

É. FALCON, M. LEFRANC
F. PÉTRÉLIS, C.-T. PHAM
ÉDITEURS

Livret des résumés de la 22^e
Rencontre du Non-Linéaire
Paris 2019

Université Paris Diderot
Non-Linéaire Publications

Table des matières

Résumés des exposés

Convection in a “centrifuge” <i>Thierry Alboussière</i>	3
Dynamics and fragmentation of small flexible fibers in turbulence <i>Sofía Allende, Christophe Henry, Jérémie Bec</i>	4
Ailes battantes à rigidité anisotrope inspirées de l’insecte <i>Romeo Antier, Sophie Ramanarivo, Benjamin Thiria, Ramiro Godoy-Diana</i>	5
Quel est l’impact des vagues sur la turbulence atmosphérique ? <i>Alex Ayet, Bertrand Chapron, Jean-Luc Redelsperger, Guillaume Lapeyre, Louis Marié</i>	6
Dynamics of an artificial aquatic blade subjected to von Kármán vortices <i>Yohann Bachelier, Delphine Doppler, Joseph John Soundar Jerome, Nicolas Rivière</i>	7
Effet de viscosité élongationnelle de l’écoulement Streaming généré par un cylindre vibrant <i>S. Amir Bahrani, Maxime Costalonga, Laurent Royon, Philippe Brunet</i>	8
Bifurcations de l’équation de Vlasov <i>Julien Barré, David Métivier, Yoshiyuki Y. Yamaguchi</i>	9
Turbulence lagrangienne, irréversibilité et flots généralisés <i>Jérémie Bec, Simon Thalabard</i>	10
Cycles limites et quasipériodiques dans une cavité cisailée <i>Yacine Bengana, Laurette S. Tuckerman</i>	11
Forced three-wave interactions of capillary-gravity waves <i>Michael Berhanu, Annette Cazaubiel, Florence Haudin, Eric Falcon</i>	12
Instabilités et formation de patterns dans les électrons relativistes : observations directes et modélisation <i>C. Szwej, C. Evain, E. Burkard, E. Roussel, M. Le Parquier, Serge Bielawski, F. Ribeiro, M. Labat, N. Hubert, J.-B. Brubach, P. Roy, E. Blomley, M. Brosi, E. Brüdermann, S. Funkner, N. Hiller, M. J. Nasse, G. Niehues, M. Schedler, P. Schönfeldt, J. L. Steinmann, S. Walther, A.-S. Müller</i> ..	13
Spatio-temporal dynamics of semiconductor microlasers with chaotic ray dynamics <i>Stephan Bittner, Stefano Guazzotti, Yongquan Zeng, Kyungduk Kim, Qi Jie Wang, Ortwin Hess, Hui Cao</i>	14

Observation de la modulation non-linéaire contra-propagative des bords d'un train d'onde de gravité à la surface d'un fluide	
<i>Féliçien Bonnefoy, Pierre Suret, Alexey Tikan, Francois Copie, Gaurav Prabhudesai, Guillaume Michel, Annette Cazaubiel, Eric Falcon, Gennady El, Stéphane Randoux</i>	15
Transition to the ultimate regime in a radiatively driven convection experiment	
<i>Vincent Bouillaut, Simon Lepot, Sébastien Aumaître, Basile Gallet</i>	16
3D inertial wave attractors	
<i>Samuel Boury, Thierry Dauvois, Evgeny Ermanyuk, Sylvain Joubaud, Philippe Odier, Ilias Sibgatullin</i>	17
Instabilités oscillatoires en milieu poreux d'un fluide en équilibre diphasique	
<i>Alexis Bres, François Pétrélis, Stéphan Fauve</i>	18
Attracteur d'ondes d'inertie en régime linéaire et non linéaire	
<i>Maxime Brunet, Thierry Dauvois, Pierre-Philippe Cortet</i>	19
Croissance d'arbre soumis à des règles d'allocation de ressource	
<i>Olivier Bui, Xavier Leoncini</i>	20
Écoulement gaz-liquide dans un milieu poreux confiné : caractérisation par analyse d'images	
<i>Thomas Busser, Barbara Pascal, Nelly Pustelnik, Patrice Abry, Marion Serres, Régis Philippe, Valérie Vidal</i>	21
Generalized dimensions and local indicators of dynamical systems	
<i>Théophile Caby, Davide Faranda, Giorgio Matnica, Sandro Vaienti, Pascal Yiou</i>	22
Turbulence d'ondes en hypergravité	
<i>Annette Cazaubiel, S. Mawet, A. Darras, G. Grojean, J. W. A. van Loon, S. Dorbolo, É. Falcon</i> ..	23
Multi-stable liquid funnel-like interfaces induced by optical radiation pressure	
<i>Hugo Chesneau, Julien Petit, Nicolas Bertin, Hamza Chraïbi, Étienne Brasselet, Régis Wunenburger, Jean-Pierre Delville</i>	24
Turbulence in edge tokamak plasma and interaction with magnetic X-point configuration in 3D fluid simulations	
<i>Guido Ciraolo, Davide Galassi</i>	25
Interaction onde-écoulement moyen en hydrodynamique dispersive	
<i>Thibault Congy, Gennady El, Mark Hoefler</i>	26
Intermittence et multi-stabilité d'un tube mou parcouru par un écoulement d'air	
<i>Anne Cros, Arturo Orozco Estrada, Ricardo Morales Hernández, Ricardo Lima</i>	27
Convective patterns in viscous planetary interiors	
<i>Anne Davaille</i>	28
Dynamique de sédimentation de particules	
<i>David De Souza, Romain Monchaux, Anne Dejoan</i>	29
Topology of quasi-singularities in an experimental turbulent swirling flow	
<i>Paul Debue, Valentina Valori, Yasar Ostovan, Christophe Cuvier, Jean-Philippe Laval, Jean-Marc Foucaut, Bérengère Dubrulle, François Daviaud</i>	30
Mathematical models of self-organization	
<i>Pierre Degond</i>	31

Comportement asymptotique de populations hétérogènes avec interactions <i>Antonin Della Noce, Amélie Mathieu, Paul-Henry Cournède</i>	32
Dynamiques transitoires de sillage dans le « pinball fluide » <i>Nan Deng, Luc R. Pastur, Bernd R. Noack, Guy Cornejo-Maceda, François Lusseyran, Jean-Christophe Loiseau, Marek Morzyński</i>	33
Solutal convection induced by dissolution <i>Julien Philippi, Michael Berhanu, Sylvain Courrech du Pont, Julien Derr</i>	34
Rivers in the lab <i>Olivier Devauchelle, Anaïs Abramian, Éric Lajeunesse, Pauline Delorme, François Métivier, Laurie Barrier</i>	35
Vers une standardisation des ultrasons non linéaires pour le contrôle non destructif du futur <i>Serge Dos Santos, Ali Masood, Martin Lints, Denis Arruga, Giuseppe Nardoni</i>	36
Dynamique non-linéaire du centre guide d'un électron soumis à un champ laser de forte intensité <i>Jonathan Dubois, Simon A. Berman, Cristel Chandre, Turgay Uzer</i>	37
Du tout simple au très compliqué : itinéraire dans la non-linéarité des plasmas <i>Dominique Escande</i>	38
Contrôle d'une instabilité spatio-temporelle affectant les électrons relativistes dans les centres de rayonnement synchrotron <i>Clément Evain, C. Sz waj, E. Roussel, M. Le parquier, M.-A. Tordeux, M. Labat, F. Ribeiro, N. Hubert, J.-B. Brubach, P. Roy, S. Bielański</i>	39
Analyse d'échelles dans un écoulement de Von Kármán numérique <i>Hugues Faller, Caroline Nore, Bérengère Dubrulle, Loïc Cappanera, Jean-Luc Guermond</i>	40
Condensation sous-critique en convection de Rayleigh–Bénard en rotation <i>Benjamin Favier, Céline Guervilly, Edgar Knobloch</i>	41
La bataille d'Actium et le Mythe de l'échénéis-remora. <i>Johann Fourdrinoy, Clément Caplier, Yann Devaux, Areti Gianni, Ierotheos Zacharias, Isabelle Jouteur, Paul Martin, Julien Dambrine, Madalina Petcu, Morgan Pierre, Germain Rousseaux</i>	42
Fluidisation d'un empilement granulaire bidimensionnel par le fond mobile d'un plan incliné <i>Nathalie Fraysse, Cyrille Claudet</i>	43
Ondes de relief et sillage émis par un courant géostrophique <i>Cruz Garcia-Molina, Chantal Staquet, Joël Sommeria, Bruno Voisin, Adekunle Ajayi</i>	44
L'adhésion élastocapillaire permet aux coléoptères de marcher la tête en bas <i>Tristan Gilet, Sophie Marie Gernay, Pierre Lambert</i>	45
Keplerian turbulence in astrophysical accretion discs <i>Christophe Gissinger</i>	46
Le tenseur complexe de Faraday pour comprendre la non validité de la théorie de Born–Infeld <i>Michel Gondran, Abdel Kenoufi, Alexandre Gondran</i>	47

Flambage d'une tige dans un milieu granulaire <i>Antoine Seguin, Philippe Gondret</i>	48
Mélange et démelange induits par des particules actives de camphre. <i>Clément Gouiller, Laurent Maquet, Florence Raynal, Mickael Bourgoïn, Romain Volk, Cécile Cottin-Bizonne, Christophe Ybert</i>	49
Érosion par dissolution : ruissellement sur plan incliné <i>Adrien Guérin, Julien Derr, Sylvain Courrech du Pont, Michael Berhanu</i>	50
Le ludion dans un fluide stratifié : une dualité onde corpuscule ? <i>Benjamin Castillo Morales, Sergio Hernández Zapata, Gerardo Ruiz Chavarria, Patrice Le Gal</i> ...	51
Dynamics of a reactive spherical particle falling in a linearly stratified layer <i>Ludovic Huguët, Michael Le Bars</i>	52
Long-time evolution of optical pulses in a nonlinear medium <i>Mathieu Isoard, Anatoly M. Kamchatnov, Nicolas Pavloff</i>	53
Fluid-particle suspension by gas release from a granular bed <i>Valérie Vidal, Tess Homan, Clément Picard, Sylvain Joubaud</i>	54
Rare transitions to a thin-layer turbulent condensate <i>Adrian van Kan, Takahiro Nemoto, Alexandros Alexakis</i>	55
Multiples attracteurs climatiques dans une planète-océan couplée <i>Maura Brunetti, Jérôme Kasparian, Christian Vérard</i>	56
Instabilité modulationnelle d'une onde plane en présence de perturbations bruyantes et localisées : expérience dans les fibres optiques <i>Adrien Kraych, Dmitry Agafontsev, Pierre Suret, Gennady El, Stéphane Randoux</i>	57
Agrégation de radeaux granulaires à une interface <i>Antoine Lagarde, Suzie Protière</i>	58
Oceanic vortices in a jar: Laboratory experiments in stratified rotating flows <i>Patrice Le Gal</i>	59
Ondes internes de gravité générées par convection turbulente <i>Pierre Léard, Patrice Le Gal, Michael Le Bars</i>	60
Mesure complète et ultra-rapide de structures non linéaires générées par l'instabilité modulationnelle en optique <i>Alexandre Lebel, Alexey Tikan, Stéphane Randoux, Pierre Suret, François Copie</i>	61
Turbulence d'ondes inertielles générée par instabilité elliptique <i>Thomas Le Reun, Benjamin Favier, Michael Le Bars</i>	62
Transition to turbulence in Couette-Poiseuille flow <i>Tao Liu, Lukasz Klotz, Benoît Semin, Ramiro Godoy-Diana, José Eduardo Wesfreid</i>	63
Un modèle fractionnaire de trafic <i>Erick Javier López-Sánchez, Patricia Eugenia Olivera-Martínez</i>	64
Dynamics of single rising bubble in suspension <i>Madec Christopher, Joseph John Soundar Jerome, Joubaud Sylvain</i>	65

