



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

Louisa

Résumés des exposés de la 15^e
Rencontre du Non-Linéaire
Paris 2012



Institut Henri Poincaré

Non-Linéaire Publications

RENCONTRE DU NON-LINÉAIRE
 Université Pierre et Marie Curie, PARIS
 14–16 Mars 2012

Nous remercions vivement l’Institut Henri Poincaré, l’Institut Jean le Rond d’Alembert, le Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules (PhLAM), le Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA), et le GDR 2984 “Contrôle et Dynamique des Ensembles Complexes” pour leur soutien matériel et financier.

Le comité scientifique est composé de :

Sébastien AUMAÎTRE	CEA — Saclay
Arezki BOUDAUD	RDP — ENS Lyon
Christel CHANDRE	CPT — Marseille
Silvia DE MONTE	Ecologie & Evolution — ENS Paris
Christophe FINOT	ICB — Dijon
Eric FALCON	MSC — Paris
Sébastien GALTIER	IAS — Orsay
Marc LEFRANC	PhLAM — Lille
Anke LINDNER	PMMH — ESPCI, Paris
Patrice MEUNIER	IRPHE — Marseille
Mathis PLAPP	LPMC — Polytechnique
Laure SAINT-RAYMOND	DMA — ENS

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

Eric FALCON	Matière et Systèmes Complexes — Paris 7
Christophe JOSSERAND	Institut Jean le Rond d’Alembert — Paris 6
Marc LEFRANC	PhLAM — Lille
Christophe LETELLIER	CORIA — Rouen

Le Colloque *Henri Poincaré* est organisé par :

Jean-Marc GINOUX	Université du Sud — Toulon
Christophe LETELLIER	CORIA — Rouen
Jean MAHWIN	Université Catholique de Louvain

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

Manipulation de colloïdes par forces osmotiques : les effets d'une pincée de sel <i>Cécile COTTIN-BIZONNE</i>	1
Spectre spatio-temporel d'un écoulement de Beltrami <i>E. Herbert, B. Saint-Michel, F. Daviaud, B. Dubrulle</i>	2
Evénements rares et statistique non gaussienne dans un laser Raman à fibre <i>Stéphane Randoux, Pierre Suret</i>	3
Bifurcation par modulation d'enveloppe d'un cycle limite dans une dynamique non linéaire à double retard <i>Laurent Larger¹, Lionel Weicker², Thomas Erneux², Maxime Jacquot¹, Yanne Chembo¹</i>	4
Phénomènes non linéaires dans les plasmas poussiéreux : Apparition d'oscillations multimodales <i>Maxime Mikikian, Hagop Tawidian, Thomas Lecas, Olivier Vallée</i>	5
Une application récente et surprenante de l'effet de <i>plasma wave echo</i> : la génération de rayonnement X cohérent <i>C. Evain*, M. Labat, A. Loulergue, M.-E. Couprie, J.-M. Filhol**, A. Nadji, C. Sz waj, S. Biela wski</i>	6
Approche Hamiltonienne de la gyrocinétique <i>de Guillebon, Vittot, Tronko, Ghendrih</i>	7
Influence d'une transition hydrodynamique sur la propagation d'un front de réaction-diffusion <i>Simona Bodea, Alain Pocheau</i>	8
Propagation d'onde sonores dans des empilements granulaires <i>Huillard Guillaume, Noblin Xavier, Rajchenbach Jean</i>	9
Modélisation de l'évolution d'un champ de barkhanes <i>Génois M., Courrech du Pont S., Hersen P., Grégoire G.</i>	10
Etude de la croissance de la zone fluidifiée lors de l'injection d'air dans des grains immergés <i>Valérie Vidal, Germán Varas, Jean-Christophe Géminard</i>	11
Formation des aegagropiles : compaction d'une pelote de poils par un écoulement <i>Gautier Verhille, Patrice Le Gal</i>	12
Reptation d'un système frictionnel modèle <i>Blanc Baptiste, Pugnaroni Luis, Géminard Jean-Christophe</i>	13
Fluage et rupture dans un matériau granulaire <i>Amon, Nguyen, Bruand, Crassous, Clément</i>	14

Rhéologie (plasticité) et blocage (jamming) d'un granulaire sec modélisé comme un graphe <i>Nicolas Rivier, Jean-Yves Fortin</i>	15
Long range particle density profiles induced by scanning optical tweezers <i>A. Arakelyan et al</i>	16
Rotations d'une goutte dans un ressaut circulaire hydraulique <i>Duchesne, A., Savaro, C., Limat, L., Lebon, L.</i>	17
Couches limites non linéaires en géophysique <i>David Gérard-Varet</i>	18
Observation expérimentale d'une instabilité de Rayleigh-Plateau dans un jet granulaire en chute libre <i>Prado Gaël, Yacine Amarouchene, Hamid Kellay</i>	19
Impact d'une goutte sans contact <i>Laurent Duchemin, Christophe Josserand</i>	20
Formation d'agrégats macroscopiques pour des populations d'oscillateurs génétiques couplés <i>Bastien Fernandez, Lev Tsimring</i>	21
Mécanisme d'ionisation retardée en champ laser intense <i>F. Mauger, A. Kamor, C. Chandre, T. Uzer</i>	22
Annular billiard dynamics in a strong laser field <i>A. Kamor, F. Mauger, C. Chandre, T. Uzer</i>	23
Observations et études numériques des instabilités micro-ondes dans les anneaux de stockage <i>E. Roussel, C. Evain, S. Bielawski, C. Sz waj, J. Barros, A. Loulergue, M.-A. Tordeux, R. Nagaoka, M. Labat, L. Manceron, J.-L. Brubach, P. Roy, M.-E. Couprie</i>	24
Microcavité non linéaire sous contrôle cohérent <i>Jérémy Oden, Stéphane Trebaol, Nicolas Dubreuil</i>	25
Turbulence d'ondes en optique : propagation non linéaire de rayonnements partiellement cohérents dans les fibres monomodes <i>Stéphane Randoux¹, Antonio Picozzi², Pierre Suret¹</i>	26
Turbulence d'ondes gravito-élastiques <i>Luc Deike, Eric Falcon</i>	27
Analyse en ondelettes de la dynamique lente en turbulence d'onde <i>Benjamin Miquel, Nicolas Mordant</i>	28
Sur la turbulence en configuration quasi bidimensionnelle <i>Pablo Gutiérrez, Sébastien Aumaître</i>	29
Scalings of field correlations and heat transport in turbulent convection <i>Pankaj Kumar Mishra, Mahendra K. Verma, Ambrish Pandey, Supriyo Paul</i>	30
Loi d'échelle pour la transition sous-critique de l'écoulement de Poiseuille plan <i>Grégoire Lemoult, Jean-Luc Aider, Jose Eduardo Wesfreid</i>	31

Analyse de séries temporelles de production éolienne : loi de Taylor et propriétés multifractales <i>Calif, Schmitt</i>	32
Analyse d'écoulement à partir de champs d'observables pris à des temps arbitraires <i>Florimond Guéniat, Lionel Mathelin, Luc Pastur</i>	33
Effets de la rotation sur la convection naturelle entre deux cylindres coaxiaux soumis à un gradient radial de température <i>Clément Savaro, Arnaud Prigent, Innocent Mutabazi</i>	34
Simulation numérique de la convection naturelle dans une canal différentiellement chauffé <i>Zhenlan GAO Bérengère PODVIN Anne SERGENT Shihe XIN Patrick LE QUÉRÉ Laurette S. Tuckerman</i>	35
Ondes de Faraday dans un fluide vibré en rotation <i>Lyes Kahouadji, Damir Juric, Jalel Chergui, Seungwon Shin, Laurette S. Tuckerman</i>	36
Topologie et observabilité d'un modèle chaotique de cancer <i>Christophe Letellier, Fabrice Denis, Luis A. Aguirre</i>	37
Dynamique cardio-respiratoire de nourrissons à risque <i>Émeline Fresnel, Emad Yacoub, Ubiratan Freitas, Valérie Messenger, Eric Mallet, Christophe Letellier</i>	38
Modèle dynamique de la maturation ovocytaire <i>Benjamin Pfeuty, Jean-Francois Bodart, Ralf Blossey,, Marc Lefranc</i>	39
Dynamique du gène auto-reprimé avec mémoire transcriptionnelle <i>Jingkui Wang, Quentin Thommen, Marc Lefranc</i>	40
Une horloge biologique à l'heure par tout temps et en toute saison <i>Quentin Thommen, Benjamin Pfeuty, Florence Corellou, François-Yves Bouget, Marc Lefranc</i> ...	41
Propriétés spatio-temporelles de la Turbulence d'ondes capillaires <i>Michael Berhanu, Eric Falcon</i>	42
Washboard road, instabilité de tôle ondulée <i>Percier B., Manneville S., Taberlet N.</i>	43
Lumière sur les vagues scélérates : le soliton de Peregrine enfin observé ! <i>Bertrand KIBLER</i>	44
Cell colonies and branching patterns <i>Benoît PERTHAME</i>	45
Naissance d'un tsunami <i>Ruiz-Chavarria, Berhanu, Falcon</i>	46
Méandrage sur substrat superhydrophobe ? <i>Stéphanie Couvreur, Philippe Brunet, Adrian Daerr</i>	47
Instabilités dans le sillage stratifié d'un cylindre <i>Mickael Bosco, Patrice Meunier</i>	48
Etude expérimentale de l'instabilité d'un jet de solution diluée de polymère <i>C.M. Gassa Feugaing, O. Crumeyrolle, G. Gréhan, I. Mutabazi</i>	49

Etude numérique de la convection d'un liquide diélectrique sous l'effet de la force diélectrophorétique en géométrie annulaire <i>O. Crumeyrolle, S. Malik, M. Smieszek, Ch. Egbers, I. Mutabazi</i>	50
Etude d'une dynamo Bullard Von Kàrmàn à paramètre d'interaction élevé <i>S. Miralles, N. Plihon, G. Verhille, J-F. Pinton</i>	51
Renversements erratiques d'une structure hydrodynamique grande échelle <i>Johann Herault, Basile Gallet, François Pétrélis et Stéphan Fauve</i>	52
Motifs en bandes de l'écoulement de Couette plan transitionnel <i>Paul Manneville</i>	53
Écoulement dans un tube faiblement divergent : transition laminaire-turbulent <i>Jorge Peixinho</i>	54
Ondes non linéaires en écoulements en tuyau de fluide rhéofluidifiant : retard à la transition et réduction de frottement <i>Roland Nicolas, Plaut Emmanuel, Nouar Chérif</i>	55
Topologie du chaos toroïdal produit par un double pendule actif <i>Martin Rosalie, Davidson Firmo, Leonardo Tôrres, Christophe Letellier</i>	56
Formes Normales d'Observabilités Quadratiques de Poincaré <i>Driss Boutat, Latifa Boutat-Baddas, et Jean-Pierre Barbot</i>	57
Théorie de l'anharmonicité des phénomènes périodiques non-linéaires <i>Patrick Hanusse</i>	58
Convergence géométrique à deux échelles dans le formalisme covariant. Applications à l'équation de Vlasov homogénéisée. <i>Back Aurore, Frénod Emmanuel</i>	59
Turbulence anisotrope des ondes pseudo-alfv�niques en deux dimensions. <i>Tronko Natalia, Sébastien Galtier, Sergey Nazarenko</i>	60
Accrochage de fréquence sans accrochage de phase de deux modes laser couplés <i>Jérémie Thévenin, Marco Romanelli, Marc Brunel, Marc Vallet, et Thomas Erneux</i>	61
Instanton Trajectories for Random Transitions in Turbulent Flows <i>Freddy Bouchet, Jason Laurie</i>	62
Emergence de microstructures dans le cancer de la peau <i>T. Balois, C. Chatelain, P. Ciarletta, M. Ben Amar</i>	63
Localisation et renversement du champ magnétique : un même modèle pour les dynamos cosmiques et l'expérience VKS ? <i>Stephan FAUVE</i>	64

Manipulation de colloïdes par forces osmotiques : les effets d'une pincée de sel

Cécile COTTIN-BIZONNE

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Nanostructures, Université Claude Bernard Lyon 1

A l'équilibre les petites particules telles que les colloïdes et les macromolécules subissent la diffusion brownienne et explorent l'espace de manière diffusive. Il est néanmoins possible d'influencer leur mouvement par l'application d'un gradient de variables thermodynamiques. Nous nous intéressons ici à l'aide d'outils microfluidiques, à un phénomène appelé la diffusiophorèse où le mouvement d'une particule est induit par un gradient de concentration en soluté (un gradient salin par exemple). Il s'agit d'un mécanisme de transport interfacial résultant d'une pression osmotique non équilibrée dans une fine couche diffuse à la surface de la particule. Nos expériences montrent que la diffusiophorèse est un moyen particulièrement efficace pour manipuler des colloïdes, former des structures ou des motifs ou bien encore engendrer l'autopropulsion de particules. Ce dernier aspect est notamment intéressant pour l'étude des propriétés collectives de particules actives.

Spectre spatio-temporel d'un écoulement de Beltrami

E. Herbert¹, B. Saint-Michel, F. Daviaud, & B. Dubrulle

CEA Saclay IRAMIS/SPEC/GIT, Ormes des merisiers
`eric.herbert@cea.fr`

Dans le domaine de la turbulence hydrodynamique, contrairement aux prédictions théoriques et aux simulations numériques qui sont orientées vers l'espace de Fourier, les études expérimentales sont généralement localisées en espace et résolues en temps. La comparaison est alors rendue possible en utilisant l'hypothèse de Taylor qui relie les échelles de temps et les échelles de longueur. L'apparition de la mesure du champs de vitesse grâce à la technique de la Vélocimétrie par Image de Particule (PIV) a permis le calcul des premiers spectres expérimentaux bidimensionnels résolus spatialement $E(\mathbf{k})$.

Dans un premier temps nous montrerons en nous appuyant sur un écoulement turbulent de Von Karman qu'il est possible de déterminer précisément les spectres spatio-temporels $E(\mathbf{k}, \omega)$ de chacune des composantes de la vitesse. Celles ci sont obtenues grâce à une PIV stéréoscopique (les 3 composantes de la vitesse sont résolues dans un plan) permettant l'acquisition de séries temporelles suffisamment longues.

Dans un deuxième temps nous rapporterons les spectres spatiaux $E(k)$ sur une large gamme de Reynolds (de 3000 à 10^6) et nous discuterons les pentes observées en nous appuyant sur une analyse de l'écoulement utilisant sa propriété de Beltrami [1], où vorticité et vitesse sont alignés.

Références

1. VKE, Nazarenko S. : Dual local and non-local cascades in 3D turbulent Beltrami flow . *en préparation*.

Événements rares et statistique non gaussienne dans un laser Raman à fibre

Stéphane Randoux & Pierre Suret

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

Les lasers Raman à fibre sont des sources délivrant un rayonnement partiellement cohérent (non monochromatique) fortement multimode. Le processus de formation de leur spectre optique résulte de l'interaction non linéaire (essentiellement due à l'effet Kerr) entre typiquement 10^5 à 10^8 modes. La physique fortement multimode de ce laser est aujourd'hui fréquemment modélisée à partir d'une équation de type Ginzburg-Landau et un traitement statistique, basé sur la théorie cinétique des ondes, a été appliqué à ce modèle dans le but de décrire la formation du spectre d'un laser Raman oscillant dans une cavité de finesse élevée [1].

Dans ce travail, nous examinons les aspects statistiques plutôt que les aspects spectraux de la formation du spectre optique du laser [2,3]. À l'aide d'un filtre optique de largeur spectrale (~ 5 GHz) beaucoup plus étroite que la largeur du spectre optique du laser Raman (~ 300 GHz), nous montrons que les propriétés statistiques du champ Stokes diffèrent fortement selon la région spectrale de filtrage. Lorsque la longueur d'onde centrale du filtre optique coïncide avec la longueur d'onde centrale du laser, la statistique du champ Stokes est gaussienne. En revanche, un filtrage effectué dans les ailes du spectre montre que la statistique du champ n'est plus gaussienne [4]. Ceci se traduit par l'apparition dans le domaine temporel d'événements rares ("rogue-like waves") d'intensité crête un ordre de grandeur plus élevée que l'intensité moyenne [4].

Les expériences de filtrage ainsi réalisées dans le domaine de l'optique peuvent être mises en relation avec des expériences de filtrage similaires effectuées sur des signaux enregistrés dans des expériences d'hydrodynamique [5]. Des travaux théoriques sont actuellement en cours pour tenter de déterminer si les comportements statistiques observés peuvent être décrits dans le cadre de la théorie de la turbulence faible [6].

Références

1. 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," *J. Opt. Soc. Am. B* **24**, 1729 (2007).
2. S. Randoux, N. Dalloz and P. Suret, "Intracavity changes in the field statistics of Raman fiber lasers," *Opt. Lett.* **36**, 790–792 (2011).
3. D. V. Churkin, O. A. Gorbunov, and S. V. Smirnov, "Extreme value statistics in Raman fiber lasers," *Opt. Lett.* **36**, 3617–3619 (2011).
4. S. Randoux and P. Suret, "Experimental evidence of extreme value statistics in Raman fiber lasers," *Opt. Lett.* **37**, 500–502 (2012).
5. P. Dennissenko, S. Lukaschuck, S. Nazarenko "Gravity wave turbulence in a laboratory flume" *Phys. Rev. Lett.* **99**, 014501 (2007)
6. S. Dyachenko, A. C. Newell, A. Pushkarev, and V. E. Zakharov "Optical turbulence : weak turbulence, condensates and collapsing filaments in the nonlinear Schrodinger equation," *Physica D* **57**, 96–160 (1992).

Bifurcation par modulation d'enveloppe d'un cycle limite dans une dynamique non linéaire à double retard

Laurent Larger¹, Lionel Weicker², Thomas Erneux², Maxime Jacquot¹, & Yanne Chembo¹

¹FEMTO-ST / dépt. Optique, UMR CNRS 6174, Université de Franche-Comté, 25030 Besançon Cedex, France.

²Université Libre de Bruxelles, Groupe d'Optique Non linéaire Théorique, 1050 Bruxelles, Belgique.

laurent.larger@univ-fcomte.fr

Du fait de leur complexité structurelle[1], et de leurs nombreuses applications potentielles[2], les dynamiques à retard connaissent un vif intérêt dans la communauté internationale des dynamiques non linéaires. Motivés par un montage expérimental en optique ayant permis de concevoir et démontrer un système complet de communication sécurisée par chaos [3] et fonctionnant sur un réseau optique installé au débit record de 10Gb/s [4], nous nous sommes intéressés à la route vers le chaos d'une dynamique non linéaire à retard présentant 2 retards temporels très distincts.

Le long de cette route vers le chaos, une première bifurcation de Hopf très courante est rencontrée, mais celle-ci est ensuite suivie, au lieu du traditionnel doublement de période, d'une déstabilisation de l'enveloppe d'oscillation, pour donner naissance au même cycle limite que celui de la bifurcation de Hopf, mais avec une modulation d'enveloppe lente, de fréquence commensurable.

Nous proposons d'aborder dans un premier temps les caractéristiques fréquentielles et temporelles des régimes dynamiques observés expérimentalement autour de cette bifurcation particulière. Après une description du système expérimental réalisant un oscillateur électro-optique à retard et à non linéarité non locale dans le temps sur la variable phase optique, nous dérivons un modèle dynamique à double retard. Ce modèle est ensuite analysé dans les conditions d'apparition de cette modulation d'enveloppe du cycle limite de la bifurcation de Hopf, en mettant en avant un certain nombre d'approximations utilisant les échelles de temps multiples très différentes qui interviennent dans la pratique. Une approche perturbative à échelle de temps multiple nous permet ensuite de décrire les conditions théoriques qui mènent à l'apparition des oscillations à enveloppe crénelée.

Références

1. T. Erneux, *Applied Delay Differential Equations* (Springer 2009).
2. L. Larger, J.M. Dudley, Nature, News & Views, **465**, 41 (2010).
3. R. Lavrov, M. Peil, M. Jacquot, L. Larger, V. Udaltsov, and J. Dudley, Phys. Rev. E **80**, 026207 (2009).
4. R. Lavrov, M. Jacquot, L. Larger, IEEE Journal Quant. Electron. **46**, 1430 (2010).

Phénomènes non linéaires dans les plasmas poussiéreux : Apparition d'oscillations multimodales

Maxime Mikikian¹, Hagop Tawidian¹, Thomas Lecas¹, & Olivier Vallée²

¹ GREMI, Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés, UMR7344, CNRS/Université d'Orléans, 14 rue d'Issoudun, BP6744, 45067 Orléans Cedex 2, France

² GREMI, Rue G. Berger, BP4043, 18028 Bourges Cedex, France
maxime.mikikian@univ-orleans.fr

Les plasmas sont des gaz ionisés que l'on rencontre aussi bien à l'état naturel que dans l'industrie. En plus des atomes, molécules, ions et électrons, ils contiennent fréquemment des objets solides (poussières) dont la taille peut varier du nanomètre au centimètre. Ces plasmas, que l'on nomme alors plasmas poussiéreux[1], sont très répandus en astrophysique (queues de comètes, atmosphères planétaires,...), dans l'industrie (notamment en microélectronique et nanotechnologie) et au bord des plasmas de fusion thermonucléaire. Ces milieux ont de fortes similitudes avec les milieux granulaires et les colloïdes.

La présence des poussières peut affecter considérablement l'équilibre du plasma. En effet, les poussières captent les électrons libres qui assurent l'ionisation. De nombreuses instabilités basse fréquence (< quelques kHz) peuvent alors apparaître[2]. Elles ont le plus souvent un caractère fortement non linéaire et c'est notamment le cas de l'instabilité nommée "heartbeat" qui affecte une zone vide de poussières au centre du plasma. La taille de cette zone se met à osciller dans le temps dans une suite de contractions et d'expansions faisant penser au battement d'un coeur[3]. Une mesure des caractéristiques du plasma pendant ces oscillations, révèle une dynamique complexe qui se traduit notamment par l'apparition d'oscillations multimodales (mixed-mode oscillations ou MMOs)[4]. Ces résultats ont été les premiers mettant en évidence des MMOs dans les plasmas poussiéreux. Les MMOs consistent en une alternance d'oscillations de petite et grande amplitude, ces dernières étant le plus souvent des phénomènes de relaxation du système. Ce type particulier d'oscillations se rencontre dans certaines réactions chimiques oscillantes (réaction de Belousov-Zhabotinskii) et dans l'activité neuronale (modèles de Hodgkin-Huxley ou FitzHugh-Nagumo). De nombreuses théories des systèmes dynamiques sont utilisées pour étudier ces comportements (canards, bifurcations de Hopf, orbites homoclines, ...).

Dans ce travail, sont présentés des résultats expérimentaux mettant en évidence la présence de MMOs dans les plasmas poussiéreux. Des analyses préliminaires concernent notamment le nombre de petites oscillations apparaissant entre les grandes. Ces premiers résultats montrent que les plasmas poussiéreux sont le siège de nombreux phénomènes dynamiques complexes. Ces milieux peuvent ainsi devenir de nouveaux domaines d'application des théories des systèmes dynamiques.

