croissance de poches turbulentes selon la direction longitudinale via une analyse des vitesses des fronts en fonction du nombre de Reynolds et du temps. La forme de la poche turbulente peut alors être appréhendée comme le résultat de l'effet combiné des mécanismes à l'oeuvre selon les deux directions d'expansion.

## Références

1. A. Lundbladh and A. V. Johansson. Direct simulation of turbulent spots in plane Couette flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 229 :499, 1991.
2. N. Tillmark and P. H. Alfredsson. Experiments on transition in plane Couette flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 235 :89, 1992.
3. O. Dauchot and F. Daviaud. Finite amplitude perturbation and spots growth mechanism in plane Couette flow. *Physics of Fluids*, 7 :335, 1995.
4. A. Prigent, G. Grégoire, H. Chaté, O Dauchot, and W. Van Saarloos. Large-Scale Finite-Wavelength Modulation within Turbulent Shear Flows. *Physical Review Letters*, 89 :014501, 2002.
5. D. Barkley and L. S. Tuckerman. Computational study of turbulent laminar patterns in Couette flow. *Physical Review Letters*, 94 :014502, 2005.
6. M. Couliou and R. Monchaux. Spreading of turbulence in plane Couette flow. *Physical Review E*, 93 :013108, 2016.



## Critical Transitions in Turbulence : “2D, or not 2D...”

BENAVIDES & ALEXAKIS

Laboratoire de Physique Statistique, École Normale Supérieure, CNRS UMR 8550,  
24 rue Lhomond, 75005 Paris, France  
santiagob@lps.ens.fr

The properties of two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) hydrodynamical turbulence are known to be quite different. In 3D flows the energy “cascades” to smaller and smaller scales, creating smaller and smaller vortices, eventually dissipating (‘forward cascade’). On the other hand, in 2D flows, the energy goes towards larger scales and must be dissipated at these scales (‘inverse cascade’)[2]. Evidently, these two different properties lead to very different physical situations. A natural question is, then, what happens in the thin-layer limit? That is, when the flow is very thin so as to approach 2D, but not *exactly* 2D. This situation is very relevant to many physical situations such as atmospheric flow[4,5], protoplanetary disks, the solar tachocline, and possibly other situations. It has been seen that thin layer flows can show a *bidirectional cascade*, meaning that both inverse and forward cascades are present [1,5]. As one varies the thickness of this layer, also denoted as the height, the rate of each respective cascade varies. We want to study this relationship. Moreover, we are interested in looking to see if there are *critical heights* at which the direct (inverse) cascade is exactly zero for some small (large), but finite, thickness,  $H_{2D}$  ( $H_{3D}$ ), and 2D body-forcing. Celani *et al.* have approached some of these questions numerically with a full 3D Navier Stokes direct numerical simulation. They attempted to demonstrate a critical height, but this was not successful since the transition appeared smooth, and they labeled the situation as unresolved [1]. In hopes of answering these questions, we have run high-resolution numerical simulations of a reduced 3D model, complemented with some analytical work (following a process similar to that done in Gallet and Doering [3]). The reduced 3D model, which is essentially a truncation in the  $z$ -dependence and therefore two-dimensional, gave us much faster computation times and allowed us to run the high-resolution simulations to a steady state. Apart from being able to do statistics on the results, there are a lot of useful tools in established turbulence theory and phenomenology for steady state turbulence [2]. *With these simulations we confirmed the existence of both  $H_{2D}$  and  $H_{3D}$ .* Furthermore, the analytical results gave us a conservative and exact bound on  $H_{2D}$  as well as a more restrictive, but tentative, bound based on linear stability. Due to the nature of the different critical points, this analytical technique was not applicable for  $H_{3D}$  and a theoretical bound for this point is still unknown.

### Références

1. Celani, A., S. Musacchio, and D. Vincenzi, “Turbulence in More than Two and Less than Three Dimensions.” *Phys. Rev. Lett.*, **104** 184506 (2010).
2. Frisch, U. *Turbulence : The Legacy of A. N. Kolmogorov*. Cambridge University Press, 1995.
3. Gallet, B. and C. R. Doering, “Exact two-dimensionalization of low-magnetic-Reynolds-number flows subject to a strong magnetic field.” *J. Fluid Mech.*, **773** (2015) : 154 - 177.
4. Pedlosky, J. *Geophysical Fluid Dynamics*. 2nd Ed. Springer, 1987.
5. Xia, H., D. Byrne, G. Falkovich, and M. Shats, “Upscale energy transfer in thick turbulent fluid layers,” *Nature Physics*, **7** (2011) : 321-324.

# Numerical investigation into the choice of gait parameters in 2D anguilliform swimmers

David Gross<sup>1,2</sup>, Médéric Argentina<sup>1</sup> & Yann Roux<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Nice Sophia-Antipolis, Institut non linéaire de Nice, CNRS UMR 7335, 1361 route des lucioles, 06560 Valbonne, France

<sup>2</sup> K-Epsilon SARL, 300 route des crêtes , 06902 Valbonne, France

Fish and swimmers in general exhibit a wide variation in amplitudes and frequency, but have been found to follow a general scaling law defined by Swimming number which captures the relation between these two parameters and the swimming speed and swimmer length (Gazzola1). While this scaling law defines the product of these two parameters, the exact selection of each individually is not clearly defined. The swimmer must choose a gait which maximizes propulsive efficiency, while permitting it to obtain a reasonable speed within the limits of its muscular capacity. This research looks at the influence of the imposed frequency, amplitude and wavelength of the traveling wave used to propel a 2D anguilliform swimmer on its propulsive efficiency. Comparison of the obtained Swimming number relations are compared with those presented in (Gazzola1). The rigid body motions of the swimmer are resolved in forward and transverse motions utilizing ARA, a finite element structural solver as a rigid body solver and coupled to an unsteady 2D thin vortex panel code with a wake particle method. The coupling between these two is accomplished using a quasi-monolithic FSI coupling (Durand2). Results of this coupling were compared to those of a coupling of ARA with a 2D URANS fluid solver. It was found that the viscous drag acting on the body strongly determines the behavior of the scaling law and must be included in some form to successfully reproduce the correct behavior. To this end, a drag force equivalent to that of a Blasius flat plate was included to account for this force, leading to the correct Reynolds number and Strouhal number behavior.

## Références

1. M. Gazzola , M. Argentina, & L. Mahadevan, Scaling macroscopic aquatic locomotion PNAS, vol. 112 , 2015.
2. Durand, M., Leroyer A., Lothode, C., Hauville, F., Visonneau, M., Floch, R., Guillaume, L., 2014. FSI investigation on stability of downwind sails with an automatic dynamic trimming. Ocean Engineering. 90 :129-139.

## Phase locking and pattern formation in tandem fish swimming

I. Ashraf<sup>1\*</sup>, R. Godoy-Diana<sup>1</sup>, J. Halloy<sup>2</sup> & B. Thiria<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), UMR CNRS 7636, PSL - ESPCI Paris, Sorbonne Université - UPMC - Univ. Paris 06, Sorbonne Paris Cité - UDD - Univ. Paris 07, 10 rue Vauquelin 75005 Paris, France

<sup>2</sup> Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain (LIED), UMR CNRS 8236, Sorbonne Paris Cité - UDD - Univ. Paris 07, Bât. Condorcet, 10 rue Alice Domon & Léonie Duquet, 75013 Paris, France

\* [intesaaf.ashraf@espci.fr](mailto:intesaaf.ashraf@espci.fr)

**Abstract.** Red nose tetra fish *Hemigrammus bleheri* swimming against a steady stream in channel flow are shown to synchronise when swimming in pairs. The synchronization is here characterized by either in-phase or out of phase swimming modes. The experiments were performed with seven different pairs of fishes. We analyze precisely the synchronisation as a function of the swimming parameters using a statistical approach based on the complete time-dependent kinematics of each fish. After showing that the synchronization between two fishes strongly depends upon swimming velocity, we give some elements about the understanding of collective swimming.

## Coques nageuses

Adel Djellouli<sup>1</sup>, Catherine Quilliet<sup>1</sup>, Gwennou Coupier<sup>1</sup> & Philippe Marmottant<sup>1</sup>

LIPhy, 140 avenue de la Physique, Domaine Universitaire, 38400 Saint-Martin d'Hères  
Catherine.Quilliet@univ-grenoble.alpes.fr

La connaissance des modes de déformation d'une coque mince soumise à un cycle dégonflement/regonflement a permis de proposer une nouvelle famille de micronageurs, robustes et réalisables en grand nombre : des coquilles colloïdales sphériques remplies d'air, dispersées dans un solvant et soumises à des ondes de pression de type sonore ou ultra-sonore. La contraction d'une coque sphérique se produit via une instabilité de flambage vers une forme axisymétrique (apparition d'une dépression), et son redéploiement s'effectue via une succession de formes non explorées à l'aller : on s'attend donc à ce que des cycles de pression génèrent un déplacement net, même si l'inertie est négligeable. Afin d'étudier plus commodément la nage d'un tel objet, nous avons réalisé une maquette à grande échelle où les nombres adimensionnés d'intérêt sont conservés. Dans ce dispositif, la coque déformable est liée à un ressort, ce qui permet de remonter aux forces en présence par analyse d'image. Les premiers résultats permettent de quantifier le type d'écoulement à l'oeuvre pendant la déformation de la coque, l'ordre de grandeur de la poussée obtenue, et les conséquences de la dissipation au sein du matériau même, lors des déformations rapides.

## Références

## Oscillations Prédateur-Proie dans les Plasmas Magnétisés

P. Morel<sup>1</sup>, S. Kobayashi<sup>1</sup>, P. Donnel<sup>1,2</sup>, C. Honoré<sup>1</sup>, V. Pisarev<sup>1</sup>, P. Hennequin<sup>1</sup> & Ö.D. Gürcan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique des Plasmas, Université Paris Sud, CNRS UMR7648, École Polytechnique, UPMC, Observatoire de Paris, route de Saclay 91128 Palaiseau Cedex

<sup>2</sup> École Normale Supérieure de Paris, 45 rue d'Ulm, 75005 Paris

`pierre.morel@lpp.polytechnique.fr`

Les systèmes Prédateur-Proie constituent un modèle fondamental sur lequel repose l'étude de systèmes dynamiques aux applications scientifiques variées [1,2,3,4]. Ce type de modèle a en particulier été largement appliqué à l'étude de la turbulence dans les plasmas [5,6]. Dans les plasmas magnétisés, la présence d'oscillations prédateur-proie trouve en effet sa source dans la compétition entre des structures à grand échelle et la turbulence à petite échelle, typiquement de l'ordre de quelques rayons de Larmor, habituellement dénommée *micro-turbulence*. Du fait de la nature complexe du plasma, les sources de micro-instabilité y sont nombreuses, et leur étude confine parfois à la zoologie. Ce travail s'intéresse plutôt à l'interaction entre les structures turbulentes à différentes échelles, et sur son origine profondément non-linéaire. Les structures à grande échelle ne peuvent en effet se développer que non-linéairement dans les plasmas magnétisés, et peuvent donc être vues comme des prédateurs pour la micro-turbulence considérée alors comme leur proie. L'interprétation de ces interactions en terme d'évolutions couplées de populations se traduit en particulier par l'observation d'oscillations prédateur-proie caractéristiques dans des stellarators [7] et des tokamaks [8].

Nous présenterons ici comment ce type de signature en temps peut être retrouvé dans nombre de plasmas magnétisés. En particulier, nous montrerons comment un modèle simple de Lotka-Volterra [1,2] permet de reproduire à la fois des données expérimentales de Tokamak, ainsi que des données de simulations gyrocinétiques [9]. Nous montrerons comment un modèle à deux populations, spatialement inhomogènes, couplées à une représentation de modèles en couches avec interactions entre échelles disparates, pour la turbulence [10,11], permet de décrire de manière satisfaisante la transition entre modes de confinement normal et avancé observé expérimentalement. Enfin, nous présenterons de récents résultats obtenus sur la machine ToriX, mettant clairement en évidence des oscillations prédateur-proie entre les réponses haute et basse fréquence du plasma.

### Références

1. A. J. Lotka, *Elements of Physical Biology*, Williams & Wilkins Company, 460 (1925).
2. V. Volterra, *Nature* **118**, 558-60 (1926).
3. M. L. Rosenzweig and R. H. MacArthur, *The American Naturalist* **97** (895), 209-223 (1963).
4. Goel N S, Maitra S C, and Montroll E W, *Rev. Mod. Phys.* **43**, 231(1971).
5. Malkov M A, Diamond P H, and Rosenbluth M N, *Phys. Plasmas* **8**, 5073 (2001).
6. Kim E J and Diamond P H, *Phys. Plasmas* **10**, 1698 (2003).
7. Estrada T, Happel T, Hidalgo C, Ascasibar E, and Blanco E, *Europhysics Letters* **92**, 35001 (2010).
8. Conway G D, Angioni C, Ryter F, Sauter P, and Vicente J (ASDEX Upgrade Team), *Phys. Rev. Lett.* **106**, 065001 (2011).
9. S. Kobayashi and Ö.D. Gürcan, *Phys. Plasmas* **22**, 050702 (2015).
10. Gürcan Ö D, Garbet X, Hennequin P, Diamond P H, Casati A, and Falchetto G L 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 255002
11. Berionni V, and Gürcan Ö D 2011 *Phys. Plasmas* **18** 112301

## Analyse expérimentale de l'évolution non-linéaire de la dérive collisionnelle électrique des ions dans une colonne de plasma magnétisée

Thierry PIERRE

UMR 7345 CNRS, Campus St Jérôme, Marseille  
thierry.pierre.cnrs7345@contactoffice.com

La force de Laplace s'exerce sur les ions d'un plasma soumis à un champ magnétique et induit le mouvement cyclotronique de Larmor. De plus lorsque ceux-ci sont soumis à un champ électrique, les ions ont un mouvement complémentaire dans le plan perpendiculaire au champ magnétique. Il en résulte une dérive des ions perpendiculaire à la fois au champ magnétique et au champ électrique qu'il est possible de décrire dans le cadre de la théorie du centre-guide. Ce phénomène très fondamental en physique des plasmas magnétisés est universel ; il est dénommé le plus souvent dérive ExB, cette dérive étant la source de nombreuses instabilités.

Un autre paramètre essentiel dans ce système physique est l'importance de la magnétisation des ions. Si le champ magnétique imposé est faible, c'est à dire si le rayon cyclotronique des ions est de l'ordre des dimensions caractéristiques du plasma, la description en terme de fluide continu devient incorrecte. Il est alors nécessaire de mettre en oeuvre une description particulière des ions du plasma. Dans l'expérience que nous présentons ici, nous sommes dans un régime intermédiaire entre une description fluide et une description particulière.

De plus, la situation est rendue plus complexe, et plus riche, par le fait que la pression du gaz neutre est importante avec un taux d'ionisation faible. Les collisions entre les ions et les atomes neutres sont suffisamment probables sur des distances de l'ordre du rayon cyclotronique pour changer complètement la dynamique du système.