Subcritical transition to turbulence in wall-bounded flows: The case of plane Poiseuille flow <i>Paul Manneville, Masaki Shimizu</i>	66
Description N-corps de l'interaction onde-particule dans une structure périodique <i>Damien F. G. Minenna, Yves Elskens, Frédéric André, Fabrice Doveil, Alexandre Poyé</i>	67
Morphogenesis and morphodynamics of sandy beaches <i>Eduardo Monsalve, S. Courrech du Pont, B. Thiria</i>	68
États transitoires dans l'écoulement de Couette plan <i>Romain Monchoux, David De Souza</i>	69
Encodage d'une information sinusoïdale dans un circuit neuronal et résonances induites par une perturbation <i>Savério Morfu, Maxime Bordet, Mathieu Rossé</i>	70
États stationnaires des plasmas de tokamak en MHD visco-résistive <i>Hanen Oueslati, Marie-Christine Firpo, Aziz Salhi</i>	71
Caractérisation et modélisation de la morphogenèse urbaine <i>Romain Pousse, Stéphane Douady</i>	72
Étude de la turbulence à très hauts Re et Gr dans le grand Taylor-Couette thermique <i>Harmander Singh, Arnaud Prigent, Hugues Besnard, Antoine Bonnesoeur, Olivier Crumeyrolle, Innocent Mutabazi</i>	73
Forces on capillary floaters <i>Giuseppe Pucci, Ian Ho, David M. Harris</i>	74
Bi-stabilité diffusive-convective en présence d'un changement de phase <i>Jhaswantsing Purseed, Benjamin Favier, Laurent Duchemin</i>	75
Drosophila during early gastrulation is not only a living being <i>Julien Fierling, Alexandre Torzynski, Catherine Quilliet, Jocelyn Etienne, Philippe Marmottant, Guy Blanchard, Claire Lye, Benedicte Sanson</i>	76
Contrôle de vitesse de flamme par un forçage paramétrique <i>Basile Radisson, Bruno Denet, Christophe Almarcha</i>	77
Zonostrophic beta-plumes, zonal jets and particle diffusivity in locally-forced shallow water experiments <i>Peter Read, Boris Galperin, Stefania Espa, Enrico Ferrero, Simon Cabanes, Federica Ivo, Massimiliano Manfrin, Hélène Scolan, Roland Young</i>	78
Unraveling nonlinearities in elastic knots <i>Pedro Reis</i>	79
Modélisation probabiliste de la structure spatio-temporelle du champ de vitesse turbulente <i>Jason Reneuve, Laurent Chevillard</i>	80
Un modèle de lithosphère en couche mince pseudo-plastique <i>Guillaume Richard, François James</i>	81
Effet de confinement lors de l'étalement de suspensions non-browniennes <i>Menghua Zhao, Alice Pelosse, Laurent Limat, Élisabeth Guazzelli, Matthieu Roché</i>	82

Méthodes d'événements rares pour l'effondrement et le développement de la turbulence de Couette plan <i>Joran Rolland</i>	83
Application de l'effet d'echo pour la génération d'harmonique d'ordre élevé dans des paquets d'électrons relativistes <i>Éléonore Roussel</i>	84
Ondes de surface produites par le déplacement d'un objet solide <i>Jose Antonio Trejo Gutierrez, Ivonne Judith Hernandez Hernandez, Gerardo Ruiz Chavarria</i>	85
Un modèle simplifié de locomotion aquatique <i>Jesus Sanchez-Rodriguez, Christophe Raufaste, Médéric Argentina</i>	86
Modèle mathématique de la dynamique de transmission de l'infection par Taenia-cysticercose <i>Norma Yanet Sánchez-Torres, Marco V. José</i>	87
Ségrégation granulaire dans les astéroïdes <i>Jérémy Sautel, Charles-Édouard Lecomte, Nicolas Taberlet</i>	88
An experimental study of turbulence generation and decay in Taylor–Couette system due to an abrupt stoppage <i>Harminder Singh, Arnaud Prigent, Innocent Mutabazi</i>	89
Experimental acoustic eigenmodes measurements: from sphere to spheroid <i>Sylvie Su, Philippe Cardin, David Cébron, Henri-Claude Nataf</i>	90
Integrable turbulence in optical fibers and 1D water tank experiments <i>Pierre Suret</i>	91
Nonlinear transport by gravity waves inside the ocean <i>Bruce R. Sutherland, Houssam Yassin, Ton S. van den Bremer</i>	92
Morphogenèse glaciaire induite par ablation différentielle <i>Nicolas Taberlet, Nicolas Plihon</i>	93
Là où l'imprédictabilité s'estompe : étude comparée de l'effet tunnel chez les marcheurs et en mécanique quantique <i>Loïc Tadrif, Tristan Gilet, Peter Schlagheck, John W. M. Bush</i>	94
Numerical modelling of edge tokamak plasma: Impact of collisionality on turbulence properties <i>Raffaele Tatali, H. Bufferand, T. Cartier-Michaud, G. Ciruolo, D. Galassi, Ph. Ghendrih, F. Nespoli, E. Serre, P. Tamain</i>	95
Wave propagation modelling in shallow water with an entire family of shallow water wave equations <i>Aurélien Serge Tchakoutio Nguetcho, Jean-Marie Bilbault, Serge Dos Santos, Michel Aillerie</i>	96
Dispersion relation for unidirectional surface gravity waves <i>Alexey Tikan, Félicien Bonnefoy, Guillaume Michel, Prabhudesai Gaurav, Annette Cazaubiel, Francois Copie, Eric Falcon, Stéphane Randoux, Pierre Suret</i>	97
How to simulate kinetic nonlinear effects in fusion plasmas <i>Natalia Tronko, Alberto Bottino, Cristel Chandre, Dominique Escande, Eric Sonnendruecker</i>	98

Cycles hétéroclines en Taylor–Couette contra-rotatif <i>Laurette S. Tuckerman, Yacine Bengana</i>	99
Perturbation theory in algebraic setting <i>Lorenzo Valvo, Michel Vittot</i>	100
Polynomial expansion of compressible modes in rotating rigid ellipsoids <i>Jérémie Vidal, Sylvie Su, David Cébron</i>	101
Interactions non linéaires d’ondes basse fréquence dans une colonne de plasma magnétisée <i>Simon Vincent, Victor Désangles, Nicolas Plihon, Vincent Dolique</i>	102
Concentration préférentielle de chaînes élastiques en turbulence <i>Jason R. Picardo, Dario Vincenzi, Nairita Pal, Samriddhi Sankar Ray</i>	103
Quadrupolar circulation in plane Couette flow <i>Zhe Wang, Yohann Duguet, Romain Monchaux</i>	104
Wrinkling and folding on soft microcapsules <i>Kaili Xie, Clément de Loubens, Marc Jaeger, Marc Leonetti</i>	105
Effet de la gravité sur le mûrissement dans un mélange binaire <i>Raphaël Zanella, Hervé Henry</i>	106
<hr/>	
Annexes	
<hr/>	
Index des auteurs	109

Résumés des communications
longues et courtes

Convection in a “centrifuge”

Thierry Alboussière

Laboratoire de Géologie, École normale supérieure de Lyon, France

thierry.alboussiere@ens-lyon.fr

Pressure plays a secondary role in usual laboratory convection experiments and industrial convection processes. This was used by Oberbeck and Boussinesq to simplify the governing equations: they assumed that, in many circumstances, density is nearly constant and that it depends on temperature only when the buoyancy force is considered. This is not the case in geophysical convective flows in the interior of stars and planets. In the Earth’s interior for instance pressure is such that the density of iron in the inner core is nearly twice that of iron on the surface. As a consequence of pressure effects, it appears clearly that vigorous convection leads to homogeneous entropy distribution in the interior of convective regions. Hence a nearly hydrostatic pressure gradient is at the origin of a so-called adiabatic temperature gradient, both leading to a uniform entropy. Another consequence is that viscous dissipation is no longer negligible and may be of the same order of magnitude as the heat flux out of the star or planet. We have built an experiment, in the rotor of a centrifuge, where the apparent gravity reaches 8,000 times the usual gravity. We have used xenon gas to maximize compressibility effects, submitted to heating from below and cooling from the top. An adiabatic gradient is indeed observed, at the expected level. However, when apparent gravity is increased, Coriolis forces increase as well. It makes it difficult to distinguish between compressibility and Coriolis effects, but we think it is worth pursuing those kind of studies, since numerical models have very few landmarks they can compare to, in the compressible regime.

Dynamics and fragmentation of small flexible fibers in turbulence

Sofia Allende¹, Christophe Henry² & Jérémie Bec¹

¹ MINES ParisTech, PSL Research University, CNRS, CEMEF

² Université Côte d'Azur, INRIA, Team TOSCA, Sophia-Antipolis, France

sofia.allende@mines-paristech.fr

The dynamics of small flexible, inextensible fibers in a turbulent flow is found to follow most of the time that of a stiff rod. Then, they are aligned with the solution to Jeffery's equation [1]. Still, this simple dynamics becomes unstable when the fiber is strongly compressed by the flow [2]. As shown in [3], such events are very rare and intermittent because of the long-term Lagrangian correlations of turbulent velocity gradients. We investigate the consequence of such a dynamics on fiber fragmentation. Two mechanisms are considered: tensile failure, when the fiber breaks because of a too strong local tension and flexural failure, when the fiber breaks because of a too strong curvature. By characterizing the statistics of the extrema of tension and of curvature, we provide estimates for the fragmentation rate. One expects large values of the tension to be attained when the fiber is in a fully straight configuration and experiences a strong stretching from the flow. The simplest fragmentation process is then due to tensile failure, because only depend on the fluctuation of the turbulent flow. Conversely, flexural failure can only occur when the fiber buckles. Fragmentation processes are hence determined by the most excited buckling mode and thus have an intricate dependence on the fiber flexibility.

References

1. A. TORNBERG & M. SHELLEY, Simulating the dynamics and interactions of flexible fibers in Stokes flows, *J. Comput. Phys.*, **196**, 8–4 (2004).
2. L. BECKER & M. SHELLEY, Instability of elastic filaments in shear flow yields first-normal-stress differences, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 198301 (2001).
3. S. ALLENDE, C. HENRY & J. BEC, Stretching and buckling of small elastic fibers in turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 154501 (2018).