Références

1. M. Mikikian, L. Couédel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi, "*Dusty Plasmas : Synthesis, Structure and Dynamics of a Dust Cloud in a Plasma*", Eur. Phys. J. Appl. Phys. **49**, 13106 (2010)
2. H. Tawidian, M. Mikikian, L. Couédel, T. Lecas, "*Plasma inhomogeneities near the electrodes of a capacitively-coupled radio-frequency discharge containing dust particles*", Eur. Phys. J. Appl. Phys. **56**, 24018 (2011)
3. M. Mikikian, L. Couédel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi, "*Threshold phenomena in a throbbing complex plasma*", Phys. Rev. Lett. **105**, 075002 (2010)
4. M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couédel, Y. Tessier, L. Boufendi, "*Mixed-Mode Oscillations in Complex Plasma Instabilities*", Phys. Rev. Lett. **100**, 225005 (2008)

Une application récente et surprenante de l'effet de *plasma wave echo* : la génération de rayonnement X cohérent

C. Evain^{1*}, M. Labat¹, A. Loulergue¹, M.-E. Couprie¹, J.-M. Filhol^{1**}, A. Nadji¹, C. Sz waj², & S. Bielawski²

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

² PhLAM, Bat. P5, Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

`clement.evain@phlam.univ-lille1.fr`

(*) Adresse actuelle : Laboratoire PhLAM

(**) Adresse actuelle : Fusion for Energy, Torrs Diagonal Litoral, 08019 Barcelona, Spain

L'écho d'ondes de plasma (*plasma wave echo*) est un effet dynamique connu depuis les années 60 [1], et qui peut être interprété comme un effet de "mémoire" à long terme. Dans un premier temps, on effectue première modulation, induisant une modulation dans l'espace des phases (par exemple un feuilletage), mais qui est "cachée" (c'est-à-dire sans conséquences visibles en pratique). Ensuite, l'existence de cette structure est révélée lorsqu'une deuxième modulation est appliquée au système.

Ce phénomène d'écho a été observé dans des domaines variés comme les plasmas [2], l'hydrodynamique [3], l'équation de Kuramoto [6], les gaz classiques [4], et les atomes froids [5]. Cependant, les applications pratiques ont été relativement limitées.

Récemment (en 2009), cet effet a connu une application potentielle inattendue, dans le domaine de la génération de rayonnement X cohérent. Le fluide en question est un paquet d'électrons relativistes dont l'espace des phases est manipulé par des lasers externes. L'application du phénomène de *plasma wave echo* à ce fluide particulier est actuellement considéré comme une voie potentiellement révolutionnaire pour la génération de rayonnement laser VUV et X [7].

Nous présentons ici un ensemble de résultats numériques quantitatifs, démontrant la possibilité de cet effet dans les anneaux de stockage déjà existants. Ensuite, nous présentons le design de LUNEX 5, un projet de machine de test français dont un des objectifs principaux est l'étude de la génération de rayonnement X par ce moyen [8].

Références

1. R. W. GOULD, Plasma wave echo, *Phys. Rev. Lett.*, **19**, 219 (1967).
2. J.H. MALMBERG, C.B. WHARTON, R.W. GOULD, T.M. O'NEIL, Observation of plasma wave echoes, *Phys. Fluids*, **11**, 1147 (1968).
3. J. VANNESTE, P.J. MORRISON AND T. WARN, Strong echo effect and nonlinear transient growth in shear flows, *Phys. Fluids*, **10**, 1398 (1998)
4. T. W. MOSSBERG, R. KACHRU, E. WHITTAKER AND S. R. HARTMANN, Temporally Recurrent Spatial Ordering of Atomic Population in Gases : Grating Echoes, *Phys. Rev. Lett.*, **43**, 851 (1979)
5. D. V. STREKALOV, ANDREY TURLAPOV, A. KUMARAKRISHNAN AND TYCHO SLEATOR, Periodic structures generated in a cloud of cold atoms, *Phys. Rev. A*, **66**, 023601 (2002)
6. EDWARD OTT, JOHN H. PLATIG, THOMAS M. ANTONSEN, AND MICHELLE GIRVAN , Echo phenomena in large systems of coupled oscillators , *Chaos*, **18**, 037115 (2008)
7. DAO XIANG AND GENNADY STUPAKOV, Echo-enabled harmonic generation free electron laser, *Phys. Rev. Special Topics Accel. Beams*, **12**, 030702 (2009)
8. LUNEX 5, Laser à électrons libres Utilisant un accélérateur Nouveau pour l'Exploitation de rayonnement X de 5ème génération, *Conceptual Design Report*, SOLEIL (2011)

Approche Hamiltonienne de la gyrocinétique

de Guillebon¹, Vittot¹, Tronko², & Ghendrih³

¹ Centre de Physique Théorique (CPT) UMR 6207, CNRS - Université Aix-Marseille Luminy, case 907, 13288 Marseille cedex 9

² University of Warwick Coventry CV4 7AL, UK

³ Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique (IRFM) Association EURATOM-CEA CEA/DSM/IRFM Cadarache, bâtiment 513 13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

`loic.de-guillebon@cpt.univ-mrs.fr`

La dynamique des plasmas dans un champ électromagnétique peut faire l'objet d'une réduction dimensionnelle lorsque le champ magnétique est fort, grâce à la présence d'une constante du mouvement, le moment magnétique [1,2]. Nous menons tout d'abord la réduction au niveau des particules (champ externe) sans utiliser de centre-guide [3]. Cela nous permet le relèvement du résultat au niveau du plasma (à travers l'équation de Vlasov), et fournit ainsi la réduction désirée à l'ordre le plus bas. La rétro-action du plasma sur la dynamique des champs (équations de Maxwell) est ensuite restaurée en tant que perturbation hamiltonienne. Cela ré-introduit une variation temporelle du moment magnétique, qui est traitée par une méthode KAM.

Références

1. J. R. Cary et A. J. Brizard, "Hamiltonian theory of guiding-center motion", *Rev. Mod. Phys.* **81** (2009), 693–738.
2. A. J. Brizard et T. S. Hahm, "Foundation of nonlinear gyrokinetic theory", *Rev. Mod. Phys.* **79** (2006), 421–468.
3. "Dynamical reduction for charged particles in a strong magnetic field without guiding-center", L. de Guillebon, N. Tronko, M. Vittot, Ph. Ghendrih, en préparation.

Influence d'une transition hydrodynamique sur la propagation d'un front de réaction-diffusion

Simona Bodea¹ & Alain Pocheau¹

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

Les fronts de réaction-diffusion se rencontrent dans divers systèmes physiques, chimiques et biologiques comme par exemple, la progression des régions de corrosion, la propagation des feux de forêt ou encore la propagation des infections [1]. Ces fronts sont alors soumis à un écoulement souvent très efficace devant le transport par réaction-diffusion. Cette étude concerne la propagation d'un front de réaction-diffusion en présence d'un écoulement structuré et s'interroge sur l'effet d'une évolution des structures advectives sur la propagation du front. Parmi les évolutions possibles, nous avons considéré ici un changement de dimension, obtenu via une transition hydrodynamique entre un écoulement cellulaire plan (2D) et un écoulement cellulaire tridimensionnel (3D).

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. Le front de réaction-diffusion est créé par initiation de la réaction auto catalytique Chlorite-Iodure [2].

Pour des vitesses d'écoulement modérées, l'écoulement reste 2D (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 augmentation concave 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 qui lui permet d'optimiser son temps de parcours [3].

Pour des vitesses d'écoulement plus élevées, nous montrons que l'apparition des écoulements secondaires en épaisseur et donc d'une composante de vitesse orthogonale à la vitesse d'écoulement 2D, est néfaste à l'optimisation du temps de parcours dans la structure. Ceci a pour conséquence l'arrêt de l'augmentation de la vitesse du front.

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. Cette loi a été validée par nos expériences.

Cette étude révèle la sensibilité des fronts de réaction à la structure des écoulements dans lesquels il se propage, faisant ainsi de ceux-ci des révélateurs très fins de transitions hydrodynamiques. Ceci pourrait être potentiellement intéressant par exemple en microfluidique. Par ailleurs, nous avons montré que, de manière assez inattendue, l'apparition d'un écoulement structuré 3D pouvait pénaliser le transport. Cette propriété peut se révéler intéressante pour des applications où on désire limiter le transport en présence d'un écoulement d'intensité croissante.

Références

1. F. SAGUES AND I.R. EPSTEIN, Nonlinear Chemical dynamics, *Dalton Trans.*, 1201-1217 (2003).
2. D.M. WEITZ AND I.R. EPSTEIN, Spatial waves in the reaction of chlorite with iodide, *J.Phys.Chem.* **88**, 5300-5304 (1984).
3. A. POCHEAU AND F. HARAMBAT, Effective front propagation in steady cellular flows : A least time criterion, *Phys.Rev.E*, **73**, 065304 (2006) ; A. POCHEAU, F.HARAMBAT, Front propagation in a laminar cellular flow : Shapes, velocities, and least time criterion, *Phys.Rev.E*, **77**, 036304 (2008).

Propagation d'onde sonores dans des empilements granulaires

Huillard Guillaume, Noblin Xavier & Rajchenbach Jean

LPMC, CNRS UMR 7336, UNS, Parc Valrose, 06108 Nice cedex 2
xavier.noblin@unice.fr

La propagation d'ondes sonores dans des empilements granulaires présente des comportements originaux et mal-élucidés, qui sont liés au désordre et à la non-linéarité des interactions de contact. Grâce à l'utilisation de grains photoélastiques et d'une caméra rapide, nous avons réussi à visualiser en temps réel le champ de déformation associé à la propagation de l'onde sonore. Nous utilisons des grains cylindriques, ce qui permet de tester une alternative à la loi de contact propre aux sphères [1].

Nous présentons d'abord le cas de l'empilement le plus simple : une chaîne unidimensionnelle de grains cylindriques en contact. Nous étudions la propagation d'impulsions sonores dans les deux cas où leurs amplitudes sont petites (régime linéaire) ou grandes (régime non-linéaire) devant la force de confinement statique appliquée à la chaîne.

Dans le premier cas, nous observons l'effet des imperfections de surface des grains sur la vitesse des ondes. Nous montrons aussi que la dissipation provient essentiellement du frottement solide. Pour les grandes amplitudes, l'impulsion initiale unique se décompose en un train d'impulsion d'amplitudes décroissantes, de largeurs comprises entre 3 et 4 grains et de vitesses supersoniques (en se référant à la vitesse des ondes de son linéaire). La vitesse du pic principal, adimensionnée par la vitesse du son linéaire, ne dépend que du rapport entre l'amplitude de l'onde et la force statique. Ces observations sont interprétées en généralisant les résultats de Nesterenko [2].

Nous présentons ensuite le cas des empilements bidimensionnels. Les ondes linéaires se propagent le long des chaînes de contacts et leurs vitesses augmentent avec la force statique. Elles restent cependant toujours inférieures à celles mesurées à 1D. Cela suggère que la dynamique de l'onde le long d'une chaîne de force est influencée par les contacts latéraux à cette chaîne de contact.

Références

1. HUILLARD, G., NOBLIN, X., AND RAJCHENBACH, J., *Physical Review E*, **84** (1), 016602 (2011).
2. NESTERENKO, V. F., *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **24**, 567 (1983).

Modélisation de l'évolution d'un champ de barkhanes

Génois M., Courrech du Pont S., Hersen P., & Grégoire G.

Laboratoire Matière & Systèmes Complexes, UMR 7057, Paris Diderot
10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75205 Paris cedex 13
mathieu.genois@univ-paris-diderot.fr

Les barkhanes sont des dunes en forme de croissant qui évoluent sur un sol non érodable. Dans les déserts, elles sont observées au sein de champs pouvant regrouper des milliers d'individus. Ces champs ont des propriétés statistiques bien définies (taille moyenne des dunes, etc), qui ne peuvent être expliquées par la dynamique d'une barkhane isolée. La compétition entre perte et captage de sable au niveau de la dune impose en effet un équilibre instable qui mène soit à la disparition de la dune, soit à une croissance divergente. Les propriétés des champs doivent donc être dues aux interactions entre les dunes. Ces interactions, captage de sable et collisions, sont fortement non linéaire.

Le modèle étudié est un système de particules autopropulsées sur un espace continu qui prend en compte l'intégralité de cette phénoménologie. C'est un modèle d'agents où la dune est l'élément microscopique. Ce système original se positionne à la frontière de plusieurs domaines connus de la physique statistique : la dynamique hors équilibre, les systèmes non conservatifs, les modèles de réaction-transport, les particules autopropulsées, la percolation sur continuum.

L'étude montre que dans un régime raisonnable de paramètres, quand la perte de sable au niveau de chaque dune est non nulle, le système atteint systématiquement un état stationnaire hors d'équilibre indépendant des conditions initiales. En fonction d'un paramètre de contrôle ξ , qui compare les temps caractéristiques d'apparition et de disparition des dunes, on observe deux états asymptotiques très différents. Pour les petits ξ le champ atteint un état dilué, dans lequel les dunes n'interagissent pas. La dynamique de cet état est résolue analytiquement. À grand ξ l'état est dense, les collisions sont très fréquentes. Nous montrons, par des arguments analytiques et numériques, que le passage d'un régime à l'autre n'est pas une transition de phase, mais un changement de dynamique lié à l'aspect hors équilibre du système.

Dans l'état dense, on observe des inhomogénéités spatiales de densité, sous la forme d'avalanches de collisions de dunes. Dans une gamme extrême des paramètres, ces avalanches atteignent la taille du système : il y a transition de percolation. L'état atteint n'est plus stationnaire et devient dépendant des conditions initiales.

Etude de la croissance de la zone fluidifiée lors de l'injection d'air dans des grains immergés

Valérie Vidal, Germán Varas & Jean-Christophe Géminard

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

Lorsqu'on injecte de manière ponctuelle de l'air en base d'une couche de grains immergée dans l'eau, on observe, au cours du temps, la formation d'une zone fluidifiée. Lors d'expériences précédentes dans une cuve cylindrique (3D) ou dans une cellule de Hele-Shaw (2D) verticale, nous avons montré que cette zone, aux temps longs, a une forme parabolique [1,2]. Un modèle analytique simple considérant les différents chemins parcourus par l'air dans le système permet d'expliquer cette géométrie en terme de processus de diffusion [1,2]. Ces travaux ont montré qu'un paramètre unique, sans dimension, gouverne la dynamique du système : le paramètre χ , défini comme le rapport entre la largeur de la distribution des surpressions capillaires dans le milieu et la pression hydrostatique sur la taille typique d'un grain. Une étude numérique a montré que pour des grandes valeurs de ce paramètre χ , on sort du régime "diffusif" [3]. Cette étude numérique, cependant, considère un milieu non-déformable et, bien qu'étant capable de décrire la morphologie de la zone fluidifiée aux temps longs, ignore sa dynamique de formation.

Nous présentons ici l'étude expérimentale de la dynamique de croissance de la zone fluidifiée lorsqu'on injecte de l'air à débit constant en base d'une couche de grains immergée dans l'eau. Nous utilisons une cellule de Hele-Shaw (système quasi-2D) que l'on peut incliner par rapport à la verticale avec un angle compris entre $\alpha = 0^\circ$ (cellule verticale) et $\alpha = 90^\circ$ (cellule horizontale), permettant ainsi de faire varier la gravité effective dans le système – et, donc, de varier le paramètre χ . De manière similaire aux résultats obtenus dans l'étude numérique nous retrouvons, pour les grands angles ($\alpha > 60^\circ$) la disparition du régime "diffusif". Dans le régime non-diffusif, cependant, il n'est pas possible d'étudier expérimentalement la morphologie de la zone fluidifiée. En effet, pour $\alpha > 60^\circ$, l'air ouvre aux premiers instants d'injection un chemin à travers le milieu et ce chemin reste stable au cours du temps, la gravité n'étant plus suffisante pour le refermer. On observe dans ce cas l'éjection progressive des grains hors de la couche initiale et, aux temps longs, la formation d'un delta analogue aux embouchures de rivières.

Nous décrivons également la dynamique de croissance de la zone fluidifiée au cours du temps. Nous montrons l'existence de trois zones : (1) une zone centrale dans laquelle deux rouleaux de convection transportent les grains autour du chemin suivi par l'air lors de sa remontée dans le milieu ; (2) une zone compacte à l'extérieur de la zone fluidifiée ; (3) une zone dite de 'stick-slip' (SSZ) à l'interface entre la zone fluide et la zone compacte. La largeur de la SSZ diminue au cours du temps, jusqu'à disparaître lorsque le système atteint un état stationnaire. Ces différentes zones se retrouvent dans des processus géologiques, en particulier, lors de la formation de conduits géants de kimberlite [4].

Références

1. G. VARAS, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, *Physical Review E*, **83**, 011302 (2011).
2. G. VARAS, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, *Compte-rendus de la 14e Rencontre du Non-Linéaire*, Eds. C. Josserand, M. Lefranc & C. Letellier, Non-Linéaire Publications, p.175-180 (2011).
3. G. VARAS, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, *Physical Review E*, **83**, 061302 (2011).
4. R.J. BROWN, M. FIELD, T. GERON, M. GILBERTSON & R.S.J. SPARKS, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **178**, 847-850 (2008).

Formation des aegagropiles : compaction d'une pelote de poils par un écoulement

Gautier Verhille & Patrice Le Gal

IRPHE - UMR 6594, 49 Rue F. Joliot-Curie - BP 146, 13384 Marseille cedex 13
gautier.verhille@irphe.univ-mrs.fr

Les aégagropiles sont des pelotes de fibres de Posidonies (plantes sous-marines) que l'on trouve le long des plages méditerranéennes. La formation de ces pelotes n'est pas spécifique aux Posidonies, puisque des structures équivalentes formées à partir d'algues ont également été observées sur les côtes de certains lacs américains [1] ou sur le littoral Nord-Est des Etats-Unis [2]. Il est généralement admis que l'écoulement au fond de la mer est responsable de cette agrégation et de la compaction des pelotes lorsque la concentration en filaments est suffisamment importante. De manière équivalente, la formation d'amas de poussière dans une habitation est liée à l'écoulement d'air qui permet le transport de la poussière, des cheveux, de poils d'animaux... et la compaction de ces structures.

A notre connaissance, aucune étude détaillée de ce phénomène n'existe : les études d'agrégations dans des écoulements concernent généralement des particules pas ou peu déformables [3,4], alors que la dynamique collective de fils est généralement associée à l'étude des polymères, donc à une échelle bien plus petite. D'un point de vue botanique, seule une étude expérimentale a été réalisée mais uniquement de manière qualitative [5]. Nous proposons d'étudier expérimentalement ce phénomène dans deux types d'expériences. La première étude est en cours et s'intéresse au comportement de plusieurs centaines de fils de cotons plongés dans un écoulement laminaire généré par un batteur qui entretient une onde stationnaire dans un aquarium. Cet écoulement à l'avantage d'être proche du forçage naturel qui peut apparaître en mer et présente des points de stagnation où les fils vont pouvoir s'emmêler. On s'intéresse alors à la dynamique d'agrégation et de compaction de ce système.

Dans un second temps, nous voulons étudier l'influence de la turbulence sur le mécanisme d'agrégation de fils. Cette partie de l'étude s'intéressera aussi bien à la dynamique d'un seul fil (formation de nœuds, analogie avec la dynamique des polymères...) qu'à la dynamique de groupe lorsque la concentration en fils est importante.

Plus généralement, cette étude peut apporter un regard nouveau sur la formation d'agrégats d'objets déformables intervenant en particulier en biologie comme l'agrégation des globules rouges, par exemple. On pourrait également trouver une analogie entre la dynamique d'un fil dans un écoulement turbulent et celle d'un brin d'ADN ou d'un polymère soumis à l'agitation thermique.

Références

1. J.B. Moyle, About beach balls, *Minnesota Volunteer*, 38-41,1971.
2. A.C. Mathieson and C.J. Dawes, *Chaetomorpha* balls foul New Hampshire, USA Beaches, *Alage*, **17**(4), 2002.
3. P. Bagchi *et al.*, Computational fluid dynamic simulation of aggregation of deformable cells in a shear flow, *Journal of Biomechanical Engineering*, **127**, 1070-1080,2005.
4. S. Melis *et al.* Effect of fluid motion on the aggregation of small particles subject to interaction forces, *AIChE Journal*, **45**(7), 1999.
5. J.F.M Cannon, An experimental investigation of Posidonia balls, *Aquatic Botany*, **6**, 407-410, 1979.

Reptation d'un système frictionnel modèle

Blanc Baptiste¹, Pugnali Luis² & Géminard Jean-Christophe¹

¹ Université de Lyon, Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon, CNRS, 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France.

² Instituto de Física de Líquidos y Sistemas Biológicos (UNLP, CONICET La Plata), Calle 59 Nro. 789, 1900, La Plata, Argentina.

baptiste.blanc@ens-lyon.fr

Dans un matériau formé par un assemblage de grains, chaque entité interagit avec ses voisines par des forces de contact dissipatives. C'est pourquoi il est nécessaire d'injecter continuellement de l'énergie pour entretenir son mouvement. T. Divoux [1] a montré expérimentalement que des variations de température sont capables d'induire une réorganisation des grains.

Nous présentons un modèle simple de matériau élastique et frictionnel se déplaçant dans un champ de pesanteur sous des variations cycliques de sa température, une chaîne de patins frottant sur un plan incliné reliés par des ressorts dont les longueurs à vide dépendent de la température. Il est possible de trouver analytiquement la vitesse moyenne d'un tel ensemble [2]. Pour un système de petite taille, la vitesse évolue avec l'angle en suivant une courbe composée de plateaux dont le nombre est relié à la taille du système. Les vitesses associées à ces plateaux dépendent linéairement de l'amplitude des variations de température tant que les dilatations thermiques sont suffisamment grandes.

De plus, par une analyse simplifiée, on prédit qu'il existe une amplitude minimale de variations de température en dessous de laquelle le système ne coule plus. L'étude numérique permet de préciser que cette vitesse n'est pas exactement nulle, mais que cette transition délimite un régime de reptation continue et un régime de reptation intermittente. Cette observation fait écho aux résultats expérimentaux de T. Divoux [1], montrant que la dynamique de compaction d'une colonne de sable chauffée de manière cyclique suit une transition similaire.

Références

1. DIVOUX THIBAUT, GAYVALLET HERVÉ, GÉMINARD JEAN-CHRISTOPHE, Creep motion of a granular pile induced by thermal cycling, *Physical Review Letters*, **101** (14), (2008).
2. BLANC BAPTISTE, PUGNALONI LUIS, GÉMINARD JEAN-CHRISTOPHE, Creep motion of a model frictional system, *Physical Review E*, **84** (6), (2011).

