



C. Josserand, M. Lefranc & C. Letellier
Éditeurs

Poincaré

Résumés des exposés de la 12^e
Rencontre du Non-Linéaire
Paris 2009



Institut Henri Poincaré

Non-Linéaire Publications

RENCONTRE DU NON-LINÉAIRE

Institut Henri Poincaré, PARIS

11–13 Mars 2009

Nous remercions vivement Michel Broué, Directeur de l'Institut Henri Poincaré, pour son aide à l'organisation de ces *Rencontres* ainsi que la Délégation Générale à l'Armement, le Laboratoire Jean le Rond d'Alembert, le Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules (PhLAM), le Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA) et le CNRS, pour leur soutien matériel et financier.

Le comité scientifique est composé de :

Amandine AFTALION	CMAP — Polytechnique
Yacine AMAROUCHÈNE	CPMOH — Bordeaux
Jean-René CHAZOTTES	CPhT — Polytechnique
Bérengère DUBRULLE	SPEC/CEA — Saclay
John DUDLEY	FEMTO-ST — Besançon
Jean-Christophe GÉMINARD	Lab. Physique — ENS Lyon
Christophe JOSSERAND	Institut J. le Rond d'Alembert — Paris 6
Marc LEFRANC	PhLAM — Lille
Thomas PODGORSKI	LSP — Grenoble
Marc RABAUD	FAST — Orsay
Laurette TUCKERMAN	PMMH — ESPCI, Paris
Massimo VERGASSOLA	Institut Pasteur — Paris

Les *Rencontres annuelles du Non-linéaire* sont organisées par :

Christophe JOSSERAND	Institut J. le Rond d'Alembert — Paris 6
Marc LEFRANC	PhLAM — Lille
Christophe LETELLIER	CORIA — Rouen

Le Colloque *Non-linéarités sur la Terre et dans les étoiles* est organisé par :

Bérengère DUBRULLE	SPEC/CEA — Saclay
Jean-Christophe GÉMINARD	Lab. Physique — ENS Lyon
Christophe JOSSERAND	Institut J. le Rond d'Alembert — Paris 6

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

Non Linéaire Publications
Bât. 510, Université de Paris-Sud, 91495 Orsay cedex

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

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

Renseignements :

rnl@nonlineaire.univ-lille1.fr

Table des matières

Vecteurs de Lyapunov covariants : comment les calculer et ce qu'ils nous apprennent <i>Hugues Chaté</i>	1
Turbulent bifurcations, multistability and slow-dynamics in high-Reynolds-number von Kármán flows <i>A. Chiffaudel, P.-P. Cortet, F. Daviaud, B. Dubrulle, R. Monchaux, F. Ravelet</i>	2
Modélisation de la transition vers la turbulence dans un écoulement en conduite de fluide rhéofluidifiant : approche par calcul d'ondes non linéaires <i>Nicolas ROLAND, Emmanuel PLAUT, Chérif NOUAR</i>	3
Étude de la stabilité d'une nappe visqueuse <i>G. Pfingstag, A. Boudaoud, B. Audoly</i>	4
Instabilité de Rayleigh–Taylor d'un film mince visqueux <i>Laurent Duchemin, Michael Le Bars</i>	5
Saturation inhomogène du gain dans un Laser à Electrons Libres <i>M. Labat, N.Y. Joly, C. Szwej, S. Bielawski, C. Bruni, M-E. Couprie</i>	6
Création de structures dans les paquets d'électrons relativistes d'anneaux de stockage <i>S. Bielawski, C. Evain, C. Szwej M. Hosaka, M. Adachi, S. Kimura, M. Katoh, M. Shimada, T. Hara, A. Mochihashi, T. Takahashi, Y. Takashima</i>	7
Emergence de structures optiques extrêmes par amplification fibrée basée sur une pompe partiellement cohérente <i>Kamal Hammani, Christophe Finot, John M. Dudley, Guy Millot</i>	8
Lasers Raman à fibre : formation du spectre optique <i>Nicolas Dalloz, Pierre Suret, Stéphane Randoux</i>	9
Saturation non linéaire de l'instabilité Raman stimulée <i>Thomas Chapman, Michel Albrecht, Denis Pesme, Stefan Hüller, Wojciech Rozmus</i>	10
Générateur de chaos opto–électronique à double retard pour les télécommunications optiques sécurisées <i>Mourad Nourine, Michael Peil, Laurent Larger</i>	11
Analyse temporelle de dynamiques spatio-temporelles d'un laser <i>Dalila Amroun Aliane, Christophe Letellier, Luc Pastur, Marc Brunel, Hervé Leblond, François Sanchez</i>	12
Instabilités Magnéto-Inertielles <i>Cebbron D., Herreman W., Le Bars M., Le Dizès S., Le Gal P., Maubert P.</i>	13

Dynamo cinématique des ondes inertielles <i>Herreman W., Le Dizès S.</i>	14
Dynamique chaotique de l'écoulement dans un cylindre en précession <i>Meunier Patrice, Lagrange Romain, Nadal François, Eloy Christophe</i>	15
Sensibilité d'un front propagatif aux transitions hydrodynamiques. <i>Simona Bodea, Alain Pocheau</i>	16
Modèle mésoscopique de cristallisation du gypse <i>G. Dumazer, A. Lemarchand</i>	17
Directions de croissance des dendrites cristallines : vers une universalité ? <i>Alain Pocheau, Julien Deschamps, Marc Georgelin</i>	18
Sur les systèmes à événements discrets non linéaires dans l'algèbre des dioïdes <i>S. Hamaci, J-L.Boimond</i>	19
Sur les modèles de type Kohn-Sham avec fonctionnelles d'échange-corrélation LDA et GGA <i>A. Anantharaman, E. Cancès</i>	20
Une horloge circadienne minimale chez l'algue unicellulaire <i>Ostreococcus tauri</i> <i>P.-E. Morant, F. Corellou, Q. Thommen, C. Schwartz, C. Vandermoère, F.-Y. Bouget, M. Lefranc</i>	21
Orbites régulières et transition de phases hors-d'équilibre dans les systèmes avec interactions à longue portée <i>R. Bachelard, C. Chandre, M.-E. Couprie, D. Fanelli, X. Leoncini, S. Ruffo</i>	22
Effets des perturbations spatiales sur la dynamique des fronts <i>F. Haudin, R. G. Elías, M. G. Clerc U. Bortolozzo et S. Residori</i>	23
1D Cahn-Hilliard equation for modulated phase systems <i>Simon Villain-Guillot</i>	24
Ondes non linéaires dans l'expérience de Faraday <i>N. Rojas, M. Argentina, E. Cerda, E. Tirapegui</i>	25
Simulation numérique des ondes de Faraday <i>Périnet Nicolas, Damir Juric, Laurette Tuckerman</i>	26
Comportement critique dans les écoulements ouverts forcés <i>Benjamin Thiria, José Eduardo Wesfreid</i>	27
Instabilité convective en milieu inhomogène : la réponse impulsionnelle dans le sillage sous-critique d'un cylindre. <i>C. Marais, R. Godoy-Diana, D. Barkley, J.E. Wesfreid</i>	28
Etude expérimentale des modes piégés dans un guide d'ondes <i>P. Cobelli, P. Petitjeans, A. Maurel, V. Pagneux</i>	29
Instabilités d'écoulements granulaires bidisperses en cisaillement sur un plan incliné <i>Axelle Amon, Renaud Delannay, Alexandre Valance</i>	30
Dynamique de formation d'un cratère dans un milieu granulaire immergé <i>Germán Varas, Valérie Vidal,, Jean-Christophe Gémard</i>	31

Sédimentation de particules en présence de convection thermique. Application à la cristallisation des chambres magmatiques et à la séparation métal-silicate dans l’océan de magma terrestre.	
<i>Guillaume Lavorel, Michael Le Bars</i>	32
Cascades de bulles à travers une couche mince de fluide non-Newtonien	
<i>Valérie Vidal, Thibaut Divoux, François Soubiran, Jean-Christophe Gémard</i>	33
Formation spontanée d’un réseau de veines	
<i>Paul Dély, C. Szwaj, S. Bielański, T. Nakagaki</i>	34
Oscillation globale de canaux ioniques	
<i>G. Boedec, M. Jaeger, F. Homblé, M. Leonetti</i>	35
L’épidémie de chikungunya : modélisation et stabilité	
<i>D. Moulay, M. Cadivel, M.A. Aziz-Alaoui</i>	36
Couplages de neurones de type Hindmarsh-Rose : de la synchronisation à l’émergence de propriétés	
<i>Nathalie Corson, M.A. Aziz Alaoui</i>	37
Portraits de phase et matrices de Markov pour l’étude des asynchronismes en ventilation non invasive	
<i>H. Rabarimanantsoa, U.S. Freitas, R. Naeck, J.-F. Muir, A. Cuvelier, C. Letellier</i>	38
Identifier le chaos au sein d’une activité cardiaque : le bon objectif ?	
<i>E. Roulin, U. Santos Freitas, C. Letellier</i>	39
Statistiques de la puissance injectée dans une plaque mise en vibration chaotique	
<i>Olivier Cadot, Arezki Boudaoud, Cyril Touzé</i>	40
Mesure, sans contact, des forces agissant sur les protéines dans les microdomaines membranaires.	
<i>Masson, Casanova, Turkcan, Voisinne, Popoff, Vergassola, Alexandrou</i>	41
Flagellar Synchronization and Eukaryotic Random Walks	
<i>Raymond E. Goldstein</i>	42
Quasipattern solutions de l’équation de Swift–Hohenberg 2D	
<i>Gérard Iooss</i>	43
Plaques et coques orthotropes multistables : conception et applications au contrôle de forme via des matériaux électroactifs	
<i>Corrado Maurini, Amâncio Fernandes, Stefano Vidoli, Angela Vincenti</i>	44
Origami capillaire contrôlé par électro-mouillage	
<i>Miguel Piñeira, Benoît Roman, José Bico</i>	45
Spiral crack path in thin sheets	
<i>Victor ROMERO, Benoit ROMAN, Enrique CERDA</i>	46
Les singularités du chaos : doubles plis et fronces dans des systèmes couplés simples	
<i>Jérémy Oden, Serge Bielański, Marc Lefranc</i>	47
La variété de courbure du flot comme squelette des attracteurs chaotiques	
<i>Jean-Marc Ginoux & Christophe Letellier</i>	48

Conditions nécessaires pour que les systèmes de Sprott à un seul point fixe puissent être chaotiques <i>MALASOMA Jean-Marc</i>	49
Echec de la technique de titration du bruit à distinguer un bruit coloré d'un chaos <i>Ubiratan S. Freitas, Christophe Letellier & Luis A. Aguirre</i>	50
Experimental verification of a modified fluctuation-dissipation theorem for a Brownian particle in a non-equilibrium steady state <i>J. R. Gomez-Solano, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Chetrite,, K. Gawedzki</i>	51
Aging and effective temperatures near a critical point <i>Joubaud Sylvain, Petrossyan Artyom, Ciliberto Sergio</i>	52
Signature expérimentale de la thermalisation d'une onde optique lors de la génération de supercontinuum <i>Benoît Barviau, Bertrand Kibler, Antonio Picozzi</i>	53
Transition de phases hors-d'équilibre dans le Laser à Electrons Libres <i>P. De Buyl, R. Bachelard, M.-E. Couprie, G. De Ninno, D. Fanelli</i>	54
Etude expérimentale des implications des marées dans les systèmes planétaires <i>Cyprien Morize, Michael Le Bars, Patrice Le Gal and Andreas Tilgner</i>	55
Waves and solitons in complex plasmas <i>Céline Durniak, Paul Harvey, Dmitry Samsonov, Sergey Zhdanov, Gregor Morfill</i>	56
Acrobaties nonlinéaires des filaments visqueux <i>N. M. Ribe, M. Habibi, Y. Rahmani, D. Bonn</i>	57
Fluage et vieillissement d'un empilement de grains soumis à des cycles contrôlés de température <i>Thibaut Divoux, Hervé Gayvallet, Jean-Christophe Gémard</i>	58
Défauts topologiques (plis) dans les structures cellulaires. De la mue du crabe au croisement de plis en géologie. <i>Nicolas Rivier</i>	59
Turbulence d'ondes à la surface d'un ferrofluide <i>François Boyer, Eric Falcon</i>	60
Impacts durs et mous de liquides et de solides <i>Emmanuel Villermaux</i>	61

Vecteurs de Lyapunov covariants : comment les calculer et ce qu'ils nous apprennent

Hugues Chaté

CEA Saclay

Le théorème d'Oseledec est au coeur des études sur le chaos, notamment pour l'existence et la définition des exposants de Lyapunov. Mais les sous-espaces d'Oseledec associés à chaque exposant en chaque point de l'espace des phases étaient restés inaccessibles jusqu'à récemment. Cette situation faisait que, par exemple, il était très difficile de quantifier la non-hyperbolicité des systèmes (qui est reliée à l'importance des tangences de ces directions le long de la trajectoire).

Grâce à un algorithme original et performant, nous sommes désormais capables de calculer ces directions intrinsèques, ces vecteurs de Lyapunov covariants, qui sont à distinguer des vecteurs de la base orthonormée par la procédure de Gram-Schmit utilisés pour le calcul des exposants, lesquels n'ont pratiquement aucune signification physique.

Après une définition des vecteurs covariants et un exposé de l'algorithme permettant de les calculer, je passerai en revue quelques résultats obtenus récemment grâce à eux :

- détermination opératoire de la variété (inertielle?) sur laquelle évolue la dynamique effective des systèmes dissipatifs à grand nombre de degrés de liberté,
- démonstration que le spectre de Lyapunov contient les modes de la dynamique collective des systèmes dissipatifs globalement couplés,
- mise à jour de notre compréhension des « modes hydrodynamiques de Lyapunov » pour le chaos Hamiltonien.

Turbulent bifurcations, multistability and slow-dynamics in high-Reynolds-number von Kármán flows

A. Chiffaudel¹, P.-P. Cortet¹, F. Daviaud¹, B. Dubrulle¹, R. Monchaux¹, & F. Ravelet¹

CEA Saclay, IRAMIS, Service de Physique de l'État Condensé, CNRS URA 2464, 91191 Gif-sur-Yvette, France
arnaud.chiffaudel@cea.fr

Experimental observations of highly turbulent von Kármán flows are presented. We report the dynamics of “turbulent bifurcations”, i.e. transitions between flows with different (time-averaged) symmetries. Turbulent bifurcations may be supercritical or subcritical. They may also occur sequentially in time, leading to slow-dynamics temporal-patterns.

For $Re > 10^4$, we also report examples of multistability of flow patterns of different symmetry and related memory effect.

Do such phenomena illustrate “phase transitions” between “states” of a highly fluctuating complex system driven very far from equilibrium?

Modélisation de la transition vers la turbulence dans un écoulement en conduite de fluide rhéofluidifiant : approche par calcul d'ondes non linéaires

Nicolas ROLAND¹, Emmanuel PLAUT², & Chérif NOUAR³

LEMTA Nancy-Université & CNRS, 2 Avenue de la Forêt de Haye 54516 Vandoeuvre Cedex^{1,2,3}
nicolas.roland@ensem.inpl-nancy.fr

La compréhension de la transition vers la turbulence en conduite cylindrique pour les fluides newtoniens est un problème ancien [1]. Des progrès récents ont été accomplis par la découverte de nouvelles solutions numériques [2], [3]. Ces solutions, des ondes non linéaires 3D, constituent le squelette de l'attracteur turbulent. Elles peuvent être considérées comme des structures cohérentes et ont été observées expérimentalement [4]. Ces découvertes ont été rendues possibles par des travaux antérieurs en canal plan, notamment ceux de Waleffe [5].

Le problème de la transition vers la turbulence pour des fluides non newtoniens importe également car de tels fluides sont utilisés par l'industrie pétrolière, du papier, en cosmétique, etc. Dans le cas de ces fluides, les effets non newtonien modifient les mécanismes de transition. Une dissymétrie a été observée dans le profil moyen (en temps) de vitesse durant la transition pour un fluide rhéofluidifiant avec ou sans contrainte seuil [6], [7]. Cette dissymétrie a également été mise en évidence numériquement par Rudman [8]. Il attribue la présence de cette asymétrie au caractère rhéofluidifiant du fluide.

Dans notre équipe, des structures cohérentes ont été mise en évidence expérimentalement pour une solution de Carbopol [9]. C'est pourquoi guidés par ces résultats, nous recherchons une famille d'ondes non linéaires présentant les mêmes symétries. Nous considérons l'écoulement d'un fluide obéissant à la loi de Carreau dans une conduite cylindrique supposée infinie. Cette recherche s'effectue en utilisant une méthode pseudo-spectrale [10] et de continuation.

Références

1. O. REYNOLDS, An experimal investigation of the circumstances which determine wether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* **174**, 935 (1883).
2. H. FAISST & B. ECKHARDT, Traveling waves in pipe flow, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 224502, 1-4 (2003).
3. H. WEDIN & R. R. KERSWELL, Exact coherent structures in pipe flow : travelling wave solutions, *J. Fluid Mech.* **508**, 333-371 (2004).
4. B.HOF *et al*, Experimental observation of nonlinear traveling waves in turbulent pipe flow, *Science* **305**,1594 (2004).
5. F. WALEFFE, Three-Dimensional Coherent States in Plane Shear Flows, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4140-4143 (1998).
6. M. P. ESCUDIER *et al*, Observations of asymmetrical flow behaviour in transitional pipe flow of yield-stress and other shear-thinning liquids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **127**, 143 (2005).
7. J. PEIXINHO *et al*, Laminar transitional and turbulent flow of yield stress fluid in a pipe, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **128**, 172 (2005).
8. M. RUDMAN *et al*, Turbulent pipe flow of shear-thinning fluids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **118**, 33 (2004).
9. A. ESMAËL & C. NOUAR , Transitional flow of a yield-stree fluid in a pipe : Evidence of a robust coherent structure, *Phys. Rev. E* **77**, 057302 (2008).
10. A. MESEGUER & F. MELLIBOVSKY , On a solenoidal Fourier-Chebyshev spectral method or stability analysis of the Hagen-Poiseuille flow, *Applied Numerical Mathematics* **57**,920 (2007).

Étude de la stabilité d'une nappe visqueuse

G. Pfingstag^{1,2}, A. Boudaoud¹ & B. Audoly²

¹ Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Physique Statistique, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

² Université Pierre et Marie Curie, Institut Jean Le Rond D'Alembert, 4 place Jussieu, 75005 Paris
gilles.pfingstag@lps.ens.fr

Le but de l'étude, inspirée par le procédé "float" de fabrication du verre plat, est de décrire l'apparition et l'évolution d'instabilités sur une nappe visqueuse flottante ou tombante. En particulier, on étudie des phénomènes de flambage visqueux de cette nappe dans différentes configurations et sous différents chargements.

Dans une première partie un modèle de nappe visqueuse est développé sous l'hypothèse d'une nappe de faible épaisseur. Cette étude s'inspire d'un modèle développé par P. D. Howell [1] auquel on ajoute les forces de gravité, la présence d'un bain d'étain supportant la nappe de verre et les tensions de surfaces aux deux interfaces. Le modèle ainsi développé se prête à une analyse de stabilité non linéaire. L'obtention des équations d'amplitude dans le régime faiblement non linéaire renseigne sur l'évolution de l'amplitude de défauts de type ondulation de la nappe.

Dans une seconde partie, le modèle précédent est adapté à une géométrie verticale dans laquelle la nappe tombe sous son propre poids. L'étude de stabilité linéaire suggère alors l'apparition d'ondulations de grande longueur d'onde. Les modes propres globaux de la nappe sont alors calculés par une méthode numérique pour étudier la stabilité du système.

Références

- [1] HOWELL, P. D., 1996 Models for thin viscous sheets, *European Journal of Applied Mathematics*, **7**, 321–343
- [2] RIBE, N. M., 2002 A general theory for the dynamics of thin viscous sheets, *Journal of Fluid Mechanics*, **457**, 255–283

Instabilité de Rayleigh–Taylor d’un film mince visqueux

Laurent Duchemin¹ & Michael Le Bars¹

IRPHE - UMR 6594 Technopôle de Château-Gombert 49, rue Joliot Curie - B.P. 146 13384 Marseille Cedex 13
duchemin@irphe.univ-mrs.fr

Lorsqu’on applique à un film liquide, en contact avec un solide, une force volumique constante dirigée du fluide vers l’extérieur, l’interface se déstabilise linéairement (instabilité de Rayleigh–Taylor) [1,2], puis on voit apparaître un jet qui peut éventuellement se rompre sous l’effet de la tension de surface (instabilité de Rayleigh–Plateau) [3]. Ce scénario, bien que classique pour les fluides peu visqueux tels que l’eau, ne fonctionne pas pour certains fluides newtoniens très visqueux comme le miel.

Cette étude numérique concerne le développement du jet aux temps longs. A l’aide d’un code de résolution des équations de Navier–Stokes axi-symétriques [4], prenant en compte la présence d’une surface libre, nous avons simulé la déstabilisation de la surface libre, du régime linéaire au régime fortement non-linéaire. Nous présenterons une étude de stabilité linéaire, permettant de valider l’approche numérique aux temps courts, et valable quels que soient l’épaisseur du film initiale, la viscosité du liquide, l’accélération et le coefficient de tension de surface. Ensuite, nous détaillerons les différents régimes observés aux temps longs, en fonction des paramètres sans dimensions du problème ; les principaux problèmes auxquels nous nous sommes intéressés étant :

- L’occurrence de l’instabilité de pincement en fonction de l’épaisseur initiale du film et de la viscosité du liquide,
- L’évolution des caractéristiques géométriques du jet (taille de goutte à l’extrémité, rayon du cylindre liquide en fonction du temps, etc...),
- L’évolution de la dynamique du jet (croissance initiale exponentielle, puis régime asymptotique en $gt^2/2$ pour la longueur du jet, etc...)

Références

1. LORD RAYLEIGH 1900 *Scientific Papers II* (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1900), 200.
2. G.I. TAYLOR 1950 The Instability of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction Perpendicular to their Planes. I *Proc. R. Soc. A* **201**, 192.
3. J. EGGERS 1997 Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows, *Rev. Mod. Phys.*, **69** (3), 865–930.
4. S. POPINET & S. ZALESKI 2002 Bubble collapse near a solid boundary : a numerical study of the influence of viscosity. *J. Fluid. Mech.* **464**, 137–163.