Ailes battantes à rigidité anisotrope inspirées de l'insecte

Romeo Antier¹, Sophie Ramanarivo², Benjamin Thiria¹ & Ramiro Godoy-Diana¹

¹ PMMH, CNRS, ESPCI Paris-PSL Research University, Sorbonne Université, Université Paris-Diderot, France

² LadHyx, CNRS, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

romeo.antier@espci.fr

Nous étudions des modèles d'ailes battantes déformables où la rigidité structurelle est inhomogène, à l'image de ce qui se produit chez les insectes où la disposition et la taille des veines déterminent l'anisotropie de l'élasticité des ailes. Les ailes de la plupart des insectes ont une disposition veineuse similaire à celle des neuroptères, où une zone renforcée en veines se distingue le long de la diagonale de chaque aile.

En utilisant un modèle expérimental, nous observons avec une caméra à haute vitesse la réponse en déformation d'ailes battantes ayant une anisotropie contrôlée. Les rigidités de flexion et de torsion peuvent être calibrées indépendamment l'une de l'autre pour obtenir des réponses différentes selon le mode étudié et ainsi optimiser le couplage des modes de torsion et de flexion en terme de génération de forces aérodynamiques. Le couplage en quadrature de modes a été identifié comme la configuration optimale pour obtenir de larges amplitudes de déformation.

Par ailleurs, nous utilisons une mesure directe de force sur un assemblage composé d'une paire d'ailes reliée à un capteur de force, pour observer les régimes transitoires et de croisières. Ces modèles d'ailes sont fabriqués à partir de feuilles en plastique homogènes sur lesquelles certaines parties ont été rigidifiées selon des directions privilégiées (typiquement celles de torsion et de flexion). En particulier, nous avons produit des variations de rigidification locales en créant des plis dans le matériau des ailes

Références

1. G. COUSIN & O. BÉTHOUX, The steps towards an inconspicuous vein fusion documented in Stenosmylinae forewings (Neuroptera : Osmylidae), *Org. Divers. Evol.*, **16**, 225–532 (2016).
2. D. FAUX, O. THOMAS, E. CATTAN & S. GRONDEL, Two modes resonant combined motion for insect wings kinematics reproduction and lift generation, *Europhys. Lett.*, **121**, 66001 (2018).
3. D. D. CHIN & D. LENTINK, Flapping wing aerodynamics: From insects to vertebrates. *J. Exp. Biol.*, **219**, 920–932 (2016).

Quel est l'impact des vagues sur la turbulence atmosphérique ?

Alex Ayet^{1,2}, Bertrand Chapron¹, Jean-Luc Redelsperger¹, Guillaume Lapeyre² & Louis Marié¹

¹ Ifremer, CNRS, IRD, Univ. Brest/ Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), IUEM, Brest, France

² LMD/IPSL, CNRS, École Normale Supérieure, PSL Research University, Paris, France
alex.ayet@ifremer.fr

L'étude du lien de causalité entre vent et vagues est un sujet qui a fait l'objet de nombreuses études, et pourtant les mécanismes couplant les deux systèmes font toujours l'objet de controverses. En présence d'un vent moyen constant au dessus de l'eau, il s'établit au premier ordre un équilibre entre la turbulence proche de la surface et le champ de vagues générées localement. Le flux turbulent de quantité de mouvement qui en résulte est essentiel pour les modèles atmosphériques, servant de condition limite inférieure au domaine d'intégration. Étant donné que la résolution numérique nécessaire pour résoudre les échelles associées aux vagues est hors de portée des modèles atmosphériques actuels, une bonne compréhension de la physique couplant turbulence et vagues est essentielle pour aboutir à des paramétrisations réalistes des flux turbulents.

Les observations in-situ permettent de caractériser quantitativement cet équilibre (i.e. les flux turbulents pour un vent moyen donné). Celui-ci a été reproduit au moyen de modèles conceptuels, par exemple Kudryavtsev *et al.* [1], dans lequel le couplage entre vent et vagues est essentiellement induit par les vagues de vent courtes. Malgré tout, ce type de modèles ne permettent pas d'expliquer la variabilité des flux turbulents pour un vent moyen donné observée dans les mesures. Cela est attribué à la présence de vagues [2], et révèle une méconnaissance des processus physiques à l'interface air-mer.

De façon plus fondamentale, la question posée est de savoir de quelle façon la présence d'une paroi non-rigide et mouvante modifie la structure de la turbulence. C'est ce que nous nous proposons de faire en généralisant une approche proposée par Katul *et al.* [3] pour la turbulence stratifiée proche d'une paroi rigide. Celle-ci nous amène à considérer la déformation des tourbillons les plus énergétiques par les vagues, et de façon plus générale, à réfléchir à l'interaction entre le spectre de la turbulence et le spectre des vagues sous un angle nouveau. Testé dans le modèle de Kudryavtsev *et al.*, le nouveau processus traduit l'impact des vagues de vent longues sur la turbulence atmosphérique, et introduit la variabilité suffisante dans l'équilibre vent-vagues pour expliquer les observations. Ce nouveau paradigme ouvre de nouvelles perspectives autant d'un point de vue théorique que pour l'exploration des données expérimentales.

Références

1. V. KUDRYAVTSEV, B. CHAPRON & V. MAKIN, Impact of wind waves on the air-sea fluxes : A coupled model, *J. Geophys. Res. Oceans.*, **46**, 1022–1037 (2014).
2. J. B. EDSON, V. JAMPANA, R. A. WELLER, S. P. BIGORRE, A. J. PLUEDDEMANN, C. W. FAIRALL, S. D. MILLER, L. MAHRT, D. VICKERS & H. HERSBACH, On the exchange of momentum over the open ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 1589–1610 (2013).
3. G. G. KATUL, A. G. KONINGS & A. PORPORATO, Mean velocity profile in a sheared and thermally stratified atmospheric boundary layer, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 268–502 (2011).

Dynamics of an artificial aquatic blade subjected to von Kármán vortices

Yohann Bachelier¹, Delphine Doppler¹, Joseph John Soundar Jerome¹ & Nicolas Rivière²

¹ Université Claude Bernard Lyon 1

² INSA de Lyon

yohann.bachelier@univ-lyon1.fr

Aquatic canopies play a vital role on river bed stabilization, flood control, sedimentation, transport and mixing of nutrients or pollutants whereby, they influence the water quality for the river ecosystem. Often plants in aquatic canopies are long and flexible. Hence, in many cases, the mass transfer and mixing processes are strongly controlled by the fluid–structure interactions between aquatic plants and vortices in the mixing layer that arises from the slow moving flow through the canopy and the fast moving river flow on the canopy top [1,2]. In this context, it is important to better understand dynamics of individual plants in the presence of vortical structures. And so, we propose a model experiment to investigate the motion of a single quasi-2D artificial blade exposed to a transverse water flow and a regular array of transverse vortices. Our experiment consists of a thin flexible polyethylene sheet of length, ($l_b = 5\text{--}20$ cm) that is fixed rigidly to the bottom of a 2 meter long narrow water channel. The blade free-end is then systematically excited by a von Karman vortex street. We control the frequency (f_b) and vortex size via the mean water speed (U) and the diameter of the cylindrical obstacle ($d = 1\text{--}4$ cm). Thereby, we observe two distinct dynamical regimes. (1) Rigid-body oscillations: the blade moves forth and back about a mean deflection and (2) Traveling wave regime: transverse waves originate at the blade anchorage near the channel bottom and move along the blade length towards its free-end. When the blade thickness (e_b) and length (l_b) are kept constant, the measured oscillation amplitude increases linearly with the obstacle-size based Reynolds number ($Re_d = \rho U d / \mu$) over a relatively wide range ($Re_d = 200\text{--}3500$). The slope of this linear Reynolds number dependence is seen to vary only with the blade rigidity, such as the thickness ratio (l_b/e_b) and the Young's modulus (E). We explain these observations via a scaling law that exploits the necessary balance between the work done by the restoring bending forces and the kinetic energy imparted by the incoming vortices on a blade. When the mean blade deformation is sufficiently large, our measurements show that traveling waves appear on the blades. The celerity of the observed traveling waves seems to be independent of the water velocity (U). In particular, we demonstrate that the transition to traveling wave regime is independent of the obstacle diameter (d) but it depends strongly on a critical Cauchy number ($Ca = 12\rho U^2 l_b^3 / E e_b^3$) which relates the form drag experienced by the blade and the blade rigidity.

References

1. M. GHISALBERTI & H. NEPF, Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows, *J. Geophys. Res.*, **107**, 3011 (2002).
2. H. NEPF, Flow and transport in regions with aquatic vegetation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **44**, 123–142 (2012).

Effet de viscosité élongationnelle de l'écoulement Streaming généré par un cylindre vibrant

S. Amir Bahrani^{1,3}, Maxime Costalonga¹, Laurent Royon² & Philippe Brunet¹

¹ Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, UMR 7057 CNRS, Université Paris Diderot, Paris, France

² Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain, UMR 8236 CNRS, Université Paris Diderot, Paris

³ Institut Mines Télécom Lille-Douai, Energy Engineering Department, F-59500 Douai, France

seyed-amir.bahrani@univ-paris-diderot.fr

Les écoulements secondaires (streaming) générés par oscillations d'objets immergés dans un fluide au repos [1] sont similaires au streaming acoustique induit par les ondes sonores dans un fluide. Un tel phénomène est appelé *Rayleigh streaming*, d'après l'étude pionnière de Rayleigh [2], et apparaît dans les écoulements incompressibles. Le streaming résulte de la création de vorticité dans une couche limite visqueuse d'épaisseur $\delta = (\frac{2\nu}{\omega})^{1/2}$ (ν : viscosité cinématique, ω : fréquence de l'oscillation) autour du corps oscillant. C'est cet écoulement visqueux incompressible du premier ordre (dont la valeur moyenne est nulle sur une période), qui produit l'écoulement secondaire, le terme inertielle du second ordre en vitesse induisant alors des forces en volume effectives de valeur moyenne non nulle. Lighthill [3] a modélisé ces forces de volume comme résultant du stress de Reynolds au niveau de la couche limite, induites par la quantité de mouvement acoustique non nulle moyenne sur une période. En conséquence, des vortex stationnaires sont générés à l'intérieur et à l'extérieur de la couche limite par continuité des contraintes visqueuses, le signe de la vorticité étant opposé entre couche interne et externe, ainsi que pour les vortex voisins. L'écoulement externe (outer streaming) a une échelle typique égale à celle de l'objet vibré, mais peut aussi être ressenti à des distances bien plus importantes lorsque l'amplitude de vibration est suffisamment élevée. Un tel écoulement a des applications potentielles dans l'homog n sation et le mélange des fluides, dans l'intensification du transfert de chaleur ainsi dans le tri de particules ou dans le pompage de fluide en microfluidique.

Nous avons étudié expérimentalement l'écoulement généré par un cylindre oscillant harmoniquement ($\omega = 5$ à 100 Hz), perpendiculairement à son axe, dans un fluide de hauteur très supérieure au diamètre du cylindre d et à celle de la couche limite δ . Tandis que la plupart des études ont jusqu'à présent été effectuées avec des fluides Newtoniens [4], notre étude cherche à comprendre l'influence de la viscoélasticité du fluide. En effet, les différentes applications sus-citées nécessitent souvent l'utilisation de fluides complexes. Les expériences ont été menées pour plusieurs fluides viscoélastique (PEO) où on change à la fois la longueur des polymères et leur concentration. Au delà d'une certaine concentration en polymères, nous avons un fort épaississement de la couche limite stationnaire interne qui devient du même ordre que la taille de l'objet. Nous attribuons cet épaississement à la viscosité élongationnelle, que nous avons mesuré avec la méthode du jet liquide étiré. Nous observons aussi des comportements inédits à plus haute fréquence ($\omega > 50$ Hz) : progressivement, l'écoulement à 2 paires de vortex est remplacé par un écoulement plus complexe où 4 paires de vortex sont observées.