Fluage et rupture dans un matériau granulaire

Amon¹, Nguyen², Bruand³, Crassous¹, & Clément²

¹ Institut de Physique de Rennes UMR 6251, Université de Rennes 1, 35042 Rennes, France

² PMMH, ESPCI, UMR 7636 and Université Paris 6 & Paris 7, 75005 Paris, France

³ ISTO, UMR 6113, 45000 Orléans, France

`axelle.amon@univ-rennes1.fr`

Je présenterai des résultats expérimentaux récents concernant la réponse mécanique d'un milieu granulaire soumis à un faible cisaillement [1]. Grâce à une technique originale de mesures de micro-déformations résolues spatialement par diffusion multiple de la lumière [2,3], nous avons mis en évidence l'existence de déformations localisées, des “spots” d'une dizaine de taille de grains, à l'origine de la déformation plastique globale observée dans le système. L'existence de tels réarrangements locaux est à la base des théories décrivant la plasticité des matériaux amorphes [4], cependant leur mise en évidence expérimentale et surtout leur lien avec la rhéologie des matériaux demandent à être approfondie.

Nous avons effectué des expériences sur une cellule de cisaillement contenant un matériau granulaire constitué de billes de verre [5]. En déformation imposée, nous avons pu visualiser un processus collectif en cascade conduisant à la formation de bandes de cisaillement correspondant à des événements précurseurs à la rupture sur la courbe de réponse en contrainte. D'autre part, des expériences en contrainte imposée nous ont permis de faire un lien direct entre le taux d'apparition de ces spots et le fluage du matériau, nous conduisant à identifier expérimentalement une variable phénoménologique, généralement appelée *fluidité*, introduite dans de nombreux modèles de rhéologie des matériaux mous [6].

Références

1. A. Amon, V. B. Nguyen, A. Bruant, J. Crassous, and E. Clément, soumis à *Phys. Rev. Lett.*.
2. M. Erpelding, A. Amon, and J. Crassous, *Phys. Rev. E* **78**, 046104 (2008).
3. M. Erpelding, A. Amon, and J. Crassous, *Europhys. Lett.* **91**, 18002 (2010).
4. Argon, A.S. *Acta Metallurgica* **27**, 47-58 (1979).
5. V. B. Nguyen, T. Darnige, A. Bruand, and E. Clément, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 138303 (2011).
6. C. Derec, A. Ajdari, and F. Lequeux, *Eur. Phys. J. E* **4**, 355-361 (2001).

Rhéologie (plasticité) et blocage (jamming) d'un granulaire sec modélisé comme un graphe

Nicolas Rivier¹ & Jean-Yves Fortin²

¹ Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (IPCMS), et Université de Strasbourg, 3, rue de l'Université F-67084 Strasbourg

² Groupe de Physique Statistique, Département de Physique de la Matière et des Matériaux, Institut Jean Lamour, UMR 7198, Nancy Université, BP 70239, F-54506 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex
`nick@fresnel.u-strasbg.fr`, `fortin@ijl.nancy-universite.fr`

Un matériau granulaire dense et sec, avec friction tangentielle infinie, est modélisé comme un graphe connexe de grains reliés par des contacts purement répulsifs. Chaque grain peut donc soit rouler sans glisser sur un autre, soit s'en déconnecter. La stabilité sous cisaillement du granulaire est assurée par la présence de circuits impairs de grains en contact qui les empêchent de rouler l'un sur l'autre. Le matériau granulaire se trouve alors dans l'un de deux états thermodynamiques : solide fragile, bloqué ("jammed") par les circuits impairs, ou fluide sec, en leur absence. La dynamique du granulaire au voisinage de la transition de blocage, dans un tambour tournant à vitesse angulaire constante autour d'un axe horizontal, saute de manière intermittente entre les états solide et fluide. Dans l'état solide fragile, le granulaire suit un cycle limite alternant avalanches et entraînement par le tambour. C'est un comportement de "stick-slip" dans un solide soumis à une friction solide (entraînement par le tambour) et à une force de rappel (gravité). Dans l'état fluide, la force de friction est visqueuse, et le matériau granulaire tend vers un point fixe de pente constante. Si la friction tangentielle est supposée nulle, la modélisation comme un graphe et la frustration causée par les circuits impairs restent valables puisque la force entre grains demeure scalaire et répulsive.

Long range particle density profiles induced by scanning optical tweezers

A. Arakelyan¹ *et al*

Ecole Normale Supérieure de Lyon, C.N.R.S. UMR5672, 46, Allée d'Italie, 69364, Lyon, France
`artak.arakelyan@ens-lyon.fr`

We have shown theoretically and experimentally that a local drive causes long range steady state density profiles in the sedimentated uniform layer of colloid particles. The theoretical calculations performed in [?] for a two dimensional particle lattice have been adapted to a layer of colloidal particles locally driven by scanning optical tweezers. It was shown that the localized drive should induce long range density profiles in the layer. Long range density profiles have been experimentally induced in a sedimentated layer of silica particles by applying certain scanning sequence to the optical trap. The obtained experimental results are in good agreement with theoretical predictions.

Références

1. PhysRevE.84.051136 Tridib Sadhu, Satya N. Majumdar, and David Mukamel. Long-range steady-state density profiles induced by localized drive. *Phys. Rev. E*, 84 :051136, Nov 2011.
URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.84.051136>.

Rotations d'une goutte dans un ressaut circulaire hydraulique

Duchesne,A.¹, Savaro,C.¹, Limat,L.¹, & Lebon,L.¹

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC), UMR 7057 du CNRS, Université Paris Diderot, 10 rue Alice Domont et Léonie Duquet, 75013 Paris, France
alexis.duchesne@paris7.jussieu.fr

Le ressaut hydraulique (jet impactant une plaque) est un dispositif original permettant l'étude de gouttes en situation de non-coalescences [1]. Une goutte du même liquide déposée sur la zone centrale (à forte vitesse car près du jet), ne coalesce pas du fait de la présence d'un très mince film d'air, entraîné par le liquide, sur laquelle elle lévite, et se trouve alors piégée contre le "mur" séparant les zones rapides et lentes de l'écoulement.

Nous nous sommes intéressés à des gouttes d'huile silicone dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur capillaire. Lorsque l'on place de telles gouttes dans un ressaut de la même huile, on observe 4 régimes dynamiques distincts [2,3] :

- La goutte reste immobile
- Mouvement orbital périodique (la goutte fait des "tours" du ressaut)
- Mouvement de transition vers le "chaos" (la goutte orbite dans le ressaut puis change soudainement de direction).
- Mouvement "chaotique" (nous n'avons pas détecté de structure périodique).

Par ailleurs nous avons étudié le comportement de gouttes d'autres liquides dans notre ressaut d'huile silicone, ces liquides ayant des propriétés (densités, tensions superficielles et viscosités) différentes. Nous avons pu observer des dynamiques de gouttes extrêmement complexes, certaines avec déformations des gouttes. Ainsi une goutte d'eau dans un ressaut d'huile va être excitée selon un mode propre de la goutte, une goutte d'éthanol va adopter une forme ellipsoïdale...

Il est apparu que la rotation propre de la goutte était un facteur clé de ces dynamiques. Par ailleurs nous nous sommes aperçus que l'hypothèse de modélisation de la goutte par une sphère dure au dessus d'un film d'air en cisaillement simple n'était pas pertinente, en particulier en ce qui concerne les fréquences de rotations attendues par un tel modèle. Nos résultats expérimentaux ont mis en évidence une loi en fréquence en $\frac{1}{R^2}$ où R est le rayon de la goutte au lieu de la loi en $\frac{V}{R}$ qui découlait de ce modèle simple. Nous le justifions par des arguments qualitatifs : l'écrasement de la goutte, son caractère déformable... [4,5] Il semble pour autant que cette fréquence de rotation soit aussi liée à différents paramètres modifiant la couche d'air (la viscosité du liquide, sa densité, etc...) ce qui traduit bien la difficulté de sa prise en compte, si l'on veut aller au delà du modèle gyroscopique de la référence [2].

Références

1. SREENIVAS, K.R., DE, P.K., ARAKERI, J.H., Levitation of a drop over a film flow, *J.Fluid.Mech*, **380**, 297-307 (1999).
2. PIRAT, C., LEBON, L., FRULEUX, A., ROCHE, J.-S., LIMAT, L., Gyroscopic Instability of a Drop Trapped Inside an Inclined Circular Hydraulic Jump, *Phys.Rev.Letters*, **105**, 8 (2010).
3. SAVARO, C., Stage expérimental de M2 (2010).
4. DE GENNES, P.-G., BROCHARD-WYART, F., QUERE, D., Gouttes, Perles et Ondes, 202-205. Belin (2002).
5. DELL'AVERSANA, P., NEITZEL, G.P., Behavior of noncoalescing and nonwetting drops in stable and marginally stable states, *Experiments in Fluids*, **36**, 299-308 (2004).

Couches limites non linéaires en géophysique

David Gérard-Varet

Institut de Mathématiques de Jussieu, Université Paris Diderot, Paris 7, 175 rue du Chevaleret, 75013 Paris
gerard-varet@math.jussieu.fr

Nous nous intéresserons dans cet exposé aux couches limites classiques des fluides géophysiques (Ekman, Munk). Dans les descriptions laminaires standard, ces couches limites sont décrites par des équations différentielles linéaires. Nous montrerons que même dans le régime laminaire, la prise en compte de l'irrégularité des reliefs (bathymétrie, côtes) nécessite des modèles plus élaborés (EDP non linéaires), dont nous présenterons quelques éléments d'analyse mathématique.

Observation expérimentale d'une instabilité de Rayleigh-Plateau dans un jet granulaire en chute libre

Prado Gaël, Yacine Amarouchene, & Hamid Kellay

Univ. Bordeaux, LOMA, UMR 5798, F-33400 Talence, France

CNRS, LOMA, UMR 5798, F-33400 Talence, France

`g.prado@loma.u-bordeaux1.fr`, `y.amarouchene@loma.u-bordeaux1.fr`

Malgré une nature discrète, un jet granulaire présente un comportement très similaire en apparence à un écoulement liquide [1,2]. On peut se poser la question de l'origine de ce comportement global : dans un liquide, des forces moléculaires sont à l'origine de la tension de surface ; qu'en est-il dans un milieu granulaire ? Il a été observé que de telles interactions attractives entre les grains (ponts capillaires ou force de Van der Waals) peuvent mener à l'apparition d'agrégats de petite taille dans un écoulement granulaire [3]. Néanmoins, ces interactions ne suffisent pas à expliquer *une tension de surface effective* justifiant un comportement collectif à grande échelle.

Les premières expériences réalisées au sein du groupe ont mis en évidence la présence d'ondes capillaires excitées thermiquement à l'interface d'un jet granulaire dans l'air [4], et ont permis de mesurer une *tension de surface effective* dans un milieu granulaire. Poursuivant l'analogie avec un jet liquide, nous étudions les propriétés des modes de grande longueur d'onde dans un jet granulaire soumis à une vibration verticale sinusoidale. On observe alors une croissance de ces modes excités pour une certaine gamme de fréquences d'excitation menant éventuellement à la rupture du jet à grande distance. Nos résultats montrent que cette instabilité est similaire à l'instabilité capillaire de Rayleigh-Plateau communément observée dans les liquides [5]. Par l'étude des modes instables excités dans le jet, nous mesurons une tension de surface granulaire effective (de l'ordre de quelques mN/m) en accord avec de précédentes mesures effectuées à plus petite échelle [4]. En répétant l'expérience dans une enceinte fermée sous vide ($P \approx 0.1\text{mbar}$), l'instabilité et la rupture disparaissent, indiquant que la tension de surface effective provient d'une interaction entre le jet granulaire et le fluide ambiant (l'air).

Références

- [1] N. Khamontova, J. Russ. Phys. Chem. Soc. 22, 281 (1890)
- [2] J. Eggers and E. Villermaux, Rep. Prog. Phys. 71, 036601 (2008)
- [3] J.R. Royer et al., Nature (London) 459, 1110 (2009)
- [4] Y. Amarouchene, J.F. Boudet, H. Kellay, Phys. Rev. Lett. 100, 218001 (2008)
- [5] G. Prado, Y. Amarouchene, H. Kellay, Phys. Rev. Lett. 106, 198001 (2011)

Impact d'une goutte sans contact

Laurent Duchemin¹ & Christophe Josserand²

¹ IRPHE, CNRS & Aix-Marseille Université, 49 rue Joliot-Curie, 13013 Marseille, France

² Institut Jean Le Rond d'Alembert, CNRS & UPMC (Univ. Paris 06), UMR 7190, Case 162, 4 place Jussieu, F-75005 Paris, France.

duchemin@irphe.univ-mrs.fr

Le but de cette étude est de quantifier l'influence de l'air environnant sur l'impact d'une goutte sur une surface lisse. Nous considérons une goutte incompressible et non visqueuse, de rayon R , de densité ρ_l , de tension de surface γ et de vitesse V . Le gaz est supposé incompressible, de densité ρ_g et de viscosité dynamique η . La gravité étant négligée, les seuls nombres sans dimensions du problème sont le nombre de Weber et le nombre de Stokes :

$$\text{We} = \frac{\rho_l R V^2}{\gamma} \quad \text{et} \quad \text{St} = \frac{\eta}{\rho_l V R},$$

qui quantifient respectivement le rapport des effets d'inertie et de tension de surface, de dissipation visqueuse et d'inertie. Par ailleurs, la géométrie est supposée rester à symétrie axiale. En résolvant la dynamique de la goutte, grâce à une méthode d'intégrales de frontières, couplée à l'équation de lubrification dans le coussin d'air séparant la goutte du solide, nous mettons en évidence différents régimes d'impact.

Lorsque $We \rightarrow \infty$, il apparaît une singularité de courbure en temps fini et la goutte rentre en contact avec le solide en un point dans le plan (r, z) , c'est-à-dire sur un cercle.

Lorsque le nombre de Weber et le nombre de Stokes ont des valeurs finies, il apparaît une nappe sur le pourtour de la zone d'impact, éjectée rapidement de manière quasi horizontale, et séparée du solide par un coussin d'air d'épaisseur h_0 . La dépendance de cette épaisseur en We et St est obtenue grâce aux simulations numériques : $h_0 \sim St^{0.9-1} \cdot We^{-0.33-0.4}$. En outre, une théorie basée sur l'équilibre des termes dominants dans les équations permet d'obtenir la dépendance suivante, en bon accord avec les résultats numériques : $h_0 \sim St^{10/9} We^{-1/3}$.

Il s'avère que si l'on cherche à quantifier cette épaisseur dans un cas d'impact réaliste, on trouve une valeur de l'ordre de quelques \AA , c'est-à-dire bien en-dessous du libre parcours moyen dans l'air, dans les conditions normales de température et pression (~ 60 nm). Il est donc raisonnable de considérer que la nappe liquide, peu après son apparition, touche le solide et qu'il est pertinent d'étudier l'expansion rapide d'une nappe liquide en contact avec le solide pour comprendre l'émergence de la corolle caractéristique de l'impact.

Références

1. L. Xu, W.W. Zhang, and S.R. Nagel. Drop splashing on a dry smooth surface. *Phys. Rev. Lett.*, 94 :184505, 2005.
2. S. Mandre, M. Mani, and M. P. Brenner. Precursors to splashing of liquid droplets on a solid surface. *Phys. Rev. Lett.*, 102 :134502, 2009.
3. P.D. Hicks and R. Purvis. Air cushioning and bubble entrapment in three-dimensional droplet impacts. *J. Fluid Mech.*, 649 :135–163, 2010.
4. F.T. Smith, L. Li, and G.X. Wu. Air cushioning with a lubrication/inviscid balance. *J. Fluid Mech.*, 482 :291–318, 2003.
5. M. Mani, S. Mandre, and M.P. Brenner. Events before droplet splashing on a solid surface. *J. Fluid Mech.*, 647 :163–185, 2010.
6. L. Duchemin and C. Josserand. Curvature singularity and film-skating during drop impact. *Physics of Fluids*, 23, 091701, 2011.

Formation d'agrégats macroscopiques pour des populations d'oscillateurs génétiques couplés

Bastien Fernandez¹ & Lev Tsimring²

¹ Centre de Physique Théorique, UMR 7332 CNRS - Aix-Marseille Université, Campus de Luminy, 13288 Marseille CEDEX 9

² BioCircuits Institute, University of California, San Diego, La Jolla, CA, 92093-0328
`fernandez@cpt.univ-mrs.fr`

Dans cet exposé, je présenterai un modèle de dynamique de populations inspiré d'une expérience récente de synchronisation de colonies d'oscillateurs génétiques. Le modèle est suffisamment simple pour que la dynamique globale puisse être exactement décrite pour toutes les valeurs des paramètres. En particulier, je montrerai l'existence d'une transition nette avec l'intensité des interactions, entre un régime où les populations peuvent rester arbitrairement dispersées dans l'espace et un régime d'agrégation sur des amas de taille extensive.

Mécanisme d'ionisation retardée en champ laser intense

F. Mauger¹, A. Kamor^{1,2}, C. Chandre¹, & T. Uzer²

¹ Centre de Physique Théorique, CNRS – Aix-Marseille Université, Campus de Luminy, case 907, 13288 Marseille cedex 09, France

² School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0430, USA
mauger@cpt.univ-mrs.fr

L'étude des interactions lasers intenses - matière a connu un véritable essor ces dernières années, depuis qu'il a été réalisé que cela donnait accès aux propriétés électroniques de la matière. En particulier, l'étude des mécanismes d'ionisation dans des atomes ou petites molécules s'est révélée particulièrement fructueuse tant sur le plan théorique qu'expérimental. Plus particulièrement, le mécanisme de la recollision, dans lequel un électron initialement ionisé par le laser est ramené dans la région du noyau lorsque le champ laser change de direction, a permis d'expliquer la génération d'harmoniques d'ordres élevés ou la double ionisation corrélée d'électrons.

La mécanique classique permet de saisir les éléments caractéristiques de l'ionisation multiple. Le succès de ce modèle réside dans sa capacité à reproduire le rôle prépondérant de la corrélation entre les électrons nécessaire à ces ionisations. L'analyse de la dynamique de ces modèles, lorsqu'ils sont soumis à des champs polarisés linéairement, nous ont permis d'expliquer le rôle joué par chacun des électrons lors de la double ionisation, en fonction de l'intensité du laser [1,2].

En polarisations linéaire, le mécanisme conventionnel de la recollision conduisant à une double ionisation corrélée implique un laps de temps très court entre le moment où l'électron pré-ionisé retourne dans la région du noyau et l'ionisation du second électron. Cependant, une inspection plus précise des fragments émis lors de ces doubles ionisations ont mis à jour une autre alternative, inattendue, où la seconde ionisation est notablement retardée. Une analyse fine de la dynamique de ces ionisations retardées nous a permis d'identifier le mécanisme qui régule [3] ce phénomène :

- identification de modèles réduits effectifs,
- analyse perturbative des modèles réduits (KAM),
- identification des résonances entre le mouvement libre de l'électron et le laser,
- analyse linéaire et non-linéaire des orbites résonantes,
- étude de l'importance de la dimension dans les modèles.

La présence d'orbites résonantes instables se traduit par la formation d'une région chaotique collante où un électron peut être piégé pour un certain temps avant d'ioniser, faisant des ionisations retardées une signature du chaos dans les interactions lasers intenses - matière. Comme autre signature de ce phénomène, nous prédisons des oscillations dans le ratio d'ionisations retardées par rapport aux doubles ionisations [3].

Références

1. F. Mauger, C. Chandre, and T. Uzer - Strong Field Double Ionization : The Phase Space Perspective - Physical Review Letters - 102, 173002 (2009)
2. F. Mauger, C. Chandre, and T. Uzer - From recollisions to the knee : A road map for double ionization in intense laser fields - Physical Review Letters - 104, 043005 (2010)
3. F. Mauger, A. Kamor, C. Chandre, and T. Uzer - Mechanism of delayed double ionization in a strong laser field - Physical Review Letters - To appear (2012)

Annular billiard dynamics in a strong laser field

A. Kamor^{1,2}, F. Mauger^{1,2}, C. Chandre², & T. Uzer¹

¹ School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0430, USA

² Centre de Physique Théorique, CNRS – Aix-Marseille Université, Campus de Luminy, case 907, 13288 Marseille cedex 09, France

akamor@gatech.edu

We analyze the dynamics of a valence electron of the buckminsterfullerene molecule (C_{60}) subjected to a circularly polarized laser field by modeling it with the motion of a classical particle in an annular billiard. We show that the phase space of the billiard model gives rise to three distinct trajectories : “Whispering gallery orbits”, which only hit the outer billiard wall, “daisy orbits” which hit both billiard walls (while rotating solely clockwise or counterclockwise for all time), and orbits which only visit the downfield part of the billiard, as measured relative to the laser term. These trajectories, in general, maintain their distinct features, even as intensity is increased from 10^{10} to 10^{14} $W \cdot cm^{-2}$. We attribute this robust separation of phase space to the existence of twistless tori.

To perform this analysis of an atomic system we use many tools from nonlinear dynamics applied to the Hamiltonian framework within which we work. These tools are Poincaré sections to observe the dynamics, a frequency analysis to identify non-KAM tori, i.e. twistless tori, and an identification of periodic orbits to better understand the dynamics.

Références

1. A. Kamor, F. Mauger, C. Chandre, and T. Uzer - Annular billiard dynamics in a circularly polarized strong laser field - Physical Review E - 85, 016204 (2012)

Observations et études numériques des instabilités micro-ondes dans les anneaux de stockage

E. Roussel¹, C. Evain¹, S. Bielawski¹, C. Szwej¹, J. Barros, A. Louergue², M.-A. Tordeux², R. Nagaoka², M. Labat², L. Manceron², J.-L. Brubach², P. Roy², M.-E. Couprie²

¹ PhLAM, Bat. P5, Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

² Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91 192 Gif-sur-Yvette, France

`eleonore.rousseau@phlam.univ-lille1.fr`

Dans les anneaux de stockage, comme l'ESRF, SOLEIL, etc., on fait circuler un paquet d'électrons relativistes sur une orbite fermée, dans le but de produire du rayonnement à diverses longueurs d'onde (du Téraherz aux X). Lorsque la densité électronique dépasse un seuil, ces sources présentent des instabilités spatio-temporelles, caractérisées par l'apparition de *patterns* (à l'échelle millimétrique) à l'intérieur du paquet d'électrons, et une évolution temporelle en général irrégulière. La signature de ces structures consiste en l'émission d'un rayonnement terahertz, cohérent, et particulièrement intense. Nous présentons ici un ensemble de résultats expérimentaux et numériques concernant cette instabilité dans l'anneau de stockage SOLEIL. Ces résultats expérimentaux sont comparés à ceux d'un modèle de type Vlasov-Fokker-Planck, dans lequel l'ingrédient-clé est l'interaction électromagnétique entre les électrons.

Microcavité non linéaire sous contrôle cohérent

Jérémy Oden, Stéphane Trebaol, & Nicolas Dubreuil

Laboratoire Charles Fabry, UMR 8501, 2 avenue Augustin Fresnel, 91127 PALAISEAU CEDEX
nicolas.dubreuil@institutoptique.fr

Les microcavités à cristal photonique sont maintenant largement utilisées afin de renforcer l'interaction entre une source de lumière incidente et le milieu qui compose le résonateur. Ceci a notamment permis d'exalter les non-linéarités et ouvert la voie à la réalisation de composants optiques à faible puissance de commande pour le traitement tout optique du signal.