Cette situation a été analysée il y a plus d'un demi-siècle par les premiers physiciens des plasmas et a conduit à une description phénoménologique correcte en particulier en terme de "screw instability" d'une colonne de plasma. Cette instabilité hélicoïdale est assez analogue à l'instabilité d'une colonne liquide en chute libre soumise à des perturbations extérieures. Nous présentons ici une analyse basée sur le freinage collisionnel de la dérive électrique des ions dans le cas du système physique formé par un plasma d'argon soumis à un champ magnétique d'une intensité comprise entre 4 et 20 mT dans notre dispositif MISTRAL du laboratoire de physique des plasmas à Marseille. Les fréquences de collision sont prises en compte dans le modèle classique de la dérive électrique freinée et nous concluons que les instabilités basse-fréquence qui furent souvent observées et décrites sur notre dispositif et sur des dispositifs équivalents en terme d'ondes de dérive diamagnétiques excitées par le gradient de densité sont sans aucun doute de nature collisionnelle à basse magnétisation, et cela dans un régime dans lequel une description fluide est le plus souvent incorrecte.

De plus, les régimes saturés de l'instabilité sont fortement non-linéaires avec des taux de fluctuation supérieurs à 80 % ce qui ne permet pas de s'appuyer sur une analyse linéaire de l'instabilité. Les résultats sont confrontés à ceux fournis précédemment par la Fluorescence Induite par Laser appliquée aux ions montrant une fonction de distribution des vitesses des ions du plasma très déformée dans l'alternance des maximas et des minimas de l'instabilité.

# Instabilité magnéto-rotationnelle et origine des vents de disques astrophysiques

Méheut, H.<sup>1</sup> & Fromang, S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Lagrange, Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Bd de l'Observatoire, CS 34229, 06304 Nice cedex 4, France

<sup>2</sup> Laboratoire AIM, CEA/DSM-CNRS-Université Paris 7, Irfu/Service d'Astrophysique, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

heloise.meheut@cea.fr

Les disques d'accrétion sont des structures que l'on retrouve à toutes les échelles de l'astrophysique, depuis les disques des noyaux actifs de galaxie jusqu'au disques entourant les étoiles jeunes et dans lesquels les planètes se forment, les disques protoplanétaires. Cette universalité est due à la conservation du moment angulaire lors de la formation de ces structures. La question du transport du moment angulaire est donc une question clé de l'astrophysique, puisqu'elle permet de comprendre l'évolution de ces structures, leur durée de vie ainsi que le transport de matière vers l'objet massif situé au centre du disque. Alors que l'on a longtemps pensé que la turbulence due à l'instabilité magnéto-rotationnelle (MRI) suffirait à expliquer ce transport de moment angulaire, il apparaît clairement aujourd'hui que d'autres mécanismes doivent être invoqués pour expliquer l'accrétion de la matière dans les disques protoplanétaires [1]. Dans ce contexte, notre étude cherche à comprendre si l'état turbulent du à la MRI peut être à l'origine de vents qui emporterait une partie du moment angulaire et permettrait ainsi le transport de matière à travers ces disques protoplanétaires. Pour cela, nous avons développé des simulations numériques globales de disques protoplanétaires en présence d'un champ magnétique vertical à grande échelle. Ce travail généralise les simulations précédentes qui se limitaient à une approche locale [2,3,4] ou avec une faible extension verticale [5], des vents en présence de MRI. Nous étudions l'état turbulent du disque suite à la croissance de la MRI, ainsi que la présence et les propriétés de vents à grande échelle issus du disque.

## Références

1. N. J. Turner, S. Fromang, C. Gammie, H. Klahr, G. Lesur, M. Wardle, and X.-N. Bai. Transport and Accretion in Planet-Forming Disks. *Protostars and Planets VI*, pages 411–432, 2014.
2. G. Lesur, J. Ferreira, and G. I. Ogilvie. The magnetorotational instability as a jet launching mechanism. *A&A*, 550 :A61, Feb. 2013.
3. S. Fromang, H. Latter, G. Lesur, and G. I. Ogilvie. Local outflows from turbulent accretion disks. *A&A*, 552 :A71, Apr. 2013.
4. X.-N. Bai and J. M. Stone. Local Study of Accretion Disks with a Strong Vertical Magnetic Field : Magnetorotational Instability and Disk Outflow. *APJ*, 767 :30, Apr. 2013.
5. T. K. Suzuki and S.-i. Inutsuka. Magnetohydrodynamic Simulations of Global Accretion Disks with Vertical Magnetic Fields. *APJ*, 784 :121, Apr. 2014.

# The theory of chaos applied to study and model the discharge of three karstic springs (Doubs, Touvre and Lez)

Y. Zhang<sup>1</sup>, S. Mangiarotti<sup>1</sup> & M. Leblanc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CESBIO, UPS-CNRS-CNES-IRD, 18 av. Ed. Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France

<sup>2</sup> Equipe Hydrogéologie, UMR EmmaH, Université d'Avignon, Agroparc, 84000 Avignon, France  
sylvain.mangiarotti@ird.fr

The hydrological dynamics of karstic springs is nonlinear and its modeling is known to be difficult. Most of the models used for this purpose are rain-flow models based on a conceptual background. In the present study, an alternative approach based on chaos theory and global modeling [1,2] is used to analyse and to model the discharge of three karstic springs : the Doubs, the Touvre and the Lez located in East, West and South of France, respectively.

A set of ordinary differential equations is obtained for modeling the discharge of each karstic spring, without rainfall forcing. Obtained models are presented and discussed. Their quality is tested by estimating the degree of explained determinism.

## Références

1. G. GOUESBET & C. LETELLIER, Global vector field reconstruction by using a multivariate polynomial  $L_2$ -approximation on nets, *Physical Review E*, **49** (6), 4955-4972, 1994.
2. S. MANGIAROTTI, R. COUDRET, L. DRAPEAU & L. JARLAN, Polynomial search and global modeling : two algorithms for modeling chaos, *Physical Review E*, **86**(4), 046205, 2012.



## Détection d'arythmie cardiaque à partir de la reconstruction dans l'espace de phase.

Mahamat Hassan Adam<sup>†</sup>, Jacquir Sabir & Binczak Stéphane

Université de Bourgogne Franche-Comté, Arts et Métiers - Laboratoire LE2I UMR 6306 Ailes des sciences de l'ingénieur BP 47870 21078 Dijon Cedex

<sup>†</sup>hassan.adam.mahamat@gmail.com

Un signal biologique ou physiologique est intrinsèquement non linéaire. Les méthodes linéaires ne sont pas donc appropriées pour caractériser ce type de signal de façon absolue. Le traitement par des méthodes non linéaires est mieux approprié et adéquat. Bien qu'un signal physiologique puisse contenir des motifs non linéaires, sa non linéarité ne peut être reflétée que lors de sa mesure. Il existe des méthodes qui permettent de vérifier la présence ou l'absence de linéarité dans un signal telles que l'analyse des données SDA (Surrogate Data Analyse) développées par [1]. Dans le but de discriminer les différentes dynamiques dans un signal physiologique, une analyse de ses états récurrents peut être pertinente, et permet d'extraire un maximum d'information comme présenté par [2]. Des travaux utilisant des outils de la théorie des systèmes dynamiques non linéaires pour la détection des anomalies dans les signaux physiologiques sont également décrits dans [3]. Dans ces travaux, nous proposons de reconstruire dans l'espace de phase, les trajectoires d'un électrocardiogramme (ECG). L'espace des phases d'un système dynamique possède  $m$  dimensions. Dans le cas d'un processus stochastique, le nombre des dimensions de l'espace des phases est directement lié à l'ensemble des variables dynamiques obéissant à un système d'équations différentielles du premier ordre. Dans le cas d'un signal physiologique clinique ou expérimental, l'espace des phases du système sous-jacent doit être construit malgré le fait que l'on ignore, à priori sa dimension. Une série temporelle peut être reconstruite dans un espace multidimensionnel ou dans un espace de coordonnées à délai temporel en utilisant la méthode de Takens [4]. Le signal reconstruit aura la forme :

$$x_n(m, \tau) = (x_n, x_{n+\tau}, \dots, x_{n+(m-1)\tau}), \quad (1)$$

où  $m$  est la dimension de plongement calculé avec la méthode des faux voisins [4] et  $\tau$  le délai temporel [5]. Les résultats de nos travaux ont montré que l'espace de phase reconstruit à partir d'un signal temporel expérimental ou clinique permet aisément de distinguer les comportements normaux et arythmiques [6].

### Références

1. T. SCHREIBER AND A. SCHMITZ , Improved surrogate data for nonlinearity tests, *Physical Review Letters* **77** (4), 635 (1996).
2. N. NAVORET, S. JACQUIR, G. LAURENT, AND S. BINCZAK , Detection of complex fractionated atrial electrograms using recurrence quantification analysis, *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on* **60** (7), pp. 1975-1982 (2013).
3. S. JACQUIR, B. XU, S. BINCZAK, AND J.-M. BILBAULT , Détection d'anomalie dans les signaux physiologiques, *Le Vivant Critique et Chaotique*, pp. 293-332 (2015).
4. H. KANTZ AND T. SCHREIBER, Nonlinear time series analysis, *Cambridge university press*, **7**, (2004).
5. A. M. ALBANO, J. MUENCH, C. SCHWARTZ, A. MEES, AND P. RAPP , Singular-value decomposition and the Grassberger-Procaccia algorithm, *Physical Review A* **38** (6), 3017 (1988).
6. B. XU, S. JACQUIR, G. LAURENT, J.-M. BILBAULT, AND S. BINCZAK, Analysis of an experimental model of in vitro cardiac tissue using phase space reconstruction, *Biomedical Signal Processing and Control*, **13**, pp. 313-326 (2014).

## Comment l'horloge biologique du foie se synchronise-t-elle à l'alternance des repas et des jeûnes ?

Aurore Woller<sup>1,2</sup>, Hélène Duez<sup>1</sup>, Bart Staels<sup>1</sup> & Marc Lefranc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univ. Lille, INSERM, CHU Lille, Institut Pasteur de Lille, U1011 - EGID, F-59000 Lille, France

<sup>2</sup> Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers, Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France  
[marc.lefranc@univ-lille1.fr](mailto:marc.lefranc@univ-lille1.fr)

Pour anticiper les changements quotidiens de leur environnement, la plupart des organismes vivants ont développé une horloge circadienne, un oscillateur biochimique qui se synchronise au cycle jour/nuit et orchestre de nombreuses fonctions biologiques. Au niveau d'un organisme, la lumière du jour est le principal signal pilotant l'horloge. Dans les organismes multicellulaires, cependant, les horloges dans les organes périphériques, tels que le foie, sont d'abord synchronisées par l'alternance des repas et des jeûnes.

Afin de mieux comprendre comment le métabolisme entraîne l'horloge hépatique, nous avons construit un modèle mathématique de l'horloge circadienne mammifère incorporant les senseurs métaboliques SIRT1 et AMPK, qui répondent respectivement aux variations des métabolites NAD<sup>+</sup> et AMP. Ce modèle reproduit très fidèlement des données expérimentales provenant de foies de souris. Nous l'avons donc utilisé pour mieux comprendre la réponse de l'horloge hépatique à différents profils temporels d'activation de la protéine AMPK, conçus pour simuler les effets d'un régime normal, d'un jeûne prolongé et d'un régime riche en graisses.

Nos résultats suggèrent que l'atténuation des oscillations de l'horloge, décrite chez des souris soumises à un stress nutritionnel et que notre modèle reproduit parfaitement, peut être corrigée en administrant à des moments précis de la journée un activateur d'une des protéines de l'horloge. Ce protocole pharmacologique permettrait de remettre à l'heure l'horloge biologique du foie en situation d'obésité, et d'éviter des dérèglements majeurs du métabolisme.

## Internal gravity wave, from absolute and convective instability to beam stability and transient growth.

G.Lerisson<sup>1</sup>, J-M.Chomaz<sup>1</sup> & S.Ortiz<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LadHyX, École polytechnique

<sup>2</sup> UME, ENSTA

lerisson@ladhyx.polytechnique.fr

Internal gravity waves that exist in a continuously stratified fluid are particularly important in the ocean. They transport energy and are thought to generate turbulent mixing which contributes to the deep ocean circulation. Through fully non-linear and linear direct numerical simulations the stability of a gravity wave beam, we show that the stability properties and transient growth intensity strongly depend on the mean flow velocity. Small scale instabilities dominate for small mean flow as for internal tide [2,3]. For lee waves or more generally strong mean flows, large scales lead the instability but small scales dominate the short time growth. Computing the linear impulse response of a monochromatic internal wave we propose an interpretation based on an extension of absolute and convective theory [4] to 2D periodic base flow and make the connection with the classical triadic instability theory [1].

### Références

1. PHILLIPS, O.M., The dynamic of the upper ocean, 2nd edition, *Cambridge University Press*, (1967).
2. BOURGET, B. AND DAUXOIS, T. AND JOUBAUD, S. AND ODIER, P., Experimental study of parametric subharmonic instability for internal plane waves, *J. Fluid Mech.*, **723**, 1–20 (2013).
3. BOURGET, B. AND SCOLAN, H. AND DAUXOIS, T. AND LE BARS, M. AND ODIER, P. AND JOUBAUD, S., Finite-size effects in parametric subharmonic instability, *J. Fluid Mech.*, **759**, 739–750 (2014).
4. J-M. CHOMAZ, Global instabilities in spatially developing flows : non-normality and nonlinearity, *Annual review of fluid mechanics* **37**, 357–392 (2005).

## Observation de la reformation d'une onde solitaire hydrodynamique après destruction par une marche immergée

Florence Haudin<sup>1,2</sup>, Michaël Berhanu<sup>1</sup> & Eric Falcon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, MSC, UMR 7057 CNRS, F-75013 Paris, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes - Institut Langevin, Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de la ville de Paris, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris, France  
[florence.haudin@univ-paris-diderot.fr](mailto:florence.haudin@univ-paris-diderot.fr)

Une onde solitaire hydrodynamique, en eau peu profonde, résulte d'un équilibre entre dispersion et non-linéarité. Elle garde ainsi un profil auto-similaire lors de sa propagation sur un fond plat. En océanographie, une telle onde est susceptible de rencontrer des zones de profondeurs réduites.

Afin de caractériser l'effet d'un changement brutal de profondeur, nous étudions expérimentalement, au sein d'un canal, l'influence d'une marche immergée de longueur comparable à celle de l'onde solitaire. Nous caractérisons l'évolution de son amplitude sur la marche et loin de celle-ci à l'aide de mesures locales et spatiales (par profilométrie par transformée de Fourier). Nous montrons, qu'après avoir émis des ondes radiatives et subi un fort raidissement à cause de la bathymétrie, l'impulsion retrouve, bien en aval de la marche, une forme auto-similaire d'onde solitaire par ajustement de son amplitude.

## Solitons capillaires à la surface d'un liquide en lévitation

Charles Duchène<sup>1,2</sup>, Stéphane Perrard<sup>1,3</sup>, Luc Deike<sup>1,4</sup> & Chi-Tuong Pham<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, CNRS UMR 7057, Université Paris Diderot, Paris, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, CNRS UMR 7636, ESPCI ParisTech, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris Diderot, Paris, France

<sup>3</sup> James Franck Institute and Department of Physics, The University of Chicago, Chicago, Illinois 60637, USA

<sup>4</sup> Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, California 92093, USA

<sup>5</sup> Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, CNRS UPR 3251, Université Paris-Sud, Orsay, France

charles.duchene@espci.fr

En déposant de l'eau sur une plaque chauffée bien au-delà de sa température d'ébullition, le liquide s'évapore et crée un film mince de vapeur qui isole thermiquement le liquide du substrat. Cette situation d'évaporation lente et de mouillage nul se nomme l'effet Leidenfrost [1]. Cependant, ce phénomène est longtemps resté limité à l'étude de gouttes de taille millimétrique. En effet, au-delà d'une certaine taille de goutte (typiquement quelques fois la longueur capillaire), des poches de gaz se forment sous la goutte et la déforme violemment [2]. Cette limitation peut être contournée en changeant la géométrie du substrat. En utilisant une rigole torique, il a été montré que de plus larges volumes de liquide pouvaient être mis en lévitation grâce à l'évacuation de vapeur le long de la courbure du substrat [3].