Références

1. N. RILEY, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **33**, 43–65 (2001).
2. LORD RAYLEIGH, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **175**, 1–21 (1884).
3. J. LIGHTHILL, *J. Sound Vib.*, **61**, 391–418 (1978).
4. S. A. BAHRANI, N. PÉRINET, M. COSTALONGA, L. ROYON & P. BRUNET, *preprint* (2019).

Bifurcations de l'équation de Vlasov

Julien Barré¹, David Métivier² & Yoshiyuki Y. Yamaguchi³

¹ Institut Denis Poisson, Université d'Orléans, Université de Tours, CNRS, et Institut Universitaire de France

² Physics of Condensed Matter and Complex Systems and Center for Non Linear Studies, Los Alamos National Laboratory, Etats-Unis

³ Graduate School of Informatics, Université de Kyoto, Japon

julien.barre@univ-orleans.fr

L'équation de Vlasov décrit la dynamique de systèmes de particules hamiltoniens, lorsque les forces sont à longue portée et le nombre de particules très grand ; elle apparaît donc dans des situations physiques très diverses : systèmes auto-gravitants, plasmas, mais aussi fluides 2D, lasers à électrons libres, optique non linéaire. . . Notre objectif à long terme est de comprendre et classifier les bifurcations de l'équation de Vlasov, au voisinage d'un seuil d'instabilité.

L'équation de Vlasov vue comme un système dynamique possède plusieurs caractéristiques qui rendent cette étude délicate : c'est un système hamiltonien de dimension infinie, à la structure non canonique, très dégénérée ; malgré ce caractère hamiltonien, une forme de dissipation est fournie par le mélange de phase, ou l'amortissement Landau ; enfin, les particules peuvent entrer en résonance avec les modes du système.

Lorsque ces résonances sont fortes, ces particularités donnent lieu à une bifurcation originale mais relativement bien connue, décrite par le « Modèle à une onde » (*Single Wave Model*). Elle se caractérise par des effets non linéaires forts induisant une saturation rapide de l'instabilité (« scaling de piégeage »), et une forme normale hamiltonienne de dimension infinie, qui contrôle la dynamique du mode instable, c'est-à-dire l'onde, et celle des particules proches de la résonance.

Nous mettons en évidence ici un nouveau type de bifurcation, lorsque les résonances sont absentes ou faibles. Dans ce cas, il apparaît génériquement au point de bifurcation un bloc de Jordan d'ordre 3, et l'absence de résonance permet d'obtenir une dynamique réduite de dimension 3, sous forme hamiltonienne, non canonique et dégénérée : certaines caractéristiques de l'équation de Vlasov originelle subsistent donc. Dans le cas test du modèle HMF (Heisenberg Mean-Field), les comparaisons de cette dynamique réduite avec des simulations numériques directes de l'équation de Vlasov sont excellentes.

Turbulence lagrangienne, irréversibilité et flots généralisés

Jérémy Bec¹ & Simon Thalabard²

¹ MINES ParisTech, PSL Research University, CNRS, CEMEF, Sophia-Antipolis, France

² Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, IMPA, 22460-320 Rio de Janeiro, Brazil

jeremie.bec@mines-paristech.fr

De nombreuses applications, allant de l'optimisation des moteurs à la circulation atmosphérique, nécessitent de disposer de modèles de turbulence précis et efficaces. Les écoulements développent un état turbulent, instable et chaotique, lorsque la quantité d'énergie cinétique injectée dépasse la dissipation visqueuse. Cet excès, mesuré par le nombre de Reynolds, résulte en un processus de cascade où une large gamme d'échelles fortement liées sont excitées. La perte d'énergie est alors assurée par des structures violentes à petite échelle, conduisant à la persistance d'une dissipation visqueuse finie dans la limite des nombres de Reynolds infinis. Cette *anomalie dissipative* repose sur la nature fortement singulière et irréversible des écoulements turbulents et constitue la principale source de difficultés pour la modélisation.

Une idée sous-jacente à la plupart des modèles est de décrire les grandes échelles de l'écoulement par les équations d'Euler inviscides. La notion de solution doit alors être affaiblie pour obtenir des champs de vitesse turbulents. Comme conjecturé par Onsager [1], et récemment démontré [2], une dissipation finie nécessite que la vitesse ait un exposant de Hölder inférieur à $1/3$. La construction de telles solutions faibles montre toutefois certaines limites. D'une part, elles ne sont pas uniques [3], suggérant que la contrainte d'une énergie décroissante ne soit pas forcément suffisante pour assurer leur pertinence physique. D'autre part, la régularisation de ces solutions singulières peut dans certains cas conduire à des solutions probabilistes [4], propriété connue sous le nom de *stochasticité spontanée*. Tout cela laisse à penser que la construction de solutions turbulentes des équations d'Euler exige une notion encore plus faible de solutions, comme par exemple les solutions-mesures de DiPerna et Majda [5] où la vitesse n'est pas définie de manière unique, mais plutôt prescrite par une distribution de probabilité locale, à savoir une mesure de Young.

Une conséquence importante d'une vitesse probabiliste est que les trajectoires d'éléments fluides deviennent elles-mêmes probabilistes et que le concept de flot lagrangien s'effondre. La formulation des solutions des équations d'Euler doit alors faire appel au principe lagrangien généralisé de moindre action formulé par Brenier [6], dont nous discutons ici de la pertinence dans un contexte turbulent.

Références

1. L. ONSAGER, Statistical hydrodynamics, *Nuovo Cimento*, **6**, 279–287 (1949).
2. P. ISETT, A proof of Onsager's conjecture, *Ann. Math.*, **188**, 871–963 (2018).
3. S. DANERI & L. SZÉKELYHIDI, Non-uniqueness and h-principle for Hölder-continuous weak solutions of the Euler equations, *Arch. Ration. Mech. Anal.*, **224**, 471–514 (2017).
4. L. BIFERALE, G. BOFFETTA, A. MAILYBAEV & A. SCAGLIARINI, Rayleigh–Taylor turbulence with singular non-uniform initial conditions, *Phys. Rev. Fluids*, **3**, 092601 (2018).
5. R. DIPERNA & A. J. MAJDA, Oscillations and concentrations in weak solutions of the incompressible fluid equations, *Commun. Math. Phys.*, **108**, 667–689 (1987).
6. Y. BRENIER, The least action principle and the related concept of generalized flows for incompressible perfect fluids, *J. Am. Math. Soc.*, **2**, 225–255 (1989).

Cycles limites et quasipériodiques dans une cavité cisailée

Yacine Bengana & Laurette S. Tuckerman

PMMH, UMR-CNRS 7636, Sorbonne Université, 7 quai Saint Bernard 75005 Paris

b.y.bengana@gmail.com

Nous étudions numériquement l'écoulement bidimensionnel dans une cavité carrée ouverte cisailée [1]. Deux bifurcations de Hopf successives mènent à deux cycles limites ayant des fréquences différentes, ainsi qu'un nombre différent de structures qui se propagent au-dessus et dans la cavité. Une branche d'états quasipériodiques produites par des bifurcations secondaires transfère la stabilité d'un cycle limite vers l'autre [2]. Nous étudions les comportements spatiaux de ces états par la transformée de Hilbert et leurs comportements temporels par moyen de transformées de Fourier. Nous vérifions que les deux cycles limites ont la propriété RZIF (Real Zero Imaginary Frequency) [3]. Les fréquences des modes successives sont séparées par un intervalle constant, comme l'avait montré Rossiter [4] pour des écoulements compressibles.

Références

1. D. SIPP & A. LEBEDEV, Global stability of base and mean flows: a general approach and its applications to cylinder and open cavity flows, *J. Fluid Mech.*, **593**, 333–358 (2007).
2. Y. BENGANA, J.-C. LOISEAU, J.-C. ROBINET & L. S. TUCKERMAN, Bifurcation analysis and frequency prediction in shear-driven cavity flow, soumis à *J. Fluid Mech.*
3. S. E. TURTON, L. S. TUCKERMAN & D. BARKLEY, Prediction of frequencies in thermosolutal convection from mean flows, *Phys. Rev. E*, **91**, 043009 (2015).
4. J. E. ROSSITER, Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds, *Tech. Rep. Ministry of Aviation; Royal Aircraft Establishment*, RAE Farnborough (1964).

Forced three-wave interactions of capillary-gravity waves

Michael Berhanu¹, Annette Cazaubiel¹, Florence Haudin & Eric Falcon¹

MSC, Univ. Paris Diderot, CNRS (UMR 7057), 75013 Paris, France

michael.berhanu@univ-paris-diderot.fr

Waves propagating on a water surface can exchange energy due to the quadratic non-linearity induced by the response of a free-surface. In weakly non-linear regime, Three-Wave resonant interactions [1] for pure capillary waves and gravity-capillary waves close to the crossover frequency are usually used to explain the dynamics of a set of dispersive, random interacting waves using the Wave Turbulence theory [2]. The interaction of two mother waves 1 and 2 produce a daughter wave 3, when the resonant conditions are satisfied. Previously, we demonstrated experimentally [3], the relevance of Three-Wave resonant mechanism for capillary-gravity wave. We have shown that the saturation of the daughter wave is due to the viscous dissipation. Here, we show using the same experimental setup, that in configurations not allowing simultaneously the resonant conditions and the linear dispersion relation, we observe a daughter wave verifying the resonant conditions but not the dispersion relation. By modeling the response of the free surface at the lowest nonlinear order, we explain this observation as a forced interaction. The significant viscous dissipation increases indeed the band-pass of the free-surface. The observation of free-surface excitations not following the linear dispersion relation become then possible. This forced Three-Wave interaction mechanism could have important consequences for Wave Turbulence in experimental or natural systems with non-negligible dissipation.

References

1. A. D. CRAIK, *Wave Interactions and Fluid Flows*, Cambridge University Press, Cambridge (1986).
2. A. C. NEWELL, *Wave Turbulence*, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **43**, 59–78 (2011).
3. F. HAUDIN, A. CAZAUBIEL, L. DEIKE, T. JAMIN, É. FALCON & M. BERHANU, Experimental study of three-wave interactions among capillary-gravity surface waves, *Phys. Rev. E*, **93**, 043110 (2016).

Instabilités et formation de patterns dans les électrons relativistes : observations directes et modélisation

C. Szwaj¹, C. Evain¹, E. Burkard^{1,4}, E. Roussel¹, M. Le Parquier¹, Serge Bielawski¹, F. Ribeiro², M. Labat², N. Hubert², J.-B. Brubach², P. Roy², E. Blomley³, M. Brosi³, E. Brüdermann³, S. Funkner³, N. Hiller^{3,5}, M. J. Nasse³, G. Niehues³, M. Schedler³, P. Schönfeldt^{3,6}, J. L. Steinmann³, S. Walther^{3,7} & A.-S. Müller³

¹ Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers, Atomes et Molécules, Centre d'Etudes Recherches et Applications (CERLA), F-59000 Lille, France

² Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91192 Gif-sur-Yvette, France

³ Karlsruhe Institute of Technology (KIT), D-76131 Karlsruhe, Germany

⁴ Present address Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation (IOSB), D-76275 Ettlingen, Germany

⁵ Present address Paul Scherrer Institute (PSI), 5232 Villigen, Switzerland.