Cependant, et à l'instar de l'excitation en régime cohérent de transitions atomiques ou moléculaires [1], l'efficacité de couplage d'une impulsion lumineuse dans une résonance de microcavité doit pouvoir être améliorée en contrôlant la relation temps-fréquence de l'impulsion. Récemment, Sandhu *et al.* [2] ont démontré théoriquement l'augmentation de l'énergie couplée dans une microcavité excitée par une impulsion dont la relation de phase compense la dispersion linéaire de la résonance. En incluant une non-linéarité de type Kerr optique dans la cavité, ils ont montré un abaissement du seuil de bistabilité optique.

Mais l'excitation cohérente d'un résonateur peut également servir à contrôler sa dynamique en régime non linéaire. En particulier, les variations d'indice induites par les non-linéarités modifient la fréquence de résonance de la cavité au cours de l'excitation. Ce désaccord dynamique entre la fréquence du signal d'excitation et celle de la résonance conduit inévitablement à un phénomène de battements et limite, en régime non linéaire, la quantité d'énergie couplée dans la cavité.

Nous étudions de telles dynamiques dans le cas de microcavités semi-conductrices dans lesquelles les non-linéarités prédominantes sont : l'effet Kerr, l'absorption à deux photons, la réfraction et l'absorption par les porteurs libres générés par l'absorption à deux photons. En utilisant un modèle des modes couplés [3] qui intègre ces effets non linéaires [4], nous avons étudié la dynamique d'une microcavité excitée par des impulsions dont la durée est légèrement supérieure à la durée de vie des photons dans la cavité. En régime non linéaire, la variation d'indice induite par les porteurs libres prédomine [5], et provoque un décalage au cours du temps de la fréquence de résonance qui peut être approché par une variation linéaire. L'application, sur l'impulsion d'entrée, d'un chirp linéaire adapté permet de contrôler l'évolution de l'énergie couplée dans la résonance. Nous montrons qu'à énergie incidente constante [6], l'utilisation d'un tel contrôle cohérent permet d'augmenter de 75% l'énergie stockée dans la cavité, en dépit de l'augmentation des pertes non linéaires.

Références

1. A. M. Weiner, "Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators", *Rev. Sci. Instrum.*, **71**(5) :1929, 2000.
2. S. Sandhu, M. Povinelli, and S. Fan, "Enhancing optical switching with coherent control", *Appl. Phys. Lett.*, **96** :231108, 2010.
3. H. A. Haus, *Waves and fields in optoelectronics* (Prentice-Hall, 1984).
4. P. Barclay, K. Srinivasan, and O. Painter, "Nonlinear response of silicon photonic crystal microresonators excited via an integrated waveguide and fiber taper", *Opt. Express*, **13**(3) :801, 2005.
5. A. Baron, N. Dubreuil, P. Delaye, R. Frey, and G. P. Agrawal, "Raman amplification of optical pulses in silicon nanowaveguides : Impact of spectral broadening of pump pulses.", *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.*, 11030, Vol **6**, 2011.
6. J. Oden, S. Trebaol, and N. Dubreuil, "Coherent excitation of a nonlinear cavity", *Opt. Express*, To be submitted.

Turbulence d'ondes en optique : propagation non linéaire de rayonnements partiellement cohérents dans les fibres monomodes

Stéphane Randoux ¹, Antonio Picozzi ² & Pierre Suret¹

¹ Laboratoire PHLAM - bât. P5- Université des Sciences et Technologies de Lille - 59655 Villeneuve d'Ascq

² Institut Carnot de Bourgogne, UMR-CNRS 5209, Université de Bourgogne, Dijon, France

stephane.randoux@univ-lille1.fr

La propagation d'une onde incohérente en milieu dispersif et non linéaire est un sujet d'études recouvrant des domaines très différents comme l'hydrodynamique et l'optique[1]. Ce type de propagation a été étudié initialement dans les années 70 dans le contexte de la turbulence d'ondes ; Zakharov a ainsi développé une théorie cinétique des ondes rendant compte des spectres d'équilibre observables quand les effets non linéaires sont perturbatifs [2]. Cette théorie prévoit entre autres une évolution vers un équilibre au sens thermodynamique quand le système d'ondes est non-intégrable ; ce comportement est actuellement étudié en optique dans des systèmes faiblement non linéaires [1,3].

De nombreux systèmes d'ondes sont décrits par l'équation de Schrodinger non linéaire unidimensionnelle :

$$\frac{\partial \psi(z, t)}{\partial z} = -i \psi \frac{\partial^2 \psi(z, t)}{\partial t^2} + i |\psi(z, t)|^2 \psi(z, t). \quad (1)$$

Cette équation est intégrable et la théorie cinétique des ondes prédit dans ce cas que le spectre de l'onde incohérente ne devrait pas évoluer au cours de la propagation [4]. Néanmoins, ce résultat n'est ni confirmé par les simulations numériques de l'équation (1) ni validé par des expériences d'optique [5].

Dans ce travail, nous revoyons certaines hypothèses habituellement utilisées dans la dérivation de la théorie cinétique des ondes. Nous montrons que celle-ci permet de décrire certaines évolutions spectrales dans les systèmes d'ondes décrits par l'Eq. (1), et ceci en dépit de leur caractère intégrable [6]. Pour cela, nous reconsidérons l'hypothèse usuelle selon laquelle le moment d'ordre quatre de l'onde est supposé stationnaire (i.e. indépendant de z). Pour des ondes incohérentes ayant des spectres de forme initiale gaussienne, nous dérivons une équation cinétique pour le moment d'ordre deux du champ (i.e. son spectre moyen). Contrairement au traitement usuel, le terme de collision n'est pas nul mais oscille de manière amortie. Ceci entraîne une croissance brutale des ailes du spectre de l'onde incohérente ainsi que leurs oscillations amorties avant l'arrivée du régime stationnaire. Les résultats théoriques obtenus sont confrontés à des expériences de propagation de rayonnements partiellement cohérents dans des fibres optiques monomodes.

Références

1. Antonio Picozzi "Nonequibrated Oscillations of Coherence in Coupled Nonlinear Wave Systems" Phys. Rev. Lett. **96**, 013905 (2006)
2. V.E. Zakharov and V.S. L'Vovo "Kolmogorov Spectra of Turbulence I" (Springer-Verlag, 1992).
3. Stéphane Pitois, Silvere Lagrange, Hans R. Jauslin, and Antonio Picozzi "Velocity Locking of Incoherent Nonlinear Wave Packets" Phys. Rev. Lett. **97**, 033902 (2006)
4. V. E. Zakharov "Turbulence in Integrable Systems," Studies in Applied Mathematics **122**, 219–234 (2009).
5. B. Barviau, S.Randoux and P. Suret "Spectral broadening of a multimode continuous-wave optical field propagating in the normal dispersion regime of a fiber " Opt. Lett. **31**, 1696 (2006)
6. Pierre Suret, Antonio Picozzi, and Stéphane Randoux Wave turbulence in integrable systems : nonlinear propagation of incoherent optical waves in single-mode fibers Opt. Express. **19**, 17852 (2011)

Turbulence d'ondes gravito-élastiques

Luc Deike & Eric Falcon

Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, MSC, UMR 7057 CNRS, F-75 013 Paris, France, EU
luc.deike@univ-paris-diderot.fr ; eric.falcon@univ-paris-diderot.fr

La turbulence d'ondes étudie les propriétés statistiques et dynamiques d'un ensemble d'ondes en interaction non linéaire. Son domaine d'application est très large : ondes internes ou de surface en océanographie, ondes dans les plasmas en astrophysique, ondes de spins dans les solides, ondes non linéaires en optique [1]. Nous nous intéressons ici à son application dans un nouveau système : les ondes gravito-élastiques.

Lorsqu'une couche élastique mince flotte à la surface d'un fluide, les déformations élastiques de la membrane sont couplées au mouvement du fluide et des ondes gravito-élastiques peuvent se propager. Ces ondes ont été observées en océanographie à la surface de l'océan en présence d'une couche de glace ou d'un lac gelé et ont été étudiées théoriquement dans la problématique des déplacements de véhicules sur la glace [2]. Cependant, à notre connaissance aucune expérience contrôlée de laboratoire permettant d'étudier des ondes en interactions dans ce système n'a été réalisée. Nous présentons un tel dispositif et l'étude d'ondes linéaires et non linéaires à la surface d'une membrane élastique recouvrant de l'eau. La relation de dispersion de ces ondes est obtenue à l'aide d'une mesure du champ de déformation spatio-temporelles de la surface et nous mettons ainsi en évidence l'importance de la tension (due à la fixation) et de la flexion de la membrane, en accord avec des travaux théoriques [3].

Les régimes de turbulence d'ondes de ce système sont ensuite étudiés et caractérisés vis à vis du régime théorique d'interactions à trois ondes [4]. La tension de la membrane est un paramètre expérimental contrôlée et nous pouvons ainsi faire varier la relation de dispersion et observer son influence sur les spectres de turbulence d'ondes.

Références

1. S. Nazarenko *Wave Turbulence*, (Lecture Notes in Physics Vol. 825, Springer, Berlin, 2010) ; V. E. Zakharov, G. Falkovich & V. S. L'Ōvov, *Kolmogorov Spectra of Turbulence I : Wave Turbulence* (Springer, Berlin, 1992).
2. V. A. Squire, R. J. Hosking, A.D. Kerr & P. J. Langhorne, *Moving Loads on Ice Plates*, (Kluwer Acad Pub., 1996).
3. R. M. S. M. Schulkes, R. J. Hosking & A. D. Sneyd, *J. Fluid Mech.* 180, 297 (1987).
4. A. V. Marchenko & V. I. Shrira, Translated from *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 4, 125, (1991) ; I. V. Lavrenov & V. G. Polnikov, *Fluid dynamics* 38, 310 (2003).

Analyse en ondelettes de la dynamique lente en turbulence d'onde

Benjamin Miquel¹ & Nicolas Mordant²

¹ Laboratoire de Physique Statistique, ENS, UPMC, CNRS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

² Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, CNRS/UJF/G-INP, BP53, 38041 Grenoble
`benjamin.miquel@lps.ens.fr`

Un ensemble d'ondes interagissant de façon faiblement non-linéaire présente une phénoménologie similaire à celle de la turbulence hydrodynamique : lorsqu'un tel système est forcé aux grandes longueurs d'ondes, l'énergie est transférée vers les petites longueurs d'ondes où elle est dissipée. La théorie de la turbulence d'onde [1] constitue un cadre théorique à l'étude de tels systèmes, dans lequel une double séparation d'échelle est postulée : le temps caractéristique associé aux échanges d'énergie entre modes T_{NL} est supposé grand devant la période des ondes (hypothèse de faible non-linéarité), mais petit par rapport au temps dissipatif (hypothèse de fenêtre de transparence). Ces hypothèses conduisent de façon analytique au spectre de Kolmogorov-Zakharov. Dans le cas spécifique des ondes de flexions dans les plaques élastiques minces, le spectre de KZ a été prédite par Düring [2], mais demeure insaisissable dans les expériences [3,4].

L'hypothèse de faible dissipation a été vérifiée dans un travail précédent [5]. Nous présentons une analyse en paquets d'onde du mouvement de la plaque destinée à mesurer le temps de cohérence d'un train d'onde en fonction de sa longueur d'onde λ . Nous montrons ainsi que l'hypothèse de faible non-linéarité est vérifiée dans notre système.

Les désaccords entre observations expérimentales et prédictions théoriques sont imputés aux effets de taille finie. Une transition entre une turbulence d'onde continue et une turbulence discrète se produit lorsque le temps non-linéaire T_{NL} est du même ordre de grandeur que l'écart de fréquence entre deux modes voisins. La raréfaction des résonances "gèle" la cascade de Kolmogorov-Zakharov avant que le régime dissipatif ne soit atteint.

Références

1. V.E. Zakharov, V.S. L'vov, and G. Falkovich, *Kolmogorov Spectra of Turbulence I* (Springer, Berlin, 1992)
2. G. Düring, C. Josserand, S. Rica, *Weak turbulence for a vibrating plate : can one hear a Kolmogorov spectrum ?*, Phys. Rev. Lett. **97**, 025503 (2007)
3. N. Mordant, *Fourier analysis of wave turbulence in a thin elastic plate*, Eur. Phys. J. B **76**, 537-545 (2010)
4. A. Boudaoud, O. Cadot, B. Odille, and C. Touzé, *Observation of wave turbulence in vibrating plates*, Phys. Rev. Lett. **100**, 234504 (2008)
5. B. Miquel and N. Mordant, *Non stationary wave turbulence in an elastic plate*, Phys. Rev. Lett. **107**, 034501 (2011)
6. B. Miquel, N. Mordant, *Nonlinear dynamics of flexural wave turbulence*, Phys. Rev. E **84**, 066607 (2011)

Sur la turbulence en configuration quasi bidimensionnelle

Pablo Gutiérrez & Sébastien Aumaitre

CEA/IRAMIS/ SPEC, SPHYNX, 91191 Gif-sur-Yvette, France

pablo.gutierrez-matus@cea.fr

Dans une réalisation expérimentale quasi bidimensionnelle d'un écoulement turbulent, par exemple quand l'épaisseur de fluide est faible, on pourrait s'attendre à vérifier les prédictions de la théorie de turbulence bidimensionnelle. C'est le cas de certains écoulements turbulents engendrés dans une couche de fluide conducteur à l'aide d'un forçage électromagnétique $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$, où \mathbf{J} est une densité de courant électrique et \mathbf{B} est un champ magnétique. C'est d'ailleurs ce qui a été observé dans des expériences menées à Grenoble dans les années 80 [1] et à Paris dans les années 90 [2].

Dans le but d'aller au-delà et d'étudier l'apparition d'effets tridimensionnels, nous avons réalisé une expérience similaire dans un métal liquide d'un cm d'épaisseur (la cuve faisant $40 \times 50 \text{ cm}^2$) et en surface libre. Le forçage y est imposé par une densité de courant \mathbf{J} appliquée entre les deux électrodes variant entre 0 et $15 A/cm^2$ et un champ magnétique \mathbf{B} engendré par un réseau d'aimants permanents dont on contrôle la géométrie.

Nous présenterons quelques uns de nos résultats expérimentaux. Il se trouve qu'ils diffèrent des observations expérimentales précédemment citées, et des prédictions théoriques sur la turbulence bidimensionnelle. On discutera donc les particularités de notre dispositif expérimental et les liens éventuelles avec d'autres cadres théoriques.

Références

1. Sommeria, J. : Experimental study of the two-dimensional inverse energy cascade in a square box. *J. Fluid Mech.* **170** : 139–168, 1986.
2. Paret, J. and Tabeling, P. : Experimental Observation of the Two-Dimensional Inverse Energy Cascade. *Phys. Rev. Lett.* **79** : 4162–4165, 1997.

Scalings of field correlations and heat transport in turbulent convection

Pankaj Kumar Mishra,^{1,2} Mahendra K. Verma,² Ambrish Pandey² & Supriyo Paul²

¹ Laboratoire de Physique Statistique, ENS, Paris

² Indian Institute of Technology, Kanpur, India

pankajmishr@gmail.com

Using direct numerical simulations of Rayleigh-Bénard convection (RBC) under free-slip boundary condition, we show that the normalized correlation function between the vertical velocity field and the temperature field, as well as the normalized viscous dissipation rate, scales as $Ra^{-0.22}$ for moderately large Rayleigh number Ra . This scaling accounts for the Nusselt number (Nu) exponent to be around 0.3 observed in experiments. Numerical simulations also reveal that the above normalized correlation functions are constants for the convection simulation under periodic boundary conditions.

Références

1. P. K. Mishra and M. K. Verma, ‘Energy Spectra and fluxes for Rayleigh-Bénard convection’, Phys. Rev. E **81**, 056316 (2010).
2. M. K. Verma, P. K. Mishra, A. Pandey and S. Paul, ‘Scalings of field-correlations and heat transport in turbulent convection’, accepted in Phys. Rev. E (Dec. 2011).

Loi d'échelle pour la transition sous-critique de l'écoulement de Poiseuille plan

Grégoire Lemoult, Jean-Luc Aider, & Jose Eduardo Wesfreid

PMMH, École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris, France
gregoire.lemoult@espci.fr

Depuis plus d'un siècle, l'étude de la transition vers la turbulence dans des écoulements cisailés a été un domaine prolifique d'étude [1]. Malgré de nombreux travaux théoriques, il n'a pas encore été possible de prévoir correctement ce processus, y compris pour des géométries aussi simple que l'écoulement de Poiseuille plan ou cylindrique ou l'écoulement de Couette. Dans le cas de l'écoulement de Poiseuille plan, la théorie de la stabilité linéaires prédit un nombre de Reynolds critique $Re_c = 5772$, où $Re = u_c h / \nu$ avec u_c la vitesse au centre du canal, h la demi hauteur et ν la viscosité cinématique du fluide. Expérimentalement, on observe que la transition se produit pour des Re sensiblement plus faibles, $1000 < Re < 2000$. A ces nombres de Reynolds, on observe qu'il y a cohabitation de zones laminaires et de zones turbulentes appelés "puffs" [2]. La transition vers la turbulence dans ces écoulements reste l'un des problèmes fondamentaux encore non résolu en mécanique des fluides.

Nous présentons ici une étude expérimentale de la transition vers la turbulence dans un écoulement de Poiseuille plan soumis à des perturbations d'amplitudes finies. Le canal dans lequel nous avons réalisé les expériences est long de 3 mètres et a une section de 20x150 mm. La conception de l'entrée du canal allié aux connections précises entre les éléments de celui-ci nous permettent de conserver des écoulement laminaires jusqu'à $Re = 5500$ minimum. Nous pouvons donc étudier précisément l'impact d'une perturbation sous forme de jets continus au travers de trous percés dans la paroi supérieure. le rapport des vitesses des jets et de u_c , noté A , varie entre 0 et 1. Dans ces régimes, chaque jet va induire une paire de vortex longitudinaux contra-rotatifs, qui vont générer par effet "lift-up" des stries de vitesse lente et rapide. Ces structures cohérentes sont proches de celles observées dans la transition naturelle [3]. Nous avons étudié l'effet de cette perturbation sur l'écoulement en utilisant à la fois de la visualisation par fluorescence induite par LASER (LIF) et de la vélocimétrie par image de particules (PIV).

En utilisant la déformation du profil moyen de vitesse pour définir l'état du système, nous avons pu construire un diagramme de phase pour différents Re et A . Nous avons déterminé pour chaque valeur de Re l'amplitude minimale d'une perturbation A_c qui déclenche la transition vers la turbulence. Nous avons montré que, pour des nombres de Reynolds suffisamment grands, A_c tend asymptotiquement vers une loi de puissance :

$$A_c = O(Re^{-1})$$

Ce résultat est en bonne adéquation avec la prédiction théorique de F. Waleffe et J. Wang [4]. Au travers d'une réduction 3D non-linéaire des équations de Navier-Stokes, ils ont adoptés l'idée d'un processus d'auto entretien de la turbulence et ont montré que l'amplitude minimale d'une perturbation permettant de déclencher la turbulence tendait asymptotiquement vers une loi de puissance en -1.

Références

1. T. MULLIN, Experimental Studies of Transition to Turbulence in a Pipe, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **43**, 1-24 (2011).
2. D.R. CARLSON, S.E. WIDNALL. AND M.F. PEETERS, A flow-visualization study of transition in plane Poiseuille flow, *Journal of Fluid Mechanics*, **121**, 487-505 (1982).
3. H. FAISST AND B. ECKHARDT, Traveling waves in pipe flow, *Physical Review Letters*, **91** (22), 224502 (1975).
4. F. WALEFFE AND J. WANG, Transition threshold and the self-sustaining process, *IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition and Finite Amplitude Solutions*, 85-106 (2005).

Analyse de séries temporelles de production éolienne : loi de Taylor et propriétés multifractales

Calif¹ & Schmitt²

¹ EA, LARGE laboratoire en Géosciences et énergétique, Université des Antilles et de la Guyane 97170 P-à-P, France

² CNRS, UMR 8187 LOG Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Université de Lille 1, 28 avenue Foch, 62930 Wimereux, France

rcalif@univ-ag.fr

Depuis quelques décennies, l'énergie éolienne connaît une croissance considérable. Cependant cette énergie est dépendante de la vitesse du vent variant en intensité sur des échelles de temps qui incluent l'année, la journée à quelques secondes. Il est donc fondamental de bien parvenir à comprendre et décrire le caractère non-linéaire et stochastique de ces fluctuations dans la production électrique issue des éoliennes. L'objectif de ce travail est de caractériser les fluctuations d'une série temporelle de production éolienne. Dans un premier temps, nous vérifions l'utilisation de la loi de Taylor, relation entre l'écart-type σ_P et la moyenne $\bar{P} : \sigma_P = \bar{P}^\alpha$. Cette relation fut observée en écologie, en finance, dans les sciences du vivant et pour des données de trafic internet [1]. De récents travaux fournissent des hypothèses d'explication quant à l'origine de cette loi [2,3]. L'exposant α caractérise le type de dynamique du processus considéré et varie entre 1/2 et 1. Dans notre cas d'étude, l'estimation de l'exposant α est proche de 1. Quand $\alpha = 1$, les processus considérés sont à invariance d'échelle [1]. Pour mettre en évidence les propriétés d'invariance d'échelle de notre série temporelle, nous effectuons une analyse multifractale pour estimer la fonction exposant d'échelle l'aide des moments d'ordre q de l'incrément temporel des données de production éolienne $\Delta P = P(t + \tau) - P(t)$, telle que $\langle (\Delta P_\tau)^q \rangle \simeq \tau^{\zeta(q)}$ [4]. La fonction $\zeta(q)$ est concave et non-linéaire : plus elle est concave, plus la série analysée sera intermittente. Nous montrons que la série temporelle de la production éolienne considérée est intermittente et possède des propriétés multifractales. De plus le modèle de cascades aléatoires log-normal se révèle pertinent pour décrire ces fluctuations.

Références

1. Zoltan Eisler, Imre Bartos, Janos Kertesz, Fluctuation scaling in complex systems : Taylor's law and beyond, *Advances in Physics*, Vol 57, 1, pp.89-142, 2008
2. Agata Fronczak and Piotr Fronczak Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in complex systems, *Physical Review E*, Vol. 81, 1, 2010
3. Wayne S. Kendal and Bent Jørgensen Taylor's power law and fluctuation scaling explained by a central-limit-like convergence, *Physical Review E*, Vol. 83, 6, 2011
4. Schertzer, D., Lovejoy, S., Schmitt, Chigirinskaya, Y. and Marsan, D., Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency, *Fractals* 5 (3) ,pp 427-471, 1997

Analyse d'écoulement à partir de champs d'observables pris à des temps arbitraires

Florimond Guéniat^{1,2}, Lionel Mathelin¹, & Luc Pastur^{1,2}

¹ LIMSI-CNRS, 91403 Orsay, FRANCE

² Université Paris-Sud, FRANCE

florimond.gueniat@limsi.fr

De nombreux outils existent pour la décomposition et l'analyse d'écoulements turbulents, comme la *Proper Orthogonal Decomposition* (POD) ou la *Dynamics Mode Decomposition* (DMD) introduit plus récemment [3]. L'algorithme standard de cette dernière méthode utilise un ensemble de vecteurs observables, mesurés à intervalles de temps réguliers, introduisant *de facto* une fréquence d'échantillonnage. Le pas de temps Δt ne doit pas être choisi au hasard : il doit être suffisamment petit pour résoudre les petites échelles temporelles de la dynamique. De l'ensemble ordonné de ces vecteurs résulte une matrice de Krylov dont sont extraits, par la DMD, les modes physiquement pertinents.