À l'aide d'un canal rectiligne chauffé à 280 °C, nous avons obtenu un cylindre d'eau de 45 cm de long en lévitation. Ce dispositif permet d'étudier la propagation d'ondes unidimensionnelles à la surface d'un cylindre liquide en lévitation, en l'absence de toute ligne de contact. Nous présenterons à la fois le cas des ondes linéaires (faible amplitude de forçage) et non linéaires (impulsion brève de plus forte amplitude). En régime linéaire, les résultats obtenus mettent en évidence des ondes gravito-capillaires en présence d'une gravité effective réduite provenant de la géométrie utilisée (jusqu'à un facteur 30).

Dans le cas d'une plus grande amplitude de forçage, des structures non linéaires localisées se propagent sans se déformer sur une distance de l'ordre du mètre en se réfléchissant au niveau des extrémités du canal. Ces structures correspondent à des solitons capillaires de type Korteweg-de Vries [4] d'amplitude négative et de vitesse subsonique (c'est-à-dire inférieure à la vitesse des ondes linéaires de grande longueur d'onde). À partir d'un modèle théorique permettant d'obtenir une équation de Korteweg-de Vries adaptée aux géométries de canal utilisées, nous démontrons que les tailles typiques et la relation entre vitesse et amplitude sont en excellent accord avec nos prédictions théoriques [5]. Nous présenterons enfin les premiers résultats obtenus dans le cas d'une superposition d'un grand nombre de structures non linéaires localisées.

## Références

1. J. G. LEIDENFROST, *De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus*, Duisburg (1756).
2. A.-L. BIANCE, C. CLANET & D. QUÉRÉ, Leidenfrost drops, *Phys. Fluids*, **15**, 1632 (2003).
3. S. PERRARD, Y. COUDER, E. FORT & L. LIMAT, Leidenfrost levitated liquid tori, *Europhys. Lett.* **100**, 54006 (2012).
4. D. J. KORTEWEG & G. DE VRIES, On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves, *Philos. Mag. J. Sci.* **39**, 422–443 (1895).
5. S. PERRARD, L. DEIKE, C. DUCHÊNE & C.-T. PHAM, Capillary solitons on a levitated medium, *Phys. Rev. E* **92**, 011002(R) (2015).

## Distorsion d'un tourbillon par des vagues : le régime non-linéaire de l'interaction ondes-vorticité.

T. Humbert, B. Gallet & S. Aumaître

SPEC, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay 91191 Gif-sur-Yvette France  
thomas.humbert.box@gmail.com

L'interaction entre un champ d'ondes et un écoulement tourbillonnaire se rencontre à des échelles très diverses : à la surface des océans, les tourbillons méso-échelles (taille typique : la centaine de kilomètres) dévient la trajectoire de la houle [1]. Aux échelles microscopiques, l'interaction entre les excitations de l'hélium superfluide et les vortex quantiques est au coeur du phénomène de friction mutuelle entre superfluide et fluide normal.

D'un point de vue expérimental, cette interaction a été étudiée à l'ordre linéaire : des ondes de faible amplitude sont réfractées par un écoulement tourbillonnaire, et peuvent servir à sonder ce dernier. De telles études ont été réalisées avec des ondes acoustiques [2] et avec des ondes de surface [3,4], en lien avec l'effet Aharonov-Bohm en mécanique quantique.

Notre étude traite de l'interaction onde-écoulement en régime non-linéaire : comment des vagues de forte amplitude rétroagissent-elles sur l'écoulement qui les réfracte ?

Nous produisons un tourbillon grâce à un courant électrique circulant dans un fluide conducteur d'électricité, en présence de champ magnétique. Un batteur engendre des ondes de surface qui interagissent avec le tourbillon. Une méthode de vélocimétrie par suivi de particules donne accès à la vitesse en surface du fluide. Une moyenne cohérente en phase avec les vagues conduit au champ d'ondes, tandis qu'une moyenne temporelle simple permet d'obtenir l'écoulement moyen.

Grâce à cette méthode, nous mesurons la distorsion du tourbillon que nous interprétons à l'aide du formalisme introduit par Craik et Leibovich en océanographie [5] : l'équilibre entre forçage du tourbillon, force de Craik-Leibovich et viscosité turbulente conduit à des lois d'échelle vérifiées expérimentalement.

### Références

1. B. Gallet, W. R. Young, *Journal of Marine Research*, **72(2)**, 105-126 (2014).
2. C. Baudet, S. Ciliberto, J.-F. Pinton, *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 2 (1991).
3. F. Vivanco, F. Melo, *Physical Review E*, **69(2)**, 026307 (2004).
4. F. Vivanco, F. Melo, C. Coste, F. Lund, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 1966 (1999).
5. A. D. D. Craik, S. Leibovich, *J. Fluid Mech.* **73(3)**, 401-426 (1976).

## Observation de Superregular Breathers en optique et en hydrodynamique

B. Kibler<sup>1</sup>, A. Chabchoub<sup>2</sup>, A. Gelash<sup>3</sup>, N. Akhmediev<sup>4</sup> & V. Zakharov<sup>3,5,6</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR6303 CNRS-UBFC, 21078 Dijon, France

<sup>2</sup> Department of Ocean Technology Policy and Environment, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8563, Japan

<sup>3</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>4</sup> Optical Sciences Group, Research School of Physics and Engineering, The Australian National University, Canberra, ACT 2600, Australia

<sup>5</sup> Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

<sup>6</sup> University of Arizona, Tucson, Arizona 857201, USA

bertrand.kibler@u-bourgogne.fr

Des phénomènes d'instabilité sont fréquemment observés dans la nature, et ils peuvent conduire à des catastrophes et des désastres inattendus dans des conditions apparemment normales. La forme la plus simple d'instabilité dans un système est sa réponse à une modulation harmonique. En hydrodynamique, cette forme d'instabilité est connue sous le nom d'instabilité de Benjamin-Feir [1,2], qui correspond à la désintégration d'un train de vagues périodique à la surface de l'eau. En optique, cette instabilité est appelée instabilité de Bespalov-Talanov [3] (ou plus généralement instabilité de modulation), elle mène à la filamentation d'ondes planes. Ces observations pionnières, réalisées indépendamment dans les années 1960, ont abouti à une meilleure compréhension du caractère universel de l'instabilité de modulation [4]. Elles ont conduit à de multiples observations dans divers domaines de la physique. Cependant, aucune de ces études n'avaient pris en compte les propriétés de localisation incontestables des perturbations. Plus de 50 ans plus tard, des formes plus réalistes, mais complexes, de ce fameux phénomène physique n'ont toujours pas été révélées. Ici, grâce à nos capacités techniques exceptionnelles pour manipuler les ondes lumineuses et l'eau, nous observons les dynamiques non-linéaires de perturbations plus sophistiquées.

Nous étudions ces dynamiques en utilisant une fibre optique et un canal hydrodynamique. Chacun de ces systèmes est soumis à de petites perturbations localisées, et nous étudions la croissance et l'annihilation de superregular breathers, qui sont les nouvelles structures d'ondes de base pour décrire le phénomène d'instabilité de modulation [5]. Nos expériences, qui sont menées sur des échelles de temps de quelques secondes dans le canal et quelques picosecondes dans la fibre optique, confirment parfaitement les prédictions théoriques [6]. Démontrer simultanément des résultats expérimentaux à des échelles radicalement différentes, dans deux branches différentes de la physique des ondes, est d'une importance considérable en soi et est extrêmement rare. A notre connaissance, cette méthodologie est la première de son genre. Ces résultats auront un fort impact dans les nombreuses disciplines liées à la dynamique des ondes. En exploitant l'équivalence mathématique entre la propagation non-linéaire d'ondes à la surface de l'eau et l'évolution d'impulsions lumineuses intenses dans les fibres optiques, cette approche multidisciplinaire prouve le caractère universel de ces structures appelées « superregular breathers ». Celles-ci présentent une dynamique d'amplification unique qui peut mener à l'apparition inattendue d'ondes d'amplitude extrême.

### Références

1. T. B. BENJAMIN AND J. E. FEIR, *J. Fluid Mech.*, **27**, 417 (1967).
2. T. B. BENJAMIN, *Proc. R. Soc. A*, **299**, 59 (1967).
3. V. I. BESPALOV AND V. J. TALANOV, *JETP Lett.*, **3**, 307 (1966).
4. V. E. ZAKHAROV AND L. A. OSTROVSKY, *Physica D*, **238**, 540 (2009).
5. V. E. ZAKHAROV AND A. A. GELASH, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 054101 (2013).
6. B. KIBLER, *et al.*, *Phys. Rev. X*, **5**, 041026 (2015).

## Séismes en laboratoire : la longueur est déterminée par la mécanique de la fracture.

Elsa Bayart<sup>1</sup>, Ilya Svetlizky<sup>1</sup> & Jay Fineberg<sup>1</sup>

Racah Institute of Physics, The Hebrew University of Jerusalem, Israel  
elsa.bayart@gmail.com

L'interface entre deux surfaces solides est constituée de contacts discrets, formés par les aspérités de chaque surface. A la transition de frottement statique à frottement dynamique, une rupture interfaciale se propage au travers des contacts solides, permettant de détacher les deux surfaces. Cette rupture est similaire à une fissure en cisaillement. Nous étudions la dynamique de mise en mouvement des solides en mesurant simultanément l'aire réelle de contact et le champ de contrainte le long de l'interface frictionnelle lors de la propagation du front de rupture.

Nous nous intéressons aux événements précurseurs au glissement : des ruptures se propagent et sont spontanément arrêtées avant de traverser la totalité de l'interface. Les événements précurseurs sont des séismes de laboratoire, une rupture de taille finie dans un système de taille infinie. Comprendre leur dynamique est essentielle à la compréhension de la sélection de taille d'un séisme. En mesurant d'une part l'énergie dissipée localement par l'avancée de la rupture et d'autre part le flux d'énergie élastique, nous montrons que la mécanique de la fracture détermine entièrement la position de l'arrêt de la rupture.



## Étude de la réflexion d'une onde de surface grâce à l'acoustique

Guillaume Michel, François Pétrélis & Stéphan Fauve

Laboratoire de Physique Statistique, École Normale Supérieure, 24 Rue Lhomond, 75 005 Paris, France  
guillaume.michel@ens.fr

L'acoustique offre dans de nombreux cas des méthodes de mesure quantitatives simples et efficaces. Pensons par exemple à l'effet Doppler, permettant outre les mesures usuelles de vélocimétrie de suivre à une résolution bien inférieure à la longueur d'onde les oscillations d'une paroi. Les surfaces fixes déformées peuvent aussi être étudiées en utilisant le phénomène de diffraction, ce qui fut très utilisé en océanographie pour sonder la houle et les fonds marins au début du XX<sup>e</sup> siècle (cf. les travaux d'Eckart [1] ou la revue [2]). L'étude acoustique des ondes de surface, de quelque type que ce soit, combine ces deux aspects : les déformations périodiques agissent comme un réseau et les mouvements associés induisent un décalage Doppler égal à un multiple de la fréquence de l'onde. Mis en évidence il y a plus de 50 ans [3], cet effet est resté anecdotique en acoustique et n'a jamais mené à des applications concrètes, contrairement à son équivalent optique (les « cellules de Bragg ») couramment utilisé en laboratoire et dans des instruments de mesure. Nous présentons ici son intérêt sur l'exemple des ondes gravito-capillaire à la surface de l'eau : avec uniquement deux transducteurs piézoélectriques (moins d'une centaine d'euros), il est possible de mesurer indépendamment les fréquences, directions de propagation et amplitudes associées avec pour ces dernières une sensibilité inférieure au micron.

Ce dispositif est ensuite utilisé pour mesurer précisément l'évolution du coefficient de réflexion d'une onde de surface gravito-capillaire sur une paroi verticale suivant la condition de mouillage. Le déplacement de la ligne triple tout comme l'oscillation de l'angle de contact d'un ménisque attaché sont en effet deux phénomènes dissipatifs (cf. [4,5,6]) diminuant l'énergie réfléchie. Nous reportons leurs effets respectifs sur le coefficient de réflexion d'une onde gravito-capillaire, pouvant être remarquables : l'énergie de l'onde réfléchie varie ainsi jusqu'à un facteur deux suivant la condition de mouillage retenue. Ainsi, modifier la hauteur du bord d'une cuve de quelques millimètres peut grandement affecter la dissipation d'ondes gravito-capillaire, paramètre contrôlant le développement d'une instabilité (telle que celle de Faraday) ou encore l'atténuation d'un régime transitoire.

### Références

1. C. Eckart, *J. Acoust. Soc. Am.* **25**, 566 (1953)
2. L. Fortuin, *J. Acoust. Soc. Am.* **47**, 1209 (1970)
3. L. N. Liebermann, *J. Acoust. Soc. Am.* **35**, 923 (1963)
4. P. G. de Gennes, *Rev. Mod. Phys.* **57**, 827 (1985).
5. C.-L. Ting and M. Perlin, *J. Fluid. Mech.* **295**, 263 (1995).
6. S. Guo, H. Lee, P. Sheng et P. Tong, *Phys. Rev. E* **91**, 012404 (2015).

## Régime chaotique verrouillé en fréquence d'un oscillateur opto-hyper.

Aurélien Thorette, Marco Romanelli, Marc Brunel & Marc Vallet

Institut de Physique de Rennes, Université Rennes I - CNRS UMR 6251, 263, av. du général Leclerc, 35042  
Rennes Cedex, France

aurelien.thorette@univ-rennes1.fr

Nous présentons un nouveau régime de synchronisation entre un oscillateur et une référence externe, séparés par un écart en fréquence  $\Delta$  (appelé désaccord).

À faible désaccord, la phase de l'oscillateur se verrouille sur celle de la référence, c'est à dire que la phase relative est constante au cours du temps. Lorsque le désaccord augmente ou que le couplage diminue, il a été montré théoriquement et expérimentalement que si le système présente une bifurcation de Hopf supercritique, on peut observer un régime de *phase bornée* dans lequel il y a verrouillage de la fréquence moyenne de l'oscillateur sur celle de la référence externe, bien que leur phase relative oscille [1,2].

Nous montrons ici que dans le cas d'une bifurcation de Hopf sous-critique, il peut exister un régime de *phase bornée chaotique*. Dans ce régime, la fréquence moyenne est verrouillée, la phase relative restant inférieure à  $2\pi$ . Mais celle-ci, ainsi que l'enveloppe du signal en sortie de l'oscillateur, présente des variations chaotiques.