Saturation inhomogène du gain dans un Laser à Electrons Libres

M. Labat^{1,2}, N.Y. Joly^{3,4}, C. Szwaj³, S. Bielawski³, C. Bruni⁵, & M-E. Couprie¹

¹ Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91 192 Gif-sur-Yvette, France

² Adresse actuelle : Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), Unità Tecnico Scientifica
 Techonolgie Fische Avanzate, Centro Ricerche Frascati, 65-00044 Frascati (Rom), Italy

³ Lab. PhLAM, Universite Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

⁴ Adresse actuelle : Max-Planck Research Group (IOIP), University of Erlangen-Nuremberg, Germany

⁵ Lab. de l'Accélarateur Linéaire, Orsay, France

serge.bielawski@univ-lille1.fr

Dans la course à la génération de rayons X nécessaires à l'étude des phénomènes survenant à l'échelle atomique, les lasers à électrons libres (LEL) à simple passage représentent une source très prometteuse. En particulier, en régime injecté, les LEL permettent de générer des impulsions courtes cohérentes à faibles longueurs d'onde et à forte intensité. Dans un LEL, le gain provient d'un paquet d'électrons se propageant avec une onde lumineuse dans un onduleur. En raison de la vitesse relativiste des électrons $v_z < c$, l'onde lumineuse glisse vers l'avant du paquet et est amplifiée de façon exponentielle jusqu'à saturation. Selon la longueur de glissement ($L_g = N\lambda_R$ où λ_R est la longueur d'onde du LEL et N le nombre de périodes de l'onduleur) ainsi que les paramètres liés au paquet d'électrons de longueur L_p , la longueur de l'onduleur et la taille de l'impulsion injectée ($\sigma_{inj.}$), le LEL présente divers comportements dynamiques. Dans le cas où $S_e = L_g/L_p \approx 1$ et $S_{inj.} = L_g/\sigma_{inj.} > 1$, le LEL peut entrer dans un régime de *superradiance*. Dans ce cas, l'impulsion injectée va s'amplifier grâce aux électrons en avant du paquet, qui n'ont pas encore subi l'influence de l'onde lumineuse. En particulier, sa puissance crête augmente en z^2 sans atteindre de régime de saturation. Et sa durée diminue en $z^{-1/2}$.

Les besoins actuels en terme de sources de courtes longueurs d'onde λ_R tendent à réduire fortement S_e . Or, pour $S_e \ll 1$, le LEL entre dans un régime où l'impulsion injectée se scinde en deux sous-impulsions. Ce régime spatio-temporel complexe affecte fortement la cohérence temporelle et spectrale du profil de la radiation émise. Nous avons étudié ce régime particulier à l'aide d'un modèle microscopique à 1D [1] tenant compte de l'interaction de chaque électron du paquet avec l'onde lumineuse et de la propagation de l'onde elle-même $A(\bar{z}, \tau)$ le long de l'onduleur \bar{z} et en fonction du temps τ :

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial \bar{z}} = p_j \quad (1a)$$

$$\frac{\partial p_j}{\partial \bar{z}} = [A(\bar{z}, \tau)e^{i\theta_j} + c.c.] \quad (1b)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A(\bar{z}, \tau) = \chi(\tau)b(\bar{z}, \tau) \quad (1c)$$

Chaque électron j est suivi dans l'espace des phases à l'aide de deux coordonnées : son énergie p_j et sa phase θ_j prise par rapport au champ électrique $\theta_j = (k_R + k_0)z - ck_R t$ où k_0 est le nombre d'onde associé à la période de l'onduleur, et k_R le nombre d'onde de la radiation émise. $\chi(\tau)$ traduit la forme du paquet d'électrons, et $b(\bar{z}, \tau) = 1/N \sum_j e^{-i\theta_j}$ est le paramètre de *bunching*.

Nous présentons ici les évolutions de l'intensité de l'impulsion injectée et de l'espace des phases des électrons, en les comparant au cas du régime de superradiance. La distribution électronique initiale est homogène selon θ et normale selon p . Dans le cas $S_e \ll 1$, nous verrons que l'évolution de l'impulsion injectée en forme de fourche qui caractérise ce régime, résulte de la saturation non homogène du gain. La forme des ailes de l'impulsion injectée détermine la forme des deux sous-impulsions et leur évolution le long de la distribution électronique.

Références

1. W.B. COLSON, *Phys. Lett. A* **59**, 187 (1976); R. BONIFACIO *et al.*, *Opt. Comm.* **50**, 373 (1984).

Création de structures dans les paquets d'électrons relativistes d'anneaux de stockage

S. Bielawski¹, C. Evain¹, C. Szwaj¹, M. Hosaka^{2,3}, M. Adachi², S. Kimura², M. Katoh², M. Shimada⁴, T. Hara⁵, A. Mochihashi⁵, T. Takahashi⁶, Y. Takashima³

¹ Laboratoire PhLAM, UMR CNRS 8523, CERLA, Université de Lille 1 F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.

² UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences, Okazaki 444-8585, Japan

³ Nagoya University Graduate School of Engineering, 464-8603 Nagoya, Japan.

⁴ High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 305-0801, Tsukuba, Japan.

⁵ RIKEN Spring-8 centre, Harima Institute, Sayo-cho, Hyogo, 679-5148, Japan

⁶ Reactor Research Institute, Kyoto University, Kumatori-cho, Osaka, 590-0494, Japan

christophe.szwaj@univ-lille1.fr

L'interaction entre la lumière laser et des paquets d'électrons relativistes présente des similarités avec l'interaction laser-matière classique. Toutefois, le détail de l'interaction se distingue par quelques particularités liées à l'évolution des électrons dans un espace des phases à 6 dimensions. La connaissance et la maîtrise des instabilités spatio-temporelles sont un enjeu majeur pour le fonctionnement des sources de rayonnement synchrotron, car la distribution spatio-temporelle des électrons détermine directement les propriétés du rayonnement synchrotron émis. Cette tâche est rendue délicate par le fait qu'il est difficile de faire des observations directes ainsi que des études des réponses à une perturbation spatio-temporelles.

Nous montrons qu'il est possible de créer une structure périodique (typiquement de l'ordre du millimètre) dans l'espace des phases d'un paquet d'électrons en utilisant une interaction avec un laser. Des études perturbatives des équations de transport pour les électrons ainsi que de l'équation de Fokker-Planck-Vlasov permette de calculer l'efficacité du processus ainsi que le temps d'amortissement en fonction du nombre d'onde.

Expérimentalement, la structuration du paquet d'électron induit l'émission de rayonnement térahertz spectralement fin et accordable [1]. Au delà de l'intérêt pratique, cette étude ouvre la voie à de nouveaux tests de la dynamique spatio-temporelles des paquets d'électrons.

Références

1. S. Bielawski *et al* Tunable narrowband terahertz emission from mastered laser-electron beam interaction, Nature Physics 4, 386 (2008).

Emergence de structures optiques extrêmes par amplification fibrée basée sur une pompe partiellement cohérente

Kamal Hammani¹, Christophe Finot¹, John M. Dudley² & Guy Millot¹

¹ Institut Carnot de Bourgogne, UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne, 21078 Dijon Cedex, FRANCE

² Institut FEMTO-ST, UMR 6174 CNRS-Université de Franche-Comté, Besançon, FRANCE

kamal.hammani@u-bourgogne.fr

Il existe, dans la nature, un grand nombre de phénomènes extrêmes aux conséquences parfois dramatiques. C'est pourquoi de nombreux chercheurs à travers le monde les étudient activement dans des domaines allant de la biologie à l'économie. En hydrodynamique, si le tsunami est maintenant connu et relativement bien compris, d'autres événements extrêmes restent encore mystérieux et incompris. C'est en particulier le cas pour les vagues scélérates dont la puissance destructrice peut anéantir des navires. Or leur grande rareté limite fortement toute étude en milieu naturel. Pour progresser dans l'étude statistique de ces événements déviant fortement d'une distribution Gaussienne, il s'avère extrêmement intéressant de pouvoir disposer de systèmes physiques analogues permettant de reproduire en laboratoire un comportement similaire. Les récentes recherches initiées par Solli et al. [1] apportent une réponse à ce besoin : lors de la génération de supercontinuum dans les fibres optiques, des impulsions lumineuses rares peuvent émerger et se détacher très significativement du comportement moyen. L'appellation "ondes scélérates optiques" a alors été choisie pour qualifier un tel comportement.

Les études fructueuses menées dans les supercontinuum générés dans les fibres à dispersion anormale [2] ont ouvert la porte à des études plus générales des statistiques des fluctuations dans un système optique. Il est en effet essentiel d'élargir les conditions étudiées afin de déterminer l'origine et l'universalité de ces comportements. Dans ce contexte, nous avons mené deux études basées sur l'amplification fibrée d'un signal. Nous avons ainsi mis en oeuvre deux processus physiques générant un gain quasi-instantané : l'amplification Raman et l'amplification paramétrique. Dans les deux configurations, le gain est apporté par une pompe partiellement cohérente.

Concernant l'amplification Raman, nous avons mis en évidence que, moyennant un pompage copropagatif dans une fibre présentant une faible différence de vitesses de groupe entre la pompe et le signal, il est possible d'enregistrer des fluctuations notables des puissances crêtes du signal amplifié. Ce comportement tire son origine dans le transfert exponentiel des fluctuations d'intensité de la pompe vers le signal amplifié [3]. Dans la configuration étudiant l'amplification paramétrique, l'instabilité modulationnelle incohérente influence fortement l'émergence de fluctuations extrêmes.

Nous présenterons pour les deux systèmes étudiés des résultats expérimentaux obtenus à partir d'équipements usuels des télécommunications optiques. L'utilisation d'un signal initial continu nous a permis de mettre qualitativement en évidence la génération de structures scélérates. Ces résultats ont pu être complétés par des mesures quantitatives enregistrées à partir d'un signal initial impulsionnel. Des simulations numériques basées sur l'équation de Schrödinger non-linéaire ont confirmé ces résultats. Nous discuterons également des stratégies qui permettent d'isoler ces événements rares et intenses.

Références

1. D.R. SOLLI, C. COPERS, P. KOONATH, B. JALALI, Optical rogue waves, *Nature*, **450**, 1057 (2007).
2. J.M.DUDLEY, G. GENTY, B.J. EGGLETON, Maîtrise des vagues optiques extrêmes, *Rencontres du non-linéaire*, **2008**, 37-41.
3. K.HAMMANI, C.FINOT, J.M. DUDLEY, G. MILLOT, Optical rogue-wave-like extreme value fluctuations in fiber Raman amplifiers, *Opt. Express*, **16**, 16467-16474 (2008).

Lasers Raman à fibre : formation du spectre optique

Nicolas Dalloz, Pierre Suret & Stéphane Randoux

Laboratoire PHLAM - bât. P5- Université des Sciences et Technologies de Lille - 59655 Villeneuve d'Ascq
dallos@phlam.univ-lille1.fr

Les lasers Raman à fibre constituent des sources de lumière cohérente attractives d'un point de vue pratique de par leur accordabilité dans le domaine infrarouge. L'étude du spectre optique de ces lasers démontre leur caractère fortement multimode, et rend l'utilisation du modèle usuel [1], écrit pour un seul mode, inadaptée à la description de leurs propriétés spectrales. Les travaux expérimentaux et théoriques présentés ici concernent l'évolution du spectre de puissance d'un laser Raman continu multimode fonctionnant en *régime de dispersion normale*.

Une étude récente [2] a montré que la formation du spectre optique d'un laser Raman à fibre est décrite à l'aide d'un modèle basé sur la *théorie cinétique des ondes*. Les auteurs ont démontré expérimentalement et théoriquement que le spectre optique, limité par la largeur spectrale des "miroirs" de la cavité (réalisés à l'aide de réseaux de Bragg photoinscrits), présentait une forme en sécante hyperbolique quelque soit la puissance. En contradiction avec ces résultats, il a été observé récemment dans une cavité n'ayant pas d'élément sélectif limitant le spectre optique du laser, un spectre de forme gaussienne indépendante de la puissance [3].

Dans l'objectif de comprendre l'origine de cette contradiction, nous avons mené une étude expérimentale portant sur un laser Raman présentant une géométrie de cavité en anneau, pompé par un laser Ytterbium continu de 8 Watt, dont le spectre optique centré à 1100 nm comporte environ 10000 modes. L'onde stokes ainsi générée au niveau du maximum du gain Raman (situé à 13 THz du rayonnement de pompe) présente, en fonction de la puissance, une dérive de son spectre valant typiquement 0.2 THz. Par ailleurs, l'étude expérimentale montre qu'à haute puissance le spectre optique est formé de deux composantes séparées d'environ 1 THz. La dérive du spectre optique d'une impulsion courte induite par effet Raman en simple propagation dans une fibre a été largement étudiée ces vingt dernières années [4]. Cependant, les mécanismes sous jacents à la dérive du spectre optique d'un laser Raman *continu en cavité* ne sont pas compris et méritent une étude nouvelle.

A l'aide d'un modèle ne tenant compte que de l'effet Raman et basé sur une approche en champ moyen, nous avons montré analytiquement et numériquement que le laser est monomode au seuil, avec la possibilité d'obtenir un état stationnaire à deux modes à plus haute puissance. De plus, ce modèle permet de retrouver qualitativement la dérive du spectre optique. Cependant, l'absence dans le modèle utilisé de l'effet Kerr optique ne permet pas de rendre compte du caractère multimode du spectre optique observé. Cet effet non linéaire d'ordre 3 est reponsable du mélange à quatre ondes pouvant agir sur les différentes composantes spectrales. Le cas des composantes de l'onde stokes agissant sur elles-mêmes (automodulation de phase) a été étudié dans l'article [2]. Cependant, la question de l'influence des composantes spectrales du laser de pompe sur celles de l'onde stokes est un problème sur lequel nous travaillons actuellement.

Références

1. P.Suret and S.Randoux *Influence of spectral broadening on steady characteristics of Raman fiber lasers : from experiments to questions of usual models*, Opt. Comm. **237** 201 (2004)
2. S.A. Babin, D.V. Churkin, A.E. Ismagulov, S.I. Kablukov and E.V. Podivilov *Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser*, JOSA B **24** 1729 (2007)
3. S. Randoux, N. Joly, G. Mélin, A. Fleureau, L. Galkovsky, S. Lempereur and P. Suret *Grating-free Raman laser using highly nonlinear photonic crystal fiber*, Optics Express **15** 16035 (2007)
4. F.M. Mitschke, L.F. Mollenauer *Discovery of the soliton self-frequency shift*, Optics Letters **11** 659 (1986)

Saturation non linéaire de l'instabilité Raman stimulée

Thomas Chapman¹, Michel Albrecht¹, Denis Pesme¹, Stefan Hüller¹, & Wojciech Rozmus²

¹ CPHT Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

² Physics Dept., Univ. of Alberta, Canada

chapman@cpht.polytechnique.fr

En interaction laser plasma la compréhension de la saturation des instabilités paramétriques est de grande importance. Les instabilités de rétro diffusion peuvent provoquer un rendement inefficace de l'absorption laser. Nous nous intéressons en particulier à l'instabilité de la diffusion Raman stimulée (DRS), un processus de grande complexité due à la diversité des échelles temporelles et spatiales impliquées. Le mécanisme principal peut être décrit par un couplage à trois ondes, en se servant des 3 équations différentielles partielles couplées : une onde électromagnétique (l'onde laser) donne lieu à une onde électro-magnétique diffusée due à des perturbation d'une onde électron plasma. De la théorie à trois ondes on peut facilement déduire des taux de rétro diffusion importants, mais rarement observés dans des expériences. Une modélisation plus réaliste nécessite à tenir compte des effets de saturation non linéaire de la DRS. Parmi les mécanismes donnant lieu à une saturation, les effets de piégeage d'électrons et du déferlement d'onde sont reconnus comme les plus importants. Nous étudions le régime des effets cinétiques qui permettent à être inclus dans une modélisation réduite de type fluide pour l'équation de l'onde électron plasma. Certains effets cinétiques peuvent être modélisés par des termes de puissance $3/2$ en amplitude d'onde, ainsi que par une modification non linéaire de l'amortissement. Pour tester sa validité, nous comparons notre modélisation réduite avec des simulations numériques avec un code cinétique type Vlasov-Maxwell.

Chaos généré par une non linéarité 2D et une dynamique à retard

Mourad Nourine, Michael Peil, & Laurent Larger

Département d'Optique, Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, Université de Franche-Comté, 25030 Besançon Cedex, France.

mourad.nourine@univ-fcomte.fr

Les communications sécurisées par chaos ont permis le développement de nombreux systèmes dynamiques optiques produisant des comportements chaotiques complexes. Les dynamiques temporelles en question sont essentiellement basées sur le principe des équations à retard, à cause de leur faisabilité expérimentale, et de leurs propriétés dynamiques attractives : dimensions d'espaces des phases infinie [1], régimes chaotiques de grande complexité [2] et possibilité de synchronisation du chaos déterministe [3].

Les dernières évolutions du domaine des communications optiques sécurisées par chaos portent sur la démonstration du potentiel d'intégration, et de la capacité technologique à générer des clés physiques pour la génération de comportements chaotiques. C'est dans ce contexte que nous avons étudié la mise en œuvre, et les comportements dynamiques, d'un oscillateur électro-optique à deux retards, qui utilise aussi une transformation non linéaire à 2 entrées. Cette transformation non linéaire particulière est obtenue grâce à l'intégration sur Niobate de Lithium (matériau actif électro-optiquement, utilisé en optique intégrée) d'un interféromètre à 4 ondes, dont la condition d'interférence en sortie peut être modulée par effet électro-optique à partir de deux entrées électriques indépendantes. Le composant commercial utilisé correspond à un modulateur QPSK pour les télécommunications optiques, mais une architecture générique d'interféromètre à ondes multiples à différences de phase accordables indépendamment est tout à fait possible. Cette flexibilité technologique permet d'envisager la définition d'une clé physique personnalisée, correspondant pratiquement à une non linéarité particulière. Pour chaque clé physique de ce type, un comportement chaotique spécifique pourra être utilisé pour masquer une information optique.

Nous proposons de présenter le principe de mise en œuvre de ce système expérimental de génération de chaos, et nous reporterons les comportements dynamiques observés expérimentalement, et numériquement. La dynamique particulière qui est obtenue dans cette situation peut se résumer à un modèle théorique de deux équations intégro-différentielles, excitées par un terme non linéaire retardé qui est fonction des deux variables couplées :

$$\frac{1}{\theta_{1,2}} \int_{t_0}^t x_{1,2}(\xi) d\xi + \tau_{1,2} \frac{dx_{1,2}}{dt}(t) + x_{1,2}(t) = f_{NL}[x_1(t - T_{1,2}), x_2(t - T_{1,2})]$$

Enfin, nous proposerons une architecture « Émetteur / Récepteur » en cours de réalisation, avec laquelle nous espérons pouvoir démontrer aussi la capacité de modulation du chaos obtenu, par une information binaire, ainsi que la capacité d'un récepteur à supprimer la modulation chaotique pour récupérer l'information d'origine en clair.

Références

1. M. LE BERRE, E. RESSAYRE, A. TALLET AND Y. POMEAU, Dynamic system driven by a retarded force acting as colored noise, *Physical Review A*, **41**(12), 6635–6646 (1990).
2. J. D. FARMER, Chaotic attractors of infinite-dimensional dynamical system, *Physica D*, **4**, 366–393 (1982).
3. J. P. GOEDGEBUER, L. LARGER, AND H. PORTE, Optical cryptosystem based on synchronization of hyperchaos generated by a delayed feedback tunable laserdiode, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 2249–225 (1998).

Analyse temporelle de dynamiques spatio-temporelles d'un laser

Dalila Amroun Aliane¹, Christophe Letellier², Luc Pastur³, Marc Brunel², Hervé Leblond⁴ & François Sanchez⁴

¹ LEQ, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger, BP 32 BEZ, 16111 Alger

² CORIA-UMR 6614, Université de Rouen, BP 12, 76801 St Etienne du Rouvray cedex

³ LIMSI-CNRS, Université de Paris Sud , BP133, Bât 508, 91403 Orsay cedex

⁴ POMA, FRE 2988 , Université d'Angers, 2 Bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 01

amroun_dalila@yahoo.fr

Les dynamiques spatio-temporelles sont souvent analysées en termes de diagrammes spatio-temporels et d'analyses réductives perturbatives, sans faire appel à la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires relative aux systèmes purement temporels. C'est ainsi que ces dynamiques spatio-temporelles sont directement interprétées en termes d'ondes et de défauts topologiques. Nous montrons que les changements dans les diagrammes spatio-temporels peuvent être reliés à des bifurcations bien identifiées dans le portrait de phase reconstruit à partir de mesures locales. Par conséquent, une certaine compréhension de la dynamique est acquise à partir d'une analyse purement temporelle.

Dans cette contribution, un modèle décrivant un laser monomode avec diffraction est étudié [1]. La structure du portrait de phase et l'ordre des défauts topologiques sur les diagrammes spatio-temporels sont clairement reliés. On observe qu'une application de premier retour à une section de Poincaré structurée est associée à des défauts apparaissant périodiquement dans l'espace et dans le temps. En revanche, une application sans aucune structure, à savoir un nuage de points, correspond à des défauts apparaissant de façon aléatoire sur les diagrammes spatio-temporels [2,3]. De plus, les portraits de phase présentent des dynamiques temporelles très complexes se développant sur des structures toroïdales, nécessitant ainsi des analyses dynamiques non triviales. Des scénarios d'apparition des instabilités pourraient être extraits, ainsi que la mise en évidence de l'influence de l'extension spatiale du système.

Références

1. D. AMROUN, M. BRUNEL, C. LETELLIER, H. LEBLOND, F. SANCHEZ, Complex intermittent dynamics in large-aspect-ratio homogeneously broadened single-mode lasers, *Physica D*, **203**, 185-197 (2005).
2. D. AMROUN, C. LETELLIER, L. PASTUR, M. BRUNEL, H. LEBLOND, F. SANCHEZ, Spatio-temporal dynamics versus temporal analysis : What can we learn ?, *First International Seminar on Fluid Dynamics and Materials Processing FDMP'2007*, Alger, 2-4 juin, 2007.
3. D. AMROUN ALIANE, L. PASTUR, C. LETELLIER, M. BRUNEL, H. LEBLOND, F. SANCHEZ, A link between spatio-temporal and temporal dynamics of a laser, *Dynamics Days Europe 2008*, Delft, 25-29 août 2008.

Instabilités Magnéto-Inertielles

Cebbron D., Herreman W., Le Bars M., Le Dizès S., Le Gal P., & Maubert P.

IRPHE - UMR 6594 Technopôle de Château-Gombert 49, rue Joliot Curie - B.P. 146

13384 Marseille Cedex 13, France

cebron@irphe.univ-mrs.fr

L'instabilité elliptique (ou instabilité de marées) correspond à la déstabilisation 3D d'écoulements tournants 2D dont les lignes de courant sont elliptiques (cf. revue par Kerswell, 2002). C'est une instabilité générique qui intervient dans de nombreux systèmes naturels, dans lesquels l'ellipticité est générée soit par des interactions entre tourbillons soit par des effets de marées. Sa présence est ainsi suggérée dans les sillages d'avion (e.g. Leweke & Williamson, 1998), les tourbillons atmosphériques et océaniques (e.g. Afanasyev, 2002), les noyaux liquides des planètes (e.g. Kerswell & Malkus, 1998), les étoiles doubles et disques d'accrétion (e.g. Lubow & al., 1993), et plus généralement dans les écoulements turbulents présentant des structures cohérentes elliptiques (e.g. Pierrehumbert, 1986; Bayly, 1986).