Néanmoins, lors du processus d'acquisition, ce type de contrainte peut poser des difficultés. A titre d'exemple, considérons la situation classique, en mécanique des fluides, où l'observable est un champ à deux composantes, de dimension deux (2D2C), mesuré par *Particle Imagery Velocimetry* (PIV). En PIV, les tailles standards sont des champs de 1000×1000 pixels. Supposons que la fréquence pertinente la plus élevée soit à 200 Hz (situation très optimiste en écoulement turbulent), le critère de Shannon-Nyquist impose alors une fréquence d'échantillonnage supérieure à 400 Hz. Avec des images de 12-bit, la bande passante ainsi nécessaire est supérieure à 1 Gb/s.

De plus, si le spectre de Fourier de la dynamique est à large bande, la durée de l'acquisition de données doit être importante. La combinaison d'une haute fréquence d'échantillonnage et d'une longue durée d'acquisition conduit à des contraintes sévères, tant pour le matériel de mesure que pour les ressources de traitements de données et de stockage.

De surcroît, certaines mesures de l'observable peuvent être corrompues, par des causes internes ou externes à l'expérience, par exemple au niveau du matériel, ou par la non-convergence d'un algorithme de pré-traitement. Les faux vecteurs en PIV sont une illustration de ce problème. S'il est souvent possible de remplacer les données manquantes ou corrompues, par diverses techniques telle la gappy-POD, de l'information non physique risque d'être introduite, en particulier dans le contenu spectral.

Dans ce papier, nous présentons une nouvelle technique pour extraire une décomposition approchant les modes DMD, sans que les contraintes précédentes n'influent sur la robustesse de l'algorithme. Nous illustrerons cette méthode sur un champ de données provenant de PIV.

Références

1. J. Basley and *al.* : Experimental investigation of global structures in an incompressible cavity flow using time-resolved PIV, *Experiment in Fluids*, **50** :905-918
2. K. Chen, J.H. Tu & C.W. Rowley, Variants of dynamic mode decomposition : connections between Koopman and Fourier analyses, *Journal of Nonlinear Science*, submitted, 2011.
3. P.J. Schmid, Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data, *J. Fluid Mech.*, **656**, p. 5–28, 2010.

Effets de la rotation sur la convection naturelle entre deux cylindres coaxiaux soumis à un gradient radial de température

Clément Savaro, Arnaud Prigent, & Innocent Mutabazi¹

LOMC, UMR 6294, CNRS-Université du Havre
clement.savaro@etu.univ-lehavre.fr

Nous nous intéressons dans cette étude à l'effet de la rotation du cylindre intérieur sur la convection naturelle entre deux cylindres coaxiaux soumis à un gradient radial de température. Les cylindres de rayons $a = 2$ cm et $b = 2,5$ cm et de hauteur $H = 55,4$ cm sont placés verticalement. Une circulation d'eau provenant de bains thermostatés permet de contrôler la température aux parois des cylindres et de créer ainsi le gradient radial de température. Le système est caractérisé par le rapport des rayons $\eta = 0,8$ et le rapport d'aspect $\Gamma = 114$. Ses paramètres de contrôle sont le nombre de Grashof Gr relié au gradient radial de température et le nombre de Taylor Ta , relié à la vitesse de rotation du cylindre intérieur. L'écoulement est visualisé à l'aide de kalliroscope et des mesures du champ de vitesse et température sont réalisés à l'aide de cristaux liquides thermochromiques encapsulés [1].

Dès qu'un gradient de température est créé entre les cylindres, il se forme une grande cellule convective verticale. À partir d'un nombre de Grashoff critique $Gr_c = 8000$ et sans rotation, la cellule convective est sujette à une instabilité prenant la forme de rouleaux axisymétriques se propageant respectivement vers le haut (le bas) quand le cylindre intérieur (extérieur) est le plus chaud [2,3,4,5]. Dans cette étude, le nombre de Grashoff est fixé à une valeur supérieure à la valeur critique et le cylindre intérieur est progressivement mis en rotation. Nous étudions alors les propriétés spatiotemporelles de l'écoulement et regardons comment l'ajout de la rotation les modifie. Une faible rotation a un faible effet perturbatif sur les rouleaux axisymétriques, diminuant seulement leur intensité. À partir d'un nombre de Taylor $Ta = 17$ les ondes modulées, aussi observées à des nombres de Grashoff moins élevés [6], apparaissent et coexistent avec les rouleaux axisymétriques. Nous avons aussi observé la présence d'un nouveau motif ayant la forme d'un unique rouleau incliné. Ce rouleau se développe sur plus de la moitié de la hauteur totale depuis l'extrémité haute ou basse du système, selon le sens du gradient de température. Pour certains paramètres il se propage autour du cylindre intérieur sans changement, faisant penser à une onde solitaire. Mais dans la plupart des cas il interagit avec les ondes modulées ce qui provoque sa déformation voir sa disparition avant qu'il ne se reforme.

Références

1. , R. GUILLERM, Étude expérimentale des instabilités thermo-hydrodynamiques dans un système de Couette-Taylor, *Thèse* (2010)
2. , G.K.BATCHELOR, An Introduction to Fluid Mechanics, *Cambridge University Press*, (1967)
3. , J.W. ELDER, Laminar free convection in a vertical slot, *J. Fluid. Mech*, **23**, 77-98 (1965)
4. , I. G. CHOI AND S. A. KORPELA, Stability of a conduction regime of natural convection in a tall vertical annulus, *J. Fluid. Mech*, **99**, 725-738 (1980)
5. , V. LEPILLER, A. PRIGENT, F. DUMOUCHEL AND I. MUTABAZI, Transition to turbulence in a tall annulus submitted to a radial temperature gradient, *Physics of Fluids*, **19** (5), 054101 (2007)
6. , R. GUILLERM, A. PRIGENT, I. MUTABAZI Ondes modulées dans le système de Couette-Taylor soumis à un fort gradient radial de température 13ème Rencontre du Non-Linéaire Ihp-Paris 2010, Paris Onze Edition,

Simulation numérique de la convection naturelle dans une canal différentiellement chauffé

Zhenlan GAO^{1,2} Bérengère PODVIN¹ Anne SERGENT^{1,2} Shihe XIN³ Patrick LE QUÉRÉ¹ Laurette S. Tuckerman⁴

¹ LIMSI-CNRS, Campus d'Orsay, 91403 Orsay Cedex

² Université Pierre Marie Curie, 75005 Paris

³ CETHIL, 9 Rue de la Physique INSA de LYON 69621 Villeurbanne Cedex. Lyon

⁴ PMMH (ESPCI-CNRS-UPMC-UPD), 75005 Paris

`gao@limsi.fr, podvin@limsi.fr`

Nous étudions les instabilités de convection naturelle d'une lame d'air ($Pr=0.71$) bi-périodique confinée entre deux plaques verticales. Nous nous appuyons sur des simulations numériques directes 3D au voisinage du nombre de Rayleigh critique. Deux cas sont considérés. Dans le premier cas, la température sur chaque paroi est constante : cas isotherme. Dans le deuxième cas, une stratification constante est imposée aux parois, c'est-à-dire que la température augmente linéairement avec la hauteur. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus par simulation 2D et l'analyse asymptotique dans le cas isotherme.

Les simulations 3D sont effectuées dans un domaine de rapport de forme 1 : 1 : 10 suivant les directions x et z . Les motifs correspondants aux étapes de la transition vers le régime chaotique sont présentés. Dans le cas isotherme, on observe une bifurcation supercritique vers des rouleaux 2D stationnaires puis une deuxième bifurcation vers des motifs 3D stationnaires. Ensuite ces motifs 3D deviennent instationnaires puis, par dédoublement de période l'écoulement devient chaotique. Dans le cas stratifié, on observe une bifurcation de Hopf supercritique vers des ondes progressives 2D périodiques, suivie d'une deuxième bifurcation apparemment supercritique vers des ondes 2D cnoidales qui se déstabilisent dans la direction transverse avant d'atteindre le régime chaotique.

Références

1. ELDER, J.W. 1965 Laminar free convection in a vertical slot *J. Fluid Mech.* **23** 77-98
2. BERGHOLZ, R.F. 1978 Instability of steady natural convection in a vertical fluid layer *J. Fluid Mech.* **84** 743-768
3. NAGATA, M. BUSSE, F.H. 1983 Three-dimensional tertiary motions in a plane shear layer *J. Fluid Mech.* **135** 1-26
4. XIN, S. 1993 Simulation numérique de convection naturelle turbulente *PhD thesis, Université Paris VI*
5. COSSU, C. 2009 Introduction to hydrodynamic instabilities *Polycopié à École Polytechnique*
6. TUCKERMAN, L. BARKLEY, D. 1990 Bifurcation analysis of the eckhaus instability *Physica D* **46** 57-86

Ondes de Faraday dans un fluide vibré en rotation

Lyes Kahouadji¹, Damir Juric¹, Jalel Chergui¹, Seungwon Shin² & Laurette S. Tuckerman³

¹ LIMSI-CNRS, BP 133, rue John von Neumann - 91403 Orsay Cedex, France

² Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

³ PMMH-CNRS-ESPCI, 10 rue Vauquelin - 75231 Paris Cedex 5, France

lyes@limsi.fr

Lorsque un récipient, contenant une matière fluide, est en rotation autour de son axe verticale, la surface libre du fluide prend une forme parabolique. De plus, si ce récipient est soumis verticalement à des vibrations périodiques, des ondes stationnaires de type Faraday peuvent être produites sur la surface libre dont la forme constitue des motifs tout à fait intéressants. Une étude préliminaire [1] a été menée au laboratoire MSC, utilisant 200 ml d'huile de silicone. Pour une fréquence de vibration de 60 Hz, deux situations ont été observées :

1. Lorsque la fréquence de rotation est inférieure à 1.1 Hz, un réseau d'ondes de Faraday de forme carré est obtenue quand l'amplitude de l'accélération est au-dessus du seuil $\gamma_m/g \sim 2.5$.
2. Lorsque la fréquence dépasse 1.1 Hz, un motif curieux apparaît : une étoile entourée par cinq pétales, chacune constituée d'un réseau d'onde.

Nous étudions numériquement cette configuration en utilisant un code parallèle permettant la résolution des équations tridimensionnelles de Navier-Stokes dans un domaine contenant deux phases fluides incompressibles.

Ce code a été développé suite à une étude précédente [2] sur les ondes de Faraday classiques sans rotation et étendu à l'étude d'écoulements diphasiques de fluides incompressibles en général.

Notre but est de reproduire numériquement l'observation expérimentale de la transition entre un motif de réseau carré et le motif d'une étoile entourée par ses pétales. Une étude théorique précédente [3] a calculé le seuil des ondes de Faraday sur une surface *plane* (correspondant à une force centrifuge négligeable). Nous déterminerons les limites de validité de cette théorie en comparant ses prédictions avec des simulations numériques de l'instabilité de Faraday dans un système en faible rotation.

Références

1. C. Fontaine. Instabilité de Faraday en rotation. *Rapport de Stage. MSC, Univ. Paris VII Diderot*. 2010.
2. N. Perinet, D. Juric & L. S. Tuckerman. Numerical simulation of Faraday waves. *J. Fluid Mech.*, **635** : 1–26, 2009.
3. G. C. Mondal & K. Kumar. The effect of the Coriolis force on Faraday waves. *Proc. R. Soc. Lond. A*, **460** : 897–908, 2004.

Topologie et observabilité d'un modèle chaotique de cancer

Christophe Letellier¹, Fabrice Denis² & Luis A. Aguirre³

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

² Centre Jean Bernard, Le Mans, France

³ Univerisdade Federal de Minas Gerais (UFMG), Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brazil

Christophe.Letellier@coria.fr

Un modèle relativement simple de croissance de tumeurs mettant en interaction — sur un unique site tumoral — des cellules hôtes, des cellules immunitaires effectrices et des cellules tumorales [1] est ici étudié. Ce modèle dont la structure algébrique est fréquemment rencontrée sur d'autres modèles de cancer, repose sur la compétition et les interactions entre ces différentes populations de cellules. Il peut expliquer plusieurs aspects importants de la dynamique de croissance d'un cancer en fonction de celle des autres cellules du corps telles que les cellules du système immunitaire et les cellules du tissu environnant.

Par une analyse topologique, il est montré que la dynamique de ce modèle peut produire un attracteur chaotique topologiquement équivalent à l'attracteur « spiral » solution du système de Rössler [2]. Le diagramme de bifurcations en fonction du taux de croissance des cellules hôtes révèle d'une part, qu'il existe une plage de valeurs favorisant le développement des cellules tumorales, développement qui est alors associé à de larges fluctuations des trois populations — tout se passe comme si le développement des cellules tumorales déstabilisait l'écosystème — et, d'autre part, que de forts taux de croissance étaient favorables à la réduction de la population de cellules tumorales. Par ailleurs, modifier le taux de prédation des cellules tumorales par les cellules immunitaires n'affecte pas la dynamique du modèle : ce paramètre est donc d'un intérêt thérapeutique très limité, (ce que confirment de nombreux essais thérapeutiques négatifs d'immunothérapie anti-cancéreuse [3,4]).

Enfin, une analyse de l'observabilité révèle que la meilleure observable pour l'étude de ce modèle de cancer est la population de cellules hôtes et non, comme cela est largement pratiqué, la population de cellules tumorales. Puisque l'observabilité est liée de manière très ténue à la « contrôlabilité » [5], ceci indique également qu'il pourrait être intéressant de « contrôler » les cancers par des actions sur les populations de cellules hôtes plutôt qu'uniquement sur les populations de cellules tumorales, comme cela est observé en radiothérapie [6] et lors de ciblage thérapeutiques *in vivo* des tissus sains péri-tumoraux [7,8].

Références

1. M. ITIK & S. P. BANKS, *International Journal Bifurcation & Chaos*, **20** (1), 71-79 (2010)
2. C. LETELLIER, P. DUTERTRE & B. MAHEU, *Chaos*, **5** (1), 271-282 (1995)
3. A. CHOUDHURY, S. MOSOLITS, P. KOKHAEI, L. HANSSON, M. PALMA & H. MELLSTEDT, *Advances in Cancer Research*, **95**, 147-202 (2006)
4. M. CHI & A. Z. DUDEK, *Melanoma Research*, **21** (3), 165-174 (2011)
5. C. LETELLIER & L. A. AGUIRRE, *Physical Review E*, **82**, 016204 (2010)
6. M. GARCIA-BARROS, F. PARIS, C. CORDON-CARDO, D. LYDEN, S. RAFII, A. HAIMOVITZ-FRIEDMAN, Z. FUKS & R. KOLESNICK, *Science*, **300**, 1155-1159 (2003)
7. I. MALANCHI, A. SANTAMARIA-MARTÍNEZ, E. SUSANTO, H. PENG, H.-A. LEHR, J.-F. DELALOYE & J. HUELSKEN, *Nature*, (2011) available on line.
8. K. J. PNG, N. HALBERG, M. YOSHIDA & S. F. TAVAZOIE, *Nature*, (2011) available on line.

Dynamique cardio-respiratoire de nourrissons à risque

Émeline Fresnel¹, Emad Yacoub¹, Ubiratan Freitas², Valérie Messenger¹, Eric Mallet³
& Christophe Letellier¹

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

² ADIR Association, Hôpital de Bois-Guillaume, 76031 Rouen cedex, France

³ Département de Pédiatrie Médicale, CHU Charles Nicolle, 76031 Rouen, France

emeline.fresnel@gmail.com

L'analyse traditionnelle de la variabilité cardiaque consiste en une approche statistique des électrocardiogrammes ou tachogrammes, à travers des indicateurs tels que la moyenne, la déviation standard ou encore le paramètre $P_{\Delta 50}$ quantifiant la variabilité de haute fréquence. Malgré leur faible temps de calcul, ces quantités ne constituent pas des standards largement acceptés par les cardiologues, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'elles ne prennent pas en compte la façon dont les événements sont distribués au cours des enregistrements. Par ailleurs, l'évaluation de la variabilité cardiaque à partir de ces critères n'est actuellement effectuée que sur des populations adultes, alors que les mécanismes cardio-régulateurs diffèrent fortement entre adultes et nouveaux-nés [1], notamment en raison d'un manque de maturation.

Pour cela, des techniques issues de la théorie des systèmes dynamiques non linéaires permettent de mieux caractériser les dynamiques cardiaques et fournissent, de manière non invasive, une bonne valeur pronostique [2]. Là encore, si la dynamique cardiaque de l'adulte a déjà été étudiée dans de nombreux travaux, celle des nouveaux-nés n'a été que peu abordée. La présente étude met donc en jeu les ΔRR , définis comme les variations entre intervalles RR successifs, qui offrent une meilleure représentation de la dynamique cardiaque sous-jacente [3].

Une fois les ΔRR extraits, une dynamique symbolique a été construite en divisant les ΔRR en trois domaines correspondant respectivement à la décroissance, au maintien et à l'augmentation des intervalles RR. Afin d'évaluer la complexité de la dynamique cardiaque, une entropie de Shannon S_h — connue pour être robuste en présence d'artéfacts — a été calculée. Un coefficient d'asymétrie α a également été défini à partir de la segmentation en neuf zones des applications de premier retour selon la dynamique symbolique. Ce coefficient permet de quantifier le déséquilibre entre accélération ($\alpha > 0$) et décélération ($\alpha < 0$) de l'activité cardiaque. Une carte définie par l'entropie de Shannon S_h et le coefficient d'asymétrie α permet ensuite de distinguer les différentes dynamiques, regroupant les applications de premier retour présentant des structures similaires dans des domaines distincts de la carte S_h - α .

Ces techniques ont été utilisées sur deux bases de données. Tout d'abord, des enregistrements Holters de 15 patients (5 sains, 5 atteints d'insuffisance cardiaque congestive et 5 atteints de fibrillation auriculaire) mis en ligne sur le site PHYSIONET à l'occasion d'un challenge proposé par Leon Glass [4] ont été utilisés dans le but de vérifier le pouvoir discriminant de nos méthodes. Dans un deuxième temps, 14 nourrissons ayant été hospitalisés pour des alertes cardiorespiratoires ont été monitorés en routine au Centre Hospitalier Universitaire de Rouen. Nous montrons que certains d'entre eux présentent des anomalies cardiaques, clairement mises en évidence avec nos outils.

Références

1. C. VALLBONA, M. M. DESMOND, A. J. RUDOLPH, L. F. PAP, R. M. HILL, R. R. FRANKLIN, J. B. RUSH, *Biologica Neonatorum*, **5**, 159-199, 1963.
2. A. VOSS, J. KURTHS, H. J. KLEINER, A. WITT, N. WESSEL, P. SAPARIN, K. J. OSTERZIEL, R. SCHARATH & R. DIETZ, *Cardiovascular Research*, **31**, 419-433, 1996.
3. U. S. FREITAS, E. ROULIN, J.-F. MUIR & C. LETELLIER, *Chaos*, **19**, 028505, 2009.
4. L. GLASS, *Chaos*, **19**, 028501 (2009).

Modèle dynamique de la maturation ovocytaire

Benjamin Pfeuty¹, Jean-Francois Bodart³, Ralf Blossey², & Marc Lefranc¹

¹ Université Lille 1, Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

² Université Lille 1, Laboratoire Régulation des signaux de division

³ Université Lille 1, Institut de Recherche Interdisciplinaire, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France

benjamin.pfeuty@univ-lille1.fr

Chez les animaux, l'ovogenèse est le processus aboutissant à la production des ovocytes puis des ovules, les gamètes de la femelle à n chromosomes. Une étape majeure de l'ovogenèse est la maturation ovocytaire au cours de laquelle l'ovocyte, en arrêt G2 et soumis à un signal hormonal, démarre une première méiose (MI) puis s'arrête en métaphase de deuxième méiose (MII) en attendant d'être fécondé puis d'effectuer des cycles mitotiques embryonnaires. Au niveau moléculaire, le contrôle de ce processus est associé à l'évolution temporelle non monotone d'une protéine cruciale, le MPF, dont la concentration croît dans un premier temps avant de diminuer puis d'augmenter à nouveau pour se stabiliser à un niveau plateau. Le profil temporel du MPF est lui-même le résultat de la dynamique non-linéaire d'un réseau de régulation extrêmement complexe qui fait intervenir de multiples boucles de rétroaction, positive et négative.

Le but de notre étude théorique est de comprendre la relation entre l'organisation sophistiquée de ce réseau biologique et son comportement dynamique non trivial. L'analyse de bifurcation et de sensibilité paramétrique d'un modèle mathématique de ce réseau a permis d'identifier des principes organisationnels basés sur l'interaction de sous-systèmes ("module") bistables et excitables qui assurent un contrôle robuste de la séquence décisionnelle conduisant la cellule à travers une succession d'états et processus cellulaires distincts. Le modèle permet par ailleurs de rendre compte d'un certain nombre d'expériences où la maturation est altérée.

Références

1. Pfeuty B, Bodart JF, Blossey R, Lefranc M (2012) A dynamical model of oocyte maturation unveils precisely orchestrated meiotic decisions. *PLoS Comp Biol*, 8(1) :1002329

Dynamique du gène auto-reprimé avec mémoire transcriptionnelle

Jingkui Wang, Quentin Thommen, & Marc Lefranc

Université Lille 1, Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules, UMR CNRS 8523,
UFR de Physique, Cité Scientifique, F-59655 Villeneuve d'Ascq
`quentin.thommen@univ-lille1.fr`

Le rôle de la grande majorité des dizaines de milliers de gènes que porte une molécule d'ADN est d'initier les premières étapes d'une chaîne de réactions conduisant à la synthèse des protéines, plus précisément la « transcription » de la séquence génétique en une molécule d'ARN messager. L'activité d'un gène n'est en général pas constante dans le temps, mais varie en réponse à l'arrimage de protéines régulatrices en amont de la zone codante. Le fonctionnement cellulaire dans son ensemble repose en grande partie sur des réseaux de gènes, dont les activités se modulent réciproquement via les protéines qu'ils synthétisent, et un problème essentiel de la biologie moderne est de comprendre la dynamique de ces réseaux, qui présentent typiquement des comportements non linéaires tels que bistabilité ou oscillations.

La modélisation mathématique de réseaux génétiques suppose généralement que l'activité d'un gène réagit immédiatement aux variations de concentration de ses protéines régulatrices. Or, des expériences récentes ont montré l'existence d'une dynamique transcriptionnelle intrinsèque, à des échelles de temps comparables aux autres processus cellulaires [1]. Cette dynamique induit un temps de réponse génique fini, assimilable à une mémoire transcriptionnelle, qui est source d'instabilité dynamique. Mais il existe potentiellement de nombreuses autres sources de retards, comme par exemple le transport entre le cytoplasme et le noyau chez les eukaryotes, dont les temps caractéristiques peuvent être significativement plus grands que le temps de réponse génique et ainsi le masquer. L'étude analytique d'un circuit génétique déterministe élémentaire et biologiquement pertinent montre cependant la spécificité du temps de réponse génique quant à la stabilité dynamique : les différents retards ont une interaction plus complexe que leur simple sommation. Ainsi, un faible temps de réponse génique permet l'apparition d'oscillations spontanées de l'activité d'un gène régulé par sa propre protéine en présence d'un retard de transport bien plus grand.