Nous avons étudié numériquement et expérimentalement ce comportement sur un oscillateur opto-hyper constitué par un laser solide bi-fréquence  $\text{Nd}^{3+}$  :YAG. Le battement entre les deux modes de polarisation du laser est synchronisé sur un synthétiseur RF via une réinjection optique (modèle décrit en détail dans l'article [3]). On peut ainsi mesurer aisément la phase relative et donc la synchronisation entre les deux oscillateurs.

Enfin, nous montrons que bien que le comportement soit chaotique, ce régime permet tout de même de transférer la pureté spectrale de la référence sur l'oscillateur. En effet, de façon surprenante, le bruit de phase autour de la fréquence de référence reste du même ordre de grandeur que pour un verrouillage complet. La stabilité à long terme d'une référence peut ainsi être transférée sur la fréquence moyenne d'un oscillateur qui présente des variations chaotiques d'intensité et de phase relative.

### Références

1. A. PIKOVSKY, M. ROSENBLUM, ET J. KURTHS, Synchronization : A Universal Concept in Nonlinear Sciences (Cambridge University, 2003).
2. M. ROMANELLI, L. WANG, M. BRUNEL ET M. VALLET, Measuring the universal synchronization properties of driven oscillators across a Hopf instability. *Optics Express*, **22**, 7364 (2014).
3. J. THÉVENIN, M. ROMANELLI, M. VALLET, M. BRUNEL ET T. ERNEUX, Phase and intensity dynamics of a two-frequency laser submitted to resonant frequency-shifted feedback. *Phys. Rev. A*, **86**, 033815 (2012).

# Identification en turbulence intégrable de structures cohérentes de type onde scélérate par une méthode de diffusion inverse

S. Randoux<sup>1</sup>, P. Suret<sup>1</sup> & G. El<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules, UMR-CNRS 8523, Université de Lille, France

<sup>2</sup> Department of Mathematical Sciences, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, United Kingdom  
`stephane.randoux@univ-lille1.fr`

La turbulence intégrable est un champ de recherche récemment introduit par V. E. Zakharov [1,2]. Ce domaine de recherche porte sur l'étude des propriétés statistiques d'ondes nonlinéaires incohérentes se propageant dans des systèmes décrits par des équations *intégrables* (par exemple, l'équation de Schrödinger non linéaire à une dimension, l'équation de Korteweg-de Vries ou l'équation de Benjamin-Ono) [4,5]. Ce champ se démarque de celui de la turbulence d'ondes qui envisage l'étude des propriétés spectrales et statistiques de systèmes d'ondes décrits par des équations *non intégrables* [3]. Considérant une onde de statistique initialement gaussienne, il s'agit par exemple d'étudier les changements statistiques résultant d'une propagation non linéaire dans un système d'ondes régi par une équation intégrable.

Dans ce travail, nous nous intéressons à des systèmes d'ondes décrits par l'équation de Schrödinger non linéaire intégrable et nous considérons le problème de l'évolution du système lorsque la condition initiale est une onde plane bruitée. Dans ce cas, l'instabilité de modulation est à l'origine de l'apparition de comportements spatio-temporels complexes et en particulier de structures cohérentes similaires à des solitons sur fond continu (Soliton de Peregrine, Akhmediev Breather...) [6]. Nous avons mis au point une méthode originale dans laquelle ces structures sont analysées par une méthode de diffusion inverse (Inverse Scattering method). Celle-ci fournit des signatures spectrales précises de ces structures cohérentes et permet d'étudier leur degré de proximité avec les solutions analytiques correspondants aux solitons sur fond continu [7].

## Références

1. "Turbulence in Integrable Systems," V. E. Zakharov, *Stud. Appl. Math.* **122**, 219 (2009).
2. "Nonlinear stage of modulation instability," V. E. Zakharov and A. A. Gelash, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 054101 (2013).
3. "Optical wave turbulence : Towards a unified nonequilibrium thermodynamic formulation of statistical nonlinear optics," A. Picozzi, J. Garnier, T. Hansson, P. Suret, S. Randoux, G. Millot, D.N. Christodoulides, *Phys. Report* **542**, 1-132 (2014)
4. "Intermittency in Integrable Turbulence," S. Randoux, P. Walczak, M. Onorato and P. Suret, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 113902 (2014).
5. "Optical rogue waves in Integrable Turbulence," P. Walczak, S. Randoux and P. Suret, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 143903 (2015).
6. "Emergent rogue wave structures and statistics in spontaneous modulation instability," S. Toenger *et al*, *Scientific Report* **5** (2015).
7. "Identification of rogue waves from scattering transform analysis of periodized waveforms," S. Randoux, P. Suret, G. El, arXiv :1512.04707

## Expériences de propagation d'ondes partiellement cohérentes : comparaison entre optique et hydrodynamique

R. EL KOUSSAIFI<sup>1</sup>, Miguel ONORATO<sup>2</sup>, Stephane RANDOUX<sup>4</sup>, Alexey TIKAN<sup>5</sup> & Pierre SURET<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et molécules, UMR-CNRS 8523, Université de Lille, France

<sup>2</sup> Dipartimento di Fisica Generale, Università di Torino, Via Pietro Giuria 1, 10125 Torino, Italy

rebeccakoussaifi@hotmail.com

Les études effectuées se placent dans le champ de la turbulence intégrable. Elles portent sur la propagation d'ondes partiellement cohérentes dans des systèmes d'ondes décrits par une équation intégrable. Nous avons envisagé spécifiquement l'équation de Schrodinger non linéaire qui décrit la propagation d'ondes dans un canal à une dimension (dans le cadre de l'hypothèse d'eau profonde) mais aussi la propagation de la lumière dans une fibre optique monomode.

Nous avons réalisé en optique une expérience analogue à une expérience réalisée en hydrodynamique en 2004[1]. Dans cette expérience une onde aléatoire de statistique initialement gaussienne se propage dans un canal à une dimension et l'on observe les déviations de la statistique gaussienne résultant des effets non linéaires associés à la propagation. Le spectre choisi pour la condition initiale est le spectre JONSWAP mesuré dans des expériences d'océanographie[2].

Nos expériences d'optique et d'hydrodynamique ont été réalisées avec des paramètres réduits identiques. Grâce à une technique d'échantillonnage optique originale, nous avons mesuré l'évolution de la statistique de la puissance et nous les avons comparées à celles de l'expérience d'hydrodynamique.

Dans les deux expériences, des événements de grandes amplitudes apparaissent avec une probabilité plus grande que celle prédite par la loi normale. Les statistiques mesurées dans les expériences d'optique et d'hydrodynamique sont quantitativement comparables. Nous discutons des différences notamment liées à l'apparition de phénomènes de déferlements des vagues en hydrodynamique.

Les comportements statistiques observés dans les expériences d'optique sont reproduits quantitativement par des simulations numériques de l'équation de Schrodinger non linéaire.

### Références

1. M. ONORATO, A.R. OSBORNE, AND M SERIO, Observation of strongly non-Gaussian statistics for random sea surface gravity waves in wave flume experiments, *Phys. Lett. E*, **70**, (2004).
2. G.J. KOMEN, L. CAVELERI, M. DONELAN, K. HASSELMAN, S. HASSELMAN, AND P.A.E.M. JANSSEN, Dynamics and Modelling of Oceans Waves *Cambridge University Press*,(1994).

# Coherent structures generated from random initial conditions in the one-dimensional Nonlinear Schrödinger Equation

A. Tikan<sup>1</sup>, S. Bielawski<sup>1</sup>, R. El Koussaifi<sup>1</sup>, C. Evain<sup>1</sup>, M. Le Parquier<sup>1</sup>, S. Randoux<sup>1</sup>, C. Szwaj<sup>1</sup> & P. Suret<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molecules, Université de Lille, UMR-CNRS 8523, France  
alexey.tikan@gmail.com

The one-dimensional Nonlinear Schrödinger Equation (1D-NLSE) is well known as a model of wave propagation in nonlinear dispersive media when third-order nonlinearity and second-order dispersion dominate other physical effects. 1D-NLSE could be used to describe waves propagation in plenty of nonlinear systems : nonlinear optical fibers and waveguides, deep water gravitational wave, Bose-Einstein condensate, hot plasma, etc. 1D-NLSE does not yield to general analytical studies and solutions could be found only in some particular cases. In the course of development of this field besides the conventional solitonic solutions, solitons on the finite background (SFB) such as Peregrine soliton [1], Akhmediev breather [2] and Kuznetsov-Ma soliton [3] were found. SFB are the solutions of 1D-NLSE in a focusing case (in the presence of anomalous dispersion). Quite recently such structures were observed in optical and hydrodynamical experiments. In these experiments the SFB have been generated by using coherent deterministic initial conditions[4,5,6].

Significant interest to SFB grew up after assumption that rogue wave phenomena observed in the open sea could be described as an interaction of this kind of coherent structures. Rogue waves are waves of extraordinary large height which appears more frequently than predicted by normal law. In nature wind generates water waves through a sophisticated mechanism and the resulting picture is a superposition of random waves. Thereby we underline the importance of stochastic initial conditions in order to use the optical system as laboratory of investigation of hydrodynamical rogue wave phenomena.

Taking into account all aforesaid, in order to investigate a dynamics of stochastic initial conditions it is necessary to use numerical simulations. We applied the split-step Fourier method as the most effective algorithm. In the numerical simulations, we explored a wide range of parameters of stochastic initial conditions. Results of simulations demonstrated occurring of breather like solutions. Detected structures were compared with analytical solutions as well as experimental results.

## Références

1. PEREGRINE D. H., Water waves, nonlinear Schrödinger equations and their solutions, *J. Aust. Math. Soc. Ser.*, **25**, 16–43 (1983).
2. AKHMEDIEV N. & KORNEEV V. I., Modulation instability and periodic solutions of the nonlinear Schrödinger equation. *Theor. Math. Phys.*, **69**, 1089–1093 (1986).
3. KUZNETSOV, E., Solitons in a parametrically unstable plasma. *Sov. Phys. Dokl.*, **22**, 507–508 (1977).
4. KIBLER, B., FATOME, J., FINOT, C., MILLOT, G., DIAS, F., GENTY, G., AKHMEDIEV, N. & DUDLEY, J. M., The Peregrine soliton in nonlinear fibre optics. *Nature Physics*, **6**, 790–795 (2010).
5. DUDLEY, J. M., GENTY, G., DIAS, F., KIBLER, B. & AKHMEDIEV, N., Akhmediev Breathers and continuous wave supercontinuum generation. *Opt. Express*, **17**, 21497–21508 (2009).
6. KIBLER, B., FATOME, J., FINOT, C., MILLOT, G., GENTY, G., WETZEL, B., AKHMEDIEV, N., DIAS, F., & DUDLEY, J. M., Observation of Kuznetsov-Ma soliton dynamics in optical fibre. *Scientific Reports*, **2**, 1–5 (2012).

# Comparaison des approches en EEM et LES/DNS pour une flamme mince plissée bidimensionnelle plane-en-moyenne

Yves D'Angelo<sup>1</sup> & Lancelot Boulet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CORIA/INSA CNRS UMR 6614 Normandie Université & LIED/PIERI Paris 7 UMR 8236

<sup>2</sup> CORIA/INSA CNRS UMR 6614 Normandie Université

dangelo@coria.fr

Si la détermination “exacte” d’une flamme (i.e. forme, évolution spatio-temporelle, production des polluants) s’avère en principe possible par la résolution numérique directe des équations de Navier-Stokes réactives (DNS), dans la pratique cet accès est restreint à des dimensions très réduites, de l’ordre de quelques centimètres cubes. Les échelles spatiales nécessaires à la simulation sont en effet de l’ordre de l’échelle de dissipation de Kolmogorov  $\eta$  ou d’une fraction de l’épaisseur de réaction  $\delta_r$ . Comme  $\eta \sim Re^{3/4}$  et  $\delta_r \sim D_{th}/S_L$ , toutes deux sont typiquement de l’ordre de 5 à 50  $\mu\text{m}$  pour les situations usuelles, ce qui rend les applications à des échelles macroscopiques excessivement coûteuses, voire impossibles. Il est alors courant de faire appel à des modèles de sous-maille (de type filtrage LES ou Simulations aux grandes échelles pour la combustion turbulente) afin de tenter de réintroduire dans la simulation au moins une partie de l’information gommée par le filtrage.

Une approche un peu alternative peut au contraire exploiter la forte disparité d’échelle en considérant la flamme comme une surface de discontinuité séparant les gaz frais des gaz brûlés, et d’établir une équation d’évolution modèle (EEM), non-linéaire et non locale, pour la forme locale du front de flamme. La stratégie d’obtention de l’équation est basée sur un développement asymptotique où le petit paramètre est le contraste de densité  $\alpha$  (cf. e.g. [1,2,3]).

Nous proposons ici une comparaison directe quantitative entre ces approches en EEM (à la Sivashinsky) et l’approche classique DNS/LES pour une flamme plane air/méthane bidimensionnelle plissée, plane-en-moyenne. Nous montrons également quelques résultats obtenus en EEM dans le cas 3D.

## Références

1. G. I. Sivashinsky *Nonlinear analysis of hydrodynamic instability in laminar flames – I. Derivation of basic equations*, Acta Astron., **4**, page 1177, 1977.
2. G. Boury and Y. D’Angelo, *On third order density contrast expansion of the evolution equation for wrinkled unsteady premixed flames*, International Journal of Non-Linear Mechanics, **46**, **9**, pp. 1213-1222, 2011.
3. Eric Albin and Yves D’Angelo, *Assessment of the Evolution Equation Modelling approach for three-dimensional expanding wrinkled premixed flames*, Combustion and Flame, volume 159, number 5, pages 1932-48, 2012.

## Turbulence-induced self-focusing and filamentation

D. Eeltink<sup>1</sup>, N. Berti<sup>2</sup>, N. Marchiando<sup>1</sup>, S. Hermelin<sup>2</sup>, M. Brunetti<sup>1</sup>, J.P. Wolf<sup>2</sup>, & J. Kasparian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Genève, GAP-Nonlinear, Chemin de Pinchat 22, 1211 Geneva 4, Switzerland

<sup>2</sup> Université de Genève, GAP-Biophotonics, Chemin de Pinchat 22, 1211 Geneva 4, Switzerland

debbie.eeltink@unige.ch

Filamentation denotes the process in which high-power, ultra-short laser pulses overcome a critical threshold above which nonlinear effects of the medium come into play. In doing so, the laser pulse can guide itself while propagating - thus creating a kind of thread or filament - instead of simply diffracting as one would normally expect [1],[2]. This self-guidance relies on a balancing act between the nonlinear Kerr effect that focuses the beam, and a defocusing caused by ionization of the medium and polarisability inversion [3]. Filaments can span over tens to hundreds of meters, and be initiated at kilometer-range distances. Therefore, filaments are promising candidates for innovative applications in several atmospheric fields like remote sensing [4], or laser-induced condensation [5].

In any application, an important factor to take into account is the interaction of the laser pulse with a turbulent atmosphere, both before and during the filamentation process. A remarkable feature of filaments is that once formed, they are rather robust to turbulence. However, in the stage before the filament has formed, the interaction with turbulence can have the seemingly opposite effects of either helping or hindering filament nucleation and increasing or decreasing the initiation distance. The effect depends on factors such as beam power, size and coherence on one hand, and the turbulence strength and its length scales on the other [6].