Grâce à un montage expérimental inspiré de celui de Malkus (Malkus, 1989), un certain nombre de résultats ont déjà été obtenus au sein de l'équipe, et comparés avec succès aux calculs de stabilité (analyse de stabilité locale WKB, analyse globale). Afin d'étendre ces résultats aux instabilités Magnéto-Inertielles, un métal liquide, le Galinstan, est à présent utilisé. Ainsi, en imposant un champ magnétique extérieur axial grâce à deux bobines de Helmholtz, le relevé du champ magnétique radial induit permet d'étudier de façon quantitative les instabilités qui se développent. Il est notamment possible de calculer les taux de croissance avec plus de précision que par visualisation. L'effet de modération du champ magnétique extérieur sur le taux de croissance est également étudié et comparé favorablement à la théorie. De plus, les expériences, menées en géométrie sphérique comme en géométrie cylindrique, montrent notamment que l'interaction non-linéaire entre les ondes inertielles peut provoquer des renversements spontanés du champ magnétique induit conformément à des simulations numériques d'un modèle non-linéaire (Herreman, 2009).

Parallèlement à ce travail expérimental, l'aspect numérique, complémentaire, est également développé par la mise en œuvre d'un code DNS développé au laboratoire basé sur les approximations pseudospectrales de type collocation Chebyshev et Fourier associées à un schéma temporel du second ordre. Ce code, pour l'instant non-MHD, a été adapté au problème posé par une approche originale, premier pas vers des simulations numériques d'instabilités Magnéto-Inertielles.

Ainsi, nous présenterons nos derniers résultats analytiques, expérimentaux et numériques concernant l'interaction entre les ondes inertielles, leurs instabilités, en particulier l'instabilité elliptique, et les champs magnétiques. Des conclusions seront déduites de ces observations et extrapolées vers des applications géophysiques.

Références

1. W. HERREMAN, Instabilités elliptiques sous champ magnétique & Dynamo d'ondes inertielles **PHD Thesis**, (2009).
2. R. KERSWELL, Elliptical Instability *Annual Review of Fluid Mechanics*, **Vol. 34** : 83-113, (2002).
3. W. V. R. MALKUS, An experimental study of global instabilities due to the tidal (elliptical) distortion of a rotating elastic cylinder *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, **Vol. 48, Issue 1 - 3** , (1989).

Dynamo cinématique des ondes inertielles

Herreman W.¹ & Le Dizès S.²

IRPHE, 49, rue Joliot Curie, 13384 Marseille
herreman@irphe.univ-mrs.fr

Les champs magnétiques planétaires fascinent depuis longtemps. On sait maintenant que l'origine de ces champs se trouve dans l'effet dynamo des écoulements de fluides conducteurs à l'intérieur des corps célestes. On pense notamment que celui de la Terre pourrait être dû à un écoulement de convection thermosolutale dans son noyau, comme le montrent certaines simulations numériques [1]. Cependant, pas tous les corps célestes permettent une telle convection interne. Pour cette raison, il est utile et nécessaire de chercher d'autres mécanismes qui peuvent mettre le fluide conducteur en mouvement, et créer une dynamo.

Les instabilités inertielles (la précession, l'instabilité de marée & la libration) nous procurent une alternative [2], [3], mais elles restent plus difficiles à modéliser et donc beaucoup moins étudiées. Ce n'est que très récemment que les premières simulations numériques de la dynamo de précession ont confirmé la possibilité d'un effet dynamo, [4], [5], mais les mécanismes mis en jeu restent peu compris. Nous nous intéressons à cette problématique et nous remarquons en première instance que les écoulements excités par les instabilités inertielles sont des ondes inertielles. Par rapport aux écoulements lentement variables excités par la convection en présence de rotation rapide, les ondes inertielles varient typiquement sur le temps rapide de la période de révolution du corps céleste. La question est alors de savoir si de telles ondes peuvent générer un champ magnétique par effet dynamo ?

Pour répondre à cette question, nous considérons un domaine de fluide cylindrique, pour lequel nous connaissons des solutions analytiques des ondes inertielles. Nous résolvons le problème de la dynamo cinématique numériquement pour une onde inertielle particulière : le mode de spinover. Nous réussissons à mettre en évidence une dynamo lorsque la viscosité du fluide est prise en compte. Nous remarquons l'existence d'un régime asymptotique dans lequel le mode dynamo est presque axisymétrique et lentement variable dans le temps. Cette observation nous permet de construire une théorie asymptotique qui décrit le mécanisme de l'instabilité dynamo. La comparaison des résultats de la théorie asymptotique avec les résultats numériques nous permet notamment de comprendre le rôle de la viscosité et de la diffusion magnétique. La théorie propose également une loi d'échelle qui s'étend dans le régime des paramètres géophysiques.

Références

1. Busse, F. H., Convective flows in rapidly rotating sphere and their dynamo action, *Phys. Fluids*, 2002, **14**, 1301.
2. Kerswell, R. R., Tidal excitation of hydromagnetic waves and their damping in the earth, *J. Fluid Mech.*, 1994, **274**, 219-241.
3. Kerswell, R.R. & Malkus, W.V.R., Tidal instability as the source for Io's magnetic signature, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**, 603-606.
4. Tilgner, A., Precession driven dynamos, *Phys. Fluids*, 2005, **17**, 34104.
5. Wu, C. C. & Roberts, P.H., A precessionally-driven dynamo in a plane layer, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 2008, **102**, 1-19.

Dynamique chaotique de l'écoulement dans un cylindre en précession

Meunier Patrice¹, Lagrange Romain¹, Nadal François², & Eloy Christophe¹

¹ Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre, CNRS, Aix-Marseille Université, 13384, Marseille

² CEA/CESTA, 15 av. des Sablières, 33114 Le Barp

meunier@irphe.univ-mrs.fr

Le mouvement de précession correspond au mouvement d'un objet en rotation autour de son axe, qui est lui même en rotation autour d'un deuxième axe, incliné par rapport au premier. Lorsque l'objet est rempli d'un fluide, la précession engendre un écoulement qui devient fortement turbulent pour des angles de précession élevés. C'est le cas par exemple de l'écoulement à l'intérieur du noyau terrestre, car la terre est en précession lente avec un angle de 23.5 degrés. Le champ magnétique terrestre étant généré par les mouvements du fer liquide dans le noyau, il est possible qu'une part importante de l'énergie du champ magnétique de la terre provienne de son mouvement de précession. Dans le domaine aéronautique, la précession est un mouvement néfaste pour les satellites, car il peut être amplifié par résonance entre l'écoulement de précession et le mouvement propre du satellite et provoquer ainsi de fortes déviations de sa trajectoire. Ces deux applications rendent ainsi l'étude de l'écoulement de précession intéressante en plus de son aspect fondamental.

Dans cette étude, nous analysons l'écoulement modèle d'un fluide dans un cylindre en précession pour de faibles angles de précession. Aux faibles nombres de Reynolds, la précession force les modes propres de l'écoulement dans le cylindre (appelés modes de Kelvin) à la fréquence de précession[1]. Lorsque la fréquence de précession est égale à la fréquence d'un mode de Kelvin libre, l'amplitude de ce mode de Kelvin diverge et il est donc nécessaire d'introduire les effets visqueux et non-linéaires pour prédire la saturation de ce mode de Kelvin. Cette analyse théorique a été confirmée expérimentalement[2] et permet de prédire correctement l'écoulement de base pour de faibles nombres de Reynolds.

Lorsque le nombre de Reynolds augmente, l'écoulement devient fortement turbulent. Nous avons montré que cette transition vers la turbulence peut être expliquée par une résonance triadique entre le mode de Kelvin forcé par la précession et deux autres modes de Kelvin libres qui croissent exponentiellement[3]. Le taux de croissance de cette instabilité peut être prédit par une analyse de stabilité linéaire incluant les effets visqueux, qui est en excellent accord avec les résultats expérimentaux.

De plus, il est possible d'ajouter les couplages non-linéaires entre ces différents modes, qui font ainsi apparaître un mode supplémentaire possédant une symétrie cylindrique. Ce mode est primordial car il sature le taux de croissance de l'instabilité par des effets de 'detuning'. La dynamique de l'écoulement de précession est alors entièrement déterminée par les amplitudes de ces 4 modes, pour lesquelles on peut obtenir quatre équations d'amplitude non-linéaires. La résolution de ces équations montrent que l'instabilité est sous-critique, mais qu'elle sature à une amplitude stationnaire juste au dessus du seuil. L'amplitude devient intermittente pour des nombres de Reynolds plus élevés, puis chaotique pour de très grands nombres de Reynolds. Cette dynamique est confirmée par les expériences, qui montrent de plus que l'écoulement moyen dans le cylindre est proche du point fixe (instable) des équations d'amplitude. Il est donc intéressant de voir que l'évolution d'un écoulement turbulent à grand nombre de degrés de liberté est ici bien représentée par un système dynamique à petit nombre de degrés de liberté.

Références

1. A. D. McEwan, Inertial oscillations in a rotating fluid cylinder, *J. Fluid Mech.*, **40**, 603-640 (1970).
2. P. MEUNIER, C. ELOY, R. LAGRANGE, F. NADAL, A rotating fluid cylinder subject to weak precession, *J. Fluid Mech.*, **599**, 405-440 (2008).
3. C. ELOY, R. LAGRANGE, F. NADAL, P. MEUNIER, , Instability of a fluid inside a precessing cylinder *Phys. Fluids* **20** (8), 081701 (2008).

Sensibilité d'un front propagatif aux transitions hydrodynamiques.

Simona Bodea¹ & Alain Pocheau¹

IRPHE, CNRS & Universités Aix-Marseille I & II, 49 rue Joliot-Curie, B.P. 146, Technopôle de Château-Gombert, F-13384 Marseille, Cedex 13, France
bodea@irphe.univ-mrs.fr

Cette étude s'intéresse à l'effet de phénomènes advectifs sur la propagation de fronts de réaction-diffusion. Ces fronts, qui se rencontrent dans divers systèmes physiques, chimiques ou biologiques (progression de régions de corrosion, feux de forêt, colonies de bactéries ou infections [1]) sont cependant souvent soumis à un transport advectif cellulaire, très efficace devant le transport par réaction-diffusion, mais restreint aux domaines de chaque cellule. Son effet net sur la propagation du front, fruit de cette ambivalence, s'avère donc souvent délicat à établir. Il dépend notamment de la structure interne de l'écoulement dans les cellules, d'une manière que nous avons voulu étudier ici au travers d'une transition à la tridimensionalité des écoulements.

Nous étudions de nature expérimentale. Le dispositif se compose d'un canal rectangulaire, de faible épaisseur, dans lequel un écoulement est produit par électroconvection sous forme d'une rangée de vortex contrarotatifs à lignes de courant fermées. Les vortex sont ainsi séparés par des zones qui ne participent pas à l'advection dans la direction du canal. Le front de réaction-diffusion utilisé est créé spontanément à un bout du canal par initiation de la réaction autocatalytique Chlorite-Iodure [2], puis se propage au travers de la structure convective.

Pour des vitesses d'écoulement modérées, l'écoulement reste bi-dimensionnel (régime de Hele-Shaw). La vitesse moyenne d'avancement du front, résultat de la compétition entre les échelles de temps d'advection, de réaction, de diffusion, présente alors une évolution non-linéaire avec l'intensité des vortex. Après une analyse détaillée, il apparaît que le front de réaction suit, lors de sa propagation dans cette structure, une trajectoire minimisant son temps de parcours [3].

Pour des vitesses d'écoulement plus élevées, nous avons constaté un brusque saut de vitesse moyenne du front, à compter d'un seuil dépendant de la géométrie du canal. Ce saut s'explique par un changement fondamental de la trajectoire empruntée par le front, lui-même corrélé à une transition à un écoulement tri-dimensionnel, suite à l'apparition d'écoulements secondaires en épaisseur. Le seuil d'apparition de ces écoulements peut être déterminé en considérant la séparation des couches limites en épaisseur, signe de la fin du régime de Hele-Shaw. Ceci conduit à une loi d'échelle reliant l'intensité critique des vortex aux facteurs géométriques tels la largeur et l'épaisseur du canal considéré. Nos expériences ont permis de la vérifier en variant les dimensions des canaux.

Cette étude révèle la sensibilité des fronts de réaction à la structure des écoulements dans lesquels il se propage, en faisant ainsi des révélateurs très fins de transitions hydrodynamiques. Ceci suggère qu'un front de réaction pourrait être utilisé pour dévoiler les structures fines d'un écoulement complexe, propriété potentiellement intéressante par exemple en microfluidique. Par ailleurs, l'accroissement important de vitesse du front par de faibles courants tridimensionnels révèle toute l'importance de la géométrie des écoulements envers l'efficacité du transport propagatif.

Références

1. F. Sagues and I.R. Epstein, *Dalton Trans.*, 1201-1217 (2003).
2. D.M. Weitz and I.R. Epstein, *J.Phys.Chem.* **88**, 5300-5304 (1984).
3. A. Pocheau and F. Harambat, *Phys.Rev.E* **73**, 065304 (2006) ;
A. Pocheau, F.Harambat, *Phys.Rev.E* **77**, 036304 (2008).

Modèle mésoscopique de cristallisation du gypse

G. Dumazer & A. Lemarchand

CNRS, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée ,
UMR 7600, 4, place Jussieu, case courrier 121, 75252 Paris Cedex 05, France
dumazer@lptmc.jussieu.fr

La cristallisation du gypse à partir de grains de sulfate de calcium hémihydraté en solution aqueuse est étudiée à une échelle mésoscopique. Nous avons construit un modèle de formation du gypse limitée par un processus de nucléation hétérogène et de précipitation sous forme d'aiguilles. Cette précipitation a une cinétique de croissance d'abord autocatalytique contrôlée par la surface des aiguilles, puis contrôlée par la diffusion des réactifs dans la solution. Ce modèle introduit un nombre minimal de paramètres dont l'effet sur la dynamique de croissance et sur la morphologie du gypse est étudié en détail par des simulations numériques et par une approche stochastique sous forme d'une équation maîtresse. Nous avons trouvé que le nombre de germes par grain d'hémihydrate raccourcit le temps d'induction ainsi que la longueur des aiguilles, tout en augmentant leur enchevêtrement, c'est-à-dire en améliorant les propriétés mécaniques du matériau. Les résultats de simulation et les solutions de l'équation maîtresse reproduisent de façon satisfaisante les résultats des expériences menées à l'Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle de Limoges par le Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes. Le modèle pourra être utilisé pour prédire le comportement du système réactif dans des conditions qui ne sont pas compatibles avec les protocoles expérimentaux d'observation.

Références

G. Dumazer, V. Narayan, A. Smith et A. Lemarchand, *J. Phys. Chem. C*, à paraître (2009).

Directions de croissance des dendrites cristallines : vers une universalité ?

Alain Pocheau¹, Julien Deschamps¹, & Marc Georgelin¹

IRPHE, CNRS & Aix-Marseille Université, 49 rue Joliot-Curie, B.P. 146, 13384 Marseille, Cedex 13, France
alain.pocheau@irphe.univ-mrs.fr

La solidification d'un liquide se produit le plus souvent en présence de germes d'orientations cristallines variées plongés dans un gradient de température. Chacun de ces facteurs détermine une direction essentielle au processus de solidification : la direction du flux thermique pour le gradient de température (noté \mathbf{G}) et la direction de croissance la plus favorisée par le réseau cristallin (notée \mathbf{a}) pour l'orientation des germes. Par ailleurs, au-delà du seuil d'instabilité primaire, l'interface liquide-solide se structure en réseau de dendrites dont la direction de croissance s'avère essentielle envers la morphologie des microstructures, leurs échelles et les hétérogénéités de concentration piégées dans le matériau solidifié. Comment cette direction de croissance se place-t-elle vis à vis des deux directions imposées \mathbf{G} et \mathbf{a} ? Comment évolue-t-elle avec la vitesse de croissance, la norme du gradient de température ou les facteurs d'anisotropie interfaciales ?

Pour répondre à ces questions, nous avons mené une étude expérimentale exhaustive des directions de croissance dendritiques en lame mince. Il s'avère que ces directions tournent de la direction \mathbf{G} à la direction \mathbf{a} au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse de croissance V . Ce phénomène répond de manière cohérente au nombre de Péclet basé sur V , la taille des dendrites et le coefficient de diffusion solutale. Ceci est le signe qu'il est régi par un couplage diffusif. Au delà, il dépend de l'angle entre les deux directions \mathbf{G} et \mathbf{a} et, possiblement, de l'intensité G du gradient thermique et de celles des modulations interfaciales anisotropes, donc du matériau.

De manière étonnante, il est cependant apparu que la *manière* dont les directions de croissance tournent avec le nombre de Péclet Pe s'avère bien plus universelle qu'attendue. Elle répond en effet à une symétrie d'échelle en Pe qui unifie les différentes rotations sous un même type de réponse. Par ailleurs, en utilisant dans le nombre de Péclet la taille du corps des dendrites plutôt que leur distance, ces différentes rotations se trouvent rassemblées certes dans un même type mais plus encore sous une réponse *unique*. Cette réponse commune est enfin apparue *indépendante* de l'intensité du gradient thermique et *insensible* au changement de matériau et donc à ses facteurs d'anisotropie.

Ce problème essentiel pour la morphologie des matériaux cristallins, donc pour la métallurgie, apparaît ainsi gouverné par une loi physique robuste et universelle. Bien que son origine soit identifiée expérimentalement comme relevant d'une symétrie d'échelle, la compréhension théorique de son existence reste à éclaircir.

Références

1. J. DESCHAMPS, M. GEORGELIN, A. POCHEAU, Crystal anisotropy and growth directions in directional solidification, *Europhys. Lett.*, **76**, 291-297 (2006).
2. A. POCHEAU, J. DESCHAMPS, M. GEORGELIN, Dendrite growth directions and morphology in the directional solidification of anisotropic materials, *JOM* **59**, 71-77 (2007).
3. J. DESCHAMPS, M. GEORGELIN, AND A. POCHEAU, Growth directions of microstructures in directional solidification of crystalline materials, *Phys. Rev. E*, **78**, 011605 (2008).

Sur les systèmes à événements discrets non linéaires dans l’algèbre des diodes

S. Hamaci¹ & J-L.Boimond²

¹ EPMI/ECS, 13 bvd de l’Hautil, F- 95092 Cergy-Pontoise

² LISA, 62 avenue Notre Dame du Lac, F- 49000 Angers

s.hamaci@epmi.fr

L’étude des systèmes à événements discrets constitue depuis le début des années 70, un domaine de recherche très actif ayant donné lieu à de nombreuses publications. De cette littérature se dégagent de multiples classes de systèmes mettant en jeu des phénomènes de natures différentes : parallélisme, saturation, synchronisation : En raison de la dynamique complexe de ces systèmes, les modèles mathématiques utilisées pour les décrire n’en permettent pas toujours une analyse efficace.

Certaines sous-classes de SED bénéficient néanmoins de modèles bien adaptés pour aborder, par exemple, les problèmes d’évaluation de performance ou de commande. Il a été montré que les systèmes mettant uniquement en jeu des phénomènes de synchronisation et de saturation peuvent être modélisés par des réseaux de Petri particuliers, appelés graphes d’événements temporisés (GET). Ces derniers admettent une représentation linéaire sur une structure algébrique particulière, connue sous le nom de l’algèbre des diodes (l’algèbre $(\min, +)$ étant un exemple de diode).

Néanmoins, les techniques développées dans le cadre des systèmes à événements discrets atteignent leur limite, lorsque la taille du système considéré est importante (du fait du nombre important d’entités). Il s’avère alors utile d’utiliser des GET à arcs pondérés, encore appelés GET avec multiplicateurs (GETM), ce qui permet de réduire la taille du modèle. Ces graphes permettent également de modéliser de façon simple des opérations d’assemblage et de désassemblage de produits présentes dans certains systèmes de production.

Contrairement aux GET, les GETM n’admettent pas une représentation linéaire dans l’algèbre $(\min, +)$. Cette non linéarité - de par les poids sur les arcs - est due à la présence de parties entières dans le modèle $(\min, +)$ régissant l’évolution dynamique de ces graphes.

Pour pallier au problème de non linéarité et pour pouvoir appliquer certains résultats développés dans le cadre de la théorie des systèmes linéaires dans les diodes, une méthode de linéarisation sera présentée. Cette méthode a pour but de linéariser le modèle mathématique régissant l’évolution dynamique des GETM, sous réserve de vérifier une condition de linéarisation sur le marquage initial, ceci afin d’obtenir un modèle $(\min, +)$ linéaire.

Dans le cas où cette condition n’est pas vérifiée, nous procédons à un ajout ou à un retrait de jetons (ressources) dans le graphe, afin de satisfaire la condition de linéarisation. Cette technique d’analyse nous permet d’encadrer la dynamique du GETM entre deux bornes : une valeur supérieure obtenue par l’ajout d’un nombre minimal de jetons dans le graphe, et une valeur inférieure obtenue par le retrait d’un nombre minimal de jetons.

Pour illustrer cette méthode, un exemple d’application sera présenté.

Références

1. Baccelli, F., Cohen, G., Olsder, G., and Quadrat, J.-P. (1992). *Synchronization and Linearity : An Algebra for Discrete Event Systems*. Wiley.
2. Cohen, G., Gaubert, S., and Quadrat, J.-P. (1998b). Timed-Event Graphs with Multipliers and Homogeneous Min-Plus Systems. *IEEE TAC*, 43(9) :1296–1302.
3. Munier, A. (1993). Régime asymptotique optimal d’un graphe d’événements temporisé généralisé : Application à un problème d’assemblage. In *RAIPO-APII*, volume 27(5), pages 487–513.
4. Murata, T. (1989). Petri Nets : Properties, Analysis and Applications. *IEEE Proceedings*, 77(4) :541–580.
5. Trouillet, B. Benasser, A. (2002). Cycle Scheduling Problems with Assemblies. In *WODES*.