⁶ Present address DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) Institute of Networked Energy Systems, Carl-von-Ossietzky-Str. 15, D-26129 Oldenburg, Germany

⁷ Present address DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), Notkestr. 85, D-22607 Hamburg, Germany

`serge.bielawski@univ-lille.fr`

Les électrons relativistes sont des sources particulièrement efficaces pour la génération de lumière à des longueurs d'ondes variées, en particulier dans les domaines terahertz, ultra-violet et X. C'est pourquoi des sources de rayonnement synchrotron comme SOLEIL en France, et des nouvelles générations de lasers à électrons libres se développent actuellement dans de nombreux pays. L'efficacité de ces sources est cependant fortement liée à la compréhension des phénomènes d'instabilités dynamiques affectant les électrons relativistes (dus en particulier à l'interaction entre électrons). Nous présentons ici un ensemble de résultats expérimentaux, numériques et de problèmes ouverts concernant les centres de rayonnement synchrotron. Ces résultats sont obtenus dans le cadre de collaborations entre le PhLAM, le centre de rayonnement synchrotron SOLEIL (France), et le Karlsruhe Research Accelerator KARA (Allemagne). En particulier nous présenterons les méthodes de mesures ultra-rapides qui ont permis récemment d'enregistrer en temps réel la formation spontanée de *patterns* dans les électrons relativistes circulant dans ces accélérateurs [1, 2]. Nous présenterons également les études numériques de la dynamique des paquets d'électrons, et qui sont basées sur l'équation de Vlasov-Fokker-Planck.

Références

1. C. EVAIN, E. ROUSSEL, M. LE PARQUIER, C. SZWAJ, M.-A. TORDEUX, J.-B. BRUBACH, L. MANCERON, P. ROY & S. BIELAWSKI, Direct observation of spatiotemporal dynamics of short electron bunches in storage rings, *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 054801 (2017).
2. S. BIELAWSKI, E. BLOMLEY, M. BROSI, E. BRÜNDERMANN, E. BURKARD, C. EVAIN, S. FUNKNER, N. HILLER, M. J. NASSE, G. NIEHUES, E. ROUSSEL, M. SCHEDLER, P. SCHÖNFELDT, J. L. STEINMANN, C. SZWAJ, S. WALTHER & A.-S. MÜLLER, From self-organization in relativistic electron bunches to coherent synchrotron light: Observation using a photonic time-stretch digitizer, <https://arxiv.org/abs/1902.06157> (2019).

Spatio-temporal dynamics of semiconductor microlasers with chaotic ray dynamics

Stephan Bittner^{1,2}, Stefano Guazzotti³, Yongquan Zeng⁴, Kyungduk Kim¹, Qi Jie Wang⁴, Ortwin Hess³ & Hui Cao¹

¹ Department of Applied Physics, Yale University, New Haven, CT, USA

² Chaire Photonique, LMOPS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Metz, France

³ Department of Physics, Imperial College, London, United Kingdom

⁴ School of Electrical and Electronical Engineering, Nanyang Technological University, Singapore

stefan.bittner@centralesupelec.fr

Broad-area semiconductor lasers (BALs) are highly nonlinear systems. Effects such as spatial hole burning, carrier-induced index changes and carrier diffusion with different spatial and temporal scales result in a very complex dynamics. BALs can thus exhibit spatio-temporal instabilities like filamentation and pulsations on a sub-nanosecond time scale [1]. These instabilities are detrimental for applications in material processing, imaging and laser surgery. Methods such as injection or delayed feedback have been used to stabilize the dynamics with, however, only limited success.

Complexity can, however, also arise from the cavity geometry. While conventional semiconductor lasers use Fabry-Perot (FP) cavities, microlasers with asymmetric cavities that can exhibit chaotic ray dynamics have been studied in the context of wave-dynamical chaos [2]. A wealth of different geometries like stadia, deformed circles or polygons have been investigated to understand how the classical ray dynamics manifests in the passive cavity mode properties, e.g., the spectra or near- and far-field distributions [2]. However, very little is known about the dynamics of asymmetric microcavity lasers. We investigate semiconductor microlasers which have the form of a circle from which a section is cut off $R/2$ away from the center, so-called D-cavities, as an example with completely chaotic ray dynamics.

We experimentally studied the spatio-temporal dynamics of conventional FP broad-area lasers as well as of D-cavity lasers [3]. The edge-emitting GaAs quantum well microlasers are pumped electrically with microsecond pulses. The FP-cavities exhibit severe spatio-temporal instabilities as expected. In contrast, the emission of the D-shaped microlasers is inherently stable without filaments or fast pulsations. It is surprising to see that adding more complexity to the system by using a geometry with chaotic ray dynamics leads to a stabilization of the dynamics. While both FP-cavity and D-cavity lasers feature the same nonlinearities due to the active medium, their consequences for the spatio-temporal dynamics strongly depend on the structure of the field distributions of the lasing modes.

In a FP cavity, the optical field propagates along the cavity axis and features a transverse wavelength of several micron. Intensity variations on this length scale create a lensing effect and result in a self-focusing instability due to carrier-induced index changes. The field distributions of the D-cavity, in contrast, consist of a superposition of plane waves in all possible directions and feature the same wavelength-scale structure size in all directions due to the chaotic ray dynamics. Hence, no lensing effect can appear and the formation of filaments is suppressed due to complex wave interference.

Furthermore, stabilization of chaotic dynamics was observed in simulations of one-dimensional semiconductor lasers with random variations of the refractive index profile [3] compared to the case of a homogeneous cavity. This demonstrates the general usefulness of complex wave interference induced by the cavity environment for suppressing spatio-temporal instabilities, and we believe that this principle will also find applications in other fields such as nonlinear optics or turbulent fluid dynamics.

References

1. I. FISCHER *et al.*, *Europhys. Lett.*, **35**, 579 (1996).
2. H. CAO & J. WIERSIG, *Rev. Mod. Phys.*, **87**, 61 (2015).
3. S. BITTNER *et al.*, *Science*, **361**, 1225 (2018).

Observation de la modulation non-linéaire contra-propagative des bords d'un train d'onde de gravité à la surface d'un fluide

Félicien Bonnefoy¹, Pierre Suret², Alexey Tikan², Francois Copie², Gaurav Prabhudesai³, Guillaume Michel³, Annette Cazaubiel⁴, Eric Falcon⁴, Gennady El⁵ & Stéphane Randoux²

¹ Ecole Centrale de Nantes, LHEEA, UMR 6598 CNRS, F-44 321 Nantes, France

² Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France

³ LPS, ENS, CNRS, Univ. Pierre et Marie Curie, Univ. Paris Diderot, F-75 005 Paris, France

⁴ Univ. Paris Diderot, Univ. de Paris, MSC, UMR 7057 CNRS, F-75 013 Paris, France

⁵ Department of Mathematics, Physics and Electrical Engineering, Northumbria University, Newcastle upon Tyne, NE1 8ST, United Kingdom

`felicien.bonnefoy@ec-nantes.fr`

Nous étudions expérimentalement la propagation d'un train d'onde sinusoïdal, d'extension finie dans le temps, au sein d'un bassin de houle de grande longueur (150 m) devant la longueur d'onde (1 m). Un batteur engendre, à une extrémité du bassin, un train de vagues monochromatique d'amplitude finie, constante, et de grande durée devant la période. Nous observons alors que les deux bords de ce train d'onde se modulent au cours de la propagation.

Le cadre de cette expérience est celui de l'équation de Schrödinger non linéaire focalisante en lien avec le problème du *dambreak* [1, 2]. A grande distance du batteur, le champ de vague est décrit théoriquement par un régime faiblement dispersif où les effets non linéaires dominent et sont responsables de la modulation non linéaire se propageant depuis les bords du paquet. La solution théorique correspond dans ce cas en une solution périodique lentement modulée en temps.

En comparant les mesures obtenues dans le bassin et la solution théorique, notre expérience révèle que le train d'onde non linéaire n'est pas déstabilisé par l'instabilité de Benjamin-Feir mais développe une modulation non linéaire se propageant à vitesse finie sous la forme de deux trains d'onde contra-propagatifs (dits de *dambreak* dispersifs) en bon accord avec le scénario théorique attendu [3]. Ces observations corroborent celles qui ont été faites en optique [4, 5].

Références

1. G. A. EL, E. G. KHAMIS & A. TOVBIS, Dam break problem for the focusing nonlinear Schrödinger equation and the generation of rogue waves, *Nonlinearity*, **29**, 2798 (2016).
2. R. JENKINS & K. D. McLAUGHLIN, Semiclassical limit of focusing NLS for a family of square barrier initial data, *Comm. Pure Appl. Math.*, **67**, 246 (2014).
3. F. BONNEFOY, P. SURET, A. TIKAN, F. COPIE, G. PRABHUDESAI, G. MICHEL, A. CAZAUBIEL, E. FALCON, G. EL & S. RANDOUX, From Benjamin-Feir instability to focusing dam breaks in water waves, *in preparation*, (2019).
4. F. AUDDO, B. KIBLER, J. FATOME & C. FINOT, Experimental observation of the emergence of Peregrine-like events in focusing dam break flows, *Optics Lett.*, **43**, 12 (2018).
5. A. E. KRAYCH, P. SURET, G. EL & S. RANDOUX, Nonlinear evolution of the locally induced Modulational Instability in fiber optics, *Phys. Rev. Lett.*, **122**, (2019).

Transition to the ultimate regime in a radiatively driven convection experiment

Vincent Bouillaut, Simon Lepot, Sébastien Aumaître & Basile Gallet

Service de Physique de l'Etat Condensé, CNRS UMR 3680, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, France
basile.gallet@cea.fr

I will report on the transition between two regimes of heat transport in a radiatively driven convection experiment, where a fluid gets heated up within a tunable heating length ℓ in the vicinity of the bottom of the tank. The first regime is similar to the one observed in standard Rayleigh-Bénard experiments, the Nusselt number Nu being related to the Rayleigh number Ra through the power-law $Nu \sim Ra^{1/3}$ [1]. The second regime corresponds to the “ultimate” or mixing-length scaling regime of thermal convection [2, 3], where Nu varies as the square-root of Ra . Evidence for these two scaling regimes have been reported in Lepot *et al.* [4], and I will present a detailed study of the transition from one regime to the other. I will introduce a simple model describing radiatively driven convection in the mixing-length regime, which leads to the scaling relation $Nu \sim \frac{\ell}{H} Pr^{1/2} Ra^{1/2}$, where H is the height of the cell and Pr the Prandtl number. From this model, one can deduce the values of Ra and Nu at which the system transitions from one regime to the other. These predictions are confirmed by the experimental data gathered at various Ra and ℓ [5].

Références

1. W. V. R. MALKUS, The heat transport and spectrum of thermal turbulence, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **225**, 196–212 (1954).
2. E. A. SPIEGEL, A generalization of the mixing-length theory of thermal convection, *ApJ* **138**, 216 (1963).
3. R. H. KRAICHNAN, Turbulent thermal convection at arbitrary Prandtl number, *Phys. Fluids* **5**, 1374 (1962).
4. S. LEPOT, S. AUMAÎTRE & B. GALLET, Radiative heating achieves the ultimate regime of thermal convection, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **115**, 36 (2018).
5. V. BOUILLAUT, S. LEPOT, S. AUMAÎTRE & B. GALLET, Transition to the ultimate regime in a radiatively driven convection experiment, *J. Fluid Mech.*, **861**, R5 (2019).