Here, we show that a strongly turbulent environment can be used to trigger filamentation for a laser beam that would not have enough power to filament in a calm atmosphere. This suggests that turbulence seeds modulation instability, i.e. the rapid growth of a perturbation in the beam, causing the onset of filaments. We believe this sub-threshold onset is an area of turbulence-filament interaction that has not yet been explored. Our setup consists of a collimated femto-second laser, propagating through a small turbulent air region followed by a water-cell. Because the nonlinear refractive index of water is about three orders of magnitude higher than of air [1], this table-top experiment allows us to see effects that would otherwise require long range propagation in air.

## Références

1. A. COUAIRO, A. MYSYROWICZ, Femtosecond filamentation in transparent media *Phys. Rep.*, **44**, 47, (2007).
2. J. KASPARIAN, J.-P. WOLF, Physics and applications of atmospheric nonlinear optics and filamentation *Optics Express*, **16**, 466-493 (2008).
3. P. BÉJOT, J. KASPARIAN, S. HENIN, V. LORIOT, T. VIEILLARD, E. HERTZ, O. FAUCHER, B. LAVOREL, J.-P. WOLF, Higher-order Kerr terms allow ionization-free filamentation in gases *Physical Review Letters*, **104**, 103903, (2010).
4. J. KASPARIAN, M. RODRIGUEZ, G. MÉJEAN, J. YU, E. SALMON, H. WILLE, R. BOURAYOU, S. FREY, Y.-B. ANDRÉ, A. MYSYROWICZ, R. SAUERBREY, J.-P. WOLF, L. WÖSTE, White-Light Filaments for Atmospheric Analysis, *Science*, **301**, 61 (2003).
5. S. HENIN, Y. PETIT, P. ROHWETTER, K. STELMASZCZYK, Z.Q. HAO, W. M. NAKAEMA, A. VOGEL, T. POHL, F. SCHNEIDER, J. KASPARIAN, K. WEBER, L. WÖSTE, J.P. WOLF, Field measurements suggest the mechanism of laser-assisted water condensation, *Nat. Commun.*, **2**, 456 (2011).
6. J. PEÑANO, B. HAFIZI, A. TING, M. HELLE, Theoretical and numerical investigation of filament onset distance in atmospheric turbulence *Journal of the Optical Society of America B*, **31**, 1965-1967 (2010).

## Kraichnan-Kazanstev dynamos in $2.5D$ flows

Kannabiran SESHASAYANAN & Alexandros ALEXAKIS

Laboratoire de Physique Statistique, École Normale Supérieure, Université Pierre et Marie Curie, 24 rue Lhomond, 75005 Paris  
`skannabiran@lps.ens.fr`

We study the dynamo instability created by a gaussian random flow first studied by [1]. This type of a flow is more commonly known as the Kraichnan flow proposed in [2] for studying passive scalar advection. By taking into account the relevant correlation functions we derive the governing equations for the two point correlation function of the magnetic field in the case of a  $2.5D$  flow, a flow which varies in two dimensions but has three components. We focus on the nonhelical flow where the vorticity and the velocity field are uncorrelated. We look for the unstable modes of the resulting set of equations as a function of the parameters. We show how the growth rate  $\gamma$  varies as a function of  $k_z$  and the magnetic Reynolds number  $Rm$ , where  $k_z$  is the vertical mode in the invariant  $z$  direction. We finally compare our results with direct numerical simulations to validate the model.

### Références

1. Kazantsev, A. P. *Enhancement of a magnetic field by a conducting fluid*. Sov. Phys. JETP, 26, 1031–1034, (1968).
2. Kraichnan, R. H., *Small-Scale Structure of a Scalar Field Convected by Turbulence*. Phys. Fluids , 11, 5, 945–953, (1968).



## Un outil mathématique pour la physique : l'analyse non linéaire MinPlus et l'intégrale de chemin MinPlus

Michel Gondran<sup>1</sup> & Alexandre Gondran<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University Paris Dauphine, Lamsade, 75 016 Paris, France

<sup>2</sup> École Nationale de l'Aviation Civile, 31000 Toulouse, France

michel.gondran@polytechnique.org

Il existe en mécanique classique un analogue de l'intégrale de chemin de Feynman : c'est **l'intégrale de chemin Minplus** qui relie l'action d'Hamilton-Jacobi  $S(\mathbf{x}, t)$  à l'action classique d'Euler-Lagrange  $S_{cl}(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0)$  par l'équation :

$$S(\mathbf{x}, t) = \min_{\mathbf{x}_0} (S_0(\mathbf{x}_0) + S_{cl}(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0)) \quad (1)$$

où le minimum est pris sur l'ensemble des positions initiales  $\mathbf{x}_0$  et où  $S_0(\mathbf{x})$  est l'action d'Hamilton-Jacobi à l'instant initial. Cette équation est une intégrale dans l'analyse non linéaire Minplus [2] que nous avons introduit en 1996, à la suite de Maslov [1]. Nous verrons que cette équation permet en mécanique classique de mieux comprendre le principe de moindre action, et en mécanique quantique de réfuter l'interprétation des mondes multiples d'Everett et de conforter l'interprétation de l'onde pilote de Broglie-Bohm pour les particules non liées (interprétation faible de de Broglie-Bohm).

On peut généraliser la mécanique analytique classique sur les nombres réels basée sur l'analyse Minplus avec une mécanique analytique définie sur les nombres complexes et les algèbres de Clifford (analyse Minplus complexe). Cette généralisation permet de revisiter la théorie non linéaire de Born et Infeld avec un tenseur de Faraday complexe et d'envisager une possible union de l'électromagnétisme avec la relativité générale.

Enfin, on propose un modèle non ponctuel d'une particule quantique (corde vibrante) et un principe de moindre action généralisée permettant d'associer à cette particule une onde qui vérifie l'équation de Schrödinger et au centre de gravité de cette particule une trajectoire de de Broglie-Bohm.

### Références

1. V.P. Maslov, *Analyse Idempotente*, édition Mir (1989).
2. M. Gondran, "Analyse MinPlus" C. R. Acad. Sci. Paris **323**, 371-375 (1996).
3. M. Gondran et M. Minoux, *Graphes, dioïdes et semi-anneaux*, Lavoisier (2004) ; *Graphs, Dioïds and Semi-rings : New models and Algorithms*, Springer, Operations Research/Computer Science Interfaces (2008).
4. M. Gondran et A. Kenoufi, "Numerical calculations of Hölder exponents for the Weierstrass functions with (min,+)-wavelets", Trends in Applied and Computational Mathematics (2014).
5. R.P. Feynman, R.B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading, MA, Vol. II, 1964.

# Un modèle heuristique de particule étendue compatible avec la mécanique quantique

Alexandre Gondran<sup>1</sup> & Michel Gondran<sup>2</sup>

<sup>1</sup> École Nationale de l'Aviation Civile, 31000 Toulouse, France

<sup>2</sup> University Paris Dauphine, Lamsade, 75 016 Paris, France

`alexandre.gondran@enac.fr`

Nous proposons un modèle non ponctuel de particule en dimension 2 : la particule étendue est représentée par quatre points qui définissent la structure d'une petite corde élastique qui vibre, en alternant entre un processus de création et un processus d'annihilation.

Nous montrons d'abord comment le spin et les relations d'incertitude d'Heisenberg émergent de cette particule étendue.

Nous montrons ensuite comment l'action complexe, associée à cette particule étendue, vérifie, à partir d'un principe de moindre action généralisé, une équation d'Hamilton-Jacobi complexe du second ordre. Alors la fonction, qui admet cette action comme une phase complexe, vérifie l'équation de Schrödinger.

Finalement, nous montrons que le centre de gravité de cette particule étendue suit une trajectoire de Broglie-Bohm.

Ce modèle est construit sur deux concepts mathématiques nouveaux : une mécanique analytique complexe généralisant l'analyse non linéaire Minplus que nous avons introduit [2,3] à la suite de Maslov [1] et les processus déterministes périodiques que nous avons développé [4,5].

## Références

1. V.P. Maslov, *Analyse Idempotente*, édition Mir (1989).
2. M. Gondran, "Analyse MinPlus", C. R. Acad. Sci. Paris **323**, 371-375 (1996).
3. M. Gondran et M. Minoux, *Graphes, dioïdes et semi-anneaux*, Lavoisier (2004) ; *Graphs, Dioïds and Semi-rings : New models and Algorithms*, Springer, Operations Research/Computer Science Interfaces (2008).
4. M. Gondran, "Processus complexe stochastique non standard en mécanique", C. R. Acad. Sci. Paris **333**, 592-598 (2001).
5. M. Gondran, "Schrödinger Equation and Minplus Analysis", Russian Journal of Mathematical Physics, 11, 2, 130-139 (2004).

## Tumbling in an extensional flow

Plan, & Vincenzi

Université Nice Sophia Antipolis, CNRS, Laboratoire Jean Alexandre Dieudonné, UMR 7351, Nice, France  
elcplan@unice.fr

Polymers exhibit a complex behaviour even in simple laminar flows. According to the geometry of the flow, polymers can indeed stretch, fold, kink, and thus display a variety of conformations [1]. In a shear flow, the dynamics of a flexible polymer is dominated by an aperiodic end-over-end tumbling motion [2,3,4]. The polymer spends most of the time aligned with the direction of shear and occasionally reverses its orientation because of the combined action of the flow and of thermal fluctuations. The dumbbell model, which simply consists of two beads joined by an elastic spring, captures the main properties of the tumbling motion of flexible polymers in a shear flow [5,6]. In particular, the distribution of the time intervals separating two reversals has an exponential tail with a time scale decreasing as a power-law of the Weissenberg number  $Wi$ . Semi-flexible polymers also undergo end-over-end tumbling when immersed in a shear flow [7]. The phenomenon of polymer tumbling is thus commonly associated with shear flows.

We address the question of whether tumbling can also exist in stretching-dominated flows. In an extensional flow, the dumbbell model yields a trivial temporal dynamics : it simply aligns with the stretching direction of the flow, while its extension fluctuates around a value that depends on  $Wi$ . A much richer dynamics is obtained by considering the simplest model of semi-flexible polymer, namely the trumbbell model, which consists of three beads joined by two rigid connectors and of an elastic hinge at the central bead [8]. The trumbbell model has been used to study the low-frequency behaviour of stiff macromolecules and the viscoelastic properties of suspensions of such macromolecules [9]. We show that the mere inclusion of one bending mode in the polymer model yields a random end-over-end tumbling motion in an extensional flow. The trumbbell spends a significant amount of time extended and oriented along the stretching direction of the flow ; occasionally, a favourable sequence of thermal fluctuations make the trumbbell fold, reverse its orientation and unfold. The analysis of the statistics of this tumbling-through-folding motion reveals a fundamental difference between extensional flows and shear flows. In an extensional flow, indeed, the mean time separating two reversals grows with  $Wi$ , and the growth is exponential. This phenomenon is explained by performing a stability analysis of the dynamical system describing the configuration of the trumbbell and by applying the large deviation theory to it.

## Références

1. PERKINS, T. T., SMITH, D. E. & CHU, S., *Science*, **276**, (1975).
2. SMITH, D. E., BABCOCK, H. P. & CHU, S., *Science*, **283**, 1724–1727 (1999).
3. SCHROEDER, C. M., TEIXEIRA, R. E., SHAQFEH, E. S. G. & CHU, S., *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 018301 (2005).
4. GERASHCHENKO, S. & STEINBERG, V., *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 038304 (2006).
5. CELANI, A., PULIAFITO, A. & TURITSYN, K., *Europhys. Lett.*, **70**, 464–470 (2005).
6. CHERTKOV, M., KOLOKOLOV, I., LEBEDEV, V. & TURITSYN, K., *J. Fluid Mech.*, **531**, 251–260 (2012).
7. WINKLER, R. G., *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 128301 (2006).
8. HASSAGER, O., *J. Chem. Phys.*, **60**, 2111–2124 (1974).
9. GARCIA DE LA TORRE, J., *Eur. Biophys. J.*, **23**, 307–322 (1994).

# Déformation de goutte posée excitée par des Ondes Acoustiques de Surface

Nicolas Chastrette<sup>1,2</sup>, Laurent Royon<sup>1</sup>, Michael Baudoin<sup>3</sup>, Philippe Brunet<sup>1</sup> & Régis Wunenburger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Université Paris-Diderot, CNRS (UMR 7057), Paris, France

<sup>2</sup> Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005 Paris, France

<sup>3</sup> International Associated Laboratory LEMAC, IEMN, UMR CNRS 8520, Université des Sciences et Technologies de Lille and EC Lille, 59652 Villeneuve d'Ascq Cédex, France

`nicolas.chastrette@univ-paris-diderot.fr`

La microfluidique en goutte nécessite le déplacement de faible quantité de fluide d'un point à un autre. Les forces d'accrochage de la ligne triple, dues aux imperfections du substrat, s'opposent à ce déplacement. L'utilisation d'ondes acoustiques de surfaces (SAW) (de fréquence supérieure au MHz) est l'un des moyens efficaces pour déplacer des gouttes à distance [1],[2],[3]. L'onde est générée par des transducteurs interdigités (IDT) consistant en un réseau d'électrodes conductrices déposées sur une plaque de Niobate de Lithium (piézoélectrique) et soumis à une tension alternative. Mis à part le déplacement de gouttes, ces SAWs peuvent provoquer le mélange, l'oscillation de la surface libre de la goutte et l'atomisation (au fur et à mesure que la puissance acoustique est augmentée). La plupart des études menées jusqu'à présent ont utilisé des ondes dont la longueur d'onde acoustique est très petite devant les dimensions caractéristiques de la goutte (dans ces études, la fréquence est supérieure à 20 MHz). Dans cette gamme de fréquences, le déplacement directionnel est accompagné d'oscillations basse fréquence (typiquement 10 → 200 Hz) de la surface libre correspondant au mode dipolaire capillaro-inertiel.

Lorsque la longueur d'onde est comparable à la taille de la goutte (typiquement entre [1 : 10] MHz), aucun déplacement n'est observé mais les oscillations de la surface libre sont caractérisées par de nombreux modes spatiaux excités auxquels est associée une plus grande dynamique spectrale. Pour caractériser ces déformations, nous avons développé une technique d'imagerie par déformation d'une grille par la goutte. À partir de ces données, nous avons reconstruit les modes de déformations dominants. Les résultats obtenus sont en accord avec les résultats issus d'un modèle théorique [4]. Nous sommes aussi capable de quantifier l'importance relative de chaque mode.

## Références

1. A. Wixforth et al, *Analytical and bioanalytical chemistry* **379**,(2004).
2. P. Brunet et al, *Physical Review E*, **81**,(2010) .
3. J. Friend and L. Yeo *Rev. Mod. Phys.*, **83**, (2011).
4. J. B. Bostwick and P. H. Steen, *Journal of Fluid Mechanics* **760**, (2014)

## Streaming de micro-bulles sous excitation acoustique : comment mélanger avec des bulles ?

Combriat Thomas<sup>1</sup>, Thibault Pierre<sup>1</sup> & Marmottant Philippe<sup>1</sup>

Laboratoire Interdisciplinaire de Physique  
thomas.combriat@univ-grenoble-alpes.fr

Les systèmes microfluidiques permettent de manipuler de très faibles volumes de fluide et sont de plus en plus répandus dans le milieu scientifique. Leurs dimensions micrométriques impliquent que les écoulements se font à très faible nombre de Reynolds, rendant des opérations comme le mélange entre fluides difficiles.