Sur les modèles de type Kohn-Sham avec fonctionnelles d'échange-corrélation LDA et GGA

A. Anantharaman^{1,2} & E. Cancès^{1,2}

¹ CERMICS, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Université Paris Est, 6 & 8 avenue Blaise Pascal, 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2, France

² INRIA Rocquencourt, Equipe-Projet Micmac, Domaine de Voluceau, B.P. 105, 78153 Le Chesnay, France
ananthaa@cermics.enpc.fr

La théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) est un cadre couramment utilisé pour calculer de manière approchée les états fondamentaux des systèmes moléculaires. Selon cette théorie, l'énergie et la densité électronique correspondant à l'état fondamental d'un système donné peuvent être obtenues en résolvant un problème de minimisation qui prend la forme suivante

$$\inf \left\{ F(\rho) + \int_{\mathbb{R}^3} \rho V, \rho \geq 0, \sqrt{\rho} \in H^1(\mathbb{R}^3), \int_{\mathbb{R}^3} \rho = N \right\}$$

où N est le nombre d'électrons du système, V est le potentiel électrostatique généré par les noyaux, et F est une fonctionnelle de la densité électronique ρ . Cette fonctionnelle F est universelle, au sens où elle ne dépend pas du système moléculaire considéré. Il n'existe cependant pas d'expression exploitable de F et on doit en pratique en construire des approximations. Pour ce faire, F est décomposée en la somme de trois termes : un terme d'énergie cinétique, un terme dit de Coulomb représentant la composante non quantique de l'énergie d'interaction entre électrons, et un terme dit d'échange-corrélation qui porte l'erreur faite sur les deux termes précédents et sur lequel se concentre l'effort de modélisation.

Pour modéliser ce terme d'échange-corrélation, Kohn et Sham ont introduit l'approximation LDA (Local Density Approximation), donnant naissance au modèle Kohn-Sham LDA [2]. Des améliorations de ce modèle ont par la suite été proposées par de nombreux auteurs (voir par exemple [4]), résultant en une classe de modèles de type Kohn-Sham GGA (Generalized Gradient Approximation). Chaque modèle de type Kohn-Sham existe de plus en deux versions : une version standard avec nombres d'occupation des niveaux d'énergie entiers, et une version étendue avec nombres d'occupation fractionnaires.

A notre connaissance, il n'existe que très peu de résultats sur les modèles de type Kohn-Sham LDA et GGA dans la littérature mathématique, le principal étant l'existence d'un minimiseur pour le modèle LDA standard établie par Le Bris dans [3]. La complexité de ces modèles provient notamment de leur non-convexité par rapport à ρ et de leur non-compacité. En outre, les équations d'Euler-Lagrange dérivant de la minimisation sont semi-linéaires dans le cas LDA et quasi-linéaires dans le cas GGA.

Récemment, nous avons prouvé dans [1] l'existence d'un minimiseur pour le modèle Kohn-Sham LDA étendu. Par ailleurs, dans le cas où le système ne comprend que deux électrons, nous avons démontré l'existence d'un minimiseur pour le modèle Kohn-Sham GGA sous certaines conditions portant sur la fonctionnelle d'échange-corrélation GGA vérifiées par les fonctionnelles utilisées en pratique.

Après avoir présenté en détail la structure mathématique des modèles LDA et GGA, nous donnerons les grandes lignes des preuves de nos résultats d'existence et exposerons les difficultés que nous avons rencontrées pour étendre nos résultats sur le modèle GGA au cas général des systèmes à N électrons.

Références

1. A. Anantharaman, E. Cancès, *On Kohn-Sham models with LDA and GGA exchange-correlation functionals*, Preprint disponible sur <http://arxiv.org/abs/0809.5139>, 2008.
2. W. Kohn, L. J. Sham, *Phys. Rev.* 140 (1965) A1133.
3. C. Le Bris, *Quelques problèmes mathématiques en chimie quantique moléculaire*, Thèse de l'Ecole Polytechnique, 1993.
4. J.P. Perdew, Y. Wang, *Accurate and simple density functional for the electronic exchange energy : Generalized gradient approximation*, *Phys. Rev. B* 33 (1986) 8800-8802.

Une horloge circadienne minimale chez l'algue unicellulaire *Ostreococcus tauri*

P.-E. Morant¹, F. Corellou², Q. Thommen¹, C. Schwartz¹, C. Vandermoère¹, F.-Y. Bouget², & M. Lefranc¹

¹ Laboratoire PhLAM, UMR CNRS 8523, Université de Lille 1, F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

² Laboratoire Modèles en Biologie Cellulaire et Evolutive, UMR CNRS-Paris 6 7628, Observatoire Océanologique de Banyuls sur mer, BP44, 66651 Banyuls sur Mer Cedex, France.

thommen@phlam.univ-lille1.fr

Chez la plupart des organismes vivants, des horloges biologiques rythment de manière cyclique activité, température corporelle, alternance veille/sommeil, photosynthèse,... ainsi que de nombreux processus biologiques. Un exemple particulièrement important est celui de l'horloge circadienne, dont la période est d'environ 24 heures. En se synchronisant au cycle jour/nuit, elle permet d'anticiper les modifications périodiques de l'environnement et d'adapter son comportement en conséquence. Sa désynchronisation nous fait au contraire vivre le phénomène de décalage horaire associé aux vols long-courriers.

Les rouages de cette horloge se trouvent dans des réseaux biochimiques où interagissent gènes et protéines. Ces dernières régulent la production des gènes qui commandent leurs synthèse, formant ainsi des boucles de rétroaction positive et/ou négative. Les principaux composants des horloges circadiennes de plusieurs organismes (*Arabidopsis*, *Neurospora*, *Drosophila* ...) ont été identifiés ainsi que leurs interactions [1,5]. Cela a permis de constater que si les acteurs moléculaires varient d'un organisme à l'autre, les réseaux d'interaction présentent des structures similaires. Cela a motivé de nombreux travaux de modélisation (par ex. [4,2]), suggérant parfois des expériences biologiques clés [3]. Mais l'implication de nombreux acteurs moléculaires rend souvent difficile un accord quantitatif.

Nous avons étudié l'horloge circadienne d'un nouvel organisme, *Ostreococcus tauri*, découvert en 1994. Cette algue verte unicellulaire microscopique est le plus petit organisme eukaryote connu. Elle est remarquable par la simplicité de son génome et par l'absence de redondance dans les gènes de l'horloge. Comme point de départ, nous avons considéré un modèle minimal ne comportant que deux gènes organisés selon une boucle de rétroaction négative, ainsi que différentes hypothèses quant aux mécanismes d'action de la lumière sur l'horloge (par exemple, par la dégradation accélérée d'une protéine à la lumière), qui permettent à l'horloge de se synchroniser sur le cycle jour/nuit.

Ce modèle simple reproduit les données expérimentales avec un accord quantitatif étonnant. De manière encore plus surprenante, le meilleur ajustement est obtenu pour un couplage à la lumière nul, ce qui suggère que les mécanismes de remise à l'heure de l'horloge n'agissent pas sur une échelle de 24 heures mais sont localisés dans le temps, probablement autour de la transition jour/nuit. Ces résultats font de *Ostreococcus tauri* un système modèle particulièrement prometteur pour la biologie circadienne.

Références

1. J.C. Dunlap. Molecular bases for circadian clocks. *Cell*, 96 :271–290, 1999.
2. J. CW Locke *et al.* Extension of a genetic network model by iterative experimentation and mathematical analysis. *Molecular Systems Biology*, 88 :msb4100018, 2005.
3. J. CW Locke *et al.* Experimental validation of a predicted feedback loop in the multi-oscillator clock of *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Systems Biology*, 88 :59, 2006.
4. P. François. A model for the *Neurospora* circadian clock. *Biophysical Journal*, 88 :2369–2383, 2005.
5. M.W. Young and S. Kay. Time zones : a comparative genetics of circadian clocks. *NATURE GENETICS*, 2 :702–715, 2001.

Orbites régulières et transition de phases hors-d'équilibre dans les systèmes avec interactions à longue portée

R. Bachelard¹, C. Chandre², M.-E. Couprie¹, D. Fanelli³, X. Leoncini², & S. Ruffo³

¹ Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Saint-Aubin - BP 48, F-91192 Gif-sur-Yvette cedex, France

² Centre de Physique Théorique, CNRS-Aix-Marseille Université, Luminy, Case 907, F-13288 Marseille cedex 9, France

³ Centro interdipartimentale per lo Studio delle Dinamiche Complesse (CSDC) and INFN and Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", Università di Firenze, via s. Marta 3, 50139 Firenze, Italia

romain.bachelard@synchrotron-soleil.fr

Les interactions à longue portée (c'est-à-dire en $1/r^\alpha$, avec $\alpha < d$ la dimension du système) sont présentes dans de nombreux domaines de la physique [1], de l'interaction ondes-particules (physique des plasmas, lasers à électrons libres, etc) à l'astrophysique et aux condensats de Bose-Einstein. Or leur dynamique présente une caractéristique très particulière, celle de se retrouver piégée dans des régimes hors d'équilibre sur des temps très longs (divergents avec le nombre de particules). Ces dynamiques métastables sont appelés "états quasi-stationnaires".

Nous nous intéressons à ces états à travers le modèle paradigmatique Hamiltonian Mean Field [2]. Ce système de N rotateurs couplés est caractérisé macroscopiquement par sa magnétisation $M = \langle e^{ix_j} \rangle_{j=1:N}$, qui caractérise le degré d'agrégation des N corps. Les états quasi-stationnaires peuvent alors être décomposés en deux grandes familles, les états "magnétisés" et les états "non-magnétisés".

On peut alors montrer [3] que lorsque le nombre de degrés de liberté du système (c'est-à-dire le nombre de particules) augmente, les orbites régulières apparaissent et se multiplient, associées à des tores invariants de la dynamique d'une particule-test. La présence de ces tores représente une interprétation dynamique de l'émergence des états quasi-stationnaires, parallèlement à l'explication statistique de ce phénomène (réalisé grâce à un mécanisme de minimisation d'entropie). La transition de phases hors d'équilibre de ce système (d'un régime magnétisé à non-magnétisé) peut alors être réinterprétée comme une bifurcation dynamique des structures de l'espace des phases. Une phénoménologie similaire est observée dans un modèle de laser à électrons libres.

Références

1. T. Dauxois *et al.* (Eds.) *Dynamics and thermodynamics of systems with long-range interactions*, Lecture Notes in Physics **602** (Springer, Berlin, 2002).
2. M. Antoni and S. Ruffo, Phys. Rev. E **52**, 3261 (1995).
3. R. Bachelard *et al.*, Phys. Rev. Lett. (accepted)

Effets des perturbations spatiales sur la dynamique des fronts

F. Haudin¹, R. G. Elías², M. G. Clerc², U. Bortolozzo¹ et S. Residori¹

¹ INLN, Université de Nice Sophia-Antipolis, CNRS, 1361 route des Lucioles 06560 Valbonne, France

² Departamento de Física, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Casilla 487-3, Santiago, Chile

`florence.haudin@inln.cnrs.fr`

Dans un système spatialement étendu, et en présence de bistabilité entre deux états métastables, nous pouvons observer la formation d'états localisés, souvent décrite en termes d'interaction de fronts [1]. En effet, quand les deux états sont respectivement un état homogène et un état périodique, il y a un effet d'*agrafage* du front sur le réseau, ce qui bloque sa propagation et permet de stabiliser des structures localisées [2]. Quand les deux états métastables sont spatialement homogènes, le phénomène d'agrafage est absent et le front est immobile seulement au point de Maxwell, correspondant au point où les deux états ont la même énergie. Les solutions localisées sont alors toujours instables, car toute petite perturbation fera se propager le front vers l'état énergétiquement le plus favorisé.

Dans ce travail, nous avons étudié les effets qu'une modulation spatiale va introduire sur la dynamique des fronts. Dans une expérience d'optique non linéaire, constituée par un dispositif à cristaux liquides inséré dans une boucle de rétroaction, nous avons fixé les paramètres de manière à avoir bistabilité entre deux états homogènes [3]. Il est donc possible d'observer le type de dynamique décrit ci-dessus : dans la zone de bistabilité, un front induit par une condition initiale appropriée se propage de manière à ce que l'état énergétiquement le plus favorisé envahisse tout l'espace, et les états localisés de taille quelconque sont instables. Nous allons montrer qu'en modulant spatialement les deux états homogènes l'on obtient un effet nouveau. La perturbation est réalisée en modulant avec une petite amplitude (moins de 10 pourcents) l'intensité de la lumière à l'entrée de la boucle de rétroaction. Cela induit une petite modulation spatiale sur l'état haut et bas du système. Dans ce cas, nous observons une large région d'agrafage du front, au-delà de laquelle le front se propage avec une vitesse oscillante. A l'intérieur de la région d'agrafage, il est possible de stabiliser des états localisés de taille différente.

Théoriquement, nous avons considéré un modèle unidimensionnel de type Ginzburg-Landau. Les ingrédients nécessaires sont la bistabilité entre deux états homogènes et un forçage périodique dans l'espace :

$$\partial_t u = \eta + \varepsilon u - u^3 + \partial_{xx} u + \Gamma_{dx}(x)(\partial_x u)^2, \quad (1)$$

où u est l'amplitude de l'état homogène, η le paramètre de brisure de symétrie, ε le paramètre de bifurcation et Γ_{dx} l'opérateur qui modélise la perturbation spatiale. Les simulations numériques de cette équation montrent l'existence d'une zone d'agrafage du front sur toute une plage de valeurs de η . De plus, de part et d'autre de la zone d'agrafage le front se propage avec une vitesse oscillante. L'extension de la région d'agrafage, ainsi que l'amplitude des oscillations de la vitesse du front, dépendent du pas dx de la modulation.

L'effet d'une modulation spatiale permet donc de réaliser une méthode de contrôle simple et robuste de la dynamique du front qui connecte deux états homogènes métastables.

Références

1. M.C. Cross, P.C. Hohenberg, Rev. of Mod. Phys. **65**, 851-1112 (1993)
2. Y. Pomeau, Physica D, **23**, 3 (1986)
3. S. Residori, Phys. Rep., **416**, 201 (2005)

1D Cahn-Hilliard equation for modulated phase systems

Simon Villain-Guillot

CPMOH Bordeaux

`s.villain@cpmoh.u-bordeaux1.fr`

Modulated phase patterns can be modeled by a modified Cahn-Hilliard equation which includes a non local term which prevents the formation of macroscopic domains. Using stationary solutions of the original Cahn-Hilliard equation as analytical ansatzs, we compute the thermodynamically stable period of a 1D modulated phase pattern. We find that the period scales like the power $(1/3)$ of the strength of the long range interaction

Ondes non linéaires dans l'expérience de Faraday

N. Rojas¹, M. Argentina¹, E. Cerda² & E. Tirapegui³

¹ Université de Nice-Sophia-Antipolis, UFR Sciences, LJAD, Parc Valrose, 28, avenue Valrose, 06108 Nice Cedex 2, France

² Departamento de Física and Centro para Investigacion Interdisciplinaria Avanzada en Ciencias de los Materiales, Universidad de Santiago, Av. Ecuador 3493, Santiago, Chile.

³ Facultad de Ciencias Físicas y Mat., Depto. Física, Univ. de Chile, casilla 487-3, Santiago, Chile
Nicolas.ROJAS@unice.fr

Dans un article publié en 1831, M Faraday décrit la formation de structures obtenues en vibrant un plateau recouvert par un milieu granulaire [1]. En annexe, il étudie les patterns constitués d'ondes de surface d'un fluide vibré. Bien plus tard [2], avec l'hypothèse de fluide non visqueux, l'origine de l'instabilité fut proposée : une résonance paramétrique. En approximation shallow water, les ondes de surface se comportent comme des oscillateurs harmoniques de fréquence \sqrt{gk} , k étant le nombre d'onde. La vibration périodique du récipient contenant ce fluide induit donc une variation périodique de la fréquence des ondes. L'amplitude des ondes de surface obéit donc à une équation de Mathieu, dont les solutions se déstabilisent avec un forçage sous harmonique. Lorsque les effets visqueux sont pris en compte, la surface du fluide vibré se déforme en produisant de petites vagues avec des longueurs caractéristiques sans lien avec la taille du récipient. Les expériences menées sur les fluides visqueux ont montré une grande variété de patterns, comme des carrés, des hexagones, des rhomboïdes [3,4,5,6] mais aussi des quasi-patterns [7,5,6] ou encore des oscillons [8,9,6]. Du point de vue théorique, l'inclusion de la dissipation visqueuse dans la détermination du seuil d'instabilité permet d'obtenir de bonnes prédictions par rapports aux mesures expérimentales [10].

Dans ce travail, nous proposons une dérivation robuste des équations non linéaires qui décrivent la dynamique de l'épaisseur de la couche de fluide et la dynamique des flux de masse. Notre approche, générale, permet de décrire les couches de fluide mince avec de petits nombres de Reynolds.

Références

1. M. Faraday, On the forms and states of fluids on vibrating elastic surfaces, Phil. Trans. R. Soc. Lond. **52**, 319-340 (1831).
2. T. B. Benjamin y F. Ursell, The stability of the plane free surface of a liquid in vertical periodic motion, Proc. Roy. Soc. London **A**, **225**, 505 (1954).
3. H. W. Muller, Periodic triangular patterns in the Faraday experiment, Phys. Rev. Lett. **71**, 3287 (1993).
4. H. Arbell, J. Fineberg, Two-mode rhomboidal states in driven surface waves, Phys. Rev. Lett. **84** (4), 654 (1999).
5. H. Arbell, J. Fineberg, Temporally harmonic oscillons in newtonian fluids, Phys. Rev. Lett. **85** (4), 756 (2000).
6. H. Arbell, J. Fineberg, Pattern formation in 2-frequency forced parametric waves, Phys. Rev. Lett. **E**, **65**, 036224 (2002).
7. W. S. Edwards y S. Fauve, Parametrically excited quasicrystalline surface waves, Phys. Rev. Lett., **E**, **47**, 788 (1993).
8. J. Wu, R. Keolian, I. Rudnick, Observation of a nonpropagating hydrodynamic soliton, Phys. Rev. Lett. **52**, 1421 (1984).
9. O. Lioubashevski, H. Arbell & J. Fineberg, Dissipative solitary states in driven surface waves, Phys. Rev. Lett. **76**, 3959 (1996).
10. E. A. Cerda, E. L. Tirapegui, Faraday's instability in viscous fluid, J. Fluid Mech. **368**, 195 (1998).

Simulation numérique des ondes de Faraday

Périnet Nicolas¹, Damir Juric² & Laurette Tuckerman¹

¹ PMMH ESPCI, UMR 7636, 10 rue Vauquelin - 75231 PARIS CEDEX 5 - FRANCE

² LIMSI-CNRS, BP 133, Bât 508 - F-91403 ORSAY CEDEX - FRANCE

perinet@pmmh.espci.fr

Quand deux fluides superposés sont soumis à une oscillation verticale, leur interface, initialement plane, peut former des motifs qui perdurent dans le temps si l'oscillation appliquée est d'intensité suffisante. Ce phénomène, l'instabilité de Faraday [1], constitue un modèle macroscopique d'une richesse extraordinaire permettant d'expliquer la formation de motifs. En effet, des motifs beaucoup plus singuliers que les réseaux cristallins classiquement rencontrés ont été observés : quasi-cristaux [2,3], oscillons [4] et super-réseaux [5].

Nous avons réalisé un code tridimensionnel non linéaire pour explorer les possibilités de motifs offertes par l'instabilité de Faraday. Une méthode de 'Front-Tracking' a été mise au point pour la recherche des forces de tension superficielle et l'advection de l'interface ; la résolution des équations de Navier-Stokes est faite à l'aide d'une méthode de projection [6,7] appliquée à un schéma aux différences finies.

Dans le régime linéaire, les calculs de seuils d'instabilité [8] et les modes propres temporels décrivant la position d'un point de l'interface ont permis une validation préliminaire du code. Celle-ci a été appuyée par une comparaison quantitative avec un article expérimental [9] des motifs carrés et hexagonaux apparaissant à saturation, pour différentes accélérations supérieures à l'accélération critique. L'évolution des spectre spatiaux et les spectres spatio-temporels sont en accord avec les résultats expérimentaux [9], aux incertitudes près.

Cependant, l'expérience [10] et les premières simulations numériques sembleraient mettre en évidence que les motifs hexagonaux sont transitoires. Leurs apparitions et disparitions successives au profit de motifs ayant d'autres symétries montreraient que le régime hexagonal serait un point fixe d'une orbite hétérocline.

Références

1. M. Faraday, "On a peculiar class of acoustical figures ; and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surfaces," *Philos. Trans. R. Soc. London* **121**, 299–340 (1831).
2. B. Christiansen, P. Alstrøm and M. T. Levinsen, "Ordered Capillary-Wave States : Quasicrystals, Hexagons, and Radial Waves," *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2157–2161 (1992).
3. W. S. Edwards and S. Fauve, "Patterns and quasi-patterns in the Faraday experiment", *J. Fluid Mech.* **278**, 123–148 (1994).
4. O. Lioubashevski, H. Arbell and J. Fineberg, "Dissipative solitary states in driven surface waves," *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3959–3962 (1996).
5. A. Kudrolli, B. Pier and J. P. Gollub, "Superlattice patterns in surface waves," *Physica D* **123**, 99–111 (1998).
6. A. J. Chorin, "Numerical simulation of the Navier-Stokes equations," *Math. Comput.* **22**, 745–762 (1968).
7. R. Temam, "Navier-Stokes Equations, Theory and Numerical Analysis," North-Holland, Amsterdam, 1984.
8. K. Kumar and L. S. Tuckerman, "Parametric instability of the interface between two fluids," *J. Fluid Mech.* **279**, 49–68 (1994).
9. A. V. Kityk, J. Embs, V.V. Menkhonoshin, C. Wagner, "Spatiotemporal characterization of interfacial Faraday waves by means of a light absorption technique,"
10. A. Kityk, C. Wagner (personal communication, 2008).

Comportement critique dans les écoulements ouverts forcés

Benjamin Thiria & José Eduardo Wesfreid

Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles, UMR 7636 CNRS-P6-P7, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris, France.

bthiria@pmmh.espci.fr

Proche du seuil, la dynamique globale de certaines instabilités hydrodynamiques peut être décrite par de simples modèles d'oscillateurs non-linéaires, permettant alors de prédire le comportement global du fluide en terme de fréquence, front et amplitude de la perturbation en fonction du paramètre propre de l'instabilité [1,2].

Des études récentes ont montrées que dès lors qu'un tel écoulement était perturbé (ce qui est le cas des écoulements contrôlés ou encore des interactions fluides-structures), sa dynamique intrinsèque s'en trouvait changée, modifiant automatiquement ses propriétés de stabilité [3,4]. L'écoulement ainsi forcé sélectionne un autre mode défini par un nouveau front, une autre fréquence,... Pour un forçage conséquent, les taux de croissances peuvent être complètement stabilisés, alors même que le système se trouve loin du seuil. Dans cette communication, nous montrons que ces écoulements forcés (ici l'instabilité de Bénard-von Kàrmàn est soumise à des perturbations temporelles locales) présentent des comportements critiques similaires à ceux observés pour des systèmes libres lorsqu'ils s'approchent de la transition entre écoulements stables et instables. Nous montrons aussi que ces comportements peuvent être expliqués par une distortion de l'écoulement moyen modifiant les cycles limites sélectionnés. Nous discutons un modèle d'équations non-linéaires couplées prenant en compte cette modification de l'écoulement moyen permettant de rendre compte de la dynamique de tels systèmes.