3D inertial wave attractors

Samuel Boury¹, Thierry Dauxois¹, Evgeny Ermanyuk², Sylvain Joubaud¹, Philippe Odier¹ & Ilias Sibgatullin³

¹ Univ Lyon, ENS de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France

² Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

samuel.boury@ens-lyon.fr

For a few decades now, numerous studies have been devoted to the intriguing properties of inertia-gravity wave reflection [1]. Since the angle of propagation of these waves is set by the ratio of their frequency to the buoyancy or rotation frequency, the reflection on a wall does not follow the usual Snell-Descartes law. In particular, in a confined trapezoidal geometry, when one of the walls is neither horizontal nor vertical, the wave beam experiences a focusing effect and eventually, whatever the initial source of the waves, ends on a definite trajectory called *attractor*.

Experimental and numerical studies have shown evidence of this structure for internal gravity waves [2] and for internal inertial waves [3] in 2D geometry. Due to the local energy focusing, non-linear triadic cascades occur in the branches of the attractor, leading to energy transfer between scales, which has been observed experimentally [4, 5].

More recently, geometric and 3D aspects of internal wave attractors have been explored using numerical simulations with inertial waves. Direct numerical simulations pictured an axisymmetric inertial wave attractor, in a trapezoidal cylindrical domain, in which focusing and defocusing effects are caused by the reflection on the inclined wall, as well as by the radially expanding geometry itself. Wave instability occurs while forcing the attractor, leading to a destabilised flow and a symmetry breakdown. Using an experimental apparatus that has shown relevance for axisymmetric wave generation [6], we produce an inertial wave attractor in a cylindrical domain and we explore its properties.

References

1. T. DAUXOIS & W. R. YOUNG, Near-critical reflection of internal waves, *J. Fluid Mech.*, **390**, 271–295 (1999).
2. C. BROUZET, I. N. SIBGATULLIN, H. SCOLAN, E. V. ERMANYUK & T. DAUXOIS, Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3D numerical simulations, *J. Fluid Mech.*, **793**, 109–131 (2016).
3. A. M. M. MANDERS & L. R. M. MAAS, Observations of inertial waves in a rectangular basin with one sloping boundary, *J. Fluid Mech.*, **493**, 59–88 (2003).
4. C. BROUZET, E. V. ERMANYUK, S. JOUBAUD, I. N. SIBGATULLIN & T. DAUXOIS, Energy cascade in internal wave attractors, *Europhys. Lett.*, **113**, 44001 (2016).
5. M. BRUNET, T. DAUXOIS & P.-P. CORTET, Linear and nonlinear regimes of an inertial wave attractor, *Phys. Rev. Fluids*, in press (2019).
6. S. BOURY, T. PEACOCK & P. ODIER, Excitation and resonant enhancement of axisymmetric internal wave modes, *Phys. Rev. Fluids*, in press (2019).

Instabilités oscillatoires en milieu poreux d'un fluide en équilibre diphasique

Alexis Bres, François Pétrélis & Stéphan Fauve

Laboratoire de Physique de l'École normale supérieure
alexis.bres@ens.fr

L'étude de l'instabilité d'un milieu poreux saturé d'une couche de fluide chauffée par le bas et refroidie par le haut remonte au milieu de siècle précédent [1]. Peu après, l'intérêt s'est porté sur ce système lorsque la température du bas dépasse le point d'ébullition. Pour des milieux de faible perméabilité, il se développe alors en-dessous de la zone liquide une zone mixte diphasique où le fluide est présent sous formes gazeuse et liquide. La dynamique convective de ce système a été étudiée en détail par la suite. L'analyse numérique de [2] montre l'existence de quatre états : fluide présent sous une ou deux phases, avec un régime de transfert thermique conductif ou convectif. L'état du système est alors caractérisé par deux nombres sans dimension, le nombre de Rayleigh et le flux thermique adimensionné.

Une instabilité secondaire de ce système, observée initialement par [3], est ici étudiée expérimentalement. Lors de la présence d'une zone liquide surplombant une zone diphasique, le front séparant ces deux zones peut se mettre spontanément à osciller. Ce mouvement est accompagné d'une oscillation du champ de température en zone liquide, ainsi que d'une expulsion/admission périodique de fluide (la paroi supérieure étant perméable). Les motivations d'étude d'un tel phénomène sont multiples. En premier lieu, il s'agit d'un système modèle en géophysique, permettant la description de certains complexes hydrothermaux [4] (lac en zone volcanique). Mais il s'agit également d'un problème d'une grande richesse physique, mêlant thermodynamique, mécanique des fluides et dynamique non linéaire. Le couplage entre cette instabilité secondaire et l'amélioration du transfert thermique présente alors un intérêt majeur pour le physicien.

Deux dispositifs complémentaires sont utilisés dans cette étude : une cellule d'expérimentation en polymère opaque isolée sous vide où les mesures sont réalisées à l'aide de thermistances espacées le long du milieu poreux ; et une cellule d'expérimentation en verre permettant la visualisation à l'aide d'une caméra thermique du champ de température pariétal. Dans les deux cas, le niveau de liquide au niveau de la paroi supérieure est suivi à l'aide d'un capteur capacitif.

Sur le plan théorique comme expérimental, on s'intéresse à la dynamique linéaire et non linéaire de cette instabilité : quel régime de paramètres amène à son déclenchement ? Quelles lois d'échelles suivent son amplitude et sa fréquence d'oscillation ? Ce système présente-t-il de l'hystérésis ? Comment évolue le nombre de Nusselt dans l'espace des paramètres ?

Références

1. E. R. LAPWOOD, Convection of a fluid in a porous medium, *Math. Proc. Camb. Philos. Soc.*, **44**, 508–521, (1948).
2. P. S. RAMESH & K. E. TORRANCE, Stability of boiling in porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **33**, 1895–1908 (1990).
3. H. H. BAU & K. E. TORRANCE, Boiling in Low-permeability Porous Materials, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **25**, 45–55 (1982).
4. J. VANDEMEULEBROUCK, D. STEMMELEN, T. HURST & J. GRANGEON, Analogue modeling of instabilities in crater lake hydrothermal systems, *J. Geophys. Res.*, **110**, B02212 (2005).

Attracteur d'ondes d'inertie en régime linéaire et non linéaire

Maxime Brunet¹, Thierry Dauxois² & Pierre-Philippe Cortet¹

¹ Laboratoire FAST, Université Paris-Sud

² Laboratoire de Physique, ENS de Lyon

maxime.brunet@u-psud.fr

Les fluides soumis à une rotation d'ensemble sont le support d'une classe d'ondes, appelées ondes d'inertie, fruit de l'action de rappel de la force de Coriolis. Dans les domaines fermés, dont les parois ne sont pas systématiquement verticales ou horizontales, peuvent se développer des modes ondulatoires appelés attracteurs d'ondes dans lesquels toute l'énergie à une fréquence donnée tend à se concentrer sur un cycle limite. Ces attracteurs apparaissent en conséquence des lois anormales de réflexion des ondes d'inertie dont la relation de dispersion contraint la direction de propagation.

Nous présentons une étude expérimentale des régimes linéaires et non-linéaires d'un attracteur d'ondes dans une cavité trapézoïdale en rotation. Nous mettons en évidence que l'attracteur est sujet à une instabilité par résonance triadique qui alimente en énergie des ondes sous-harmoniques. Ce mécanisme non-linéaire a pour conséquence de réduire l'amplitude de l'attracteur et de faire croître sa longueur d'onde en accord avec des résultats récents dans des simulations numériques et des expériences en fluide stratifié. En variant le taux de rotation ainsi que l'amplitude et la longueur d'ondes du forçage, nous avons identifié les lois d'échelles suivies par l'amplitude et la longueur d'onde de l'attracteur dans les régimes linéaire et non-linéaire. Nous avons montré que le régime non-linéaire de l'attracteur peut être décrit quantitativement en remplaçant dans le modèle linéaire, aujourd'hui bien établi, la viscosité du fluide par une viscosité turbulente, prenant en compte de manière effective la dissipation que constitue l'instabilité triadique pour l'attracteur. Ce dernier résultat pourrait notamment être utile pour extrapoler la théorie des attracteurs aux situations géo et astrophysiques où de forts effets non-linéaires sont évidemment attendus et où la présence d'attracteurs a déjà été montré numériquement.

Croissance d'arbre soumis à des règles d'allocation de ressource

Olivier Bui & Xavier Leoncini

Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, CPT, Marseille, France

olivi.bui@gmail.com

Les réseaux de transportation apparaissent fréquemment en physique, en ingénierie et en biologie qu'il s'agisse du transport d'eau, d'électricité, d'oxygène ou d'automobiles, etc. Une façon de formaliser ce genre de système consiste à le transformer en un problème de flot dans un réseau entre des sources et des puits dans lequel des règles peuvent être implémentées pour modéliser, par exemple, les frictions ou d'autres propriétés. De là, une approche typique pour étudier ces systèmes est d'essayer de faire de l'optimisation [1, 2]. Toutefois, il est possible que pour comprendre l'évolution dans le temps de certains réseaux les approches d'optimisation ne sont pas suffisantes mais qu'il soit nécessaire de prendre en compte la dynamique sous-jacente derrière la croissance du réseau. Cela peut être particulièrement vrai dans le cas où la substance transportée par le réseau est en fait la ressource utilisée qu'il utilise pour se développer et croître (des exemples en économie peuvent venir à l'esprit). Nous essayons de développer une approche qui pourrait tenir compte de cet aspect. On conçoit un modèle inspiré des arbres et du transport d'une de leur ressource vitale (des sucres). On modélise ces arbres comme des graphes sans boucle transportant un flux (flux de sève) dans lesquels nous définissons des lois d'évolution de sorte que le système consomme le flux pour se développer : notre réseau de transport sera un réseau qui peut croître mais la croissance dépend de la consommation de la ressource qu'il transporte. Chaque noeud du réseau peut consommer le flux de ressource qui le traverse ou échanger ce flux de ressource avec ses voisins.

Références

1. M. DURAND, Architecture of optimal transport networks, *Phys. Rev. E*, **73**, 016116 (2006).
2. F. CORSON, Fluctuations and redundancy in optimal transport networks, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 048703 (2010).

Écoulement gaz–liquide dans un milieu poreux confiné : caractérisation par analyse d’images

Thomas Busser¹, Barbara Pascal¹, Nelly Pustelnik¹, Patrice Abry¹, Marion Serres^{1,2,3}, Régis Philippe² & Valérie Vidal¹

¹ Univ. Lyon, ENS de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique, 46 Allée d’Italie, 69364 Lyon, France

² Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques, CNRS UMR 5285, CPE Lyon, UCBL, Univ. Lyon 43 bd du 11 novembre 1918, 69616 Villeurbanne, France

³ IFPEN - IFP Energies nouvelles Rond-point de l’échangeur de Solaize, 69360 Solaize, France

thomas.busser@ens-lyon.fr

Les écoulements multiphasiques dans des milieux poreux sont très largement répandus, allant des processus naturels (liquéfaction des sols, fracture hydraulique, éruptions volcaniques) aux processus industriels (réacteurs catalytiques, extraction assistée de pétrole). Les enjeux de leur compréhension sont donc multiples et pluridisciplinaires : génie des procédés (optimisation de procédés catalytiques, procédés de filtrations) [1], géophysique [2] par exemple. Dans toutes ces applications, les interfaces de contact entre les différentes phases jouent un rôle crucial sur l’écoulement et les réactions chimiques possiblement associées. Leur position et leur dynamique restent cependant très difficiles à quantifier. Dans ce contexte, les expériences de laboratoire peuvent apporter des éléments fondamentaux pour comprendre et prédire l’hydrodynamique de ces écoulements complexes [3].