Nous proposons ici une approche originale de ce problème basée sur l'introduction de bulles micrométriques dans ces systèmes qui permettent, lorsqu'elles sont excitées par un champ extérieur de pression périodique (onde ultrasonore), de forcer des écoulements intenses grâce au phénomène non linéaire d'écoulement redressé ou *streaming acoustique*. En effet les bulles, du fait de leur grande compressibilité comparée à l'eau, peuvent pulser avec de grandes amplitudes, ce qui en fait de bonnes sources secondaires de pression acoustique.

Les bulles sont injectées dans des canaux de polydiméthylsiloxane (PDMS) fabriqués par lithographie. La hauteur de ces canaux (entre 25 et 40 microns) est plus faible que la taille des bulles étudiées qui sont donc confinées dans leur dimension verticale, adoptant la forme de «pancakes». La position des bulles dans le canal peut être contrôlée grâce à des microcavités qui servent de piège, ce qui permet d'étudier de manière reproductible divers agencements de bulles.

L'excitation est faite entre 30 et 140 kHz afin d'être proche de la résonance des bulles dont le rayon est généralement compris entre 25 et 50 microns.

Du fait de la non linéarité de l'équation de Navier-Stokes, une excitation sinusoïdale de pression peut provoquer un écoulement de moyenne temporelle non nulle. Ce type d'écoulement redressé est observé aux alentours d'une bulle soumise à une onde ultrasonore du fait de l'oscillation radiale (mode 0) de sa surface à la fréquence d'excitation.

En présence d'autres bulles, du fait d'interactions véhiculées par des ondes de surface se propageant sur les parois du canal [1], une bulle peut également présenter d'autres modes d'oscillation comme par exemple un mode de translation (mode 1). La présence simultanée de différents modes (en particulier les modes 0 et 1) sur une bulle génère des écoulements bien plus intenses que ceux produits par un seul mode 0, du fait de la brisure de symétrie radiale de l'oscillation [2]. Ces écoulements issu d'un tel mode mixte ont la particularité d'être à relative grande portée (jusqu'à une dizaine de rayon de la bulle excitatrice) et très rapides (vitesse pouvant atteindre  $1 \text{ mm.s}^{-1}$ ).

Nous étudions actuellement différentes configurations de bulles devant favoriser le mélange, à la fois sur le plan expérimental et grâce à des simulations numériques multibulles.

À terme, ces études doivent pouvoir se généraliser à l'étude des vibrations d'un grand nombre de bulles couplées, se comportant alors comme un métamatériau.

## Références

1. RABAUD, D. *et al.*, Acoustically Bound Microfluidic Bubble Crystals, *Phys. Rev. Lett.*, **106**, (2011).
2. MEKKI-BERRADA, F. *et al.*, Interactions enhance the acoustic streaming around flattened microfluidic bubbles, Soumis au *Journal of Fluid Mechanics*.

## Écoulement et stabilité d'un rideau liquide viscoélastique.

Antoine Gaillard, Laurent Limat, Luc Lebon<sup>1</sup>, Julien Beaumont<sup>2</sup> & Henri Lhuissier<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Matière et Systèmes Complexes (MSC), Université Paris Diderot & CNRS, UMR 7057, Bâtiment Condorcet, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, F-75013 Paris, France

<sup>2</sup> Saint-Gobain Recherche, 39 Quai Lucien Lefranc, F-93300 Aubervilliers, France

<sup>3</sup> Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI), Aix-Marseille Université & CNRS, UMR 7343, Technopôle de Château-Gombert, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille, France

antoineogaillard@gmail.com

Nous avons étudié expérimentalement l'écoulement et la stabilité d'un rideau de liquide viscoélastique tombant depuis une fente mince sous l'effet de la gravité. On observe de nouveaux phénomènes non décrits par l'étude des rideaux de liquides Newtoniens de Brown et Taylor [1]. La vitesse moyenne de chute  $U(z)$  ne se résume plus à une chute libre, même loin de la fente. Elle diminue à mesure qu'on augmente la concentration en polymère, ce qui est une manifestation de la réponse élastique des polymères à l'étirement. De plus, l'écoulement est modulé horizontalement. Le rideau s'organise alors en une succession de bandes épaisses et de bandes fines verticales, où le liquide tombe respectivement plus vite et plus lentement que l'écoulement moyen. Les bandes fines sont alors des lieux propices à la rupture du rideau. Cet effet déstabilisant dû à la présence de polymères en solution est à comparer à l'effet stabilisant trouvé par Becerra et Carvalho [2] indiquant une diminution du débit minimum de formation d'un rideau avec la concentration en polymère.

### Références

1. D. R. BROWN, A study of the behaviour of a thin sheet of moving liquid, *J. Fluid Mech.*, **10**, 297-305 (1961).
2. M. BECERRA AND M. S. CARVALHO, Stability of viscoelastic liquid curtains, *Chem. Eng. and Process.*, **50**, 445-449 (2011).

## Etude Magnétohydrodynamique des écoulements soumis à un forçage électromagnétique

M.Pereira & C.Gissingner, S. Fauve

Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8550, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 24 rue lhomond 75005 Paris  
mpereira@lps.ens.fr

Lorsqu'un fluide conducteur de l'électricité (dans notre cas un métal liquide) est soumis à un champ magnétique variable, la force de Laplace due aux courants induits met en mouvement ce fluide. Un champ magnétique sous la forme d'une onde progressive (champ glissant) permet donc le pompage du fluide : c'est le principe des pompes électromagnétiques (PEM) à induction, utilisées par exemple dans les circuits de refroidissement secondaire de certaines centrales nucléaires.

Plusieurs comportements observés dans les PEM restent encore largement incompris. Par exemple, lorsque la vitesse du champ glissant est trop élevée, le fluide peut brutalement décrocher d'un régime de quasi-synchronisme avec le champ glissant, ce qui entraîne une forte diminution du débit.

Cette étude porte donc sur l'étude expérimentale d'un écoulement de métal liquide dans un tore soumis à un champ magnétique glissant dans la direction orthoradiale, où nous avons caractérisé la dynamique des écoulements turbulents engendrés. Les mesures de vélocimétrie Doppler acoustique, ainsi que les mesures à l'aide de sondes potentielles, indiquent que l'évolution du fluide est contrôlée par un phénomène d'expulsion de flux magnétique au sein du canal, en bon accord avec nos prédictions théoriques. En outre, pour certains paramètres il est possible d'observer des régimes instables, associés à des renversements de l'écoulement au sein du canal. L'étude des propriétés statistiques du signal enregistré révèle notamment la présence d'un bruit en  $1/f$  dans le spectre de puissance.

### Références

1. A. Gailitis et al., "Instability of homogeneous velocity distribution in an induction-type MHD machine", *Magnitnaya Gidrodinamika*, March 1975.
2. P. Rodriguez Imazio & C. Gissingner & S. Fauve, "Instability in electromagnetically driven flows", *Physics of Fluids*, 2016.
3. Hideo Araseki et al., "Magnetohydrodynamic instability in annular linear induction pump", Part 1 : Experiment and numerical analysis, *Nuclear Engineering and Design*, July 2003.
4. H. Kamkar & H. K. Moffatt, "A dynamic runaway effect associated with flux expulsion in magnetohydrodynamic channel flow", *Journal of fluid mechanics*, October 1981.

# Une dynamo équatoriale en écoulement de Taylor-Couette sphérique.

F. Marcotte<sup>1</sup> & C. Gissinger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MAG (ENS/IPGP), LRA, Département de Physique de l'Ecole Normale Supérieure

<sup>2</sup> LPS, Département de Physique de l'Ecole Normale Supérieure

marcotte@lra.ens.fr

Nous présentons un nouveau scénario pour l'amplification du champ magnétique dans les intérieurs planétaires où un fluide conducteur est confiné entre deux coquilles sphériques en rotation différentielle (écoulement de Couette sphérique), lorsque un rapport d'aspect fin est considéré. Ainsi que le prévoit le critère de Rayleigh, une instabilité hydrodynamique primaire apparaît dans la région de l'équateur lorsque le moment angulaire de l'écoulement décroît suffisamment vite dans la direction radiale. Le nouvel état de base est caractérisé par des paires de vortex toroidaux contra-rotatifs et axisymétriques (les vortex de Taylor), semblables à ceux observés en écoulement de Couette cylindrique. Nous caractérisons la bifurcation sous-critique de la dynamo engendrée par cet écoulement, et étudions son évolution à mesure que des instabilités hydrodynamiques secondaires modifient cet état de base, avec l'apparition de vortex modulés dans la direction azimuthale. Dans le régime turbulent, nous montrons que le nombre de Reynolds magnétique critique semble atteindre une valeur constante. L'influence de la rotation globale sur le seuil dynamo et les implications de ces résultats pour les intérieurs planétaires sont finalement présentés.

## Références

1. S. Chandrasekhar, Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability (Clarendon, Oxford, 1961).
2. C. Gissinger, Phys. Fluids, 26, 044101 (2014).
3. C. Guervilly and P. Cardin, Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 104, 221 (2010).
4. P. Laure, P. Chossat, and F. Daviaud, in Dynamo and Dynamics : A Mathematical Challenge, Nato Science Series II Vol. 26 (Springer, Berlin, 2000), pp. 17-24.
5. C. Nore et al., Phys. Fluids 24, 094106 (2012).
6. A. Willis and C. Barenghi, Astron. Astrophys. 393, 339-343 (2002).



## Instabilities in electrically conducting fluids driven by rotating magnetic fields

K. Sandeep Reddy<sup>1</sup>, Christophe Gissinger<sup>1</sup> & Stephan Fauve<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8550, 24 rue Lhomond 75005 Paris, France

ksreddy@lps.ens.fr

Rotating or alternating magnetic fields are used for non-intrusive flow control of liquid metals especially in metallurgy [1]. Currents are induced in electrically conducting fluids when subjected to rotating magnetic fields, generating a body force which drives the fluid [2]. We consider a cylindrical annulus of electrically conducting fluid, which is driven by rotating magnetic field. We perform numerical simulations to study the stalling of the flow occurring at high wave speed of the rotating magnetic field. The magnetic Reynolds number in our study is based on the speed of the wave [3]. The effects of different parameters like the Hartmann number, hydrodynamic Reynolds number, Prandtl number, and the wavenumber of the rotating magnetic field on the stalling of the flow are studied. We also present various time averaged quantities like the azimuthal flow-rate, volume averaged components of velocity and magnetic field, etc., for different aforementioned parameters. An objective of this study is to facilitate the development of an experimental setup similar to Pereira *et al.* [4] to observe stalling of the flow at high magnetic Reynolds number.

### Références

1. Davidson, P. A., *Magnetohydrodynamics in materials processing*. Annu. Rev. Fluid Mech., **31**, pp. 273-300 (1999).
2. Moffatt, H. K., *Rotation of a liquid metal under the action of a rotating magnetic field*. MHD-Flows and Turbulence (ed. H. Branover & A. Yakhot), pp. 45-62 (1980). Israel Universities Press.
3. Gissinger, C., Imazio, P. R., and Fauve S., *Instabilities in electromagnetically driven flows : part I*, in press Phys. Fluids (2016).
4. Pereira, M., Gissinger, C., and Fauve S., *Etude Magnétohydrodynamique des écoulements soumis à un forçage électromagnétique*, manuscript in preparation (2016).

## Instabilité d'une suspension de particules non browniennes oscillant horizontalement.

Y.L. Roht<sup>1,2</sup>, J-P. Hulin<sup>1</sup>, G. Gauthier<sup>1</sup>, D. Salin<sup>1</sup>, R. Chertcoff<sup>2</sup>, H. Auradou<sup>1</sup> & I. Ippolito<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Univ Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Lab FAST, Bât 502, Campus Univ, Orsay, F-91405 (France).

<sup>2</sup> Grupo de Medios Porosos, Facultad de Ingeniería, Paseo Colón 850, 1063, Buenos Aires (Argentina).

lucreroht@gmail.com

En faisant osciller une suspension isodensité de particules sphériques non browniennes dans une cellule de Hele-Shaw rectangulaire d'épaisseur allant de 10 à 25 diamètres de billes, nous avons observé des bandes transverses régulièrement espacées sur toute la longueur de la cellule.

Ces bandes correspondent à des variations de la concentration locale des particules ; elles sont observées pour des suspensions denses de fraction volumique variant entre 25 et 37 %, pour des amplitudes millimétriques du déplacement du fluide et pour des périodes des oscillations de l'écoulement allant jusqu'à plusieurs secondes. Plusieurs formes de variations du débit d'écoulement au cours du temps ont été comparées (sinusoïdes, triangles, carrés).

La longueur d'onde des bandes dépend peu de la largeur ou de la longueur de la cellule mais elle augmente de  $\sim 1$  à  $\sim 2$  mm lorsque l'épaisseur passe de 0,4 à 1 mm. Une augmentation de la viscosité du fluide porteur ainsi qu'un faible contraste de densité entre les particules et ce fluide influencent peu la longueur d'onde mais réduisent la gamme de valeurs de la période ou de l'amplitude de l'écoulement pour lesquelles elles sont observées.

Nos résultats expérimentaux suggèrent l'importance, dans cette l'instabilité, des renversements du sens de l'écoulement qui se produisent lors des oscillations. Au cours du renversement, on peut en effet attendre une irréversibilité du mouvement des particules due à leurs interactions et conduisant à des effets non linéaires ; comme il est effectivement observé, de tels effets n'apparaissent qu'au delà d'une fraction volumique minimale de particules.

## Destabilisation et cratérisation d'un lit granulaire immergé par force de bouée

Eric Herbert<sup>1</sup>, Cyprien Morize<sup>2</sup>, Aurelie Louis-Napoleon<sup>3</sup>, Alban Sauret<sup>4</sup>, Christophe Goupil<sup>1</sup> & Yves D'Angelo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> DyCoE Team, Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain, LIED UMR 8236, Université Paris Diderot, Paris, France

<sup>2</sup> FAST Lab, Orsay, FRANCE

<sup>3</sup> National Institute for Applied Sciences INSA/CORIA UMR 6614, Normandy University, St Etienne du Rouvray, France

<sup>4</sup> SVI, CNRS/Saint-Gobain, Aubervilliers, France

[eric.herbert@univ-paris-diderot.fr](mailto:eric.herbert@univ-paris-diderot.fr)

Dans le noyau terrestre ou les chambres magmatiques apparaît une différenciation des cristaux due à la compétition entre sédimentation et ré-entraînement de ces cristaux en présence de convection. Dans des régimes convectifs très turbulents il a été exploré la remise en suspension par viscosité de particules plus lourdes que le liquide[1] dans lequel elles baignent ou le retard à la sédimentation[2] Nous explorons ici un autre mécanisme dans lequel le fluide est au repos et les grains sont remis en suspension par effet de bouée.

Le dispositif expérimental consiste en une cuve rectangulaire en PMMA (200 mm de large et 17 mm de profondeur) remplie d'un mélange d'eau et de  $\text{CaCl}_2$  pour contrôler finement la densité. Des grains en polystyrène de diamètre  $250 \mu\text{m}$  sont ensuite ajoutés et en sédimentant, forment une couche homogène de grains, sous la forme de loose random packing de hauteur  $h$  au fond de la cuve. La température du fond de la cuve peut être localement élevée, générant une force de bouée à cet endroit.