Références

1. M. PROVANSAL, C. MATHIS & L. BOYER, Bénard-Von Karman instability : transient and forced regimes, *J. Fluid Mech.* **182**, 1–22. (1987)
2. J.E. WESFREID & B. ZIELINSKA, On the spatial structure of global modes in wake flow, *Phys. Fluid.* **7**, 1418–1424 (1995)
3. B. THIRIA & J.E. WESFREID, Stability properties of forced wakes, *J. Fluid. Mech.* **579**, 137–161 (2007)
4. B. THIRIA & J.E. WESFREID, Critical properties of forced wakes, Preprint (2008)

Instabilité convective en milieu inhomogène : la réponse impulsionnelle dans le sillage sous-critique d'un cylindre.

C. Marais¹, R. Godoy-Diana¹, D. Barkley² & J.E. Wesfreid¹

¹ PMMH, Equipe Instabilités, Contrôle et Turbulence, CNRS ESPCI, Univ. Paris 6 et Paris 7.

² Mathematics Institute, University of Warwick

marais@pmmh.espci.fr

Nous étudions expérimentalement la réponse impulsionnelle du sillage d'un cylindre en régime sous-critique ($Re < Re_c$), dans un tunnel hydrodynamique. Dans ce régime sous-critique, il existe une région localisée d'instabilité convective qui entraîne une amplification transitoire de toute perturbation initiale. Ce phénomène est dû à l'inhomogénéité du milieu. La réponse de l'écoulement à une perturbation impulsionnelle est étudiée avec la méthode de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) à deux dimensions. L'évolution du paquet d'ondes est décrite quantitativement à partir des séries temporelles des champs de vitesse calculés, et permet de rendre compte de la croissance transitoire de la perturbation. Nous avons caractérisé le comportement du paquet d'onde en fonction de deux paramètres : le nombre de Reynolds et la force de la perturbation imposée. Pour chaque expérience nous avons déterminé la position en temps et espace de l'amplitude maximale de perturbation, ainsi que les vitesses de groupe et de fronts du paquet d'onde. De plus, l'évolution temporelle de l'énergie montre une croissance algébrique transitoire aux temps courts suivie d'une décroissance exponentielle. La mesure des taux de décroissance associés en fonction du nombre de Reynolds se compare très favorablement à un calcul numérique 2D (DNS).

Etude expérimentale des modes piégés dans un guide d'ondes

P. Cobelli¹, P. Petitjeans¹, A. Maurel², & V. Pagneux³

¹ Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, UMR CNRS 7636, ESPCI

² Laboratoire Ondes et Acoustique, UMR CNRS 7587, ESPCI

³ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, UMR CNRS 6613

Avenue Oliver Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9

cobelli@pmmh.espci.fr

Dans la théorie linéaire des ondes de surface, les modes piégés sont des modes propres d'oscillation dans un milieu ouvert. Ils se produisent à des fréquences en dessous d'un certain seuil et persistent dans la région localisée autour d'un obstacle partiellement ou totalement immergé.

Cette étude expérimentale s'intéresse aux modes piégés par un cylindre vertical placé au centre d'un guide d'ondes dans une cuve d'eau de 5 cm de profondeur. Une technique de profilométrie 3D de haute résolution temporelle et spatiale récemment développée au laboratoire nous permet de mesurer la déformation de la surface libre du liquide et de détecter les modes piégés.

La fréquence de résonance est déterminée expérimentalement et la structure spatiale de ces modes est mise en évidence. La caractéristique globale de notre méthode de mesure permet aussi une séparation en partie symétrique et antisymétrique ainsi qu'une décomposition en modes linéaire et non-linéaires (amplitude et phase).

Les résultats de cette étude expérimentale montrent un très bon accord avec les prédictions théoriques et les simulations numériques, et constituent la première preuve expérimentale de l'existence de ces modes jamais observés avec autant de détails.

Références

1. Callan, M. & Linton, C.M. & Evans, D.V., *J. Fluid Mech.* (1991) **229**, 51–64.
2. Evans, D.V. & Linton, C.M., *J. Fluid Mech.* (1991) **225**, 153–175.
3. Linton, C.M. & Evans, D.V., *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (1992) **338**, 325–357.
4. Berry, M., *Nature* (2000) **403**, 21.
5. Retzler, C.H., *Appl. Ocean Res. Tech. Note* (2001) **23**, 249–250.
6. Duclos, G. & Clément, A.H., *Ocean Eng.* (2004) **31**, 1655–1668.
7. Li, Y. & Mei, C.C., *J. Fluid Mech.* (2006) **561**, 391–416.
8. Motygin, O.V., *Wave Motion* (2008) **45**, 940–951.

Instabilités d'écoulements granulaires bidisperses en cisaillement sur un plan incliné

Axelle Amon, Renaud Delannay, & Alexandre Valance

Institut de Physique de Rennes, UMR UR1-CNRS 6251, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex

`axelle.amon@univ-rennes1.fr`

La physique des écoulements granulaires denses est encore mal comprise. Un dispositif typique pour étudier de tels flots consiste à entretenir un écoulement dans un canal, situation correspondant à des configurations industrielles de transport des grains. Les paramètres de contrôle d'un tel dispositif sont l'inclinaison du fond du canal et le débit du silo délivrant les grains. De nombreuses études ont été faites dans le cas de grains monodisperses sur un fond rugueux, c'est à dire constitué de grains collés sur un plan rigide [1,2]. Il a été montré qu'il existe des valeurs des paramètres pour lesquels l'écoulement est stationnaire et d'épaisseur uniforme dans le canal [1]. Dans le cas de billes de verre monodisperses, le rapport des tailles des grains qui s'écoulent sur ceux qui constituent le fond rugueux gouverne le coefficient de friction effectif subit par l'écoulement et donc la vitesse de l'écoulement dans le régime stationnaire [3].

Nous nous intéressons à des situations dans lesquelles deux écoulements granulaires s'écoulent parallèlement en cisaillement sur le même plan incliné. En effet, alors qu'en hydrodynamique le développement d'instabilités entre des couches de fluides différents en cisaillement est un domaine bien documenté (instabilités de type Kelvin-Helmholtz), dans les milieux granulaires il y a encore peu de résultats sur ce type de systèmes. La seule étude à notre connaissance sur ce type d'instabilités [3] mettait en jeu deux écoulements de mêmes grains irréguliers (sable) à des débits différents dans un canal à fond lisse. Des instabilités à l'interface entre les deux écoulements ont été observées pour des angles faibles d'inclinaison du plan. Néanmoins, les écoulements dans cette expérience sont accélérés le long du plan incliné ce qui rend difficile la modélisation des phénomènes mis en jeu.

Nous avons développé un dispositif expérimental utilisant les propriétés des écoulements sur fond rugueux : on peut obtenir sur un même plan incliné des écoulements stationnaires de vitesses différentes pour deux types de granulaires, c'est à dire des billes de verre de diamètres différents. Nous pouvons ainsi obtenir un cisaillement à l'interface entre deux écoulements granulaires. Pour certaines valeurs de l'angle d'inclinaison du plan et des débits des silos, nous avons observé le développement d'une instabilité à l'interface entre les deux flots. Ce résultat est nouveau : dans l'étude précédente sur fond lisse, aucune instabilité n'avait été observée lorsque les grains utilisés étaient des billes de verre monodisperses. Des études systématiques de manière à cerner les critères d'apparition de l'instabilité ont été entreprises. L'évolution de la hauteur de la couche de granulaire sur la largeur de l'écoulement est complexe et peut présenter elle-même des instabilités (oscillations de la hauteur de l'écoulement). Des effets à l'interface entre les deux granulaires, sans doute liés à la ségrégation, ont été observés.

Références

1. O. Pouliquen, "Scaling laws in granular flows down rough inclined planes", *Physics of Fluids*, **11**, 542-548 (1999).
2. GDR MiDi, "On dense granular flows", *Eur. Phys. J. E* **14**, 341 (2004).
3. C. Goujon, N. Thomas and B. Dalloz-Dubrujeaud, "Monodisperse dry granular flows on inclined planes : Role of roughness", *Eur. Phys. J. E* **11**, 147 (2003).
4. D. J. Goldfarb, B. J. Glasser, T. Shinbrot, "Shear instabilities in granular flows", *Nature*, **415**, 302-305 (2002).

Dynamique de formation d'un cratère dans un milieu granulaire immergé

Germán Varas, Valérie Vidal, & Jean-Christophe Géminard

Université de Lyon, Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon, CNRS, 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France.

german.varas@ens-lyon.fr

L'étude de la morphologie des cratères a un domaine d'application très large, allant des impacts de météorites [1] à la dynamique moléculaire [2], en passant par le séchage de peinture [3] ou la formation de structures volcaniques [4]. La dynamique du système peut alors jouer un rôle crucial : dans la mise en place des cratères volcaniques, par exemple, la compétition entre le flux de masse émis par le volcan (gaz et ejecta) et l'évolution de la taille du cratère pourrait contrôler directement la nature - et donc, les conséquences - de l'éruption [4]. La morphologie des cratères en milieu granulaire sec a été largement étudiée, expérimentalement ou numériquement [5]. En milieu immergé, un écoulement d'eau ou de gaz à travers un lit granulaire peut induire des instabilités localisées et de la fluidification [6] conduisant, par la suite, à la formation d'un cratère à la surface libre. Une étude expérimentale de Gostiaux *et al.* [7] a montré que l'écoulement d'air à travers une couche granulaire immergée pouvait se faire selon différents régimes : à bas débit, des bulles remontent indépendamment les unes des autres (régimes *bulles*) ; à fort débit, l'écoulement de gaz crée et maintient un canal stable à travers le système (régime *canal ouvert*) ; enfin, à débit intermédiaire, on observe une alternance spontanée du système entre les deux régimes précédents (régime *intermittent*).

Afin de connaître l'influence des différents régimes d'émission du gaz sur la formation et la dynamique des cratères en milieu immergé, nous avons réalisé l'étude expérimentale suivante : un flux d'air est injecté par un trou millimétrique à la base d'une couche de grains de taille fixée (initialement plane, de hauteur h_g), immergée sous une hauteur d'eau h_w . En 2D, le cratère consiste en deux talus symétriques autour du point d'émission du gaz. Au cours du temps, par dépôts successifs des grains, l'amplitude des talus augmente et leur maximum s'éloigne du point d'émission. On observe que la taille typique du cratère (distance entre les maxima des talus) augmente logarithmiquement au cours du temps. Une étude quantitative permet de décrire l'influence des différents paramètres expérimentaux (hauteur d'eau et de grains, taille des grains, débit). On montre en particulier que la dynamique de formation des cratères ne dépend que du débit et de la taille des grains, et n'est pas modifiée par les changements de régime d'émission du gaz [8].

Références

1. D.G. Korycansky & K.J. Zahnle, *Icarus* **169**, 287 (2004).
2. Z. Insepov *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. B* **206**, 846 (2003).
3. P.L. Evans, L.W. Schwartz & R.V. Roy, *J. Colloid Interface Sci.* **227**, 191 (2000).
4. A.W. Woods & S.M. Bower, *Earth Planet. Sci. Lett.* **131**, 189 (1995).
5. X.-J. Zheng, Z.-T. Wand & Z.-G. Qiu, *Eur. Phys. J. E* **13**, 321 (2004) ; S.J. de Vet & J.R. de Bruyn, *Phys. Rev. E* **76**, 041306 (2007) ; K. Wada, H. Senshu & T. Matsui, *Icarus* **180**, 528 (2006).
6. P. Rigord *et al.*, *Gran. Matt.* **7**, 191 (2005) ; F. Zoueshtiagh & A. Merlen, *Phys. Rev. E* **75**, 056313 (2007).
7. L. Gostiaux, H. Gayvallet & J.-C. Géminard, *Gran. Matt.* **4**, 39 (2002).
8. G. Varas, V. Vidal & J.-C. Géminard, *Dynamics of crater formations in immersed granular materials*, accepté à *Phys. Rev. E* (déc. 2008).

Sédimentation de particules en présence de convection thermique. Application à la cristallisation des chambres magmatiques et à la séparation métal-silicate dans l’océan de magma terrestre.

Guillaume Lavorel & Michael Le Bars

IRPHE - UMR 6594 Technopôle de Château-Gombert 49, rue Joliot Curie - B.P. 146 13384 Marseille Cedex 13, France

lavorel@irphe.univ-mrs.fr

L’étude de la sédimentation de particules dans un fluide en convection est de grand intérêt pour la compréhension de certains processus intervenant dans les systèmes géophysiques. Une meilleure connaissance des mécanismes mis en jeu peut permettre, par exemple, de mieux appréhender la dynamique de la séparation métal-silicate dans l’océan de magma apparu durant la formation de la Terre. Elle peut également aider à la compréhension des mécanismes de suspension et de différenciation dans les systèmes partiellement fondus comme les chambres magmatiques.

Dans cette perspective, nous avons mis au point une expérience permettant de quantifier au cours du temps la vitesse de sédimentation et la fraction solide en suspension en fonction de la vigueur de la convection (caractérisé par le nombre de Rayleigh Ra) et l’intensité de la stratification (caractérisée par le rapport $\frac{\Delta\rho}{\rho}$). Le dispositif est constitué d’une cuve ($20 \times 20 \times 4$ cm) chauffée par le dessous et refroidie par le dessus. Cette cuve est remplie d’eau salée (dont la densité peut être choisie entre 0.999 et 1.200 g.cm^{-3} en diluant plus ou moins de $NaCl$) et de billes de PMMA (densité 1.188 g.cm^{-3}). La cuve est éclairée par le côté par une tranche lumineuse, de façon à ce que les billes soient visibles dans le fluide. En enregistrant un film pendant chaque expérience et à l’aide d’un traitement d’images *a posteriori*, nous déterminons le nombre de billes restées en suspension en fonction du temps.

Ainsi, nous observons systématiquement deux phases : (i) une sédimentation initiale, rapide, où les mouvements de convection ne sont pas encore en place et où l’inertie du mélange initial est prépondérante; (ii) un régime final où l’évolution de la fraction solide en suspension au cours du temps est correctement décrit par une équation de convection-diffusion, obtenu en introduisant un flux diffusif dû à la turbulence. Nous pouvons alors obtenir des lois d’échelle des grandeurs physiques en fonction de Ra et $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, en accord avec les résultats expérimentaux. Nous introduisons également un nombre de Peclet Pe défini comme le rapport du produit de la vitesse de sédimentation par la hauteur par le coefficient de diffusion turbulente, qui permet de distinguer deux régimes. Si $Pe < Pe_c$, où Pe_c est un nombre de Peclet critique, la diffusion turbulente est dominante et les particules tendent à rester en suspension. Au contraire, si $Pe > Pe_c$, les particules ont tendance à sédimenter, les mouvements convectifs ne sont pas suffisamment efficaces pour maintenir les particules en suspension. En évaluant Pe_c , nous pouvons déduire dans quel régime se trouvent les deux systèmes géophysiques considérés. En outre, notre modèle permet de calculer le temps de sédimentation des gouttelettes de fer dans l’océan initial.

Références

1. T. Hoink, J. Schmalzl & U. Hansen. Dynamics of metal-silicate separation in a terrestrial magma ocean. *G3*, 7(9), 2006.
2. D. Martin & R. Nokes. Crystal settling in a vigorously convecting magma chamber. *Nature*, 332, 1988.
3. D. Rubie, H. Melosh, J. Reid, C. Liebske & K. Righter. Mechanisms of metal-silicate equilibration in the terrestrial magma ocean. *EPSL*, 205 : 239-255, 2003.
4. V. Solomatov, P. Olson & D. Stevenson. Entrainment from a bed of particles by thermal convection. *EPSL*, 120 : 387-393, 1993.

Cascades de bulles à travers une couche mince de fluide non-Newtonien

Valérie Vidal, Thibaut Divoux, François Soubiran & Jean-Christophe Gémard

Université de Lyon, Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon, CNRS, 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France.

Valerie.Vidal@ens-lyon.fr

La dynamique de passage d'un gaz à travers une couche de fluide non-Newtonien peut présenter différents régimes : à faible débit, on observe l'émission de bulles successives (régime *bulles*) ; à fort débit, un *canal ouvert* traverse le système, et le gaz est émis continûment [1,2] ; enfin, pour des débits intermédiaires, on observe une alternance spontanée entre le régime *bulles* et le régime *canal ouvert* [2,3]. Dans le cas d'un fluide viscoélastique et rhéofluidifiant, la formation d'un tel canal est directement liée aux propriétés rhéologiques du fluide. Ces dernières sont responsables, d'une part, de la forme et de la dynamique des bulles isolées [4,5], et d'autre part, de l'interaction non-triviale des bulles en ligne, due au sillage négatif (*'negative wake'*) et à la chute de la viscosité locale induite par le passage d'une bulle [1,3,6,7]. Dans le cas limite d'une couche *mince* (de l'ordre de la taille d'une bulle), la dynamique de l'émission d'un gaz reste à caractériser.

Nous avons réalisé l'étude expérimentale du passage d'un flux continu d'air à travers une couche mince d'un mélange CTAB + NaSal. Ce fluide se caractérise par son caractère rhéofluidifiant et viscoélastique dont les propriétés, bien tabulées, peuvent être modifiées en faisant varier sa concentration c . On injecte un flux d'air constant Φ dans une chambre de volume V , connectée à une buse millimétrique au bas de la couche de fluide, et on mesure la surpression δP dans la chambre au cours du temps. Dans le régime *bulles*, nous observons, pour une certaine gamme de paramètres (V, Φ, c), que l'air est émis à travers le fluide non plus sous la forme de bulles isolées, mais de *cascades de bulles* successives. Nous montrons que la distribution temporelle des bulles émises à l'intérieur d'une même cascade présente une transition entre deux régimes, que l'on peut relier à la rhéologie du fluide. L'étude de ces cascades représente donc une méthode non-intrusive pour sonder les propriétés non-linéaires d'un fluide.

Références

1. I. L. KLIAKHANDLER, Phys. Fluids **14**, 3375 (2002).
2. L. GOSTIAUX, H. GAYVALLET & J.-C. GÉMINARD, Gran. Matt. **4**, 39 (2002).
3. T. DIVOUX, E. BERTIN, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, *Intermittent outgassing through a non-Newtonian fluid*, arXiv :0810.3095v1 [cond-mat.stat-mech] (2008).
4. A. BELMONTE, Rheol. Acta **39**, 554 (2000).
5. N.Z. HANDZY & A. BELMONTE, Phys. Rev. Lett. **92**, 124501 (2000).
6. H.Z. LI, Y. MOULINE, D. FUNFSCHILLING, P. MARCHAL, L. CHOPLIN & N. MIDOUX, Chem. Eng. Sci. **53**, 2219 (1998).
7. S. DAUGAN, L. TALINI, B. HERZHAFT & C. ALLAIN, Eur. Phys. J. E **7**, 73 (2002) ; *ibid.*, Eur. Phys. J. E **9**, 55 (2002).

Observation directe de la formation spontanée d'un réseau de veines dans *Physarum polycephalum*

Paul Dély¹, C. Szwaj¹, S. Bielawski¹, T. Nakagaki²

(1) : Laboratoire PhLAM, UMR CNRS 8523, CERLA, FR CNRS 2416,
Université des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.

(2) RIES, Hokkaido university, Sapporo, Japan.
`serge.bielawski@univ-lille1.fr`

La formation de vaisseaux est un phénomène particulièrement vital pour les systèmes biologiques. Cependant, la complexité des organismes modèles classiques (plantes, animaux) rend délicate l'étude détaillée de la formation progressive de ces structures spatiales en fonction du temps.

Dans ce travail nous étudions la formation spontanée d'un réseau de veines dans un organisme modèle "relativement simple", *Physarum polycephalum* [1], ou encore *slime mold*. C'est un organisme unicellulaire macroscopique dont la taille atteint typiquement plusieurs centimètres de la famille des myxomycètes. *Physarum* présente des oscillations d'épaisseur, avec une période de l'ordre de la minute, qui génèrent des mouvements du cytoplasme, et une structuration de la cellule en un réseau de canaux et de veines [2].

Nous présentons ici des résultats expérimentaux sur l'observation directe en fonction du temps par microscopie infrarouge, de la formation des veines à partir du liquide cytoplasmique. Techniquement, la détermination et l'analyse des régions où le fluide est en mouvement est possible grâce à la présence naturelle de granules à l'intérieur du cytoplasme. La formation du réseau de veines à partir des zones liquides passe par la formation de zones solides (transition sol-gel), due à une réaction de polymérisation réversible des filaments d'actomyosine. Nous observons que la structuration fait apparaître des piliers, qui croissent en remontant le courant cytoplasmique. Ce comportement rappelle l'intussusception, observée dans la formation des vaisseaux sanguins.

Un des objectifs est d'obtenir des données expérimentales qui serviront de base au développement et au test de modèles (de type microfluidique) pour *Physarum*. Un des challenges sera de connaître les liens possibles avec la formation de réseaux de veines dans d'autres contextes, comme la vasculogenèse et l'angiogenèse.

Références

1. T. NAKAGAKI, H. YAMADA AND A. TOTH., NATURE 407, 470 (2000).
2. T. NAKAGAKI, H. YAMADA AND T. UEADA, BIOPHYS. CHEM. 84, 195 (2000).

Oscillation globale de canaux ioniques

G. Boedec¹, M. Jaeger¹, F. Homblé² & M. Leonetti³

¹ M2P2, Aix-Marseille Université, Ecole Centrale de Marseille, Technopôle de Château-Gombert, Marseille Cedex France

² Structure et Fonction des Membranes Biologiques, Centre de Biologie Structurale et Bioinformatique, Campus Plaine (CP206/2), B-1050 Bruxelles, Belgique

³ IRPHE, Aix-Marseille Université, CNRS, Technopôle de Château-Gombert, BP 146, 13384 Marseille Cedex 13 France

gwenn.boedec@L3M.univ-mrs.fr

Résumé.

L'activité électrique des cellules ou de tissus est à l'origine de nombreux phénomènes spatiotemporels : arythmies cardiaques, potentiel d'action ou influx nerveux, oscillation temporelle et modulation spatiale stationnaire du potentiel électrique de membrane. On retrouve dans les phénomènes bioélectriques, une grande partie de la zoologie observée dans l'auto-organisation des systèmes de réaction-diffusion. Pour résumer, il résulte de l'activité électrique cellulaire, une grande richesse dans la dynamique du champ électrique local et des concentrations ioniques volumiques.