Cette étude porte sur la caractérisation d’un écoulement gaz-liquide conjoint à travers un milieu de grande porosité (96%), une mousse solide métallique (NiCrFeAl) à cellules ouvertes. L’expérience est réalisée dans une cellule de Hele-Shaw (milieu confiné quasi-bidimensionnel). Nous comparons une analyse d’images classique (outils morphologiques tels que binarisation, érosion, dilatation...) à deux méthodes de segmentation de texture combinant des outils d’optimisation convexe et d’invariance d’échelle. Ces méthodes, très performantes sur des images de taille réduite, ont été développées et optimisées au laboratoire pour être applicables sur des séries d’images à haute résolution [4]. Nous déterminons pour chacune de ces méthodes d’une part, la répartition entre les phases liquide et gaz dans le système et d’autre part, les interfaces et leur mouvement. Une étude détaillée des propriétés statistiques des bulles (périmètre, aire, diamètre équivalent...) permettra de discuter l’efficacité de chaque méthode pour une application à l’étude des écoulements multiphasiques.

Références

1. J.-N. TOURVIELLE, R. PHILIPPE & C. DE BELLEFON, Milli-channel with metal foams under an applied gas–liquid periodic flow: External mass transfer performance and pressure drop, *Chem. Eng. J.*, **267**, 332–346 (2015).
2. K. R. NEWMAN *et al.*, Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **267** 341–352 (2008).
3. G. VARAS, G. RAMOS, J.-C. GÉMINARD & V. VIDAL, Flow and fracture in water-saturated, unconstrained granular beds, *Front. Phys.*, **3**, 44 (2015).
4. B. PASCAL, N. PUSTELNIK, P. ABRY, M. SERRES & V. VIDAL, Joint estimation of local variance and local regularity for texture segmentation, application to multiphase flow characterization, in *25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Calgary, Canada, pp. 2092–2096 (2018).

Generalized dimensions and local indicators of dynamical systems

Théophile Caby^{1,2}, Davide Faranda^{3,4}, Giorgio Matnica^{5,6}, Sandro Vaienti² & Pascal Yiou³

¹ Aix Marseille Université, Université de Toulon, CNRS, CPT, 13 009 Marseille, France

² Center for Nonlinear and Complex Systems, Dipartimento di Scienza ed Alta Tecnologia, Università degli Studi dell' Insubria, Como, Italy

³ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR 82 12 CEA-CNRS-UVSQ, IPSL and Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

⁴ London Mathematical Laboratory, 8 Margravine Gardens, London, W6 8RH, UK

⁵ INFN sezione di Milano, Italy

⁶ Indam, Gruppo Nazionale di Fisica Matematica, Italy

caby.theo@gmail.com

Generalized dimensions of multifractal measures are usually seen as static objects, related to the scaling properties of suitable partition functions, or moments of measures of cells. When these measures are invariant for the flow of a chaotic dynamical system, generalized dimensions take on a dynamical meaning, as they provide the rate function for the large deviations of the 1st hitting time, which is the (average) time required to connect any two different regions in phase space. We prove this result rigorously under a set of stringent assumptions. As a consequence, the statistics of hitting times provides new algorithms for the computation of the spectrum of generalized dimensions. Numerical examples, presented along with the theory, suggest that the validity of this technique reaches far beyond the range covered by the theorem.

We state our result within the framework of extreme value theory. This approach reveals that hitting times are also linked to dynamical indicators such as stability of the motion and local dimensions of the invariant measure. This suggests that one can use local dynamical indicators from finite time series to gather information on the multifractal spectrum of generalized dimension. We show an application of this technique to experimental data from climate dynamics.

Turbulence d'ondes en hypergravité

Annette Cazaubiel¹, S. Mawet², A. Darras², G. Grojean², J. W. A. van Loon^{3,4}, S. Dorbolo² & É. Falcon¹

¹ Université de Paris, Université Paris Diderot, MSC, UMR 7057 CNRS, F-75 013 Paris, France

² GRASP, Département de Physique B5, Université de Liège - B-4000 Liège, Belgium

³ Gravity Simulation Laboratory, ESTEC, ESA, Noordwijk, The Netherlands

⁴ ACTA, University of Amsterdam, The Netherlands

`annette.cazaubiel@univ-paris-diderot.fr`

La turbulence d'ondes concerne l'étude des propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes aléatoires en interaction non linéaire. Ce phénomène, omniprésent dans la Nature, se rencontre dans de nombreuses situations : ondes de surface en océanographie, ondes internes en géophysique, ondes d'Alfvén dans les plasmas astrophysiques, ondes optiques ou ondes de spins dans les solides [1].

Nous étudions ici la turbulence d'ondes gravito-capillaires à la surface d'un fluide en hypergravité. En utilisant la centrifugeuse de grand diamètre de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), l'accélération effective de la gravité peut être contrôlée et atteindre jusqu'à 20 fois la gravité terrestre. La fréquence de transition entre les régimes de turbulence d'ondes de gravité et de capillarité est alors augmentée d'une décade. Une telle extension de la zone inertielle nous permet ainsi de mieux étudier en laboratoire le régime de turbulence d'ondes de gravité, encore mal compris. Le spectre de l'amplitude des ondes montre alors, dans chaque régime, une loi de puissance de l'échelle, dont l'exposant est trouvé indépendant du niveau de gravité et de la cambrure des ondes. Comme attendu par la théorie de turbulence faible, nous observons expérimentalement une séparation entre les temps caractéristiques de propagation linéaire, des interactions non linéaires et de dissipation. Cependant, les temps non linéaire et dissipatif sont trouvés être indépendants du niveau de gravité et de l'échelle considérée. Nous montrons alors qu'il est nécessaire de prendre en compte le rôle des modes propres grandes échelles du bassin (permettant un transfert d'énergie cumulatif à travers les échelles en plus du transfert usuel par interactions non linéaires entre ondes) afin de mieux décrire les expériences de laboratoire de turbulence d'ondes de gravité.

Ces expériences sont complémentaires de celles réalisées lors de campagnes de vols paraboliques au sein de l'Airbus Zéro-g [2] ou à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS) [3] pour observer la turbulence d'ondes purement capillaires sans l'influence de la gravité.

Nous remercions l'ESA pour l'accès au LDC (Large-Diameter Centrifuge) à travers l'offre CORA-GBF-2018. Nous remercions M. Mélard pour son support technique sur le dispositif expérimental. Ce travail a été en partie soutenu par l'ANR DYSTURB (project No. ANR-17-CE30-0004) et par le FNRS.

Références

1. S. NAZARENKO, *Wave Turbulence*, Lecture Notes in Physics vol. 825, Springer, Berlin (2010).
2. C. FALCÓN, E. FALCON, U. BORTOLOZZO & S. FAUVE, Capillary wave turbulence on a spherical fluid surface in zero gravity, *Europhys. Lett.*, **86**, 14002 (2009).
3. M. BERHANU, E. FALCON & S. FAUVE, Wave turbulence in microgravity, in *Report to COSPAR (World Committee for Space Research)*, CNES Ed., pp. 66–67 (2018).

Multi-stable liquid funnel-like interfaces induced by optical radiation pressure

Hugo Chesneau¹, Julien Petit, Nicolas Bertin, Hamza Chraïbi¹, Étienne Brasselet¹, Régis Wunenburger² & Jean-Pierre Delville¹

¹ Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, 351 cours de la libération, Talence, 33400

² Institut Jean le Rond d'Alembert, Place Jussieu, Paris, 75252

hugo.chesneau@u-bordeaux.fr

We present a numerical study about non linear deformation and metastability of soft liquid-liquid interfaces actuated by optical radiation pressure (RP). We perform Ab Initio simulations based on boundary element method which solves simultaneously Stokes and Helmholtz equations to investigate the coupling between wave propagation and interface deformation. We also compare with experimental results obtained by focusing a continuous wave laser beam on a soft ($\sigma \approx 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) liquid-liquid interface. At first, we show that above a threshold power, reflections of the wave within the deformation and then total internal reflection modify drastically the shape of the interface. The induced liquid structure becomes then guiding and form liquid-core liquid-cladding waveguides with a funnel-like shape [1,2]. In a second part, we point out and discuss the stability of these liquid waveguides which seem to present hysteretic behavior [3] and we compare them to numerically induced morphologies. Our numerical tool allow us to unravel the guiding properties of these liquid objects responsible of their stability. In fact, the RP exerted by the wave propagating into the deformation, counter-balance the Laplace pressure and stabilizes the liquid object formed. It keeps its shape when the power is continuously decreased until a second lower threshold is reached. Finally we demonstrate that this statement is true for multiple states of the funnel-like structure, showing the multi-stability of our liquid waveguides.

Références

1. É. Brasselet & J.-P. Delville, Liquid-core liquid-cladding optical fibers sustained by light radiation pressure: Electromagnetic model and geometrical analog, *Phys. Rev. A*, **78**, 013835 (2008).
2. É. BRASSELET, R. WUNENBURGER & J.-P. DELVILLE, Liquid optical fibers with a multistable core actuated by light radiation pressure, *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 014501, (2008).
3. R. WUNENBURGER, A. CASNER & J.-P. DELVILLE, Light-induced deformation and instability of a liquid interface. II. Dynamics., *Phys. Rev. E*, **73**, 036315 (2006).

Turbulence in edge tokamak plasma and interaction with magnetic X-point configuration in 3D fluid simulations

Guido Ciraolo¹ & Davide Galassi²

¹ CEA, IRFM, St Paul lez Durance, 13108, France

² École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015, Lausanne, Switzerland

guido.ciraolo@cea.fr

Turbulence in the edge plasma of a tokamak fusion device is a key actor in the determination of the confinement properties. The physics of the transition from Low to High confinement mode is not fully understood, but seems to be linked to the plasma shape. The 3D fluid turbulence code TOKAM3X is used here to evaluate the effect of a diverted configuration on turbulence in the edge plasma, in an isothermal framework. The presence of the X-point is found, locally, to affect both the shape of turbulent structures and the amplitude of the fluctuations, in qualitative agreement with recent experimental observations. In particular, fluctuations are strongly damped in the vicinity of the X-point, both in open and closed flux surfaces. Globally, a mild transport barrier spontaneously forms near the separatrix, differently from simulations in limiter configuration. The effect of turbulence-driven Reynolds stress on the formation of the barrier is found to be weak by dedicated simulations, while turbulence damping around the X-point seems to globally reduce turbulent transport on the whole flux surface. Although the L-H transition dynamics is not retrieved, the magnetic shear around the X-point could be a crucial element in the formation of the edge transport barriers

Interaction onde–écoulement moyen en hydrodynamique dispersive

Thibault Congy¹, Gennady El¹ & Mark Hoefer²

¹ Department of Mathematics, Physics and Electrical Engineering, Northumbria University, Newcastle upon Tyne, UK

² Department of Applied Mathematics, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309-0526, USA
thibault.congy@northumbria.ac.uk

L'interaction entre une onde et un écoulement moyen, ou *wave-mean flow interaction*, constitue un problème fondamental de la mécanique des fluides. Une des clés pour étudier une telle interaction est la séparation des échelles de variation spatiale et temporelle, beaucoup plus petites pour les ondes que pour l'écoulement moyen. L'interaction onde-écoulement moyen a été largement étudiée pour des situations où le courant est prescrit de façon externe sous la forme d'un courant stationnaire ou dépendant du temps.