Avec un choix judicieux de paramètres, le lit granulaire peut être destabilisé par ce forçage thermique localisé et la force de bouée associée. La destabilisation est mise en évidence par l'apparition brutale d'un panache convectif correspondant à l'entraînement dans le volume des grains composants le lit. Le temps de destabilisation trouvé est purement conductif et correspond à  $\tau \propto h^2$ , ce qui est le signe que le lit de grain semble se comporter comme une couche conductrice purement passive. Ce point est un argument fort en faveur d'une approche liquide (non Newtonien) d'une modélisation numérique de la destabiliation.

Une fois le panache initial déclenché, l'érosion du lit est continue et fini par mettre à nu le fond de la cuve. Le lit formant alors une forme typique de cratère. Tous les grains composant préalablement le cratère sont remis en suspension. Le cratère prend finalement un aspect stationnaire, les grains qui sédimentent en permanence à l'interface étant immédiatement remis en suspension à proximité du forçage à haute température.

Le suivi de l'interface au cours du temps avant la destabilisation a montré que celle-ci ne correspondait pas à l'expansion thermique mais au contraire décroissait. Il est donc observé un échappement du liquide interstitiel et donc une réorganisation des grains. Nous discuterons finalement l'utilisation de cette propriété pour prédire le moment du déclenchement indépendamment du début effectif du orçage thermique.

## Références

1. SOLOMATOV, V. S., OLSON, P. STEVENSON, D. J, Entrainment from a bed of particles by thermal convection. *Earth and Planetary Science Letters*, **120**, 387–393 (1993).
2. LAVOREL, G. LE BARS, Sedimentation of particles in a vigorously convecting fluid *Phys. Rev. E*, **80**, 046324 (2009).

# Incorporation de fluide dans un matériau granulaire sec en écoulement

Guillaume Saingier, Alban Sauret & Pierre Jop

Surface du Verre et Interfaces, CNRS/Saint-Gobain, 33 quai Lucien Lefranc, 93303 Aubervilliers, France  
guillaume.saingier@saint-gobain.com

La conception de nombreux matériaux de construction (béton, mortier, plâtre) nécessite de mélanger une matière première, sous forme de poudre ou de granulats, avec un liquide (eau, additif liquide, ...). Lorsque la quantité de liquide est importante, une suspension est obtenue. Par contre, l'incorporation de plus faibles quantités de fluide crée localement des ponts capillaires entre les grains, générant de la cohésion dans le matériau et pouvant être source d'hétérogénéités pouvant modifier l'état final du système (apparition de bulles, agrégation des grains, distribution spatiale du liquide) [1]. Dans ce cadre, notre étude vise à mieux comprendre les mécanismes physiques régissant la transition d'un matériau granulaire sec à un matériau granulaire partiellement saturé.

De nombreux travaux ont étudié la répartition et la dynamique du liquide dans un matériau divisé. Cependant, la plupart de ces observations sont faites dans des situations statiques où le liquide interagit avec le matériau granulaire comme dans un empilement poreux [2,3].

Nous nous proposons ici d'étudier le mélange grains/liquide au moyen d'une expérience modèle d'incorporation de liquide dans un matériau granulaire sec en écoulement. Le dispositif expérimental est un plan incliné rugueux quasi-2D de largeur  $L=12$  mm. Le matériau granulaire, composé de billes de verre de granulométrie contrôlée, est délivré à un débit constant et réglable. Le fluide est injecté à l'extrémité inférieure du plan, à pression ou débit imposé, afin d'imprégner le matériau granulaire.

Lorsque les grains entrent en contact avec le liquide, un agrégat humide se forme sur toute la largeur du canal et vient entraver l'écoulement. Les grains sont alors piégés par ce barrage de grains humides sur le plan incliné, entraînant la formation d'un écoulement sur tas sec qui interagit avec l'agrégat et entretient sa croissance. Nous avons étudié la dynamique de croissance ainsi que la composition et la morphologie de l'agrégat en fonction de différents paramètres expérimentaux (angle d'inclinaison, débit de grains, taille de grains). La dynamique de croissance en logarithme du temps, également observée dans la formation de tours granulaires [4], diffère nettement de l'imprégnation capillaire dans un matériau granulaire statique. La cinétique des grains permet en effet de déplacer le liquide au-delà des échelles atteignables par la capillarité.

## Références

1. S. HERMINGHAUS, Dynamics of wet granular matter, *Adv. Phys.* **54** 221-244 (2005).
2. M. SCHEEL, R. SEEMAN, M. BRINKMAN, M. DI MICHIEL, A. SHEPPARD, B. BREIDENBACH & S. HERMINGHAUS, Morphological Clues to Wet Granular Pile Stability, *Nature Materials* **7**, 189-193 (2008).
3. M. REYSSAT, L. Y. SANGUE, E. A. VAN NIEROP & H. A. STONE, Imbibition in layered systems of packed beads, *Europhys. Lett.* **86**, 56002 (2009).
4. F. PACHECO-VÁZQUEZ, F. MOREAU, N. VANDEWALLE & S. DORDOLO, Sculpting sandcastles grain by grain : Self-assembled sand towers, *Phys. Rev. E* **86**, 051303 (2012).

## Instabilités grande échelle d'écoulements hélicitaires

Alexandre Cameron<sup>1</sup>, Alexandros Alexakis<sup>1</sup> & Marc-Étienne Brachet<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique de l'École Normale Supérieure associé au CNRS et aux Universités Paris 6 et 7, 24 Rue Lhomond, 75237 Paris Cedex 05, France.

`alexandre.cameron@ens.fr`

Depuis le milieu du siècle dernier [1,2], l'effet alpha est considéré comme un des mécanismes pouvant être à l'origine des champs magnétiques planétaires et solaires. Ce phénomène provenant d'une instabilité magnéto-hydrodynamique, permet d'engendrer un champ magnétique de grande échelle à partir d'un écoulement de petite échelle. Étant donnée la forte analogie entre l'équation d'évolution du champ magnétique et l'équation d'évolution du champ de vorticité, U. Frisch a prolongé l'étude de cet effet dans un cadre purement cinématique [3,4]. Il a ainsi pu prouver théoriquement qu'il existait un effet alpha cinétique anisotrope (AKA) et exhiber un exemple numérique de champs de vitesse vérifiant les hypothèses de l'effet AKA.

Avec des méthodes de développement en série de Floquet, nous avons effectué des simulations numériques qui ont permis de reproduire les résultats de l'effet AKA. Nous avons poursuivi l'étude d'instabilité grande échelle pour d'autres champs de vitesse. Nous avons étudié principalement les écoulements de Roberts et Arnold-Beltrami-Childress (ABC). Ces deux champs de vitesses ne satisfont pas aux conditions énoncées par U. Frisch mais ont tout de même une instabilité grande échelle. En revanche, contrairement à l'effet AKA où le taux de croissance de l'instabilité est proportionnel au nombre d'onde, l'instabilité engendrée par les écoulements de Roberts ou ABC est proportionnelle au carré du nombre d'onde.

### Références

1. M. STEENBECK AND F. KRAUSE AND K.-H. R DRLER Berechnung der mittleren Lorentz-Feldst rke für ein elektrisch leitendes Medium in turbulenter, durch Coriolis-Kräfte beeinflusster Bewegung *Zeitschrift f r Naturforschung A* (1966)
2. HENRY K. MOFFATT Field Generation in Electrically Conducting Fluids *Cambridge University Press* (1978)
3. U. FRISCH AND Z. S. SHE AND P. L. SULEM Large-scale flow driven by the anisotropic kinetic alpha effect *Physica D : Nonlinear Phenomena*, **28**, 382-392 (1987)
4. U. FRISCH AND Z. S. SHE AND P. L. SULEM Large-scale flow driven by the AKA effect - Nonlinear regime *Fluid Dynamics Research*, **3**, 262-269 (1988)

# Instabilités secondaires dans la convection de Rayleigh-Bénard pour un fluide non-Newtonien

T. Varé<sup>1</sup> & C. Nouar<sup>1</sup>

LEMETA, UMR 7563 CNRS-Université de Lorraine, 2 Avenue de la Forêt de Haye, TSA 60604 54516  
Vandoeuvre lès Nancy Cedex  
thomas.vare@univ-lorraine.fr

Dans des articles récents [1] et [2], le problème de la convection de Rayleigh-Bénard pour un fluide non-Newtonien rhéofluidifiant a été considéré moyennant une analyse faiblement non linéaire. La compétition entre les différents motifs de convection au voisinage du seuil de la bifurcation primaire a été examinée en fonction des paramètres rhéologiques et de la conductivité thermique des parois. Il apparaît que le caractère rhéofluidifiant favorise une convection sous forme de rouleaux contrairement à ce qui a été précédemment mentionné dans la littérature [3]. En s'écartant du seuil d'instabilité, les modes dont le nombre d'onde  $k$ , appartient à une bande  $[k_c - \delta k, k_c + \delta k]$  avec  $\delta k = \sqrt{\epsilon}/\xi_0$  deviennent instables [4]. Ceci se traduit par une modulation spatiale de la solution stationnaire, comme le décrivent les équations de Ginzburg-Landau. Ici,  $\epsilon$  est l'écart au seuil d'instabilité,  $k_c$  le nombre d'onde critique et  $\xi_0$  la longueur de cohérence.

La présente communication a pour objectif d'étudier la stabilité de ces solutions stationnaires vis à vis de perturbations infinitésimales de grandes longueurs d'onde pour un fluide de Carreau rhéofluidifiant. Il s'agit de perturbations en amplitude et en phase [5], [6].

Dans le cas de parois infiniment conductrices, la convection s'organise sous forme de rouleaux. La rhéologie du fluide n'intervient pas dans les instabilités de dilatation / compression (Eckhaus) et de torsion (zig-zag). Elle a par contre un rôle significatif dans l'instabilité d'amplitude du type "Rouleaux-croisés". Les résultats montrent que l'augmentation du degré de rhéofluidification s'accompagne d'une réduction du domaine de stabilité des rouleaux.

Dans le cas de parois de conductivité thermique finie, la convection s'organise en carrés. L'augmentation du degré de rhéofluidification conduit en revanche à un élargissement du domaine de stabilité des carrés. A noter que dans le cas newtonien, nos résultats sont en parfait accord avec la littérature [7], [8]. Cette étude se poursuit avec l'analyse de stabilité des hexagones dans le cas d'un fluide de Carreau thermodépendant.

## Références

1. M. Bouteraa, C. Nouar, E. Plaut, C. Métivier, A. Kalck. Weakly nonlinear Rayleigh-Bénard convection in shear-thinning fluids : Nature of the bifurcation and pattern selection. *J. Fluid. Mech.* 767, 269-734 (2015).
2. M. Bouteraa, C. Nouar. Weakly nonlinear analysis of Rayleigh-Bénard convection in a non-Newtonian fluid between plates of finite conductivity : Influence of shear-thinning effects. *Phys. Rev. E.* 92, 063017-1 063017-13 (2015).
3. Pattern selection in thermal convection of non-Newtonian fluids. *J. Fluid. Mech.* 600, 500-550 (2011).
4. F. Charru. *Instabilités hydrodynamiques*. EDP Sciences, (2007)
5. R. Hoyle. *Pattern formation. An introduction to methods*. Cambridge, (2006).
6. C. Misbah. *Dynamiques complexes et morphogénèse. Introduction aux sciences non linéaires*. Springer, (2011).
7. F. H. Busse, J. A. Whitehead. Instabilities of convection rolls in a high Prandtl number fluid. *J. Fluid. Mech.* 47, 305-320 (1971)
8. B. Holmedal, M. Tveitereid, E. Palm. Planform selection in Rayleigh-Bénard convection between finite slabs. *J. Fluid. Mech.* 537, 255-270 (2005)

# The influence of fluid viscoelasticity on steady streaming generated by an oscillating cylinder

Seyed-Amir Bahrani<sup>1</sup>, Maxime Costalonga<sup>1</sup>, Laurent Royon<sup>1</sup> & Philippe Brunet<sup>1</sup>

Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC), UMR 7057, CNRS, F-75013, Paris, France

[philippe.brunet@univ-paris-diderot.fr](mailto:philippe.brunet@univ-paris-diderot.fr)

Oscillations of bodies immersed in fluids are known to generate secondary steady flows (streaming) [1]. These flows have strong similarities with acoustic streaming induced by sound and ultrasound waves, although such flow can be generated if the fluid is incompressible. Such streaming is actually similar to Rayleigh acoustic streaming [2] induced in the vicinity of an oscillating boundary layer around the body, due to the non-linear interactions between first order viscous forces and second order inertial ones. Lighthill [3] modeled these volume forces as results of Reynolds stresses near the boundary layer, induced by the non-zero acoustic momentum averaged over one period. As a result, stationary vortex flows are generated both inside and outside the boundary layer. Such streaming flow have potential applications to fluid homogenization and mixing, to heat transfer enhancement, to particle sorting in microfluidics or fluid pumping.

The generation of such secondary flows was theoretically investigated first by Rayleigh, then later by Batchelor [4] and Schlichting [5] in the context of oscillating boundary layers. Let us consider an object moving at velocity  $U = A \exp i\phi t$  within a fluid, forcing the fluid particles to follow this motion. Due to the no-slip boundary condition along the body, within a layer of typical thickness  $\delta = \frac{2\nu}{\omega}$ , the vorticity is created within this boundary layer. By conservation of momentum, this vorticity induces large-scale vortices outside the boundary layer.

A typical situation is that of an cylinder oscillating perpendicular to its axis, generating two pairs of counter-rotating vortices due to the transfer of vorticity from a inner boundary layer. While most studies so far investigated the situation of newtonian fluids, it is often required to achieve mixing in fluids with complex, non-newtonian properties for various practical applications [6]. Here, we consider the situation of a viscoelastic fluid : by using PIV, we carry out an experimental study of the flow structure and magnitude over a range of amplitude and frequency. As shown previously qualitatively [7,8,9], we evidence the effect of elasticity in streaming by systematic comparison with a purely newtonian case.

## Références

- [1] N. Riley, Steady streaming, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **33**, 43-65 (2001).
- [2] Lord Rayleigh, On the circulation of air observed in Kundt's tube, and on some allied acoustical problems, *Philos. Trans. R. Soc. London*, **175**, 1-21 (1884).
- [3] J. Lighthill, Acoustic streaming, *J. Sound Vib.*, **61**, 391-418 (1978).
- [4] G. K. Batchelor, *An introduction to fluid dynamics*, Cambridge University Press (1967).
- [5] H. Schlichting, *Boundary layer theory*, Mac Graw-Hill Book Company, 7th Edition (1979).
- [6] T. J. Ober, D. Foresti and J. A. Lewis, Active mixing of complex fluids at the micro scale, *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.*, **112**, 12293-12298 (2015).
- [7] C. F. Chang and W. R. Schowalter, Flow near an oscillating cylinder in dilute viscoelastic fluid, *Nature*, **252**, 686-688 (1975).
- [8] C. F. Chang and W. R. Schowalter, Secondary flow in the neighborhood of a cylinder oscillating in a viscoelastic fluid, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **6**, 47-67 (1979).
- [9] G. Böhme, On steady streaming in viscoelastic liquids, *J. non-Newt. Fluid Mech.* **44**, 149-170 (1992).