Divers modèles ont été proposés dans la littérature pour décrire l'apparition de structures stationnaires. Le but n'est pas ici d'en proposer un nouveau mais, plutôt d'explorer les structures spatiotemporelles possibles au-delà du seuil dans le cadre du modèle d'auto-agrégation de canaux ioniques et de ses proches voisins [1,2,3,4]. La pertinence de cette instabilité est discutée dans la référence [5]. Plusieurs instabilités secondaires ont d'ores et déjà été caractérisées : dérive par exemple [6]. Ici, nous étudions numériquement une instabilité secondaire caractérisée par une oscillation globale de la densité de protéines membranaires dans une cellule circulaire. Son portrait de phase établi en 3D dans l'espace $(a_1; b_1; a_2)$ des coefficients réels de Fourier des modes $m = 1$ et $m = 2$ est constitué d'une boucle hétérocline entre deux points fixes, les deux modes quadrupolaires $m = 2$ semblables à une rotation de $\pi/2$ près. La période augmente avec le temps comme prévu par la théorie (en log).

Références

1. L. JAFFE, Electrophoresis along cell membranes, *Nature* **265**, 600-602 (1977).
2. R. LARTER AND P. ORTOLEVA, A study of instability to electrical symmetry breaking in unicellular systems, *J. Theor. Biol.*, **96**, 175-200 (1982).
3. P. FROMHERZ AND W. ZIMMERMANN, Stable spatially periodic patterns of ion channels in biomembranes, *Phys. Rev. E* **51**, R1659-R1662 (1995).
4. M. LEONETTI AND E. DUBOIS-VIOLETTE, Pattern formation by electro-osmotic self-organization in flat biomembranes, *Phys. Rev. E* **56**, 4521 (1997).
5. F. HOMBLE AND M. LEONETTI, Origin of symmetry breaking in fucoid zygotes, *Trends in Plant Sciences* **12**, 253-259 (2007).
6. M. LEONETTI, J. NUEBLER AND F. HOMBLE, Parity-Breaking instability in patterns of ion channels, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 218101 (2006).

L'épidémie de chikungunya : modélisation et stabilité

D. Moulay¹, M. Cadivel², & M.A. Aziz-Alaoui³

Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (LMAH), Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon,
BP540, 76058 Le Havre

djamila.moulay@univ-lehavre.fr

Le virus *chikungunya* est un arbovirus (de l'anglais : **arthropode borne virus**), du même type que la Dengue, isolé pour la première fois en 1953 et transmis par un vecteur, le moustique *Aedes Albopictus*. Ce virus entraîne des pathologies lourdes pour les personnes contaminées. La Réunion a connu en 2005 une épidémie de chikungunya. Après un premier pic en mai 2005 (400 contaminations par semaine), l'épidémie a été ralentie par l'arrivée de l'hiver austral. En effet les températures plus basses et une hygrométrie plus faible, durant cette période, ont fortement limité la croissance de l'*Aedes Albopictus*. Mais ceci n'a pas été suffisant pour stopper l'épidémie dont le pic le plus important a eu lieu en février 2006, avec plus de 40000 cas par semaine. Bien qu'il soit très difficile de prévoir un tel phénomène, une étude à partir d'un modèle simple peut nous permettre de mieux appréhender les facteurs clés de la propagation de l'épidémie. Dans ce but, et afin d'évaluer, de prévenir et de contrôler le risque sanitaire dus aux moustiques, des modèles mathématiques sont proposés et étudiés. Le premier modèle que nous proposons, basé sur le cycle de vie du moustique, permet de décrire la dynamique de population de celui-ci. Le second, utilisant les modèles de type SI et SIR, est proposé afin de décrire la transmission du virus entre la population moustique et la population humaine. L'étude théorique de ces modèles permet de déterminer des facteurs essentiels de la prolifération du vecteur. Nous présentons ainsi l'analyse des solutions d'équilibre et étudions leur stabilité locale ou globale, un premier pas vers une étude plus détaillée de la dynamique non linéaire de ces modèles.

Références

1. L. ESTEVA ET C. VARGAS, Analysis of a Dengue disease transmission model, *Mathematical Biosciences*, **150**, 131-151 (1998).
2. M.Y. LI ET J.S. MULDOWNNEY, Global Stability for the SEIR Model in Epidemiology, *Mathematical Biosciences*, **125**, 1225-1234 (1995).
3. J.S. MULDOWNNEY, Compound matrix and ordinary differential equations, *Rocky Mountain J. Math.*, **20**, 857-872 (1990).
4. J.D. MURAY, *Mathematical Biology*, Springer, Paris (1993).

Couplages de neurones de type Hindmarsh-Rose : de la synchronisation à l'émergence de propriétés

Nathalie Corson¹ & M.A. Aziz Alaoui²

Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (LMAH), Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon,
BP540, 76058 Le Havre
nathalie.corson@univ-lehavre.fr

Le modèle mathématique de Hodgkin-Huxley [7] décrit le comportement d'un neurone en terme de circulation des principaux ions à travers la membrane de celui ci. Le système différentiel lent-rapide de Hindmarsh-Rose [6] est basé sur celui de Hodgkin-Huxley et modélise la circulation de l'information le long d'un neurone. Les interactions entre les neurones par l'intermédiaire des synapses peuvent être modélisées soit par une fonction de couplage linéaire (synapses électriques) soit par une fonction de couplage non-linéaire à seuil (synapses chimiques). Après une rapide étude numérique de la dynamique asymptotique d'un neurone, qui s'avère chaotique pour certaines valeurs de paramètres, nous cherchons numériquement la force de couplage nécessaire pour observer un phénomène de synchronisation entre les neurones. Ce travail a été effectué dans le cas d'un couplage linéaire puis dans le cas d'un couplage non-linéaire de plusieurs neurones. Chaque neurone est supposé couplé à tous les autres. Dans un premier temps, tous ces neurones sont identiques, puis nous modifions les paramètres des neurones afin que tous soient légèrement différents les uns des autres. Les interactions, linéaires ou non, entre les éléments, identiques ou non, de ce système font émerger des propriétés nouvelles en relation avec la force de couplage nécessaire pour faire synchroniser les n neurones. Ces propriétés émergentes sont données par des lois heuristiques caractéristiques d'une certaine notion de complexité.

Références

1. M.A. Aziz-Alaoui (2006), *Synchronization of chaos*, Encyclopedia of mathematical physics, Elsevier vol.5, pp 213-226
2. M.A. Aziz-Alaoui (2006), *Complex emergent properties and chaos (De) synchronization*, in Emergent Properties in Natural and Artificial Dynamical Systems, Understanding complex systems, Springer, pp 129-147
3. N. Corson, M.A. Aziz Alaoui (2008), *Asymptotic dynamics of the slow-fast Hindmarsh-Rose neuronal model*, To be submitted...
4. N. Corson, M.A. Aziz Alaoui (2008), *Complex emergent properties in synchronized neuronal oscillations*, To be submitted...
5. I. Belykh, E. Lange, M. Hasler (2005), *Synchronization of Bursting Neurons : What matters in the Network Topology*, Phy. Rev. Lett.94, 18, pp 188101.1-188101.4
6. J.L. Hindmarsh, R.M. Rose (1984), *A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations*, Proc. R. Sc. Lond. B221, pp 87-102
7. A. Hodgkin, A. Huxley (1952), *A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve*, J. Physiol. 117, p 500-544
8. E.M. Izhikevich (2007), *Dynamical systems in neuroscience - The geometry of excitability and bursting*, The MIT Press

Portraits de phase et matrices de Markov pour l'étude des asynchronismes en ventilation non invasive

H. Rabarimanantsoa¹, U.S. Freitas¹, R. Naeck², J.-F. Muir^{2,3}, A. Cuvelier^{2,3}, & C. Letellier¹

¹ CORIA UMR 6614 — Université de Rouen, BP. 12, 76801 Saint-Etienne du Rouvray Cedex

² GRHV UPRES EA (IFRMP 23), Université de Rouen

³ Service de Pneumologie et de Soins Intensifs Respiratoires — CHU de Rouen

letellier@coria.fr

Résumé. La ventilation non invasive est utilisée pour soulager les patients souffrant d'insuffisance respiratoire chronique en favorisant les échanges gazeux (O₂ et CO₂) dans leur sang à l'aide d'un ventilateur [1]. La dynamique sous-jacente au système patient-ventilateur est étudiée à partir de portraits de phase reconstruit à partir de la mesure de l'évolution temporelle du débit dans le circuit ventilatoire. Les portraits de phase révèle — en temps réel — si la dynamique ventilatoire est régulière, perturbée ou non par des asynchronismes et si des fuites apparaissent. Un codage des différents événements (cycles normaux, non déclenchés et désynchronisés) permet de construire une dynamique symbolique [2] qui se révèle particulièrement efficace pour traiter les milliers de cycles ventilatoires d'une nuit. A partir de cette dynamique symbolique, une matrice de Markov [3] est calculée ; dans cette première approche, elle est traitée sous la forme de graphe d'interactions, ce qui permet de définir quatre profils ventilatoires.

Références

1. M. VITACCA, F. RUBINI, K. FOLIO, S. SCALVINI, S.NAVA & N. AMBROSINO, Non invasive modalities of positive pressure ventilation improve the outcome of acute exacerbations in COLD patients. *Intensive Care in Medicine*, **19**, 450-455, 1993.
2. C. LETELLIER, P. DUTERTRE & B. MAHEU, Unstable periodic orbits and templates of the Rössler system : toward a systematic topological characterization, *Chaos*, **5** (1), 272-281, 1995.
3. A.A. MARKOV, Rasprostranenie zakona bolshih chisel na velichiny, zavisyaschie drug ot druga, *Izvestiya, Fiziko-matematicheskogo obschestva pri Kazanskom universitete*, 2-ya seriya, tom 15, **94**, 135-156, 1906.

Identifier le chaos au sein d'une activité cardiaque : le bon objectif ?

E. Roulin, U. Santos Freitas, & C. Letellier

CORIA UMR 6614 — Université et INSA de Rouen, BP. 12, 76801 Saint-Etienne du Rouvray cedex
roulin@coria.fr

De nombreuses études ont déjà tenté d'extraire le caractère chaotique du rythme cardiaque. La plupart d'entre elles utilisent des critères géométriques tels que les dimensions de corrélation ou les exposants de Lyapunov ([1,2], entre autres). Ces techniques sont cohérentes lorsque le comportement présente un déterminisme sous-jacent clair, mais ne peuvent pas, à elles seules, être concluantes quant à la présence ou non de chaos [3,2]. L'analyse de données supplémentives [4] peut être utilisée pour détecter une non-linéarité sous-jacente à la dynamique ou, lorsqu'elle est associée à une technique de modélisation globale, pour détecter un déterminisme sous-jacent [5]. Mais là encore, il est impossible de conclure quant à la présence de chaos au sein de la dynamique étudiée.

Un comportement chaotique se doit d'être décrit comme des "fluctuations produites par des **lois déterministes**, qui néanmoins conduisent à une dynamique irrégulière, et imprévisible à long terme [6]. Ainsi, avant d'affirmer la présence de chaos, il est nécessaire d'identifier clairement un déterminisme sous-jacent à la dynamique étudiée, soit des équations déterministes par exemple. Aucun des articles cités précédemment n'a procédé à cette identification préalable du déterminisme au sein du rythme cardiaque, et les outils d'analyse actuels issus de la théorie des systèmes dynamiques non linéaires ne permettent pas de répondre de façon satisfaisante à cette question, aucun modèle global stable produisant une dynamique plus riche qu'un cycle limite de période 1 n'ayant été obtenu [7].

Un autre aspect, plus simple, de la question est de détecter un processus non linéaire contribuant au développement de la dynamique. À partir d'une analyse sur les ΔRR , permettant de s'affranchir de la variabilité sinusale lente du rythme cardiaque, nous avons procédé à la discrimination de trois catégories de sujets (sains, insuffisants cardiaques ou en fibrillation atriale), et nous avons montré qu'il était fort probable qu'un processus non linéaire sous-jacent intervienne dans la dynamique cardiaque présentée par les sujets sains ou insuffisants cardiaques, tandis que la fibrillation résulterait d'un processus purement stochastique. Nos résultats montrent également une composante déterministe dans le processus d'extra-systole rencontré chez les sujets insuffisants cardiaques. Ainsi, bien qu'un comportement chaotique n'ait été démontré, il est possible d'utiliser la théorie des systèmes dynamiques non linéaires pour distinguer des sujets sains de patients atteint de pathologies cardiaques à partir de la variabilité cardiaque.

Références

1. J.E. SKINNER, C. CARPEGGIANI, C.E. LANDISMAN & K.W.FULTON, Correlation dimension of heart beat intervals is reduced in conscious pigs by myocardial ischemia, *Circulation Research*, **68**, 966-976, 1991.
2. S. Guzzetti, M. G. Signorini, C. Cogliati, S. Mezzetti, A. Porta, S. Cerutti & A. Malliani, Non-linear dynamics and chaotic indices in heart rate variability of normal subjects and heart-transplanted patients, *Cardiovascular Research*, **31**, 441-446, 1996.
3. J. K. Kanters, N.-H. Holstein-Rathlou & E. Agner, Lack of evidence for low-dimensional chaos in heart rate variability, *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, **5**, 591-601, 1994.
4. J. Theiler, A. Logtin, S. Eubank, B. Galdrikian & J. D. Farmer, Testing for nonlinearity in time series : the method of surrogate data, *Physica D*, **58**, 77-94, 1992.
5. M. E. D. Gomes, A. V. P. Souza, H. N. Guimarães & L. A. Aguirre Investigation of determinism in heart rate variability, *Chaos*, **10** (2), 398-410, 2000.
6. L. Glass, Chaos and heart rate variability, *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, **10**, 1358-1360, 1999.
7. C. Letellier, L. A. Aguirre & U. S. Freitas Frequently Asked Questions about global modelling, *Chaos*, submitted.

Statistiques de la puissance injectée dans une plaque mise en vibration chaotique

Olivier Cadot¹, Arezki Boudaoud², & Cyril Touzé¹

¹ ENSTA-UME, Unité de Recherche en Mécanique, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, Cedex, France

² Laboratoire de Physique Statistique, UMR 8550 du CNRS/ENS/Paris 6/Paris 7, 24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 5, France

`olivier.cadot@ensta.fr`

Une plaque mise en vibration à grande amplitude atteint un état chaotique de turbulence d'onde [1,2,3] où l'interaction non-linéaire entre ondes de flexion de la plaque conduit au transfert d'énergie de grande à petite longueur d'onde. Notre travail [4] porte sur l'injection d'énergie dans ce système à l'aide d'un forçage périodique ou aléatoire. D'une part, nous avons étudié les corrélations entre force appliquée et réponse en vitesse au point de forçage. Les modèles proposés pour les statistiques de ces grandeurs sont en bon accord avec les expériences. Les distributions de puissance injectées présentent toujours une divergence logarithmique à petite puissance; par contre, les queues de ces distributions sont gaussiennes pour le forçage périodique et exponentielles pour le forçage aléatoire. D'autre part, nous avons également étudié les distributions d'énergie injectée sur de longs intervalles de temps dans le cadre correspondant au théorème de fluctuation (ou théorème de Gallavotti-Cohen). Il apparaît que les conclusions du théorème sont vérifiées uniquement avec le forçage déterministe (périodique). En utilisant des estimations indépendantes de la contraction dans l'espace des phases, nous discutons nos résultats à la lumière des résultats théoriques disponibles.

Références

1. G. DURING, C. JOSSE RAND & S. RICA, Weak Turbulence for a Vibrating Plate : Can One Hear a Kolmogorov Spectrum?, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 025503 (2006).
2. A. BOUDA OUD, O. CADOT, B. ODILLE & C. TOUZÉ, Observation of Wave Turbulence in Vibrating Plates, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 234504 (2008).
3. N. MORDANT, Are There Waves in Elastic Wave Turbulence?, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 234505 (2008).
4. O. CADOT, A. BOUDA OUD & C. TOUZÉ, Statistics of power injection in a plate set into chaotic vibration, *Eur. Phys. J. B*, sous presse (2008).

Mesure, sans contact, des forces agissant sur les protéines dans les microdomaines membranaires.

Masson¹, Casanova², Turkcan², Voisinne¹, Popoff¹, Vergassola¹, & Alexandrou²

¹ Institut Pasteur, 25/28 rue du Docteur Roux, 75116, Paris France

² Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France

`jbmasson@pasteur.fr`

Ces dernières années le mouvement des protéines et des lipides dans les membranes cellulaires ainsi que les liens entre ces mouvements et leurs diverses fonctions ont attiré un grand intérêt [1]. Les avancées faites sur le marquage des protéines, tout particulièrement celles dans le domaine des nanoparticules et des quantum dots permettent de suivre leurs trajectoires pendant de longues périodes. La plupart des analyses de trajectoire se font par l'intermédiaire de l'étude de la déviation standard en fonction du temps. Cependant, un grand nombre d'information supplémentaires est stockée dans la trajectoire complète et peut être exploitée.

Un des aspects importants et souvent négligé, car peu accessible par la déviation standard, est la présence de champs de forces agissant sur ces protéines. Nous proposons une méthode générale basée sur des inférences bayésiennes [2] qui permet d'extraire, à partir de trajectoires de nanoparticules, des cartes de forces agissant sur les protéines. Ces inférences donnent de bons résultats avec des distributions à posteriori de forces très étroites et des convergences très rapides.

La modélisation est simple : la protéine est considérée comme un marcheur Brownien évoluant dans un champ de force. La probabilité d'aller d'un point à un autre est gouvernée par l'équation de Smoluchowski [3], ce qui rend l'inférence facilement applicable car il existe de nombreuses solutions exactes à cette équation. Le domaine dans lequel évolue la protéine est discrétisé et les forces sont supposées constantes dans les sous domaines correspondant. Ainsi la distribution à posteriori de l'ensemble des paramètres, U , connaissant la trajectoire, T , vaut $P(U|T) = \prod_{i,j=1}^n P(\mathbf{F}_{i,j}, D|T)$ ou $\mathbf{F}_{i,j}$ est le vecteur force du sous domaine (i, j) et D la diffusivité du couple protéine-nanoparticule et

$$P(\mathbf{F}_{i,j}, D|T) \propto \prod_{\mu: \mathbf{r}_\mu \in \mathcal{S}_{i,j}} \frac{\exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_{\mu+1} - \mathbf{r}_\mu - \mathbf{F}_{i,j} \Delta t / \gamma)^2}{4D \Delta t}\right]}{4\pi D \Delta t}. \quad (1)$$

ou \mathbf{r} donne la position de la biomolécule, μ indexe les différents temps et ou le produit est restreint aux temps où la biomolécule est dans le sous domaine (i, j) . Ainsi l'optimisation de l'inférence reste un processus non-linéaire mais séparable par partie sur chaque sous-domaine.

Nous avons testé cette technique expérimentalement [4] sur le récepteur transmembranaire de la toxine ϵ de cellules MDCK. Il fut marqué par des nanoparticules d'oxyde de lanthanide recouvert de fonctions amines et suivi pendant plusieurs dizaines de secondes à la résolution de 50 images par secondes. Les résultats révèlent des champs de forces complexes remettant en cause le modèle du pure confinement des protéines par le cytosquelette.

Références

1. M.J. SAXTON, Single-particle tracking : connecting the dots, *Nature Methods.*, **5** 671 (2008).
2. D.J. MCKAY, Information Theory, Inference, and Learning Algorithms, *Cambridge University Press*, (2003).
3. H. RISKEN, The Fokker-Planck Equation : Methods of Solutions and Applications *Springer*, (1989).
4. J.-B MASSON *et al*, Inferring maps of forces inside cell membrane microdomains, *Phys. Rev. Lett.*, (2009 to be published) .

Flagellar Synchronization and Eukaryotic Random Walks

Raymond E. Goldstein

DAMTP, Cambridge

Flagella, among the most highly conserved structures in eukaryotes, are responsible for such tasks as fluid transport, motility and phototaxis, establishment of embryonic left-right asymmetry, and are thought to have played a key role in the development of multicellularity. These tasks are usually performed by the coordinated action of groups of flagella (from pairs to thousands), which display various types of spatio-temporal organization. The origin and quantitative characterization of flagellar synchronization has remained an important open problem, involving interplay between intracellular biochemistry and interflagellar mechanical/hydrodynamic coupling. Using micromanipulation, high-speed imaging, three-dimensional cell tracking, and macroscopic studies of the model organism *Chlamydomonas reinhardtii* we have discovered the eukaryotic equivalent of the "run-and-tumble" locomotion known from bacterial chemotaxis. This is achieved by individual cells alternating between a noisy synchronized state and one with two very different beat frequencies. These results raise a whole range of new questions in the dynamics of eukaryotic flagellar beating and biological search strategies.

Quasipattern solutions de l'équation de Swift–Hohenberg 2D

Gérard Iooss

I.U.F., Université de Nice, Laboratoire J.-A. Dieudonn e, Parc Valrose, F-06108 Nice, France

Ce travail a été fait en collaboration avec A. M. Rucklidge (Leeds). Les quasipatterns sont des structures spatialement quasi-périodiques qui restent un sujet largement ouvert dans les problèmes de structuration spatiale. Comme dans tous les problèmes où intervient une quasi-périodicité, une difficulté de petits diviseurs se présente dès qu'on veut prouver leur existence mathématique en tant que solution d'une certaine équation aux d riv es partielles. On considère ici les quasipatterns engendrés par $2Q$ vecteurs unités dont les extrémités forment un polygone régulier, avec $Q \geq 4$, qui sont solutions de l'équation de Swift-Hohenberg. On montre que la solution en série formelle divergente de puissances du paramètre de bifurcation, peut être utilis e pour construire une fonction régulière quasi-périodique qui est une solution de l'EDP de Swift-Hohenberg à une erreur exponentiellement petite près (en terme du paramètre de bifurcation).

Plaques et coques orthotropes multistables : conception et applications au contrôle de forme via des matériaux électroactifs

Corrado Maurini^{1,2}, Amâncio Fernandes^{1,2}, Stefano Vidoli³, & Angela Vincenti^{1,2}

¹ UPMC Univ Paris 06, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005 Paris, France.

² CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005 Paris, France.

³ Università di Roma La Sapienza, Dip. di Ing. Strutturale e Geotecnica, via Eudossiana 18, 00184 Rome, Italie
corrado.maurini@upmc.fr

Les plaques et coques élastiques présentent des phénomènes non-linéaires intrinsèquement liés à la géométrie des surfaces. Ces phénomènes induisent des propriétés de multistabilité intéressantes [1] à exploiter dans les applications au contrôle de forme des structures souples constituées de matériaux électroactifs [2].