Par ailleurs, la dynamique transcriptionnelle est pilotée par une variable binaire quantifiant l'état de la molécule unique d'ADN comme liée ou non-liée à une protéine du milieu. Cette variable binaire induit des fluctuations importantes qui, prises en compte dans une modélisation déterministe au premier ordre de fluctuation, influent en interagissant avec les non-linéarités pour modifier, et les points fixes du réseau génétique, et sa stabilité. Le gène auto-reprimé présente ainsi une résonance entre le temps de réponse génique et la durée de vie de la protéine, résonance caractérisée par une statistique sub-poissonienne de la distribution des pics de protéine au cours du temps (similaire au photon « anti-bunching »), que l'on peut interpréter comme un analogue de l'oscillation déterministe.

Le gène auto-reprimé, déjà largement étudié [2,3,4], semble être un modèle clef pour comprendre les interactions entre retards, non-linéarités et fluctuations stochastiques ainsi que leurs influences sur le comportement dynamique des réseaux génétiques.

Références

1. I. GOLDING, J. PAULSSON, S.M. ZAWILSKI, E.C. COX, *CELL* **123**, 1025-1036 (2005).
2. J. S. GRIFFITH, Mathematics of cellular control processes I. Negative feedback to one gene, *J. Theor. Biol.* **20**, 202 (1968).
3. M. H. JENSEN, K. SNEPPEN & G. TIANA, Sustained oscillations and time delays in gene expression of protein Hes1, *FEBS Lett.* **541**, 176 (2003).
4. P.-E. MORANT, Q. THOMMEN, F. LEMAIRE, C. VANDERMOERE, B. PARENT AND M. LEFRANC, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 183901 (2009).

Une horloge biologique à l'heure par tout temps et en toute saison

Quentin Thommen¹, Benjamin Pfeuty¹, Florence Corellou², François-Yves Bouget², & Marc Lefranc¹

¹ Université Lille 1, Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, et Molécules, UFR de Physique, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France

² Université Pierre and Marie Curie Paris 06, Laboratoire d'Océanographie Microbienne, Observatoire Océanologique, F-66651 Banyuls/Mer, France

marc.lefranc@univ-lille1.fr

De nombreux organismes possèdent une horloge biologique, dite circadienne, qui leur fournit une mesure interne de l'heure qu'il est et leur permet d'anticiper les variations périodiques de l'environnement induits par l'alternance jour-nuit [1]. Les horloges circadiennes sont constituées de réseaux de gènes et de protéines qui interagissent de manière à engendrer des oscillations biochimiques avec une période d'environ 24 heures. Afin de pouvoir donner l'heure tout au long de l'année, ces oscillateurs génétiques se synchronisent au cycle jour-nuit en couplant certaines de leurs propriétés biochimiques à l'éclairement solaire, par exemple en incorporant une protéine dont le taux de dégradation dépend de la lumière. Le phénomène d'accrochage de fréquence permet alors à l'horloge circadienne de caler sa période sur celle du cycle jour-nuit et de maintenir avec lui une différence de phase constante.

Cependant, la lumière du jour présente à la fois des fluctuations rapides et aléatoires, liées par exemple à une couverture nuageuse aléatoire, et des variations lentes et régulières, résultant du changement graduel de la durée du jour tout au long de l'année. Si le couplage de l'horloge circadienne au cycle jour-nuit était quelconque, ces fluctuations pourraient à la fois entraîner des remises à l'heure de l'horloge incessantes et la déstabiliser vers des régimes dynamiques non physiologiques [2,3].

En analysant les profils temporels d'activité de deux gènes centraux de l'horloge de l'algue microscopique *Ostreococcus tauri*, nous avons mis à jour un mécanisme simple qui permet à cette horloge d'être insensible aux fluctuations d'éclairement. En effet, on ne peut détecter aucune signature de couplage dans les signaux enregistrés en situation de synchronisation : un modèle mathématique simple d'oscillateur libre permet d'ajuster remarquablement bien les données [2]. Nous avons montré que ce paradoxe pouvait s'expliquer simplement si le couplage à la lumière n'est activé que dans des fenêtres temporelles bien précises où l'oscillateur central de l'horloge, quand il en phase avec le cycle externe, est insensible aux perturbations extérieures. Cela permet de « débrayer » le couplage quand l'horloge est à l'heure, tout en la laissant avancer ou retarder l'horloge lorsqu'un décalage éventuel fait disparaître la coïncidence. Une horloge à l'heure n'étant de fait pas forcée, elle n'est pas exposée aux fluctuations de ce forçage [2].

Nous avons montré récemment que ce phénomène d'« invisibilité du couplage » peut être mis en évidence pour toutes les durées de jour comprises entre 2 et 22 heures. Cela est d'autant plus remarquable que les profils temporels des gènes de l'horloge de *Ostreococcus tauri* varient de manière significative tout au long de l'année, afin d'adapter les signaux délivrés aux diverses saisons et aux contraintes différentes qu'elles imposent [4]. Cela montre en même temps que la robustesse aux fluctuations d'éclairement est une contrainte évolutive forte et qu'un oscillateur génétique simple est capable de présenter cette robustesse.

Références

1. M.W. Young and S. Kay. Time zones : a comparative genetics of circadian clocks. *Nature Gen.*, **2** 702 (2001).
2. Q. Thommen *et al.*, Robustness of circadian clocks to daylight fluctuations : hints from the picoeucaryote *Ostreococcus tauri*, *PLoS Comp. Biol.* **6** : e1000990, doi :10.1371/journal.pcbi.1000990 (2010).
3. B. Pfeuty, Q. Thommen, and M. Lefranc, Robust entrainment of circadian oscillators requires specific phase response curves, *Biophys. J.* **100**, 2557 (2011).
4. Q. Thommen *et al.*, Robust and flexible response of *Ostreococcus tauri* circadian clock to light/dark cycles of varying photoperiod, arXiv : 1201.0158, <http://arxiv.org/abs/1201.0158> (2011).

Propriétés spatio-temporelles de la Turbulence d'ondes capillaires

Michael Berhanu¹ & Eric Falcon¹

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC), Université Paris Diderot, CNRS UMR 7057 10 rue A. Domon et L. Duquet 75013 Paris, France
`michael.berhanu@univ-paris-diderot.fr`

La turbulence d'ondes étudie les propriétés statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction non linéaire. Les ondes à la surface d'un fluide constituent l'archétype de ce phénomène pouvant être traité théoriquement dans le cas faiblement non linéaire [1]. Une difficulté expérimentale repose dans la nécessité d'utiliser une mesure du champ d'ondes simultanément dans l'espace bidimensionnel et dans l'espace temporelle. Récemment Herbert et al. [2] ont caractérisé la turbulence d'ondes de gravité en utilisant une méthode optique (Profilométrie par Transformée de Fourier). Ici l'utilisation d'une autre méthode optique (Diffusing Light Photography [3]) associée à une caméra rapide nous permet d'atteindre une meilleure résolution spatiale et de caractériser les propriétés spatio-temporelles de la Turbulence d'ondes capillaires. On obtient la relation de dispersion des ondes capillaires dans les cas linéaire et non-linéaire, ainsi que le spectre de hauteur de vagues à la fois en fonction du nombre d'onde k et de la pulsation ω . Les propriétés statistiques sont extraites et analysées dans le but d'évaluer la validité des théories faiblement non-linéaire. Enfin comme cette technique n'est pas limitée aux faibles amplitudes de déformation de la surface, nous pouvons aussi étudier la création de vagues capillaires parasites au sommet des vagues raides de gravité et déterminer l'influence de ces structures sur la Turbulence d'ondes.

Références

1. A. C. NEWELL AND B. RUMPF, Wave Turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **43** 59 (2011).
2. E. HERBERT, N. MORDANT AND E. FALCON, Observation of the Nonlinear Dispersion Relation and Spatial Statistics of Wave Turbulence on the Surface of a Fluid, *Phys. Rev. Lett.* , **105** 144502 (2010).
3. W. B. WRIGHT, R. BUDAKIAN AND S. J. PUTTERMAN, Diffusing Light Photography of Fully Developed Isotropic Ripple Turbulence, *Phys. Rev. Lett.* , **76** 4528 (1996).

Washboard road, instabilité de tôle ondulée

Percier B.¹, Manneville S.¹, & Taberlet N.¹

laboratoire de physique de l'ENS de Lyon, 46 allée d'italie 69007 Lyon
baptiste.percier@ens-lyon.fr

Le passage répété de véhicules sur des routes de terre ou de sable est à l'origine de la formation d'un motif de rides . Ce phénomène, appelé *tôle ondulée* (ou *washboard road*) constitue un problème physique très intéressant de formation spontanée de motifs.

Dans mon exposé je commencerai par présenter le phénomène de tôle ondulée et j'expliquerai comment nous l'avons reproduit à l'échelle du laboratoire. Notre dispositif expérimental consiste en une piste circulaire en sable de 2 m de diamètre sur la laquelle on tire un objet. Afin de réduire au maximum le nombre de degrés de liberté, cet objet est en réalité une simple plaque inclinée à 45° et libre de se déplacer verticalement (il n'y a notamment pas d'amortisseur). Nous verrons que ce dispositif très simplifié fait apparaître le motif de tôle ondulée de manière très robuste dès que la plaque est tirée suffisamment vite.

Afin de construire un modèle permettant de décrire ce phénomène nous avons mesuré les forces de portance et de traînée agissant sur une plaque charriant du sable à altitude et vitesse constante. Ces mesures montrent que ces forces sont indépendantes de la vitesse de la plaque mais proportionnelles à la masse de sable transportée. Comme il existe une relation intégrale entre cette masse et l'altitude de la plaque nous avons pu écrire une équation d'évolution du troisième degré pour la plaque. Ce premier modèle simpliste prédit la longueur d'onde du motif mais un raffinement est nécessaire afin de prédire le caractère critique de l'instabilité. De nouvelles mesures de forces, faites en imposant un mouvement sinusoïdal à la plaque, nous permettent de compléter ce modèle de manière très satisfaisante.

Références

1. PERCIER B ; MANNEVILLE S ; MCELWAIN J.N ; MORRIS S.W ; TABERLET N *Lift and drag forces on an inclined plow moving over a granular surface*, Phys Rev E **84**, 051302(2011).

Lumière sur les vagues scélérates : le soliton de Peregrine enfin observé !

Bertrand KIBLER

Institut Carnot de Bourgogne, Dijon

Les solitons sont des éléments essentiels des sciences non-linéaires, et en particulier les solitons d'enveloppe de l'équation de Schrödinger non-linéaire (ESNL), étudiés dans de nombreux systèmes physiques. En plus des solitons d'enveloppe qui se propagent sans déformation sur de longues distances, l'analyse mathématique de l'ESNL révèle l'existence d'autres classes de solutions localisées.

Notamment, une structure prédite dès 1983 et depuis connue sous le nom de soliton de Peregrine [1] possède des propriétés atypiques. Contrairement à d'autres classes de solitons, elle est ainsi localisée à la fois dans le temps et dans l'espace : elle émerge de nulle part et extrait son énergie d'une onde continue, pour atteindre une très forte intensité avant de disparaître aussi subitement qu'elle est apparue et retrouver son état initial. Ce cycle de croissance-décroissance est si remarquable que les liens entre l'ESNL et les équations utilisées en hydrodynamique conduisent désormais à considérer le soliton de Peregrine comme une explication sérieuse du phénomène de vagues scélérates observées à la surface des océans [2].

De manière surprenante, le soliton de Peregrine n'avait jusque-là encore jamais été observé expérimentalement. Nos travaux menés en 2010 dans le domaine de l'optique représentent donc la première confirmation expérimentale de l'existence de ce soliton [3]. Une première étude analytique et numérique a permis de déterminer les conditions pour lesquelles les caractéristiques fondamentales du soliton de Peregrine pouvaient être observées. La configuration expérimentale retenue se veut volontairement simple : elle requiert une onde continue faiblement modulée qui est injectée dans une fibre optique aux propriétés non-linéaire et dispersive judicieusement choisies. Cette condition initiale est non idéale d'un point de vue mathématique, elle est néanmoins suffisante pour mettre en évidence le comportement extrême de localisation spatio-temporelle. Dans notre étude, la complexité expérimentale se trouve principalement dans la caractérisation fine des propriétés du soliton de Peregrine. L'utilisation d'un système d'auto-corrélation résolue en fréquence adapté à la mesure d'impulsions ultracourtes sur onde continue a permis de confirmer de manière quantitative les profils spécifiques d'intensité et de phase du soliton de Peregrine.

Pour conclure, il s'agit d'un privilège rare d'observer une nouvelle classe de solitons en physique non-linéaire. Le soliton de Peregrine a depuis été généré dans d'autres systèmes à fibres et les résultats ont stimulé sa recherche fructueuse dans l'environnement naturel d'un canal hydrodynamique [4], ou bien encore dans les domaines de la physique des plasmas ou de la finance.

Références

1. . H. Peregrine Water waves, nonlinear Schrödinger equations and their solutions, *Journal of the Australian Mathematical Society Series B* 25, 16-43 (1983).
2. . I. Shrira, V. V. Geogjaev, What makes the Peregrine soliton so special as a prototype of freak waves?, *Journal of Engineering Mathematics* 67, 11-22 (2009).
3. . Kibler, J. Fatome, C. Finot, G. Millot, F. Dias, G. Genty, N. Akhmediev, J. M. Dudley, The Peregrine soliton in nonlinear fibre optics, *Nature Physics* 6, 790-795 (2010).
4. . Chabchoub, N.P. Hoffmann, N. Akhmediev, Rogue wave observation in a water wave tank, *Physical Review Letters* 106, 204502 (2011).

Cell colonies and branching patterns

Benoît PERTHAME

Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Pierre et Marie Curie Paris 6

There are very few PDE models undergoing branching instability. Among those, one of the most famous, inspired by dendritic growth of cell populations is known as Mimura's model. It describes the growth of a cell population under the effect of a nutrient which is locally depleted.

We present a conservative parabolic model that undergoes branching instabilities. The swimmers are modeled by a Fokker-Planck type equation à la Keller-Segel, coupled with two fields describing attraction and repulsion. It also includes the 'quorum sensing' limitation proposed by Dolak and Schmeiser.

Several reduced models explain stability and unstability of plateau type traveling wave solutions.

This lecture is based on collaborations with F. Cerreti, Ch. Schmeiser, M. Tang and N. Vauchelet.

Naissance d'un tsunami

Ruiz-Chavarria^{1,2}, Berhanu² & Falcon²

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

² Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, MSC, UMR 7057 CNRS

gruiz@unam.mx

Un tsunami se produit généralement par un tremblement de terre lié au glissement relatif des plaques tectoniques du fond marin. Ce phénomène est considéré comme une vague en eau peu profonde car sa longueur d'onde est grande par rapport au fond de l'océan. Nous présentons une étude expérimentale d'un aspect encore peu connu de ce phénomène : son processus de formation. La plupart des modèles suppose que la déformation initiale de la surface libre est donnée en translatant la déformation du fond marin à la surface libre. Cette approximation n'est cependant pas valable si la vitesse verticale du fond est faible devant la vitesse de phase des ondes de surface. Afin d'étudier l'analogie de la formation d'un tsunami, une cuve en plexiglas de 1.1 m x 1.1 m est remplie d'eau sur une profondeur de 2.5 cm. Une membrane élastique située au fond peut être déformée de manière périodique ou impulsionnelle. Des mesures de champ vitesse au sein du fluide par PIV (Particle Image Velocimetry), de l'accélération du fond déformable, et de la surface libre ont été réalisées afin de mieux comprendre la formation de vague à partir d'une déformation dynamique du fond de la cuve. Dans le cas d'un forçage périodique à basse fréquence, une différence de phase entre le déplacement du fond et celui de la surface libre est observé. Par contre, nous observons que la différence de phase entre les déformations du fond et de la surface libre diminue lorsque la fréquence augmente, montrant ainsi l'importance de tenir compte de la dynamique du fond pour la formation d'une telle vague.

Méandrage sur substrat superhydrophobe ?

Stéphanie Couvreur¹, Philippe Brunet¹, & Adrian Daerr¹

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes - Université Paris Diderot-Paris 7 - France
stephanie.couvreur@univ-paris-diderot.fr

Quand un filet liquide s'écoule en mouillage partiel sur une surface inclinée, il adopte plusieurs formes. à bas débits, il coule verticalement, dans le sens de la plus grande pente. Au dessus d'un certain débit seuil, une instabilité inertielle a lieu et le filet d'eau adopte une forme sinueuse, passant dans un régime dit "de méandres" : les petites perturbations de la ligne de contact présentes initialement sont amplifiées par la force centrifuge [1], [2].

Cette instabilité existe car il existe une anisotropie de la friction sur le substrat en mouillage partiel : il faut vaincre une friction significative pour déplacer une ligne de contact alors que la friction est faible dans le sens de l'écoulement du liquide. Des perturbations d'une forme rectiligne du filet ne sont par conséquent plus advectées à la vitesse du fluide, lequel, contraint de les doubler, subit des forces centrifuges qui tendent à amplifier les perturbations.

Quel comportement adopte un filet liquide en écoulement sur un substrat superhydrophobe ? Sur ce type de surface, les angles de contact sont proches de 180° , l'hystérésis de mouillage quasi nulle et la friction sur le substrat très faible.

Par action de la tension de surface, un filet liquide aux angles de contacts supérieurs à 90° est instable vis à vis de modulations de section [3] et se brise en gouttes selon l'instabilité de Rayleigh Plateau. Nous étudierons donc au préalable cette instabilité avant de s'intéresser à la dynamique intrinsèque du filet.

Références

1. S.H. DAVIS J.B. CULKIN, Meandering of water rivulets, *Aiche Journal*, **30** (2), 263-267 (1984).
2. A. DAERR, L. LIMAT AND N. LE GRAND-PITEIRA, Meandering rivulets on a plane : a simple balance between inertia and capillarity? *Physics Review Letters*, **25**, (2006).
3. R. L. SPETH AND E. LAUGA, Capillary instability on a hydrophilic stripe, *New Journal of Physics*, (2009).

Instabilités dans le sillage stratifié d'un cylindre

Mickael Bosco & Patrice Meunier

Institut de Recherche sur les Phenomenes Hors Equilibre, 49, rue F. Joliot-Curie, B.P. 146, F-13384 Marseille cedex 13, France

bosco@irphe.univ-mrs.fr, meunier@irphe.univ-mrs.fr

L'étude consiste à analyser expérimentalement, numériquement et théoriquement comment la dynamique du sillage d'un cylindre, bien connu pour le cas des fluides homogènes, est modifiée en présence d'une stratification linéaire. Ce sujet est notamment motivé par les applications géophysiques aussi bien pour les sillages océaniques que pour les écoulements atmosphériques [1].

La première partie, dédiée à la dynamique 2D du sillage, met en évidence la stabilisation de l'allée de von Karman pour une stratification modérée pour des cylindres horizontaux et inclinés en accord avec la stabilisation des écoulements de cisaillement à grand nombre de Richardson. Cependant, les vortex réapparaissent pour une stratification plus importante dans le cas d'un cylindre incliné.

La seconde partie se concentre sur les instabilités 3D du sillage d'un cylindre. Le mode A bien connu pour les fluides homogènes [2] est encore une fois présent à faible stratification. Sa structure est mise en évidence expérimentalement par ombroscopie. Pour un cylindre vertical, ce mode est plus instable pour des stratifications modérées mais il disparaît à forte stratification. Cependant, pour des angles d'inclinaison au delà de 45° , un nouveau mode d'instabilité apparaît avec une structure similaire à celle observée dans la couche critique d'un vortex incliné stratifié.

Références

1. J.T. Lin and Y.H. Pao : Wakes in stratified fluids : a review. *Ann. Rev. Fluid Mech.* Vol **11** p 317, 1979.
2. C.H.K. Williamson : Three-dimensional wake transition. *J. Fluid Mech.* Vol **328** p 345-407, 1996.

Etude expérimentale de l'instabilité d'un jet de solution diluée de polymère

C.M. Gassa Feugaing¹, O. Crumeyrolle¹, G. Gréhan², & I. Mutabazi¹

¹ LOMC, UMR 6294, CNRS-Université du Havre

² CORIA, UMR 6614, CNRS-Université de Rouen

olivier.crumeyrolle@univ-lehavre.fr

L'atomisation des liquides viscoélastiques est essentielle dans de nombreuses applications domestiques, agricoles et industrielles [1]. Dans ces processus, la présence de polymère change la dynamique de rupture du jet et joue un rôle important pour le contrôle de la taille des gouttes et la suppression des gouttes satellites [2]. Dans le même temps l'apparition de ligaments entre les gouttes peut conduire à l'apparition de gouttes secondaires lors de la déstabilisation du ligament [3]. Les travaux les plus récents montrent qu'un démixage du polymère peut se produire entre les gouttes et le filament [4].

Nous étudions expérimentalement la dynamique de brisure des jets libres et forcés de solutions diluées de polymère flexible de forte masse molaire au travers d'un petit orifice. Pour cela nous employons des solutions aqueuses de 5 ppm (parties par million, en masse) et 10 ppm de polyoxyéthylène (POE, $c^* = 180$ ppm) débouchant au travers d'un orifice de 50 μm de diamètre. Nous observons que le jet présente dans la longueur de rupture finale la structure dite de « perles sur une ficelle ». Cette dynamique nous permet de mettre en évidence un effet élongationnel même en régime fortement dilué. Nous nous intéressons aux propriétés statistiques des gouttes et à la longueur de la structure filamentaire.

Références

1. Bergeron V., Bonn D., Martin J. Y., & Vovelle L., Controlling droplets deposition with polymer additive, *Nature*, **405**, (2000); Chao K.K., Child C.A., Grens II A.E. & Williams M.C., Antimisting Action of Polymeric Additives in jet Fuels, *AIChE J.* **30**(1), 111-120, (1984); Son Y., Kim C., Spreading of inkjet droplet of non-Newtonian fluid on solid surface with controlled contact angle at low Weber and Reynolds numbers, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **162**, 78-87, (2009); Mun R. P., Young B. W. & Boger D. V., Atomisation of dilute polymer solutions in agricultural spray nozzles, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **83**, 163-178, (1999).
2. Christanti Y.M. & Walker L., Effect of Fluid Relaxation Time on Jet Breakup due to a Forced Disturbance of Polymer Solutions, *J. Rheol.*, **46**(3), 733-748, (2002).
3. C. Clasen, J. Eggers, M.A. Fontelos, J. Li & G.H. McKinley, The beads-on-string structure of viscoelastic threads, *J. Fluid Mech*, **556**, (2006)
4. R. Sattler, C. Wagner & J. Eggers, Blistering Pattern and Formation of Nanofibers in Capillary Thinning of Polymer Solutions, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 164502, (2008).