## Contrôle de la force musculaire par une commande non-linéaire

Maillard A.<sup>1</sup>, Bakir T.<sup>1</sup> & Binczak S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Bourgogne Franche-Comté, Arts et Métiers - Laboratoire LE2I UMR 6306 Ailes des sciences de l'ingénieur BP 47870 21078 Dijon Cedex  
 stbinc@u-bourgogne.fr

L'électromyostimulation (EMS) consiste à envoyer des impulsions électriques à travers un muscle à l'aide d'électrodes de surface. Ces impulsions induisent des contractions musculaires sans aucune intervention du système nerveux. Depuis de nombreuses années, les athlètes et les kinésithérapeutes utilisent les EMS dans le reconditionnement musculaire. Les EMS aident à augmenter les performances, à retrouver l'usage d'une fonction musculaire ou encore à stimuler des muscles déficients. Cependant, l'efficacité des EMS est limitée par la fatigue induite. C'est pourquoi, divers travaux tentent de modéliser les effets des stimulations sur la force développée et sur la fatigue musculaire générée. La modélisation est réalisée par l'utilisation de modèles mathématiques prenant en compte les paramètres physiologiques qui, d'une personne à une autre varient [1], ce qui rend cette tâche difficile.

Le système dynamique non-linéaire proposé dans l'étude [2, 3] utilise un modèle à protocole spécifique qui a prouvé sa fiabilité à résoudre ces difficultés de modélisation de par ces bons résultats et de par la présence du lien force-fatigue dans le modèle. Ces raisons ont conforté notre choix d'utiliser ce modèle pour notre étude. Ce modèle a aussi été utilisé pour analyser l'influence de la fréquence de stimulation comme variable de contrôle sur la force et la fatigue [4-6]. Actuellement, les systèmes d'EMS n'adaptent pas les paramètres de stimulation automatiquement et ne prennent pas en compte les paramètres physiologiques. Pour adapter ces paramètres aux réponses musculaires et optimiser les séances de rééducation, nous proposons d'appliquer une méthode de contrôle non-linéaire à un modèle physiologique incluant les effets de la fatigue musculaire [7, 8]. Ce contrôle non-linéaire est conçu pour permettre le contrôle de la force musculaire tout en contrebalançant l'influence de la fatigue. Le contrôle agit alors sur deux paramètres : le temps d'inter-pulsation des contractions et l'amplitude des impulsions électriques. L'analyse des résultats permet de conclure sur l'efficacité obtenue et d'en définir les limites.

### Références

1. Z. Li, M. Hayashibe, C. Fattal and D. Guiraud, "Muscle fatigue tracking with evoked EMG via recurrent neural network : toward personalized neuroprosthetics", *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2014, 9 (2), 38-46.
2. J. Ding, A. S. Wexler and S. A. Binder-Macleod, "A predictive fatigue model-I : Predicting the effect of stimulation frequency and pattern on fatigue", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation*, vol 10, no 1 March 2002.
3. J. Ding, A. S. Wexler, and S. A. Binder-Macleod, "A predictive fatigue model-II : Predicting the effect of resting times on fatigue", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation*, vol 10, no 1 March 2002.
4. Li-Wei Chou, Jun Ding, Anthony S. Wexler, Stuart A. Binder-Macleod, "Predicting optimal electrical stimulation for repetitive human muscle activation", *International Congress Series 15 (2005)* 300-309.
5. Jun Ding, Anthony S. Wexler, Stuart A. Binder-Macleod, "Mathematical models for fatigue minimization during functional electrical stimulation", *International Congress Series 13 (2003)* 575-588.
6. Jun Ding, Anthony S. Wexler, Stuart A. Binder-Macleod, "A mathematical model that predicts the force-frequency relationship of human skeletal muscle", *Wiley Periodicals, Inc. Muscle Nerve* 26 (2002) 477-485.
7. A. Fettweis, J-L. Massey, J.W. Modestino and M. Thoma, "Alberto Isidori : Nonlinear Control Systems", *Communications and Control Engineering Series*, 1985.
8. A. Maillard, M. Yochum, T. Bakir, S. Binczak, "On the control of a muscular force model including muscular fatigue", *Neural Engineering IEEE EMBS*, 2015.



## Propagation non linéaire d'une bulle d'embolie dans le réseau hydraulique des feuilles

Bienaimé Diane<sup>1</sup> & Marmottant Philippe<sup>1</sup>

Laboratoire Interdisciplinaire de Physique  
diane.bienaime@univ-grenoble-alpes.fr

Les motifs complexes des veines qui ornent les feuilles des plantes terrestres sont parmi les plus importants en biologie. Ils conduisent la sève du tronc ou de la tige jusqu'au mésophyle, où la feuille génère par évaporation des dépressions très fortes à l'origine de la montée de la sève dans l'arbre. La sève coule alors dans ce réseau hydraulique sous des pressions négatives, allant jusqu'à moins 200 bars. Dans ces conditions, l'eau est dans un état métastable et peut caviter. L'apparition d'une bulle, appelée embolie, coupe l'approvisionnement en sève et provoque à terme la mort de la feuille. Comprendre la façon dont les plantes protègent leur réseau contre la rupture hydraulique a d'importantes conséquences, tant écologiques qu'en bioingénierie.

Une nouvelle méthode optique nous permet d'observer directement et facilement l'évolution dynamique de l'embolie dans des feuilles fraîchement prélevées et soumises à un stress hydriques. En caméra rapide, nous avons pu mettre en évidence que cette embolie n'est pas continue, contrairement au taux d'évaporation qui est à l'origine du phénomène. En effet, les événements d'invasion par l'air sont brutaux et suivis d'une période de latence.

En réalité, le réseau des veines de la feuille, s'il semble d'un seul tenant à l'œil nu, se constitue d'une multitude de courts canaux, appelés trachéides, reliés entre eux par des valves microscopiques, les ponctuations. En fonctionnement normal, les ponctuations permettent le passage de la sève. En présence d'une bulle, elles empêchent la propagation d'air d'une trachéide à l'autre grâce à leur très petit diamètre. Cependant, quand la différence de pression entre deux trachéides excède celle nécessaire au passage du ménisque à travers la ponctuation, l'air se propage.

Est-ce que ce comportement à seuil des ponctuations dû à la loi de Laplace suffit à expliquer l'évolution par à-coups de l'embolie ?

Pour répondre à cette question, nous avons simulé la propagation à l'aide d'un modèle simple. En utilisant l'analogie électrique, nous assimilons chaque trachéide à une résistance couplée à une capacité afin de modéliser l'élasticité des canaux. Nous lui associons un volume d'eau initialement égal au volume du canal relaxé, et un volume d'air initialement nul. Les ponctuations reliant deux canaux sont des résistances tant que ces canaux comportent de l'eau. Quand l'un d'eux est rempli d'air, la ponctuation se comporte comme un interrupteur ouvert. Si la différence de tension à ses bornes excède le seuil défini par la loi de Laplace, elle permet le passage de l'air.

À terme, nous testerons la résistance à l'embolie des différentes architectures observées dans les feuilles. Nous comparerons ces résultats aux expériences réalisées sur les feuilles naturelles. Cette étude de la dynamique de l'embolie permettra de mieux comprendre son impact sur la perte de fonctionnalité de la feuille.

## Acoustique et vibration des mousses liquides

Elias<sup>1</sup>, Pierre<sup>1,2</sup>, Derec<sup>1</sup>, Guillermic<sup>2</sup>, Kosgodagan<sup>1</sup>, Saint-Jalmes<sup>2</sup>, Drenckhan<sup>3</sup>, Gay<sup>1</sup>, Dollet<sup>2</sup> & Leroy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CNRS/Université Paris-Diderot/UPMC, laboratoire MSC, Paris, France

<sup>2</sup> CNRS/Université Rennes 1, IPR, Rennes, France

<sup>3</sup> CNRS/Université Paris-Sud, LPS, Orsay, France

`florence.elias@univ-paris-diderot.fr`

Comment le son se propage-t-il dans une mousse? La réponse acoustique dépend fortement de la structure de la mousse, alors que la longueur d'onde acoustique est très grande devant la taille des bulles.

Une mousse liquide est constituée de bulles de gaz concentrées dans une matrice liquide. Les bulles sont séparées par des films fins, stabilisés par des surfactants. Aux arêtes des bulles, les films se rejoignent en des micro-canaux appelés bords de Plateau. La taille des bulles varie de  $10^{-5}$ m à  $10^{-2}$ m [1].

Des expériences récentes ont montré l'existence de deux régimes de propagation acoustique peu ou pas dispersifs [2], [3], [4]. Dans le premier régime, à basse fréquence ou petite taille de bulles, la célérité de l'onde, de l'ordre de 30 à 50 m.s<sup>-1</sup>, est donnée par la loi de Wood  $c_W = 1/\sqrt{\chi\rho}$  où  $\chi$  est la compressibilité du gaz et  $\rho$  est la masse volumique de la mousse [5]. Dans le deuxième régime elle est de l'ordre de 250 m.s<sup>-1</sup>, comme si seul le liquide contenu dans les films contribuait à la masse inertielle de la mousse. La transition entre les deux régimes se fait à une fréquence  $f \sim R^{-1.5}$  où  $R$  est le rayon moyen des bulles de la mousse. Cette fréquence de résonance résulte d'un couplage entre la vibration des films de savon et celle des bords de Plateau, qui contiennent la majeure partie de la phase liquide [4]. Si la structure de la mousse intervient dans la réponse acoustique de la mousse, c'est donc par l'intermédiaire de la vibration du squelette liquide en réponse à un forçage acoustique : la taille des bulles doit être comparée non pas à la longueur d'onde acoustique, mais à la longueur d'onde capillaire sur les interfaces liquides à la fréquence de forçage acoustique.

Comment vibrent les interfaces liquides de la mousse? Dans le cas d'un film de savon isolé soumis à une vibration transverse, la vitesse de phase est fixée par la tension de surface de la solution savonneuse et par l'inertie du liquide dans le film et de l'air environnant; l'atténuation de l'onde de vibration se fait par dissipation visqueuse dans l'air [6]. Lorsque les films de savon se rejoignent en un micro-canal, l'inertie du liquide contenu dans le bord de Plateau doit être prise en compte, ainsi que les forces de tension superficielle exercées par les films sur le bord de Plateau. La propagation d'une onde de vibration transverse le long d'un bord de Plateau se fait alors selon deux régimes : un régime à basse fréquence dominé par la vibration des films adjacents (alourdis par l'air environnant), et un régime à plus haute fréquence où l'inertie du bord de Plateau domine.

Dans cet exposé, nous dresserons un panorama des résultats acquis récemment dans le cadre d'une approche multi-échelle de l'acoustique et des vibrations des mousses liquides. Nous discuterons les pistes qu'il reste à explorer pour compléter la compréhension et nous présenterons les perspectives prometteuses ouvertes par ces travaux.

## Références

1. I. Cantat, S. Cohen-Addad, F. Elias, F. Graner, R. Hohler, O. Pitois, F. Rouyer, A. Saint-Jalmes, *Les mousses, Structure et dynamique*, Belin, 2010, English translation : ed. S. J. Cox, *Foams : Structure and Dynamics*, translated by R. Flatman, Oxford University Press, 2013
2. I. Ben Salem, R.-M. Guillermic, C. Sample, V. Leroy, A. Saint-Jalmes, B. Dollet, *Soft Matter*, 2013, **9**, 1194.
3. J. Pierre, F. Elias, V. Leroy, *Ultrasonics*, 2013, **53**, 622.
4. J. Pierre, B. Dollet, V. Leroy, *Phys. Rev. Lett.*, 2014, **112**, 148307.
5. J. Pierre, R.-M. Guillermic, F. Elias, W. Drenckhan, V. Leroy, *Eur. Phys. J. E.*, 2013, **36**, 113.
6. S. Kosgodagan Acharige, F. Elias, C. Derec, *Soft Matter*, 2014, **10**, 8341.
7. C. Derec, V. Leroy, D. Kaurin, L. Arbogast, C. Gay, F. Elias, *Europhys. Lett.*, 2015, **112**, 34004.

## Un modèle mathématique d'interaction liquide-vapeur

F. James<sup>1</sup> & H. Mathis<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Mathématiques – Analyse, Probabilités, Modélisation – Orléans (MAPMO), Université d'Orléans & CNRS UMR 7349, BP 6759, F-45067 Orléans Cedex 2, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Mathématiques Jean Leray, UMR 6629, CNRS, Université de Nantes, 2 chemin de la Houssinière, BP 92205, 44322 Nantes Cedex 3, France

<sup>3</sup> Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes, UMR 6112, CNRS, Université de Nantes, 2 chemin de la Houssinière, BP 92205, 44322 Nantes Cedex 3, France.

Francois.James@math.cnrs.fr

On propose un modèle mathématique de transition de phase liquide-vapeur en adoptant une description moyennée du phénomène. Chaque état du système suit une même loi d'état non monotone, de van der Waals réduite. Le système, supposé isotherme, est entièrement décrit par son énergie libre de Helmholtz, somme des énergies de tous les états possibles.

Le second principe de la thermodynamique nous amène à construire un problème d'optimisation sous contraintes de l'énergie totale du système. Les conditions d'optimalité du système permettent de retrouver dans un premier temps la règle des phases de Gibbs. Les minima globaux du problème d'optimisation comportent les états purs (liquide ou vapeur), et les états de coexistence, pour lesquels on retrouve la loi des aires de Maxwell. Les états métastables sont également contenus dans cette description, et sont vus comme des minima locaux.

On construit également un système dynamique, basé sur les conditions d'optimalité, qui dissipe l'énergie du système en temps. L'étude des bassins d'attraction du système dynamique nous permet de démontrer que le système capture bien les états d'équilibre voulus en temps long. En particulier, on montre que les états métastables et les états de mélange admettent des bassins d'attraction différents et ne sont distingués que par leur comportement en temps long par rapport à la donnée initiale, ainsi que formulé par exemple dans [2].

Dans [1], on propose d'utiliser ce système dynamique comme une relaxation vers l'équilibre dans un modèle simplifié d'écoulement isotherme. On simule ainsi des phénomènes de cavitation ou de création de goutte. D'autres pistes sont à explorer, par exemple les liens avec les modèles de Cahn-Hilliard.

### Références

1. F. JAMES AND H. MATHIS, A relaxation model for liquid-vapor phase change with metastability, preprint <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01178947>
2. L. LANDAU AND E. LIFSHITZ, *A Course of theoretical physics* Volume 5, Statistical Physics, Pergamon Press (1959-1969)

## Signalisation hydraulique et gravitropisme chez les plantes : de la poroélasticité aux suspensions actives

FORTERRE Yoël

CNRS/Aix Marseille Université

yoel.forterre@univ-amu.fr

Bien qu'elles n'aient pas de système nerveux, les plantes ont développé des mécanismes originaux pour percevoir et répondre à des sollicitations mécaniques comme le vent, le toucher ou la gravité. Nous discuterons du rôle de la mécanique et de l'hydrodynamique dans cette mécano-perception à travers deux questions :

1. Comment les déformations mécaniques sont-elles perçues par les plantes et quel est le rôle des couplages poroélastiques dans la transmission longue-distance de cette perception ?
2. Comment les plantes perçoivent-elles la gravité et comment cette réponse est-elle liée à la nature "granulaire" de leur capteur de gravité à l'échelle cellulaire ? Ces problèmes seront abordés en combinant des expériences sur des systèmes "biomimétiques" simples et des expériences in-situ à l'échelle de la plante ou de la cellule.