Un premier objectif de notre travail est d'étudier l'influence de la géométrie initiale, des propriétés matérielles et des déformations induites par des effets thermiques et par des matériaux actifs sur la forme et le nombre des configurations d'équilibre stable de plaques et coques orthotropes. Pour des plaques et coques à courbures modérées et avec bords libres, ces propriétés peuvent être étudiées en utilisant un modèle simplifié basé sur l'hypothèse de courbure uniforme dans l'espace. Les équilibres stables sont caractérisés comme minima d'une fonction énergie potentielle, somme de l'énergie élastique en flexion et en extension. Par le biais des relations de compatibilité géométrique, cette énergie peut être écrite seulement en terme des courbures [3]. L'étude numérique montre que des coques orthotropes possèdent jusqu'à trois positions d'équilibre stable. Ensuite, un modèle simplifié basé sur l'hypothèse d'inextensibilité nous permet de résoudre analytiquement la dépendance des propriétés de multistabilité en fonction des paramètres de la loi de comportement et des courbures initiales. Nous montrons en particulier que ces structures sont tristables pour une large gamme de courbures initiales lorsque la matrice de rigidité en flexion approche une condition de singularité [4]. Nous nous posons alors le problème de la conception de composites multicouches avec propriétés matérielles optimisées pour la tristabilité. Nous présenterons alors plusieurs exemples réalistes de coques multicouches tristables en employant une méthode polaire de représentation de tenseurs de rigidité [5].

Le deuxième objectif est la conception d'un actionnement multiparamétrique efficace pour ces structures non linéaires. Certains auteurs ont étudié numériquement et expérimentalement l'utilisation d'un actionnement piézoélectrique pour contrôler le passage entre les deux configurations d'équilibre stable de plaques composites avec précontraintes d'origine thermiques [2]. Avec un seul paramètre d'actionnement ce passage s'obtient avec des phénomènes de type snap-through. Par contre, avec un actionnement multiparamétrique, nous montrons qu'on peut réaliser une transition quasi-statique entre les deux configurations d'équilibre stable sans phénomène d'instabilité. Des simulations numériques éléments finis seront présentées afin de valider les résultats obtenus avec les modèles simplifiés basés sur l'hypothèse de courbure uniforme.

Références

1. Y. Forterre, J. Skotheim, J. Dumais and L. Mahadevan 2005, How the Venus flytrap snaps, *Nature*, **433**, 421-425.
2. M. R. Schultz and M. W. Hyer 2003, Snap-through of unsymmetric cross-ply laminates using piezoceramic actuators, *J. Intelligent Material Systems and Structures*, **14**, 795-814.
3. K. A. Seffen 2007, 'Morphing' bistable orthotropic elliptical shallow shells, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.* **463**(2077), 67-83.
4. S. Vidoli and C. Maurini 2008, Tristability of thin orthotropic shells with uniform initial curvature, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, **464**(2099), 2949-2966.
5. P. Vannucci 2005, Plane anisotropy by the polar method, *Meccanica*, **40**, 437-454

Origami capillaire contrôlé par électro-mouillage

Miguel Piñeirua, Benoît Roman, & José Bico

PMMH-ESPCI-P6-P7, 10 rue Vauquelin 75005 Paris
pineirua@pmmh.espci.fr

Que se passe-t-il si on dépose une goutte d'eau sur une feuille flexible ? La feuille enrobe-t-elle spontanément la goutte ? Elle y parvient si les forces capillaires issues de l'interface liquide/air l'emportent sur la rigidité de la feuille élastique [1]. Cette technique "d'origami capillaire" pourrait être utilisée non seulement pour encapsuler des micro-gouttes mais également pour produire des objets tri-dimensionnels à partir de patrons plans, ce qui demeure un défi à l'échelle de Micro-Systèmes-Électro-Mécaniques (MEMS). Une fois la micro-structure refermée, serait-il possible de la réouvrir à volonté ? Les propriétés de mouillage d'un liquide peuvent être ajustées grâce à un champ électrique [2]. Ce phénomène d'électromouillage peut être interprété comme la minimisation de l'énergie électrique d'un condensateur. Afin d'actuer la forme de la capsule liquide, nous proposons d'appliquer un champ électrique entre la goutte (une solution électrolytique) et le substrat. La feuille flexible isole ainsi les deux électrodes (la goutte et le substrat). La goutte reste encapsulée tant que le circuit est ouvert, et s'ouvre lorsque l'on applique un champ suffisamment intense. Nous proposons de décrire cette interaction originale entre champ électrique, capillarité et élasticité.

Références

1. C. PY, P. REVERDY, L. DOPPLER, J. BICO, B. ROMAN, C.N.BAROUD, Capillary origami : spontaneous wrapping of a droplet with an elastic sheet, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 156103 (2007).
2. F. MUGELE, J.-C. BARET, Electrowetting : from basics to applications, *J. Phys. Cond. Mat.*, **17**, R705 (2005).

Spiral crack path in thin sheets

Victor ROMERO^{1,2}, Benoit ROMAN², & Enrique CERDA²

¹ PMMH, 10 rue Vauquelin 75231 Paris Cedex 5 FRANCE

² Laboratorio de Física no lineal, Avenida Ecuador 3493, Estación Central, Santiago, Chile
vromero@pmmh.espci.fr, Benoit@pmmh.espci.fr, enrique.cerda@usach.cl

Thin layers are commonly used in the industry (from everyday packaging to airplanes) and frequently found in biological systems. The mechanics of thin sheets is rich and complex, with strong geometrical nonlinearities leading for example to the intricate folds and singularities that we can observe in a crumpled sheet of paper. But here we show that the fracture path in thin sheets can follow remarkably regular geometrical path.

We have studied experimentally two situations that evolved from an initial simple notch configuration into a logarithmic spiral crack path that grew from a few millimeters to a meter in diameter. The regularity of the crack path is particularly impressive despite of the scale span. These two different procedures lead to two families of logarithmic spirals, and the study of the final shape gives a measurement of material properties.

Les singularités du chaos : doubles plis et fronces dans des systèmes couplés simples

Jérémy Oden, Serge Bielawski, & Marc Lefranc

Laboratoire PhLAM, UMR CNRS 8523, Université de Lille 1, F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.
marc.lefranc@univ-lille1.fr

Déterministe mais imprédictible, une dynamique chaotique s'explique par l'action conjointe dans l'espace des phases de deux mécanismes géométriques complémentaires : étirement et repliement [1,2]. L'étirement sépare inexorablement des trajectoires voisines suivant la direction instable, rendant l'évolution imprédictible, tandis que le repliement rapproche suivant la direction stable des états initialement éloignés, permettant ainsi de maintenir la dynamique dans une région finie de l'espace des états. Au fil du temps, ce processus de contraction induit une perte de mémoire sur les conditions initiales et par là une irréversibilité. Cela suggère que la dynamique asymptotique d'un système chaotique peut être caractérisée en termes de *singularités*, ou *catastrophes* [2], qui sont les outils mathématiques adaptés pour caractériser la non-inversibilité d'applications différentiables [3]. Cette idée devient naturelle lorsqu'on considère que la dynamique dans l'espace des phases induit une dynamique singulière dans la surface invariante qu'est la variété instable, en la repliant indéfiniment sur elle-même [2].

Lorsqu'un attracteur chaotique possède une seule direction instable, les singularités rencontrées sont alors du type le plus simple, le *pli*. C'est cette singularité qui est à l'origine du comportement chaotique d'applications d'un intervalle dans lui-même telles que la célèbre suite logistique. Dans le cas des systèmes hyperchaotiques, qui présentent deux directions instables, il faut alors considérer les applications singulières d'une surface dans elle-même [2]. De manière générique, on doit alors observer des singularités d'ordre supérieur, à savoir des *fronces*, localisées à l'intersection de lignes de plis [3].

Afin de mettre clairement en évidence la présence de singularités fronces dans des systèmes hyperchaotiques, nous nous sommes intéressés à des systèmes obtenus en couplant faiblement deux systèmes fortement dissipatifs à une seule direction instable. En deça de la synchronisation, les deux directions instables sont préservées et les modifications de leurs structures peuvent être analysées.

Nous avons tout d'abord étudié le couplage de deux suites logistiques, associées chacune à une singularité de type pli. De manière remarquable, on montre facilement que le double pli laisse la place à une fronce pour un couplage arbitrairement petit, ce qui illustre la stabilité structurelle de cette singularité dans un système hyperchaotique. Afin de démontrer la pertinence expérimentale de ce phénomène, nous avons ensuite couplé deux résonateurs à diode [4,5] par une liaison capacitive extrêmement faible. Une section de Poincaré du système couplé met clairement en évidence une fronce semblable à celle observée pour la double suite logistique couplée. Enfin, des simulations numériques de deux systèmes de Rössler couplés donnent des résultats tout à fait similaires. Ces résultats constituent une première étape vers une classification topologique des systèmes chaotiques en termes de singularités [2].

Références

1. E. OTT, *Chaos in Dynamical Systems* (Cambridge University Press, Cambridge, 2002).
2. R. GILMORE AND M. LEFRANC, *The Topology of Chaos* (Wiley, New York, 2002).
3. V. ARNOLD, A. VARCHENKO, AND S. M. GUSEIN-ZADE, *Singularités des applications différentiables* (Edition Mir, Moscou, 1986). R. THOM, *Stabilité structurelle et morphogénèse* (InterÉditions, Paris, 1972).
4. P. LINSAY, Period doubling and chaotic behavior in a driven anharmonic oscillator, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 1349–52 (1981). J. TESTA, J. PEREZ AND C. JEFFRIES, Evidence for universal chaotic behavior of a driven nonlinear oscillator, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 714–717 (1982)
5. R. VAN BUSKIRK AND C. JEFFRIES, Observation of chaotic dynamics of coupled nonlinear oscillators, *Phys. Rev. A* **31**, 3332–3357 (1985)

La variété de courbure du flot comme squelette des attracteurs chaotiques

Jean-Marc Ginoux¹ & Christophe Letellier²

¹ Laboratoire PROTEE, I.U.T. de Toulon — Université du Sud, BP 20132, F-83957 La Garde Cedex, France

² CORIA UMR 6614 — Université de Rouen, BP 12, F-76801 Saint-Etienne du Rouvray cedex, France

ginoux@univ-tln.fr

Depuis que les attracteurs chaotiques sont reconnus comme un objet important dans la description des phénomènes dynamiques, qu'ils soient physiques, chimiques, biologiques ou autres, les techniques de classification des attracteurs chaotiques se répartissent globalement en deux catégories : celles issues d'une approche statistique en lien avec la théorie ergodique [1,2] et celles reposant sur une approche topologique [3]. La caractérisation des comportements chaotiques est aujourd'hui un problème plutôt bien documenté, au moins dans les cas tri-dimensionnels [3,4,5]. Depuis les premiers travaux de Poincaré [6], il est reconnu que les portraits de phase se structurent autour des points singuliers. Bien que permettant d'accéder à de nombreuses propriétés du système, il est néanmoins constaté que ces points singuliers ne donnaient pas toute la structure des attracteurs.

Récemment, des propriétés métriques du flot ont été analytiquement calculées pour des systèmes non intégrable dont la courbe solution n'est pas connue de manière générale [7,8]. Ces propriétés métriques consistent en la *courbure du flot* et définissent, dans l'espace des phases, une variété reposant sur les dérivées temporelles du champ de vecteurs vitesse et contenant les points singuliers. Il s'agit de la *variété de courbure du flot* dont l'invariance sous l'action du flot a été prouvée par le théorème de Darboux [9]. Dans cette contribution, nous montrons que la composante non stationnaire — dépendante du temps — de cette variété structure l'attracteur chaotique et permet d'envisager une classification topologique reposant sur une démarche analytique. Quelques exemples comme les systèmes de Rössler et Lorenz sont traités.

Références

1. J. P. ECKMANN & D. RUELLE, Ergodic theory of chaos and strange attractors, *Review of Modern Physics*, **57**, 617-656, 1985.
2. H. D. I. ABARBANEL, R. BROWN, J. J. SIDOROWICH & L. SH. TSIMRING. The analysis of observed chaotic data in physical systems, *Review of Modern Physics*, **65** (4), 1331-1388, 1993.
3. R. GILMORE & M. LEFRANC, *The topology of chaos*, Wiley, 2002.
4. T. D. TSANKOV & R. GILMORE, Strange attractors are classified by bounding tori, *Physical Review Letters*, **91** (13), 134104, 2003.
5. C. LETELLIER, E. ROULIN & O. E. RÖSSLER, Inequivalent topologies of chaos in simple equations, *Chaos, Solitons & Fractals*, **28**, 337-360, 2006.
6. H. POINCARÉ, Sur les courbes définies par une équation différentielle, *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, Série IV, **2**, 151-217, 1886.
7. J.-M. GINOUX & B. ROSETTO, Differential geometry and mechanics applications to chaotic dynamical systems, *International Journal of Bifurcations & Chaos*, **16** (4), 887-910, 2006.
8. J.-M. GINOUX, B. ROSETTO & L. O. CHUA, Slow invariant manifolds as curvature of the flow of dynamical systems, *International Journal of Bifurcation & Chaos*, sous presse.
9. G. DARBOUX, Sur les équations différentielles algébriques du premier ordre et du premier degré, *Bulletin des Sciences Mathématiques*, Série 2, **2**, 60-96, 123-143, 151-200, 1878.

Conditions nécessaires pour que les systèmes de Sprott à un seul point fixe puissent être chaotiques

MALASOMA Jean-Marc

Université de Lyon, DGCB URA CNRS 1652
ENTPE, Rue Maurice Audin, 69518 Vaulx en Velin Cedex
malasoma@entpe.fr

Le système chaotique décrit en 1963 par Lorenz [1] est polynomial et comporte sept monômes dont deux sont quadratiques. Les premiers travaux ayant produit un système chaotique possédant une structure algébrique plus simple que celle du système de Lorenz sont dus à Rössler [2]. Il a proposé en 1976 un système chaotique qui est toujours constitué de sept monômes mais avec un seul d'entre eux quadratique. Trois ans plus tard, deux nouveaux modèles chaotiques constitués seulement de six monômes, dont un seul quadratique, sont décrits indépendamment l'un par Rössler [3] et l'autre par Couillet, Tresser et Arnéodo [4].

Depuis un grand nombre de systèmes chaotiques ont été décrits dans la littérature spécialisée. Toutefois, ce n'est qu'en 1994 que Sprott [5], ignorant l'existence des deux systèmes décrits en 1979, relance la recherche de systèmes chaotiques quadratiques, présentant des structures algébriques plus simples que celle du système de Lorenz et de celle du premier système de Rössler. Après plusieurs mois de simulations numériques, il a pu mettre en évidence quatorze systèmes chaotiques possédant six monômes dont une nonlinéarité et cinq systèmes chaotiques constitués de cinq monômes dont deux nonlinéarités.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux sept systèmes de Sprott possédant un unique point fixe. Pour chacun d'entre eux, en effectuant des changements de l'échelle du temps et des trois variables il est possible de rendre quatre paramètres unitaires. Il reste alors un ou deux paramètres de contrôle, suivant que le système est constitué de cinq ou six termes. En effectuant une étude analytique de l'espace des paramètres libres de ces sept systèmes, nous établissons de façon rigoureuse, des conditions nécessaires portant sur le où les paramètres pour que ces systèmes puissent être chaotiques. Dans l'article de 1994, Sprott donne à ces paramètres des valeurs numériques suffisantes pour que les solutions soient chaotiques, nous vérifions que ces valeurs sont bien compatibles avec les conditions nécessaires trouvées analytiquement.

Références

1. E.N. LORENZ, Deterministic nonperiodic flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 130-141, (1963).
2. O.E. RÖSSLER, An equation for continuous chaos, *Physics Letters A*, **57** (5), 397-398, (1976).
3. O.E. RÖSSLER, Continuous chaos - Four prototype equations, *Annals of the New York Academy of Sciences*, **316**, 376-392, (1979).
4. P. COULLET, C. TRESSER & A. ARNEODO, A transition to stochasticity for a class of forced oscillators, *Physics letters A*, **72** (4-5), 268-270, (1979).
5. J.C. SPROTT, Somme simple chaotic flows, *Physical Review E*, **50**, R647-R650, (1994).

Echec de la technique de titration du bruit à distinguer un bruit coloré d'un chaos

Ubiratan S. Freitas, Christophe Letellier & Luis A. Aguirre

Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não Lineares, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil
freitas@coria.fr

Identifier des comportements chaotiques à partir de données expérimentales, c'est-à-dire, des données contaminées par du bruit, reste un problème particulièrement délicat dans la mesure où une preuve définitive reste très difficile à fournir. En effet, il est connu qu'une dimension fractale ou un exposant de Lyapunov ne sont pas suffisants pour confirmer l'hypothèse d'un chaos sous-jacent. De manière à éviter les faiblesses des techniques basées sur l'utilisation d'invariants géométriques (dimensions, exposants de Lyapunov), Barahona et Poon ont introduit une procédure de titration numérique qui compare les prédictions à un pas réalisées avec des modèles linéaires et non linéaires [1]. Le principe repose sur l'adjonction d'un bruit de déviation standard σ^2 jusqu'à ce que le modèle non linéaire ne permette pas de meilleures prédictions que le modèle non linéaire. La limite de bruit NL= σ^2 correspond à ce niveau de bruit.

A l'aide de deux contre exemples, nous montrons que cette technique ne permet pas de distinguer un bruit coloré d'un comportement chaotique. En d'autres termes, tant que la nature déterministe du comportement n'est pas vérifiée, la technique de Poon et Barahona ne permet pas de confirmer, comme les autres techniques, l'hypothèse d'un chaos sous-jacent. Par exemple, la titration de bruit offre une limite de bruit égale pour un bruit coloré filtré non linéairement et une fonction logistique.

Références

1. C.-S. POON & M. BARAHONA, Titration of chaos with added noise, *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)*, **98**, 7107-7112, 2001.

Experimental verification of a modified fluctuation-dissipation theorem for a Brownian particle in a non-equilibrium steady state

J. R. Gomez-Solano, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Chetrite, & K. Gawedzki

Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672, Ecole Normale Supérieure de Lyon, 46, Allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07, France

`juan.gomez.solano@ens-lyon.fr`

A modified fluctuation-dissipation theorem (MFDT) has been recently found for simple Langevin dynamics close to non-equilibrium steady states (NESS) with non-vanishing probability currents [1]. In this work we verify experimentally MFDT for fluctuations of a micron-sized silica particle immersed in water moving in a periodic potential and subjected to a non-conservative constant force. A NESS is implemented by means of a toroidal optical trap created by a rotating laser beam with intensity modulation which confines the motion of the particle on a circle [2,3]. We measure the autocorrelation function of an observable related to the angular position of the particle, the corresponding integrated response function due to a small perturbation of the amplitude of the periodic potential, and a corrective term given by the constant probability current. We find that the correlation minus the corrective term times the inverse temperature of the surrounding water is equal to the integrated response, as shown theoretically by [1]. The results can be interpreted as an equilibrium-like fluctuation-dissipation relation in the Lagrangian frame moving at the mean local velocity of the particle determined by the probability current.

Références

1. R. CHETRITTE, G. FALKOVICH, AND K. GAWEDZKI, Fluctuation relations in simple examples of non-equilibrium steady states, *J. Stat. Mech.* P08005, (2008).
2. V. BICKLE, T. SPECK, U. SEIFERT, AND C. BECHINGER, Characterizing potentials by a generalized Boltzmann factor, *Phys. Rev. E* **75**, 060101 (2007).
3. V. BICKLE, T. SPECK, C. LUTZ, U. SEIFERT., AND C. BECHINGER, The Einstein relation generalized to non-equilibrium, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 210601 (2007).

Aging and effective temperatures near a critical point

Joubaud Sylvain¹, Petrossyan Artyom², & Ciliberto Sergio²

¹ Physique of Fluids - University of Twente
P.O. Box 217, 7522AE Enschede The Netherlands

² Ecole Normale Supérieure de Lyon, Laboratoire de Physique, C.N.R.S. UMR5672,
46, Allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07, France

s.joubaud@utwente.nl

The mean orientations of the fluctuations of the director of a nematic liquid crystal are measured using a sensitive polarization interferometer. When an electric field is applied perpendicularly to the initial alignment of the molecules, there is a critical point for which molecules try to align to the field. This is called the Fréedericksz transition which is expected to be second order phase transition. We report experimental evidence that, because of the critical slowing down, the LC presents, after a quench near the critical point, several properties of an aging system, such as power law scaling versus time of correlation and response functions. During this slow relaxation, a well defined effective temperature, much larger than the heat bath temperature, can be measured using the fluctuation dissipation relation. The results are in excellent agreement with the previous theoretical prediction for the effective temperature.

Signature expérimentale de la thermalisation d'une onde optique lors de la génération de supercontinuum

Benôit Barviau, Bertrand Kibler, & Antonio Picozzi

ICB, Institut Carnot de Bourgogne UMR 5209 CNRS, 9 av. Alain Savary 21078 Dijon CEDEX
benoit.barviau@u-bourgogne.fr

L'évolution d'un système Hamiltonien d'ondes aléatoires est généralement caractérisée par un processus de thermalisation. Par analogie avec la théorie cinétique des gaz, cet effet se manifeste par une évolution irréversible du spectre de l'onde vers un état d'équilibre thermodynamique, i.e. le spectre de Rayleigh-Jeans (RJ). La théorie cinétique de turbulence faible donne une description détaillée de cet effet de thermalisation d'ondes incohérentes [1]. En dépit de son importance, ce phénomène irréversible n'a pas fait l'objet d'une étude expérimentale approfondie, essentiellement en raison du fait que l'effet de thermalisation est prédit dans un système Hamiltonien (formellement réversible) qui néglige les effets dissipatifs inhérents à tout système physique réel. Nous étudions théoriquement et expérimentalement la thermalisation d'ondes optiques dans le cadre de la *génération de supercontinuum* (SC) dans des fibres optiques microstructurées [2]. Cet effet se caractérise par un élargissement dramatique du spectre de l'onde lors de son passage dans un milieu de type Kerr [2]. Nous montrons que, dans certaines conditions, cette conversion de lumière cohérente ('laser') en lumière blanche résulte de la thermalisation naturelle du champ optique vers l'état d'entropie maximale, comme décrit par l'analogie du théorème H de Boltzmann.