Etude numérique de la convection d'un liquide diélectrique sous l'effet de la force diélectrophorétique en géométrie annulaire

O. Crumeyrolle¹, S. Malik¹, M. Smieszek¹, Ch. Egbers², & I. Mutabazi¹

¹ LOMC, UMR 6294, CNRS-Université du Havre, BP 540, F-76058 Le Havre cedex

² LAS, Brandenburg Technical University, Siemens-Halske-Ring 14, D-03046 Cottbus, Germany

olivier.crumeyrolle@univ-lehavre.fr

En microgravité, l'absence de pesanteur rend impossible la convection naturelle, faute de poussée d'Archimède. Ceci complique la réalisation d'échangeurs thermiques, et une des pistes possible consiste à recréer une gravité artificielle à l'aide de l'effet diélectrophorétique. Celui-ci est observé par exemple quand, sous l'effet d'un gradient de température, la permittivité diélectrique varie dans l'espace. L'application d'un champ électrique haute tension permet alors de recréer une gravité dite électrique.

Nous étudions numériquement le cas où le liquide diélectrique est confiné dans un espace annulaire cylindrique d'entrefer $d = b - a$. Dans la formulation du problème nous employons les équations de la convection thermique couplées à une équation stationnaire du champ électrique. La permittivité électrique est traitée de manière similaire à la masse volumique dans l'approximation de Boussinesq. Nous veillons à inclure les effets rétroaction de la température sur le champs électrique contrairement aux travaux théoriques de [1], et n'employons pas l'hypothèse d'axisymétrie, précédemment supposée par [2]. On impose sur les cylindres un écart de température fixe, une différence de potentiel électrique, et le non-glissement du liquide aux parois. L'étude de stabilité linéaire (LSA) est conduite à l'aide d'un code pseudo-spectral pour quatre valeurs du rapport des rayons et de nombreuses valeurs du nombre de Prandtl Pr . Les simulations numériques directes instationnaires (DNS) sont conduites en 3D à l'aide du code industriel d'éléments finis COMSOL v3.5. Les frontières planes aux extrémités de l'espace annulaire y sont supposées adiabatiques et électriquement isolantes. Les paramètres sont $L = 10d$, $a/b = 0,5$ et $Pr = 65$, et sont issus des expériences qui sont menées en vol paraboliques [3]. Le paramètre de contrôle de l'étude est alors l'état de base/l'état initial d'une part, et d'autre part le nombre de Rayleigh électrique Ra_E , ratio entre le produit du temps de diffusion thermique par le temps de diffusion visqueux et le carré du temps de convection sous l'effet de la gravité électrique.

Avec un état de base/initial purement conducteur, la LSA et l'étude DNS montrent [4,5] que le système évolue vers un régime possédant à la fois un nombre d'onde axial et un nombre d'onde azimutal, soit une structure en hélice, les deux orientations étant également critique. Pour différents Pr , le seuil Ra_c relevé est toujours le même. La DNS montre que les hélices contraorientées peuvent entrer en compétition et se répartir dans le système. Avec un état initial plus réaliste dans le cadre d'un vol parabolique, à savoir un régime de convection naturel, et Ra très largement supérieur au seuil, il est possible d'observer le développement de motifs d'écoulement dans le temps imparti de microgravité (22 s), qui est très court par rapport au temps de diffusion thermique. La structure en hélice n'est que peu visible, supplantée par le développement de panaches localisés de convection. Ces structures favorisent un transfert transitoire très important près du cylindre intérieur - là où la gravité électrique est la plus élevée- mais le transfert près du cylindre extérieur est plus faible.

Références

1. B. Chandra, D.E. Smylie, *Geophys. Fluid Dyn.* **3**, 211 (1972)
2. M. Takashima, *Q. J. Mech. appl. Math.* **33**, 93 (1980).
3. N. Dahley, B. Futterer, M. Smieszek, C. Egbers, O. Crumeyrolle, *38th COSPAR*, Bremen, 18-25 July 2010.
4. M. Smieszek, O. Crumeyrolle, I. Mutabazi, Ch. Egbers, *Proceedings of 16th International Couette-Taylor Workshop*, Princeton, 9-11 September 2009.
5. M. Satish, O. Crumeyrolle, I. Mutabazi, *17th International Couette-Taylor Workshop*, Leeds, 25-27 July 2011.

Etude d'une dynamo Bullard Von Kàrmàn à paramètre d'interaction élevé

S. Miralles¹, N. Plihon¹, G. Verhille², & J-F. Pinton¹

¹ Laboratoire de Physique Ecole Normale Supérieure de Lyon, UMR CNRS 5672, 46, Allée d'Italie 69007 Lyon

² Institut de Recherche sur les phénomènes hors équilibre, IRPHE UMR 6594, Technopôle de

Château-Gombert, 49, rue Joliot Curie, 13384 Marseille

sophie.miralles@ens-lyon.fr

Les dynamo fluides en métaux liquides ont été observées dans seulement quelques expériences dans le monde, notamment l'expérience Von Kàrmàn Sodium (VKS) [1]. L'expérience VKS est composée d'une cuve cylindrique remplie de sodium, l'écoulement est produit par la contra-rotation de deux disques co-axiaux placés à chaque extrémité de la cuve.

Le sodium étant difficilement manipulable, une expérience plus petite mais présentant la même topologie d'écoulement en gallium liquide a été développée à l'ENS Lyon. La puissance disponible n'étant pas suffisante dans VKG pour franchir le seuil de l'instabilité dynamo par l'écoulement seul, un dispositif de bouclage s'inspirant de la dynamo disque de Bullard ([2]) permet d'observer une dynamo synthétique dite de Bullard-Von Kàrmàn.

Un champ extérieur (axial ou transverse) est appliqué avec des bobines. Un champ magnétique induit est créé par l'interaction du champ magnétique appliqué et des gradients de vitesse de l'écoulement. Enfin, le courant traversant les bobines est proportionnel au champ magnétique induit par l'écoulement. Ce bouclage permet de dépasser le seuil de l'instabilité au delà d'une certaine fréquence de forçage du fluide à travers différents régimes (intermittence on-off, renversements)

Cette étude a déjà été réalisée à faible paramètre d'interaction ([3], [4]) qui est le rapport entre la force de Laplace et le terme d'inertie apparaissant dans l'équation de Navier-Stokes $N = \sigma B^2 L / \rho \nu \ll 1$.

Nous présentons ici une étude de la dynamo de Bullard Von Kàrmàn à paramètre d'interaction plus élevé ($N \sim 1$), régime dans lequel la force de Laplace a une intensité suffisamment grande pour rétroagir sur l'écoulement et en modifier la topologie, ce qui conduit à la saturation de la dynamo.

Références

1. R. MONCHAUX ET AL., Generation of a Magnetic Field by Dynamo Action in a Turbulent Flow of Liquid Sodium *Phys. Review Letters*, **98**, (2007).
2. E.C. BULLARD, The stability of a homopolar dynamo *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **51**, 744 (1955).
3. M. BOURGOIN ET AL., An experimental Bullard -Von Kàrmàn dynamo *New J. Phys.*, **8**, 329 (2006).
4. G. VERHILLE ET AL., Large scale fluctuations and dynamics of the Bullard-Von Kàrmàn dynamo *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, **104** (2-3), 189-205 (2010).

Renversements erratiques d'une structure hydrodynamique grande échelle

Johann Herault, Basile Gallet, François Pétrélis et Stéphane Fauve

Laboratoire de Physique Statistique ENS-Paris, 24 rue Lhomond, 75005 Paris
jherault@lps.ens.fr

Le champ magnétique terrestre, dont la composante grande échelle est principalement un dipole aligné avec l'axe de rotation, a subi des inversions de polarité à des intervalles de temps irréguliers. Ce champ magnétique est engendré au centre de la terre par le mouvement fortement turbulent de métal liquide, où l'énergie cinétique du fluide est convertie en énergie magnétique via l'instabilité dynamo. Cependant l'influence de la turbulence sur la génération ainsi que la dynamique du champ magnétique n'est que partiellement comprise. Les récents résultats de l'expérience VKS (dynamo expérimentale) semble montrer que la turbulence joue le rôle d'un bruit qui affecte la dynamique (de basse dimension) du champ magnétique **(1)**.

Afin d'explorer cette relation entre structures cohérentes et turbulence, nous avons élaboré une expérience de turbulence 2D **(2)** où l'écoulement à fort Reynolds ($Re \sim 10^4$) engendre une circulation grande échelle, qui à l'instar du champ magnétique, se renverse et change de sens de circulation de manière erratique **(3)**. À travers l'étude statistique et dynamique des renversements, nous montrons que ce système hydrodynamique diffère des renversements observés dans l'expérience VKS. Il semble qu'une partie des renversements ait une trajectoire déterministe dans l'espace des phases (comme dans VKS) alors que l'autre partie des renversements implique une dynamique plus erratique et complexe.

Nous discutons ainsi de la modélisation possible de ces renversements par un scénario d'intermittence de crise **(4)**, scénario suggéré par les simulations numériques.

Références

1. F. Pétrélis, S. Fauve, E. Dormy, JP Valet, **Simple Mechanism for Reversals of Earth's Magnetic Field**, Physical Review Letters, 102(14), 144503 (2009)
2. J. Sommeria, **Experimental study of the two-dimensional inverse energy cascade in a square box**, J. Fluid Mech. (1986), vol. 170, pp. 13S168
3. B. Gallet, J. Herault, C. Laroche, F. Pétrélis and Stéphane Fauve, **Reversals of a large scale field generated over a turbulent background**, accepted in GAFD (2011)
4. Edward Ott, **Chaos in dynamical systems**, Cambridge University Press

Motifs en bandes de l'écoulement de Couette plan transitionnel

Paul Manneville

Laboratoire d'Hydrodynamique, Ecole Polytechnique, Palaiseau
paul.manneville@polytechnique.edu

L'écoulement de Couette plan est linéairement stable pour tout nombre de Reynolds. Néanmoins, il transite vers la turbulence, en présentant un régime caractéristique – encore imparfaitement compris – de bandes obliques alternativement laminaires et turbulentes à nombre de Reynolds modéré [1]. Le travail présenté ici concerne un modèle phénoménologique conceptuellement analogue à celui développé par D. Barkley pour l'écoulement dans une conduite cylindrique [2], mais mieux fondé que l'extension à l'écoulement de Couette qui en a été faite [3]. Dans notre approche, un modèle dû à Waleffe [4] implémentant le mécanisme de maintien de la turbulence, est transformé en système de réaction-diffusion à la Barkley, en laissant diffuser deux de ses variables, conceptuellement les plus proches de celles choisies par celui-ci, l'écoulement moyen M et le mode d'instabilité des trainées turbulentes W . Le modèle s'écrit :

$$\begin{aligned}(\partial_t + \alpha_m) M &= \sigma_m W^2 - \sigma_u UV + \alpha_m + \partial_{xx} M, \\(\partial_t + \alpha_u) U &= -\sigma_w W^2 + \sigma_u MV, \\(\partial_t + \alpha_v) V &= \sigma_v W^2, \\(\partial_t + \alpha_w) W &= \sigma_w UW - \sigma_m MW - \sigma_v VW + D\partial_{xx} W.\end{aligned}$$

et ne contient comme paramètre que le coefficient de diffusion de W . Ce système présente une instabilité de Turing à condition que D soit suffisamment petit et qui permet d'interpréter l'apparition des bandes. Au stade non-linéaire l'amplitude de la modulation de l'intensité "turbulente" sature, les solutions correspondantes se maintenant en dessous du seuil d'apparition de la solution non-triviale homogène représentant le régime turbulent uniforme.

Références

1. A. Prigent, G. Grégoire, H. Chaté, O. Dauchot, Long-wavelength modulation of turbulent shear flow, *Physica D* **174** (2003) 100–113.
2. D. Barkley, Simplifying the complexity of pipe flow, *Phys. Rev. E* **84** (2011) 016309.
3. D. Barkley, Modeling the transition to turbulence in shear flows, *J. Phys. : Conf. Ser.* **318** 032001, 2011.
4. F. Waleffe, On a self-sustaining process in shear flows, *Phys. Fluids* **9** (1997) 883-900.

Écoulement dans un tube faiblement divergent : transition laminaire-turbulent

Jorge Peixinho

Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, CNRS UMR 6294 et Université du Havre, 76600 Le Havre
jorge.peixinho@univ-lehavre.fr

L'écoulement dans un tube parfaitement cylindrique et les bifurcations entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent sont sous-critiques. C'est à dire que la transition du régime laminaire au régime turbulent se manifeste par l'apparition d'une intermittence sous forme de bouffées ou "puffs" turbulents localisés qui se propagent le long de la conduite [1]. Autrement dit, l'écoulement de Poiseuille cylindrique est linéairement stable pour tout nombre de Reynolds. D'un autre côté, la transition des écoulements dans des tubes avec des élargissements brusques est caractérisée par l'apparition d'une recirculation secondaire super-critique. Lorsque le débit augmente, l'intensité et la taille de cette recirculation augmentent. Pour des débits plus forts, la recirculation devient dissymétrique et il se forme une bouffée turbulente localisée qui ne se propage pas. Cette étude présente des résultats expérimentaux et numériques pour les écoulements dans des tubes faiblement divergent afin de faire le lien entre des résultats récents pour les tubes [2] et les élargissements brusques [3]. En particulier, on quantifiera les conditions d'existence de la recirculation et les conditions de formation d'une bouffée.

Références

1. O. REYNOLDS, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **174**, 935-982 (1883).
2. K. AVILA, D. MOXEY, A. DE LOZAR, M. AVILA D. BARKLEY & B. HOF, *Science*, **333**, 192-196 (2011).
3. T. MULLIN, J. R. T. SEDDON, M. D. MANTLE & A. J. SEDERMAN, *Phys. Fluids*, **21**, 014110 (2009).

Ondes non linéaires en écoulements en tuyau de fluide rhéofluidifiant : retard à la transition et réduction de frottement

Roland Nicolas¹, Plaut Emmanuel² & Nouar Chérif²

¹ Max Plank Institute for Dynamics and Self-Organization, Bunsenstrasse 10, D - 37073 Göttingen

² Lemta, UMR CNRS - U. Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye, F - 54516 Vandœuvre-lès-Nancy cedex
`emmanuel.plaut@univ-lorraine.fr`

Nous nous intéressons à la modélisation de la transition vers la turbulence et de la turbulence modérément développée dans des écoulements en tuyau de fluides non newtoniens. Des expériences [1,2,3] ont montré l'existence d'un retard à la transition, i.e., à l'apparition des « bouffées turbulentes » ('puffs'), dans les fluides non newtoniens. Alors qu'en fluide newtonien les bouffées turbulentes apparaissent à partir d'un nombre de Reynolds Re , basé sur la vitesse débitante et le diamètre, de l'ordre de 2000, en fluide non newtonien elles apparaissent à partir d'un nombre de Reynolds Re_p , basé sur la vitesse débitante, le diamètre et la viscosité à la paroi, de l'ordre de 3000 à 8000. Pour étudier théoriquement ces phénomènes, nous avons choisi de nous focaliser sur le cas de fluides purement visqueux ne présentant aucun effet élastique, à savoir des fluides obéissant à la loi de Carreau [4]. D'autre part, nous avons choisi l'approche par calcul d'ondes non linéaires mise au point, dans le cas d'écoulements en tuyau, par [5,6]. Cette approche, alternative à celle des simulations numériques directes, repose sur un forçage virtuel de l'équation de la quantité de mouvement permettant de déclencher une bifurcation qui, lorsqu'elle est suffisamment sous critique, peut conduire à de nouvelles solutions physiques ondes non linéaires. Ces ondes seraient des précurseurs et supports des bouffées turbulentes [7]. Ainsi leur seuil d'apparition en Reynolds, par des bifurcations nœud-col, serait une estimation par valeur inférieure du Reynolds d'apparition des bouffées turbulentes. Leur coefficient de frottement maximal donnerait aussi l'ordre de grandeur du coefficient de frottement des écoulements turbulents modérément développés.

Nous avons développé un code pseudo spectral de type Petrov-Galerkin pour calculer des ondes non linéaires tridimensionnelles en écoulements en tuyau d'un fluide obéissant à la loi de Carreau [8]. Nous présenterons des résultats récents pour différentes valeurs du nombre d'onde azimutal fondamental, avec optimisation du nombre d'onde axial, qui confirment l'effet de retard à l'apparition des ondes établi dans [8], et montrent de plus un effet de réduction du coefficient de frottement maximal des ondes. On tentera un parallèle entre ce dernier résultat et le fameux effet de réduction de frottement par ajout de polymères dans un fluide newtonien [1]. Ce parallèle ouvre une nouvelle piste pour l'étude théorique de ce phénomène qui reste mal compris : la rhéofluidification pourrait contribuer à la réduction de frottement.

Références

1. M. P. Escudier, F. Presti & S. Smith, Drag reduction in the turbulent pipe flow of polymers, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **81**, 197 (1999).
2. M. Escudier, R. Poole, F. Presti, C. Dales, C. Nouar, C. Desaubry, L. Graham & L. Pullum, 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).
3. M. Escudier, S. Rosa & R. Poole, Asymmetry in transitional pipe flow of drag-reducing polymer solutions, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **161**, 19 (2009).
4. R. Bird, R. Armstrong & O. Hassager, Dynamics of polymeric liquids. Wiley - Interscience, New-York (1987).
5. H. Faisst & B. Eckhardt, Traveling waves in pipe flow, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 224502 (2003).
6. H. Wedin & R. Kerswell, Exact coherent structures in pipe flow : travelling wave solutions, *J. Fluid Mech.* **508**, 333 (2004).
7. F. H. Busse, Visualizing the dynamics of the onset of turbulence, *Science* **305**, 1574 (2004).
8. N. Roland, E. Plaut & C. Nouar, Petrov-Galerkin computation of nonlinear waves in pipe flow of shear-thinning fluids : first theoretical evidences for a delayed transition, *Computers & Fluids* **39**, 1733 (2010).

Topologie du chaos toroïdal produit par un double pendule actif

Martin Rosalie¹, Davidson Firmo², Leonardo Tôrres² & Christophe Letellier¹

¹ CORIA UMR 6614 — Université de Rouen, Av de l'Université, BP 12, F-76801 Saint-Etienne du Rouvray Cedex, France

² Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brazil

`martin.rosalie@coria.fr`

Le système dynamique ici étudié est un double pendule actif qui présente la particularité de compenser la dissipation d'énergie par frottements à l'aide d'un mécanisme constitué d'un moteur commandé par une boucle de rétroaction basée sur la vitesse angulaire : des oscillations entretenues peuvent ainsi être observées [1]. Le système dynamique associé à ce double pendule est donc dissipatif, mais l'apport « contrôlé » d'énergie permet d'obtenir des attracteurs chaotiques. Après avoir réalisé un plongement différentiel du portrait de phase à partir de la variable θ_1 , nous avons supprimé la symétrie centrale par construction d'un système image, étape simplificatrice de la caractérisation topologique de systèmes équivariants (pourvus de propriétés de symétrie) [2]. Nous avons trouvé une cascade de doublements de période en faisant varier le paramètre V_a . Nous avons choisi d'étudier la topologie de la dynamique du double pendule peu après le point d'accumulation de cette cascade, là où le chaos est encore lacunaire [3,4], choix qui permet d'éviter à la trajectoire de recouvrir l'ensemble de la surface du tore et, par conséquent, d'éviter l'écueil important dans la caractérisation topologique du chaos toroïdal par un gabarit. En effet, la construction d'une surface branchée « toroïdale » est un problème ouvert. Ceci constitue donc une première étape dans la caractérisation topologique de la dynamique du double pendule et, plus généralement, de tout chaos toroïdal. Un gabarit d'un attracteur du système image du double pendule est donc établi. Par construction de la couverture sous une symétrie centrale de ce gabarit, la topologie de l'attracteur plongé dans l'espace des phases original est ensuite proposée.

Références

1. D.L. FIRMO, L. A. B. TÔRRES, & E. G. NEPOMUCENO, Simulation and dynamical characterization of an active mechanical chaotic double pendulum, *Proceedings of COBEM*, 2007
2. C. LETELLIER, R. GILMORE & T. JONES, Peeling bifurcations of toroidal chaotic attractor, *Physical Review E*, **76**, 066204 (2007)
3. C. LETELLIER, V. MESSENGER & R. GILMORE, From quasiperiodicity to toroidal chaos : analogy between the Curry-Yorke map and the van der Pol system, *Physical Review E*, **77**, 046203 (2008)
4. M. ROSALIE & C. LETELLIER, Vers une topologie du chaos toroïdal, *Comptes-Rendus des Rencontres du Non Linéaire*, **14**, 151-156 (2011)

Formes Normales d'Observabilités Quadratiques de Poincaré

Driss Boutat¹, Latifa Boutat-Baddas,² et Jean-Pierre Barbot³

¹ Loire Valley University, ENSI de Bourges, Institut PRISME, 88, Boulevard Lahitolle 18020 Bourges Cedex

² ECS ENSEA, 6, avenue du Ponceau 95014 Cergy-Pontoise Cedex, et EPI Non-A, INRIA Lille-Nord Europe, France

³ CRAN-CNRS, UHP NancyI, IUT de Longwy 186, rue de Lorraine, 54400 Cosnes-et-Romain

`driss.boutat@ensi-bourges.fr`

Les conditions géométriques, introduites par Krener et Isidori [2], de la mise sous forme normal d'observabilité de Brunovsky [7] d'un système non linéaire sont souvent trop restrictives.

Pour les systèmes linéairement observables avec un mode inobservable, dans Boutat-Baddas et al. [6], nous nous sommes basés sur l'approche de l'approximation quadratique de Poincaré [1] pour mettre au point une forme normale modulo l'injection de termes quadratiques entrées-sorties. Cette forme permet de concevoir des observateurs non-linéaires simples (souvent appelés, dans l'industrie, capteurs logiciels). Ceci est due aux faits que les propriétés d'observabilité sont clairement exprimées sous cette forme et que la structure choisie pour représenter chaque classe d'équivalence est dédiée à la synthèse d'observateur. Grâce à ceci, nous avons donné plusieurs applications en cryptographie [5].

Dans cette communication, comme un complément de notre précédente approche, nous revenons au concept de base géométrique pour les systèmes mono sortie linéairement observables, afin de mettre en évidence les propriétés structurelles géométriques par rapport à la sortie. Nous mettons en jeu une liste de nombre caractéristiques d'observabilité quadratique qui permettent de caractériser la partie quadratique de tels systèmes. Nous proposons la même analyse, que celle de Kang et Krener [3] et celle de Boutat et Barbot [4] pour les systèmes commandables.

Références

1. H. Poincaré, Méthodes nouvelles de la mécanique céleste, Gauthier- Villars, 1899.
2. A. Krener and A. Isidori, 'Linearization by output injection and nonlinear observer', Systems & Control Letters, Vo 3, pp 47-52, 1983.
3. W. Kang and A.J. Krener, 'Extended quadratic controller normal form and dynamic state feedback linearization of non linear systems', SIAM J. Control and Optimization, Vol 30, No 6, pp 1319-1337, 1992.
4. D. Boutat and J.P. Barbot, 'Poincaré normal form for a class of driftless systems in a one dimensional submanifold neighborhood', Mathematic of Control, Signals and Systems, Vol. 15, pp. 256-274, 2002.
5. L. Boutat-Baddas, J.P. Barbot, D. Boutat, R. Tauleigne 'Observability bifurcation versus observing bifurcations ', Proc. of the 15 th IFAC, 2002.
6. L. Boutat-Baddas, D. Boutat and J.P. Barbot "Observability analysis by Poincaré normal forms" Mathematics of Control Signals and Systems 21, 2 (2009) 147-170
7. P. Brunovsky, 'A classification of linear controllable systems', Kybernetika Vo 6, pp 173-188 1970.