La propagation de lumière incohérente dans une fibre optique est relativement bien décrite par l'équation Hamiltonienne de Schrödinger non linéaire *généralisée* (NLSE) [2],

$$\frac{\partial \Psi(z, t)}{\partial z} = i \sum_{j \geq 2} \frac{i^j \beta_j}{j!} \frac{\partial^j \Psi(z, t)}{\partial t^j} + i\gamma \left[1 + i\tau_s \frac{\partial}{\partial t} \right] |\Psi(z, t)|^2 \Psi(z, t). \quad (1)$$

Les simulations numériques de l'Eq.(1) révèlent, dans certaines conditions, une *thermalisation de l'onde vers un état d'équilibre caractérisé par un spectre à double pic* [3], ce qui le distingue du spectre Lorentzien (RJ) usuel de l'équation NLS non généralisée [1]. Sur la base de la théorie cinétique, nous avons dérivé une équation cinétique à partir de l'Eq.(1) qui décrit une évolution irréversible de l'onde vers le spectre d'équilibre suivant :

$$n^{eq}(\omega) = \frac{T(1 + \tau_s \omega)}{k(\omega) + \lambda \omega - \mu}, \quad (2)$$

où T et μ sont la température et le potentiel chimique de l'onde, $k(\omega) = \sum_{j \geq 2} \beta_j \omega^j / j!$ étant la relation de dispersion de l'Eq.(1). Ce spectre est en accord quantitatif avec les simulations de (1) sans l'utilisation de paramètres ajustables [3]; T , λ et μ étant déterminés à partir de la conservation de l'énergie E , de la quantité de mouvement P et de la puissance N (nombre de particules).

L'expérience a été réalisée dans une *fibre optique microstructurée* présentant deux zéros de dispersion. Sa longueur a été diminuée progressivement par découpes successives, ce qui a permis d'identifier une signature de l'effet de thermalisation de l'onde. Un accord qualitatif a été obtenu avec la théorie cinétique sur une largeur spectrale de l'ordre de 150 THz (i.e. de 850 nm à 1450 nm) [3].

Références

1. V. Zakharov, V. L'vov and G. Falkovich, *Kolmogorov Spectra of Turbulence I* (Springer, Berlin, 1992).
2. J.M. Dudley, G. Genty and S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Rev. Mod. Phys.* **78**, 1135 (2006).
3. B. Barviau, B. Kibler, S. Coen et A. Picozzi, "Toward a thermodynamic description of supercontinuum generation," *Optics Letters* **33**, 2833 (2008); B.Barviau *et al.*, "Experimental signature of optical wave thermalization through supercontinuum generation," soumis à *Optics Express* (2008).

Transition de phases hors-d'équilibre dans le Laser à Electrons Libres

P. De Buyl¹, R. Bachelard², M.-E. Couprie², G. De Ninno³, & D. Fanelli⁴

¹ Interdisciplinary Center for Nonlinear Phenomena and Complex Systems, Campus Plaine – CP 231, Blvd du Triomphe, B-1050 Brussels, Belgium

² Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Saint-Aubin - BP 48, F-91192 Gif-sur-Yvette cedex, France

³ Sincrotrone Trieste, S.S. 14Km163.5, Basovizza, 34012, Trieste, Italy

⁴ Centro interdipartimentale per lo Studio delle Dinamiche Complesse (CSDC) and INFN and Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", Università di Firenze, via s. Marta 3, 50139 Firenze, Italia

pdebuy1 @ulb.ac.be

Les Lasers à Electrons Libres (LEL) sont des sources de lumière puissantes dans les gammes X à UV. La dynamique d'un LEL dans le régime *Self-Amplified Spontaneous Emission* montre des régimes de fort gain et de faible gain dans lesquels la valeur de l'intensité atteinte ne correspond pas à celle prédite par l'équilibre de Boltzmann.

Le LEL est décrit par les interactions onde-particules entre les électrons et l'onde lumineuse générée. La dynamique présente des Etats Quasi-Stationnaires : ce sont des stades intermédiaires dans lesquels le système se retrouve bloqué. Ils sont dûs à la nature de longue portée de l'interaction. Une description du LEL par l'équation de Vlasov, dans la limite d'un grand nombre d'électrons, nous permet d'utiliser deux outils :

- La théorie de Lynden-Bell, basée sur une maximisation de l'entropie.
- La simulation numérique de l'équation de Vlasov.

Dans cet article, nous interprétons les régimes du LEL en fonction des prédictions de la théorie de Lynden-Bell. Nous trouvons deux solutions correspondant aux deux régimes du LEL, qui constituent des états quasi-stationnaires de la dynamique. L'issue d'une condition initiale est donnée par une analyse simulatoire de ces solutions.

Références

1. R. Bonifacio et al., Opt. Comm. **50**, 373(1984)
2. M-C. Firpo and Y. Elskens, Phys. Rev. Lett. **84**, 3318 (2000)
3. P. de Buyl, D. Fanelli, R. Bachelard and G. De Ninno, arXiv :0902.0712v1 (2009).
4. D. Lynden-Bell, Mon. Not. R. Astron. Soc. **136**, 101 (1967).

Etude expérimentale des implications des marées dans les systèmes planétaires

Cyprien Morize, Michael Le Bars, Patrice Le Gal and Andreas Tilgner

IRPHE - UMR 6594 - Marseille University
University of Goettingen
lebars@irphe.univ-mrs.fr

Le rôle fondamental des effets de marées en géo et astrophysique a été le sujet de multiples études depuis plusieurs siècles. Au-delà du phénomène bien connu de flux et de reflux de la mer sur nos rivages, les marées sont également responsables de phénomènes aussi variés que le volcanisme intense de Io ou de la synchronisation de la Lune sur la Terre. Elles pourraient également exciter, dans les étoiles et les noyaux liquides des planètes, une instabilité hydrodynamique dite elliptique, dont l'existence est liée à la résonance d'ondes inertielles. Cette instabilité affecte en fait n'importe quel fluide en rotation dès que ses lignes de courant sont déformées elliptiquement.

Un dispositif expérimental a été réalisé permettant l'étude exhaustive des modes instables d'une sphère fluide déformable mise en rotation suivant son axe. Dans un premier temps, ces études ont permis de déterminer les conditions d'apparition d'un mode instable dit de "spin-over", qui force le fluide à tourner suivant un axe perpendiculaire à l'axe d'entraînement. Dans un second temps, nous présenterons un nouveau phénomène de génération de vents zonaux par un forçage de marées. Suivant une récente analyse théorique et numérique de Tilgner [1], nous observons une première vérification expérimentale que l'auto-interaction d'un mode inertiel non-linéaire avec lui-même peut conduire à un écoulement axisymétrique intense, de zones de cisaillement, dans une sphère en rotation. Ces résultats sont significatifs pour la génération de vents zonaux dans les planètes et les étoiles.

Références

1. A. TILGNER, Zonal wind driven by inertial modes, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 194501 (2007).

Waves and solitons in complex plasmas

Céline Durniak¹, Paul Harvey¹, Dmitry Samsonov¹, Sergey Zhdanov², & Gregor Morfill²

¹ Department of Electrical Engineering and Electronics, The University of Liverpool, Brownlow Hill, Liverpool L69 3GJ, United Kingdom

² Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, D-85740 Garching, Germany.
celine.durniak@liv.ac.uk

Complex or dusty plasmas are plasmas with added microparticles (or dust grains). The microparticles collect electrons and ions and become highly charged. Their charges are usually negative due to higher mobility of the electrons. The grains interact with each other electrostatically via a Yukawa (or Debye-Hückel, or screened Coulomb) potential and often form ordered structures. Similar to colloids, complex plasmas can exist in solid, liquid or gaseous states and exhibit phase transitions [1].

Complex plasmas can be found in space, e.g. in planetary rings, comets or interstellar clouds. In plasma technology, dust contamination has negative effects on the yield of semiconductor devices. As the grains are weakly damped by gas friction and are traceable individually, dynamic phenomena such as shocks [2], Mach cones [3], solitons [4], and waves [5] can be observed at the kinetic level in real time.

The experiments were performed in a capacitively coupled radio-frequency discharge. A powered lower electrode was placed in a grounded vacuum chamber. Monodisperse plastic micro-spheres (9.19 μm in diameter) were levitated in the plasma sheath above the lower electrode. They were confined radially in a bowl shaped potential formed by a rim on the outer edge of the electrode and formed a monolayer hexagonal lattice. A horizontal thin sheet of laser light illuminated the particles, which were imaged by a digital video camera. Electrostatic pulses were applied to wires stretched above the electrode in order to excite waves and solitons.

We simulated monolayer complex plasmas consisting of 3000 negatively charged microparticles with the help of molecular dynamics simulations in three dimensions. The equations of grain motion were solved using the 5th order Runge Kutta method taking into account the interaction of each grain with every other. Their motion was damped by the friction force. The grains were confined more strongly in the vertical direction than in the horizontal one. After seeding the grains randomly, the code was run until equilibrium was reached and a monolayer crystal lattice was formed. Varied excitation forces were then applied to produce nonlinear waves and solitons.

Here we report on the experimental and numerical results of our study of wave phenomena in complex plasmas. We investigated the structural changes of the lattice due to wave propagation, properties of compressional nonlinear waves and solitons, as well as interaction of colliding solitons and the influence of the lattice inhomogeneity on the soliton propagation.

Références

1. H.M. THOMAS AND G.E. MORFILL, Melting of a plasma crystal, *Nature*, **379**, 806-809 (1996); C.A. KNAPEK, D. SAMSONOV, S. ZHDANOV, U. KONOPKA, AND G.E. MORFILL, Recrystallization of a 2D plasma crystal, *Physical Review Letters*, **98**, 015004 (2007).
2. D. SAMSONOV, S.K. ZHDANOV, R.A. QUINN, S.I. POPEL, AND G.E. MORFILL, Shock melting of a two-dimensional complex plasma, *Physical Review Letters*, **92** (25), 255004 (2004).
3. D. SAMSONOV, J. GOREE, H.M. THOMAS, AND G.E. MORFILL, Mach cone shocks in a two-dimensional Yukawa solid using a complex plasma, *Physical Review E*, **61** (5), 5557-5572 (2000).
4. D. SAMSONOV, A.V. IVLEV, R.A. QUINN, G. MORFILL, AND S. ZHDANOV, Dissipative longitudinal solitons in a two-dimensional strongly coupled complex (dusty) plasma, *Physical Review Letters*, **88** (9), 095004 (2002), T.E. SHERIDAN, V. NOSENKO, AND J. GOREE, Experimental study of nonlinear solitary waves in two-dimensional dusty plasma, *Physics of Plasmas*, **15**, 073703 (2008).
5. D. SAMSONOV, S. ZHDANOV, AND G. MORFILL, Vertical wave packets in a crystallized hexagonal monolayer complex plasma, *Physical Review E*, **71**, 026410 (2005).

Acrobaties nonlinéaires des filaments visqueux

N. M. Ribe¹, M. Habibi², Y. Rahmani², & D. Bonn^{3,4}

¹ Laboratoire FAST, Bât. 502, Campus Universitaire, 91405 Orsay cedex

² Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan 45195-159, Iran

³ Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05

⁴ Van der Waals-Zeeman Institute, University of Amsterdam, Valckenierstraat 65, 1018 XE Amsterdam, the Netherlands

ribe@fast.u-psud.fr

De minces filaments de fluide visqueux jouent un rôle important dans de nombreux phénomènes naturels (e.g., éruptions volcaniques) et procédés industriels (e.g., fabrication des polymères et d'étoffes non-tissés). A cause de sa surface libre, un filament visqueux se comporte de façon non-linéaire de par sa nature même, avec notamment la possibilité d'états radicalement différents pour un seul et même jeu de paramètres externes. Nous étudions depuis quelque temps la riche dynamique 'multistable' d'un filament visqueux qui tombe verticalement sur une surface rigide, en conjuguant expériences de laboratoire et modélisation. Nous en présenterons ici trois exemples, vidéos à l'appui :

(1) Modes 'pendulaires' d'un filament qui s'enroule sur lui-même ('coiling') [1,2,3]. Selon les conditions de l'expérience, nous observons jusqu'à 4 états différents qui se succèdent de manière aléatoire, et dont les fréquences s'accordent bien avec les prédictions d'un modèle théorique de type 'filament mince'.

(2) Génération d'ondes spirales par l'instabilité d'enroulement [4]. Sous certaines conditions, l'enroulement s'accompagne d'un mouvement de précession qui piège des bulles d'air entre les boucles du filament pour les éjecter radialement ensuite en forme d'ondes spirales.

(3) Un nouvel état de "repliement rotatif" d'un filament de faible viscosité. Dans certaines fourchettes de valeurs de la hauteur de chute et de la viscosité, trois états du filament sont observés : stagnation axi-symétrique ; enroulement 'normal' ; et repliement périodique avec rotation lente du plan de repliement. Les transitions entre ces états se font par le moyen de perturbations finies convectives générées en haut du filament, qui en arrivant en bas 'écrasent' un état donné pour laisser la place à un autre.

Références

1. Ribe N M, Huppert H E, Hallworth M A, Habibi M, Bonn D (2006) Multiple coexisting states of liquid rope coiling. *J. Fluid Mech.* **555**, 275–297.
2. Ribe N M, Habibi M, Bonn D (2006) Stability of liquid rope coiling. *Phys. Fluids* **18**, 084102.
3. Habibi M, Maleki M, Golestanian R, Ribe N, Bonn D (2006) Dynamics of liquid rope coiling, *Phys. Rev. E* **74**, 066306.
4. Habibi M, Møller P, Ribe N M, Bonn D (2007) Spontaneous generation of spiral waves by a hydrodynamic instability, *Europhys. Lett.*, **81**, 38004.

Fluage et vieillissement d'un empilement de grains soumis à des cycles contrôlés de température

Thibaut Divoux, Hervé Gayvallet & Jean-Christophe Géminard

Université de Lyon, Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon,
CNRS, 46 Allée d'Italie, 69364, Lyon cedex 07, France.
`thibaut.divoux@ens-lyon.fr`

Un tas de sable est un système athermique : en effet, l'énergie potentielle d'un grain calculée sur une échelle de taille de l'ordre de son diamètre est d'une dizaine d'ordres de grandeur supérieure à l'énergie d'agitation thermique à température ambiante. Cette estimation répandue et tout à fait justifiée, masque cependant deux caractéristiques profondes des milieux granulaires. D'une part, la répartition des contraintes est inhomogène au sein du tas : des chaînes de force supportent l'essentiel des contraintes et donnent un rôle clef aux contacts entre grains. D'autre part, le diamètre d'un grain n'est pas sa seule échelle caractéristique : les grains ne sont jamais parfaitement lisses, et leur rugosité de surface fournit au moins une deuxième échelle pertinente. Ces deux ingrédients font des empilements granulaires des constructions athermiques essentiellement *fragiles* [1] ; une signature de cette fragilité est la grande sensibilité que présente un tas de sable aux variations de température extérieure. En effet, on sait depuis les expériences de C. Liu et S.R. Nagel que de faibles variations de température suffisent à provoquer des réorganisations au sein d'un empilement [2]. La dilatation des grains modifie fortement la distribution des chaînes de force [3], ce qui conduit à des avalanches internes [4], et à une restructuration macroscopique du tas. L'utilisation de variations périodiques de température se révèle donc être un moyen original d'induire la compaction d'un empilement [5,6].

Les mécanismes à l'origine d'un tel *fluage* d'une assemblée de grains ainsi que sa dynamique n'ont cependant pas fait l'objet de l'attention qu'ils méritent. Nous présentons ici une étude expérimentale de la dynamique résolue en temps d'une colonne de grains soumise à des cycles de température [7]. Nous montrons que cette dynamique est lente, qu'elle dépend fortement de l'amplitude des cycles de température imposés et qu'elle présente des signes manifestes de vieillissement. Nous discuterons les grandes caractéristiques de ce processus de compaction, et comment la compaction thermique se compare à la compaction mécanique (tapping [8], cisaillement [9], etc). Enfin, nous détaillerons la limite des cycles de température de faible amplitude qui place l'empilement au voisinage de la transition de blocage. Tous ces résultats incitent à voir un empilement de grains comme un système modèle de solide amorphe, et les variations contrôlées de température le cadre expérimental adapté pour tester des idées récentes quant aux réarrangements locaux (structure quadrupolaire) dans ce type de milieux [10].

Références

1. M.E. Cates, J.P. Wittmer, J.P. Bouchaud and P. Claudin, Phys. Rev. Lett. **81**, 1841 (1998).
2. C. Liu and S.R. Nagel, Phys. Rev. Lett. **68**, 2301 (1992) ; C. Liu Phys. Rev. B **50**, 782 (1994).
3. E. Clément, Y. Séréro, J. Rajchenbach, and J. Duran, in Proceedings of the *IIIrd* Intern. Conf. on Powder & Grains in Durham, p 349, R.P. Behringer and J.T. Jenkins editors (Balkema, Rotterdam, 1997).
4. P. Claudin and J.P. Bouchaud, Phys. Rev. Lett. **78**, 231 (1997).
5. J.-C. Géminard, *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université Joseph Fourier, Grenoble I, p. 32 (2003).
6. K. Chen *et al.*, Nature **442**, 257 (2006).
7. T. Divoux, H. Gayvallet and J.-C. Géminard, Phys. Rev. Lett. **101**, 148303 (2008).
8. J.B. Knight *et al.*, Phys. Rev. E **51**, 3957 (1995). P. Richard *et al.*, Nature Materials **4**, 121 (2005).
9. O. Pouliquen *et al.* Phys. Rev. Lett. **91**, 014301 (2003). M. Toiya *et al.* Phys. Rev. Lett. **93**, 088001 (2004).
10. M. Tsamados, A. Tanguy, F. Léonforte and J.-L. Barrat, Eur. Phys. J. E **26**, 283 (2008).

Défauts topologiques (plis) dans les structures cellulaires. De la mue du crabe au croisement de plis en géologie.

Nicolas Rivier

IPCMS, Université de Strasbourg
nick@fresnel.u-strasbg.fr

La cuticule (épiderme) du crabe est une mousse topologique, un pavage désordonné bidimensionnel constitué de cellules en contact. Deux cellules sont séparées par une arête, et trois cellules et trois arêtes sont incidentes sur un sommet. Les cellules sont hexagonales en moyenne. Un dipole $5/7$ constitue une dislocation. La division d'une cellule hexagonale crée deux dislocations en tête-bêche, $7\backslash 5/5\backslash 7$, et la division d'une cellule heptagonale permet à une dislocation de monter par rapport à l'autre, laissant derrière elle une rangée de nouvelles cellules, qui esquisse aussi un pli sur un tissu plat. C'est le mécanisme de croissance d'un tissu biologique. La dislocation (dipole de disclinaisons $5/7$) et le pli (matière ajoutée, bornée par deux dislocations) sont des défauts topologiques, que l'on peut identifier en les entourant d'un contour fermé, comme les charges et les courants en électromagnétisme. Avant de muer, le crabe se construit par le mécanisme ci-dessus une nouvelle cuticule à l'intérieur de la première, copie conforme, mais plus grande et toute plissée. Il se met alors à l'abri, mue, et attend que sa cuticule gonfle et se minéralise en une carapace [1]. Les plis sont aléatoires et se croisent, sinon la nouvelle cuticule ressemblerait à un accordéon, et le crabe serait soit très long, soit très gras. Tout défaut topologique coûte une énergie élastique que le tissu cherche à minimiser. Un pli peut être une vallée (en V) ou une crête (en Λ). Le croisement d'un V et d'un Λ est un col (selle de cheval), coûteux en énergie et visible (cellule de 7 ou de 8 côtés). En fait, deux plis se croisant constituent une selle pour singe (trois V pour les jambes et la queue et trois Λ), sans signature topologique locale et moins coûteuse en énergie. Ce que l'on peut constater en géologie (Figure : Croisement de deux plis en selle de singe, Big Sur State Park, CA).

Références

- [1] Rivier N., Miri M.F., Oguey C. Plasticity and topological defects in cellular structures : Extra matter, folds and crab moulting. *Coloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects* **263**, 39–45 (2005).

Turbulence d'ondes à la surface d'un ferrofluide

François Boyer¹ & Eric Falcon²

¹ Institut Universitaire des Systèmes Thermique Industriels (IUSTI), Université de Provence, CNRS UMR 6595
5 rue Enrico Fermi 13 453 Marseille cedex 13, France

² Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC), Université Paris Diderot, CNRS UMR 7057
10 rue A. Domon et L. Duquet 75 013 Paris, France

francois.boyer@polytech.univ-mrs.fr

La turbulence d'ondes étudie les propriétés statistiques et dynamiques d'un ensemble d'ondes en interaction non linéaire. Son domaine d'application s'étend des ondes internes ou de surface en océanographie aux ondes dans les plasmas astrophysiques en passant par les ondes de spins dans les solides. Contrairement à la turbulence usuelle, la théorie de turbulence d'ondes, développée à la fin des années 60, permet d'obtenir des résultats analytiques exactes tels que l'expression du spectre spatial ou fréquentiel de l'amplitude des ondes [1]. Il existe pourtant à ce jour peu d'études expérimentales sur le sujet. Récemment, le régime de turbulence d'ondes gravito-capillaires à la surface d'un fluide a été observé en bon accord avec les prédictions théoriques, tout en mettant en évidence de nouveaux phénomènes (intermittence, fluctuations du flux d'énergie, effets de taille finie) [2].

Nous avons étudié la turbulence d'ondes à la surface d'un ferrofluide soumis à un champ magnétique normal. Un ferrofluide est une suspension colloïdale de fines particules ferromagnétiques présentant un caractère liquide et fortement magnétique [3]. Nous avons mis en évidence, pour la première fois, l'existence d'un régime de turbulence d'ondes magnétiques à la surface d'un ferrofluide [4]. Nous montrons expérimentalement que ce régime résulte d'un processus d'interactions à quatre ondes. Les domaines d'existence des régimes d'ondes de gravité, d'ondes capillaires et d'ondes magnétiques sont mis en évidence, ainsi qu'un point triple, zone de coexistence de ces trois régimes. Les frontières de ces domaines en fonction du champ magnétique sont trouvées en très bon accord avec les prédictions issues de la relation de dispersion des ondes de surfaces ferrohydrodynamiques. Ces travaux publiés dans *Physical Review Letters* ont été notifiés comme *Editors' Suggestion* et commentés dans *Physics*.

Références

1. V. E. Zakharov, G. Falkovich & V. S. L'Ōvov, *Kolmogorov Spectra of Turbulence I : Wave Turbulence* (Springer-Verlag, Berlin, 1992).
2. E. Falcon, C. Laroche & S. Fauve, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 094503 (2007) ; *Phys. Rev. Lett.* **98**, 154501 (2007) ; E. Falcon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 064503 (2008).
3. R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics* (Dover, New York, 1997).
4. F. Boyer & E. Falcon, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 244502 (2008), synopsis in *Physics : The new wave*, <http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.101.244502>

Impacts durs et mous de liquides et de solides

Emmanuel Villermaux

IRPHE, Marseille

On s'intéresse à la forme et à la dynamique d'objets déformables lors d'un impact avec une source de quantité de mouvement dirigée. On envisagera le cas d'un objet dur (élastique) choqué par un autre objet dur pour des géométries simples (tiges, feuilles), le cas d'un objet mou (liquide) impactant un solide, et le cas d'un objet mou se déformant dans un milieu encore plus mou (gaz). On soulignera l'intérêt de ces observations pour le problème de la fragmentation en général, et pour la compréhension de certains phénomènes naturels comme la pluie.