Théorie de l'anharmonicité des phénomènes périodiques non-linéaires

Patrick Hanusse

Centre de Recherche Paul Pacal, CNRS-Université de Bordeaux, Avenue A. Schweitzer, 33600, Pessac
hanusse@crpp-bordeaux.cnrs.dr

Les phénomènes périodiques représentent l'une des manifestations les plus répandues du monde physique. Nous considérons ici la description des aspects non-linéaires communs à une très large classe de systèmes physiques.

De manière typique, un système physique qui entre en oscillation, produit initialement un signal harmonique simple, puis développe des comportements anharmoniques et éventuellement des phénomènes de plus grande complexité dynamique. Nous considérons ici des oscillations «simples», ne possédant qu'un maximum et un minimum par période, mais dont la morphologie peut-être extrêmement anharmonique. De telles «oscillations de relaxation» sont fréquentes dans de nombreux domaines.

Fondamentalement, nous voulons répondre à la question suivante : est-il possible de définir des paramètres morphologiques universels, en petit nombre, en plus de période et amplitude, qui expriment l'essentiel du phénomène physique et mesurent les propriétés de la dynamique ou de la structure du système. En d'autres termes, est-il possible de concevoir une théorie générique de l'anharmonicité ? La réponse est oui !

Nous savons que les séries de Fourier permettent de décrire des signaux périodiques quelconques. Mais la morphologie de signaux périodiques non-linéaires décrite par un grand nombre d'harmoniques n'exprime pas beaucoup de sens physique et une telle quantité de données ne correspond pas à la mesure visuelle intuitive que nous faisons de la complexité de tels signaux.

En décrivant la dynamique de phase d'un phénomène oscillant quelconque au voisinage d'une situation générique harmonique et les brisures de symétries successives quelle peut subir, nous élaborons une approche totalement originale. La forme générale de cette dynamique de phase est construite et une solution générale est obtenue. A cette fin de nouveaux outils mathématiques sont développés et d'importants résultats sont obtenus. Un nouveau théorème de factorisation des fonctions périodiques est établi et de nouvelles fonctions trigonométriques non-linéaires sont introduites, ouvrant un champ nouveau à explorer, véritable "trigonométrie non-linéaire"

Cette solution générale conduit très naturellement à la définition de nouvelles grandeurs mesurables qui caractérisent la distance à l'harmonicité et la classe morphologique du comportement. Nous montrons qu'un nombre très petit de ces quantités, typiquement deux, parfois quatre, suffisent à décrire de façon précise et pertinente des signaux même extrêmement anharmoniques, quantitativement et qualitativement, et portent un sens physique clair et universel qui exprime la signature dynamique ou structurelle du système physique qui a produit ce signal.

Il existe de nombreuses applications, dans des domaines très divers, dont nous présenterons quelques exemples. Ces résultats, qui présentent une forte potentialité de développements, ont une portée considérable et constituent une percée majeure dans la description des phénomènes périodiques du monde physique.

Ces travaux introduisent donc non seulement de nouvelles mesures mais aussi un nouveau langage pour parler des phénomènes périodiques non-linéaires.

Références

Patrick Hanusse, *A Novel Approach to Anharmonicity for a Wealth of Applications in Nonlinear Science Technologies*, AIP Conf. Proc. 1339, 303-308, 2011

Convergence géométrique à deux échelles dans le formalisme covariant. Applications à l'équation de Vlasov homogénéisée.

Back Aurore¹ & Frénod Emmanuel²

¹ Post-doc, Centre de physique théorique-CNRS, Marseille, aure.back@cpt.univ-mrs.fr

² Université de Bretagne-Sud, Vannes, Emmanuel.Frenod@univ-ubs.fr
aurore.back@cpt.univ-mrs.fr

La convergence à deux échelles initiée par Nguetseng [7] et reprise par Allaire [1] permet d'établir des résultats de convergence pour une suite de fonctions $(u^\epsilon)_{\epsilon>0}$ définie dans un ouvert W de \mathbb{R}^n et présentant des oscillations de période ϵ vers une fonction $u_0(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ définie sur $W \times \mathbb{R}^n$ et périodique en \mathbf{y} . Le principe est le suivant : on fixe la période et on a u^ϵ qui est solution d'une équation de la forme

$$L^\epsilon u^\epsilon = f,$$

sur l'ouvert W avec L^ϵ est un opérateur différentiel présentant des oscillations de période ϵ et f un terme source indépendant de ϵ (on peut ajouter également des conditions au bords appropriées). On dira alors que la suite de fonction $(u^\epsilon)_{\epsilon>0}$ dans $L^r(W)$ pour $r \in]1, +\infty]$ converge à deux échelles vers une fonction U dans l'espace $L^r(W, L^r_{per}(Y))$ si pour toute fonction $\psi \in C_c^\infty(W, C^\infty_{per}(Y))$ on a

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_W u^\epsilon(\mathbf{x}) \psi(\mathbf{x}, \frac{\mathbf{x}}{\epsilon}) d\mathbf{x} = \int_Y \int_W U(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \psi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dx dy.$$

U est alors appelé la limite à deux échelles de u^ϵ dans $L^r(W, L^r_{per}(Y))$. Nguetseng [7] et Allaire [1] ont établi un critère de convergence à deux échelles qui sera très utile pour établir un système d'équations différentielles vérifié par la limite deux échelles. Frénod, Sonnendrücker [3], Han-Kwan [4] et bien d'autres ont utilisé ces outils dans le cadre de l'équation de Vlasov-Poisson.

Comme les équations de la Physique peuvent s'écrire en utilisant les formes différentielles, on propose ici de développer la convergence à deux échelles dans le cadre de la géométrie différentielle [2,8]. On peut alors montrer que cette convergence géométrique à deux échelles résulte du théorème de Birkhoff et permet de travailler dans un cadre plus adapté pour les équations (les variétés différentielles). Il est alors intéressant d'appliquer cette théorie sur l'équation de Vlasov. En adimensionnant celle-ci on arrive à mettre en évidence le rayon de Larmor fini [3] et on fait donc apparaître dans cette équation les oscillations de période ϵ . On peut ainsi l'écrire sous la forme $L^\epsilon u^\epsilon = 0$. On utilisera alors la convergence géométrique à deux échelles sur l'équation de Vlasov et on établira une équation différentielle vérifiée par la limite deux échelles.

Références

1. Allaire G., Homogenization and two-scale convergence, SIAM J. Math. Anal., 1992.
2. Back A., Étude théorique et numérique des équations de Vlasov-Maxwell dans le formalisme covariant, Thèse, 2011.
3. Frénod E. and Sonnendrücker E., The finite Larmor radius approximation, SIAM J. Math. Anal., 2001.
4. Han-Kwan D., The three-dimensional finite Larmor radius approximation, Asymptot. Anal., 2010.
5. Hopf E., Statistik der geodätischen Linien in Mannigfaltigkeiten negativer Krümmung, Ber. Verh. Sächs. Akad. Wiss. Leipzig, 1939.
6. Mautner F. I., Geodesic flows on symmetric Riemann spaces, Ann. of Math. (2), 1957.
7. Nguetseng G., A general convergence result for a functional related to the theory of homogenization, SIAM J. Math. Anal., 1989.
8. Pak H. C., Geometric two-scale convergence on forms and its applications to Maxwell's equations, Proc. R. Soc. Edinb., Sect. A, Math., 2005.

Turbulence anisotrope des ondes pseudo-alfvéniqes en deux dimensions.

Tronko Natalia¹, Sébastien Galtier², & Sergey Nazarenko³

¹ Centre for Fusion Space and Astrophysics, University of Warwick, Gibbet Hill road, CV4 7AL Coventry, UK

² Institut d'Astrophysique Spatiale UMR 8617 - Université Paris-Sud Bât. 121, F-91405 Orsay Cedex, France

³ Department of Mathematics, University of Warwick, Gibbet Hill road, CV4 7AL Coventry, UK

nathalie.tronko@gmail.com

La Magnéto-Hydro-Dynamique (MHD) représente un outil de travail unique pour l'étude du comportement turbulent des plasmas astrophysiques (comme le vent solaire) ou de laboratoire.

Notre travail s'est focalisé sur le régime de la turbulence faible, appelé aussi turbulence d'ondes, pour le système MHD incompressible en deux dimensions (2D). On considère la présence d'un fort champ magnétique ambiant \mathbf{B}_0 appartenant au même plan que les champs fluctuants : $(\tilde{\mathbf{b}}, \tilde{\mathbf{v}})$ et on met en évidence des différences importantes avec le cas à trois dimensions (3D) où le champ \mathbf{B}_0 est perpendiculaire au plan des perturbations [1]. L'objectif de ce travail est aussi de mettre en garde contre l'utilisation parfois abusive de modèles ou de simulations 2D pour décrire le cas 3D très anisotrope.

Il est bien connu que le comportement de la turbulence MHD 3D est qualitativement différent de la turbulence classique. Dans le cas qui nous intéresse, la turbulence MHD tend vers un état très anisotrope tel que $k_{\parallel} \gg k_{\perp}$: en présence d'un fort champ magnétique ambiant, la cascade d'énergie se fait essentiellement, voire exclusivement, dans la direction perpendiculaire au champ.

L'outil principal de notre travail est le formalisme ondulatoire-cinétique résumé dans les ouvrages de Zakharov et al.[2] et Nazarenko [3].

Deux types d'ondes d'Alfvén sont possibles en MHD 3D. Celles dont les fluctuations sont transverses au fort champ magnétique ambiant (ondes d'Alfvén de cisaillement) et celles dont les fluctuations sont le long du champ ambiant (pseudo-ondes d'Alfvén). Ces dernières sont souvent négligées en 3D car elles ont une dynamique esclave des premières. En revanche en 2D, ce sont elles qui gèrent la dynamique de la MHD.

Dans notre étude, nous montrons que le comportement de la turbulence MHD 2D est totalement différent du cas 3D présenté par [1]. Par exemple, dans le cas 2D on observe l'absence de solutions de type Kolmogorov, une absence de cascade d'énergie et donc une absence d'universalité de la turbulence. Ceci est essentiellement dû au fait que le transfert de l'énergie en 2D est donné uniquement par l'interaction des pseudo-ondes d'Alfvén avec elles-mêmes.

On montre que l'interaction triadique des pseudo-ondes d'Alfvén est non nulle et mène à une dérivation de l'équation cinétique pour le spectre de l'énergie. Un des points intéressants de cette équation est sa simplicité qui permet un traitement analytique rigoureux dans le cas d'une dissipation donnée par un frottement uniforme, et de manière qualitative dans le cas d'un frottement visqueux. Afin de compléter notre étude et mettre en évidence les principales particularités du cas 2D, le traitement numérique de l'équation cinétique de spectre d'énergie est réalisé pour le cas de frottement visqueux.

L'article qui résume les résultats de ce travail est en préparation ; il sera soumis au journal " *Physica D* ".

Références

1. Galtier S., Nazarenko S.V., et al, *A weak turbulence theory for incompressible magnetohydrodynamics*, Journal of Plasma Physics, 2000, vol.63, part.5, pp. 447-488.
2. Zakharov V.E., L'vov V.S, Falkovich, G., *Kolmogorov spectra of turbulence 1. Wave turbulence*. Springer 1992, ISBN 3-540-54533-6.
3. Nazarenko S.V. *Wave turbulence*, The Lecture Notes in Physics, Springer 2010, ISBN 978-3-642-15942-8.

Accrochage de fréquence sans accrochage de phase de deux modes laser couplés

Jérémy Thévenin¹, Marco Romanelli¹, Marc Brunel¹, Marc Vallet¹, et Thomas Erneux²

¹ Institut de Physique de Rennes, UMR CNRS 6251, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, F-35042 Rennes Cedex, France

² Université Libre de Bruxelles, Optique Non Linéaire Théorique, Campus Plaine, CP 231, 1050 Bruxelles, Belgique

marco.romanelli@univ-rennes1.fr

La tendance des oscillateurs couplés à se verrouiller sur une fréquence commune est observée dans un grand nombre de systèmes, comme les oscillateurs biologiques, les réactions chimiques, les oscillateurs électriques, les lasers, etc. [1]. Quand l'amplitude des oscillations est constante, on peut souvent modéliser le système avec l'équation d'Adler :

$$\frac{\dot{\Phi}}{2\pi} = \Delta\nu - f_A \sin \Phi, \quad (1)$$

où Φ est la phase relative entre les oscillateurs, $\Delta\nu$ le désaccord entre leur fréquences propres, et f_A l'intensité du couplage, ramenée à une fréquence.

L'éq. 1 montre que le comportement de deux oscillateurs couplés est déterminée par le rapport $\Delta\nu/f_A$. Si $|\Delta\nu/f_A| \leq 1$, l'éq. 1 admet une solution stationnaire stable, ce qui signifie que les phases des deux oscillateurs se verrouillent. Au contraire, si $|\Delta\nu|$ est supérieur à f_A , les deux oscillateurs ne parviennent pas à se synchroniser, et leur phase relative croît indéfiniment. Ce comportement simple est bien vérifié, par exemple, par deux lasers de classe A couplés, dans les limites de couplage et désaccord faibles [2]. D'autre part, des analyses théoriques [3,4] ont montré que, pour des lasers de classe B couplés, l'amplitude des oscillations ne peut plus être évacuée du problème. Il en résulte une dynamique bien plus complexe, et, en particulier, un régime intermédiaire entre l'accrochage de phase et le décrochage pur et simple apparaît, pour certaines valeurs des paramètres. Dans ce régime, la phase relative n'est pas stationnaire, cependant elle reste bornée. Cela implique que les oscillateurs ont la même fréquence moyenne, c'est pourquoi nous parlons d'accrochage de fréquence sans accrochage de phase. Ce régime de synchronisation n'est pas spécifique aux lasers (il a été prédit également pour des oscillateur de van der Pol couplés [5]), mais, à notre connaissance, aucune observation expérimentale d'un tel comportement n'avait été reportée.

Nous avons réalisé une expérience permettant d'observer l'accrochage de fréquence sans accrochage de phase [6]. Nous avons mesuré la phase relative entre deux modes laser couplés par rétroaction optique et trouvé que, pour $\Delta\nu > f_A$, elle demeure bornée ; la plage de synchronisation s'étend ainsi au-delà de f_A , même s'il s'agit d'une synchronisation "imparfaite". Expérimentalement, l'accrochage de fréquence sans accrochage de phase apparaît lorsque $\Delta\nu \simeq f_R$, où f_R est la fréquence des oscillations de relaxation caractéristique des lasers de classe B [2]. Près de la résonance, les modes laser sont très sensibles au couplage, et par conséquent on observe la synchronisation pour des taux de couplage extrêmement faibles (la puissance réinjectée d'un mode vers l'autre vaut environ 10^{-5} en valeur relative).

Références

1. A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths, *Synchronization : a universal concept in nonlinear sciences*, (Cambridge University Press, Cambridge, England, 2001).
2. T. Erneux and P. Glorieux, *Laser Dynamics*, (Cambridge University Press, Cambridge, England, 2010).
3. P. A. Braza and T. Erneux, Phys. Rev. A **41**, 6470 (1990).
4. M. K. Stephen Yeung and S. H. Strogatz, Phys. Rev. E **58**, 4421 (1998).
5. R. E. Kronauer, C. A. Czeisler, S. F. Pilato, M. C. Moore-Ede, et E. D. Weitzman, Am. J. Physiol. **242**, R3 (1982) ; T. Chakraborty and R. H. Rand, Int. J. Non-Linear Mech. **23**, 369 (1988).
6. J. Thévenin, M. Romanelli, M. Vallet, M. Brunel, et T. Erneux, Phys. Rev. Lett. **107**, 104101 (2011).

Instanton Trajectories for Random Transitions in Turbulent Flows

Freddy Bouchet¹ & Jason Laurie¹

Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon, CNRS, UMR 5672, Université de Lyon, 46 allée d'Italie, 69007, Lyon, France

Freddy.Bouchet@ens-lyon.fr

Many turbulent flows undergo sporadic random transitions after long periods of very apparent statistical stationarity. For instance, the Earth's magnetic field reversal or in MHD experiments [1], 2D turbulence experiments [2], atmospheric flows [4] and for paths of ocean currents [5]. This phenomena is far from understood due to the complexity, the large number of degrees of freedom, and the non-equilibrium nature of many of these flows.

A straightforward numerical approach, by direct numerical simulation of the governing equations is just impracticable due the extremely long time between two transitions and to the very high Reynolds number and degrees of freedom involved. In this talk, we will present an alternative strategy, in which we apply instanton theory.

The transition probability is then represented as a path integral over all possible paths between the two states :

$$P(x, t; x(0) = x_0, x(T) = x_T) = \int \mathcal{D}[x] e^{-\frac{1}{4\alpha} S(x)}. \quad (1)$$

Instanton theory uses the saddle point method in the limit of small noise ($\alpha \rightarrow 0$) to show that the most probable transition trajectory (and henceforth the maximizer of the exponential) is the trajectory that minimizes the action $S(x)$ - this trajectory is what is know as the instanton.

In this talk, we present results on applying instanton theory to the 2D Navier-Stokes equations. We show that by minimizing an appropriate action, we can predict the most probable instanton trajectory between two non-equilibrium stationary states and estimate the period of its occurrence. This work is the first application of this promising approach to turbulence problems.

We consider the 2D stochastic Navier-Stokes equations. In a regime of small forces and dissipations, the largest scales of the flow self-organize to produces coherent jets and vortices. Moreover it was recently shown that over long times, random switchings between two non-equilibrium stationary states can occur - more precisely between a parallel and dipole flow [6]. We compute the instanton trajectory and the transition time for observing such a trajectory within the 2D stochastic Navier-Stokes equations and finally, we will discuss the applicability to more complex turbulent flows that show bistability behavior, such as the Kuroshio ocean current [5].

Références

1. Berhanu, M., et al. : Magnetic field reversals in an experimental turbulent dynamo. *Europhys. Lett.* **77** :59001, 2007.
2. Sommeria, J. : Experimental study of the two-dimensional inverse energy cascade in a square box. *J. Fluid Mech.* **170** :139–168, 1986.
3. Ravelet, F., Marié, L., Chiffaudel, A., Daviaud, F. : Multistability and memory effect in a highly turbulent flow : experimental evidence for a global bifurcation. *Phys. Rev. Lett.* **93** :164501, 2004.
4. Weeks, E. R., Tian, Y., Urbach, J. S., Ide, K., Swinney, H. L., Ghil, M. : Transitions between blocked and zonal flows in a rotating annulus with topography. *Science* **278** :1598–1601, 1997.
5. Schmeits, M. J., Dijkstra, H. A., Bimodal behavior of the Kuroshio and the Gulf stream. *J. Phys. Oceanogr.* **31** :3435–3456, 2001.
6. Bouchet, F., Simonnet, E. : Random change of flow topology in two-dimensional and geophysical turbulence. *PRL* **102** :94504, 2009.

Emergence de microstructures dans le cancer de la peau

T. Balois¹, C. Chatelain¹, P. Ciarletta² & M. Ben Amar¹

¹ Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, Paris, France

² CNRS et Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Institut Jean le Rond d'Alembert, Paris, France

benamar@lps.ens.fr

Le diagnostic clinique des cancers de la peau est basé sur plusieurs critères morphologiques, l'un d'entre eux est la présence de microstructures (i.e. petite pigmentation, nests)[1] répartis de façon éparse sur la lésion tumorale. Cependant, l'origine physique de ces structures reste inconnue. Dans cette étude, nous démontrons que ces patterns peuvent provenir d'un procédé de séparation de phase à l'aide d'un modèle mutiphase[2].

En l'absence de prolifération, nous utilisons un modèle de mélange binaire[3] (composé de cellules cancéreuses d'une part et d'autres part des cellules saines, du liquide extracellulaire, de la matrice extracellulaire...) pour représenter le comportement mécanique des cancers de la peau. Celui-ci contient une interaction entre cellules cancéreuses aboutissant à une équation maîtresse ressemblant à une équation du type Cahn-Hilliard. Nous montrons numériquement et analytiquement, que cette équation maîtresse aboutit elle aussi à un processus de séparation de phases.

Nous prenons ensuite en compte le couplage entre les cellules et les nutriments, c'est-à-dire la prolifération des cellules cancéreuses et la consommation de nutriments, et nous montrons que ce modèle à deux phases peut lui aussi subir une décomposition spinodale même en considérant les échanges de masse entre les deux phases.

Cependant, l'interaction nutriment-cellule définit une longueur caractéristique de diffusion, qui limite la croissance des domaines séparés, stabilisant ainsi la microstructure aux grandes échelles. La distribution et l'évolution de la forme de ces clusters prédits par notre modèle, sont comparés avec succès aux observations cliniques des microstructures dans les lésions tumorales.

Références

1. G. ARGENZIANO *et al*, Dermoscopy of pigmented skin lesions : results of a consenses meeting via internet, *J. of the American Academy of Dermatology*, **48** , 679-693 (2003).
2. P. CIARLETTA, L. FORET, & M. BEN AMAR, The radial growth phase of malignant melanoma, *J. Roy. Soc. Interface*, **8** , 345-368 (2011).
3. C. CHATELAIN, P. CIARLETTA, & M. BEN AMAR, Morphological changes in early melanoma development : Influence of nutrients, growth inhibitors and cell-adhesion mechanisms, *J. of Theoretical Biology*, **290** , 46-59 (2011).

Localisation et renversement du champ magnétique : un même modèle pour les dynamos cosmiques et l'expérience VKS ?

Stephan FAUVE

Laboratoire de Physique Statistique, École normale supérieure, Paris

Les renversements du champ magnétique terrestre sont sans doute sa caractéristique la plus spectaculaire. Un tel comportement n'a été observé au laboratoire qu'en 2006 dans l'expérience VKS. Certains des nombres sans dimension caractérisant les écoulements dans le noyau terrestre diffèrent de plus de six ordres de grandeur de ceux de l'expérience. De plus, ces écoulements ne présentent pas les mêmes symétries. Cependant, nous avons montré que dans les deux cas, une brisure de symétrie de l'écoulement couple les modes dipolaire et quadrupolaire du champ magnétique. Ceci permet de comprendre les caractéristiques essentielles des renversements du champ magnétique terrestre ainsi que de ceux observés dans l'expérience VKS. Le même modèle illustre de façon simple un autre phénomène présent dans certaines dynamos planétaires et stellaires : la localisation du champ magnétique dans un seul des hémisphères. Plus généralement, de nombreux exemples de renversement d'un champ de vecteurs à grande échelle en présence d'un écoulement turbulent, semblent résulter d'une dynamique résultant de l'interaction entre quelques modes de symétries différentes.