Durant cette présentation, je décrirai une nouvelle réalisation de cette interaction où un projectile correspondant à une onde de petite échelle : un paquet d'onde linéaire ou un soliton, interagit avec un état hydrodynamique en expansion : une onde de raréfaction ou une onde de choc dispersive (par ex. un mascaret). Le couplage entre l'onde et le courant moyen de l'état hydrodynamique est décrit par des équations de modulation. Ces équations admettent une classe particulière de solutions décrivant la transmission (*tunnelling*) ou le piégeage de l'onde incidente par l'état hydrodynamique non-stationnaire. Dans les deux cas, deux invariants adiabatiques de la modulation sont identifiés et déterminent les conditions de transmission et de piégeage du projectile. Je montrerai notamment que ces conditions sont indépendantes de la nature de l'état hydrodynamique, propriété dénommée réciprocité hydrodynamique, confirmée récemment expérimentalement. La théorie développée est générale et peut être appliquée à des équations d'onde non-linéaires, intégrables ou non-intégrables, dans divers contextes physiques comprenant la mécanique des fluides, l'optique non-linéaire ou les gaz quantiques. L'équation de Korteweg-de Vries sera considérée comme exemple concret. Cette présentation est basée sur deux travaux récents [1, 2].

Références

1. M. D. MAIDEN, D. V. ANDERSON, N. A. FRANCO, G. A. EL & M. A. HOEFER, Solitonic dispersive hydrodynamics: Theory and observation, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 144101 (2018).
2. T. CONGY, G. A. EL & M. A. HOEFER, Interaction of linear modulated waves with unsteady dispersive hydrodynamic states, [arXiv:1812.06593](https://arxiv.org/abs/1812.06593).

Intermittence et multi-stabilité d'un tube mou parcouru par un écoulement d'air

Anne Cros¹, Arturo Orozco Estrada¹, Ricardo Morales Hernández¹ & Ricardo Lima²

¹ Universidad de Guadalajara, Mexique

² Dream and Science Factory, Marseille

anne.cros@academicos.udg.mx

Lorsqu'un tube flexible est parcouru par un écoulement d'air, il est sujet à l'instabilité aeroélastique qui provoque des oscillations périodiques [1]. Le tube de notre expérience a des parois si fines que, lorsqu'il fluctue, le tube se plie et se déplie sur sa longueur qui est alors constituée de portions curvilignes séparées par des angles pour lesquels les dérivées spatiales ne sont plus définies [2].

Lorsque le tube est suspendu et sous certaines conditions de la vitesse de l'air, le tube présente un régime intermittent, pour lequel les phases turbulentes correspondent aux fluctuations chaotiques du tube alors que les phases laminaires durent tant qu'un profil en zig-zag se maintient statique. Le signal de pression est enregistré à la base du tube pour différentes puissances électriques de la pompe. Les distributions statistiques des durées sont de type exponentiel pour les régions turbulentes et algébriques pour les phases laminaires.

Nos signaux sont analysés dans le cadre d'un système probabiliste [3], où une variable d'état x varie aléatoirement au cours du temps. Une seconde variable aléatoire y joue le rôle du seuil et le système reste dans la même phase tant que $x \leq y$ et change de phase lorsque $x > y$. Les deux lois statistiques sont retrouvées lorsque le seuil varie avec la même cadence que la variable d'état (loi exponentielle) ou bien lorsqu'il est congelé (loi algébrique).

Après avoir proposé une signification physique pour x et y , il est possible de relier les exposants des distributions des durées aux moments flecteurs nécessaires pour générer des plis dans le tube.

Références

1. M. P. PAÏDOUSSIS, Dynamics of tubular cantilevers conveying fluid, *J. Mech. Eng. Sci.*, **12**, 85–103 (1970).
2. F. CASTILLO FLORES & A. CROS, Transition to chaos of a vertical collapsible tube conveying air flow, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **166**, 012017 (2009).
3. E. FLORIANI, D. VOLCHENKOV & R. LIMA, A system close to a threshold of instability, *J. Phys. A*, **36**, 4771–4783 (2003).

Convective patterns in viscous planetary interiors

Anne Davaille

Laboratoire FAST (CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris-Saclay), Bât. 502, rue André Rivière, 91405 ORSAY, FRANCE

davaille@fast.u-psud.fr

The cooling and evolution of a planet strongly depends on the convective regime prevailing in its mantle (e.g. the 2900 km-thick envelope of solid rocks under our feet on Earth). Geophysical data show that the planets and rocky satellites of our solar system undergo very different evolutions and present-day dynamics. But the conditions necessary for convection to generate plate tectonics and quasi-continuous resurfacing on Earth, episodic resurfacing on Venus, heat pipes on Io, or no resurfacing on Mars, remain strongly debated. The difficulty comes from the complexity of rocks rheology : viscous at high temperature and on long time-scale, brittle at low temperature and short time-scale. This “soft matter” behaviour can be recovered in the laboratory using aqueous colloidal dispersions, whose rheology varies from viscous to elasto-visco-plastic to brittle when their temperature, and/or their water or ionic content, vary. We therefore have investigated the characteristics of thermal and solutal convection in those systems. They show a diversity of convective regimes, including the ones encountered in rocky mantles. Their physical understanding provides insights on the dynamics of planetary interiors.

Dynamique de sédimentation de particules

David De Souza¹, Romain Monchaux¹ & Anne Dejoan²

¹ Institut des Sciences de la Mécanique et Applications Industrielles (IMSIA),
ENSTA-ParisTech/CNRS/CEA/EDF/Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France

² Unidad de Modelización y Simulación de Procesos, Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spain

david.de-souza@ensta-paristech.fr

Les écoulements transportant des particules ont un large champ d'applications, technologiques et naturelles. Ces écoulements sont en général décrits par : le nombre de Reynolds (intensité de la turbulence), le nombre de Stokes (inertie des particules), le nombre de Rouse et le nombre de Froude (effets de la gravité). L'équation régissant le mouvement d'une particule dans un écoulement turbulent étant complexe [1, 2], la plupart des modèles reposent sur de fortes simplifications. Des études expérimentales sont donc toujours nécessaires. Certains phénomènes relatifs à ces écoulements sont bien documentés, comme la concentration préférentielle et la modification de la vitesse de sédimentation des particules. Ces deux phénomènes semblent de plus être liés, comme suggéré dans les travaux expérimentaux menés par Aliseda [3]. Il avance notamment que les amas de particules se comporteraient comme des méta-particules, responsables de la modification de la vitesse de sédimentation. Ceci est soutenu par des travaux expérimentaux plus récents [4] et par des simulations numériques prenant en compte une rétroaction des particules sur le fluide (simulation *two-way*) [5].

Nous avons conçu un dispositif dans lequel des particules solides tombent dans un écoulement turbulent engendré par des grilles oscillantes. Nos objectifs sont les suivants : (i) démêler les effets des différents paramètres de contrôle et (ii) poursuivre l'étude du lien entre vitesse de glissement locale particule/fluide et modification de la vitesse de sédimentation. En contrôlant nos populations de particules en densité (particules en verre, céramique, acier et carbure de tungstène, pour des rapports de densité avec l'eau de 2,5, 4, 7 et 14) et en taille (10 à 200 μm affinés par des tamis) nous pourrions paver l'espace des paramètres afin d'évaluer l'effet de chacun d'entre eux. En utilisant un dispositif de double mesure en velocimétrie par images de particules (PIV) et en suivi de particule (PTV), nous aurons accès simultanément aux vitesses des deux phases. Cette étude expérimentale est complétée par de nouvelles simulations *two-way*.

Dans la littérature, la vitesse de référence choisie pour l'étude de la modification de la vitesse de sédimentation est souvent celle d'une particule soumise à une traînée linéaire de type Stokes. Comme des effets collectifs peuvent apparaître même sans turbulence amont, un tel choix peut nuire à l'étude de l'effet de la turbulence sur la vitesse de sédimentation, en particulier dans le cas d'une diminution de cette vitesse. Nous sommes donc actuellement en train d'effectuer des mesures de référence sans turbulence avec des fractions volumiques en particules permettant que des effets collectifs soient observés (10^{-5} à 10^{-4}). Ces résultats sont comparés aux vitesses de sédimentations obtenues selon différents modèles de traînée (Stokes, Schiller–Naumann, Newtonien).

Références

1. R. GATIGNOL, The Faxén formulae for a rigid particle in an unsteady non uniform Stokes flow, *J. Mec. Theor. Appl.*, **1**, 143–150 (1983).
2. M. R. MAXEY & J. J. RILEY, Equation of motion for a small rigid sphere in a non uniform flow, *Phys. Fluids*, **26**, 883–889 (1983).
3. A. ALISEDA *et al.*, Effect of preferential concentration on the settling velocity of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence, *J. Fluid Mech.*, **468**, 77–105 (2002).
4. P. D. HUCK *et al.*, The role of collective effects on settling velocity enhancement for inertial particles in turbulence, *J. Fluid Mech.*, **846**, 1059–1075 (2018).
5. R. MONCHAUX & A. DEJOAN, Settling velocity and preferential concentration of heavy particles under two-way coupling effects in homogeneous turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, **2**, 104302 (2017).

Topology of quasi-singularities in an experimental turbulent swirling flow

Paul Debue¹, Valentina Valori¹, Yasar Ostovan², Christophe Cuvier², Jean-Philippe Laval², Jean-Marc Foucaut², Bérengère Dubrulle¹ & François Daviaud¹

¹ SPEC, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, France

² LMFL, Université de Lille, Lille, France

paul.debue@cea.fr

Even though they are more than 150 years old, the incompressible 3D Navier-Stokes equations remain an open mathematical problem [1]: the existence of a solution was proven by Leray [2] but it is still unknown whether such a solution is unique and regular. The quest for singularities in Navier-Stokes equations is of fundamental interest but may also have more applied consequences, regarding the relevance of numerical simulation and small scale modelling for instance.

In this work we aim at providing insight on what such singularities may resemble and how they may form by studying the distribution and topology of extreme events of energy transfer in a real turbulent flow. Indeed, a singularity is characterized by a refinement of scales and may result in a non-zero or diverging inter-scale transfer with decreasing scale, as suggested by Duchon and Robert [3].

Local inter-scale energy transfer terms are computed from 3D-3C velocity fields, experimentally obtained by tomographic particle image velocimetry (TPIV) implemented in a compact set-up involving 5 cameras. Extreme events are detected following the methodology described in a previous work of the group [4], with the improvement that we are now able to measure the gradients in the three directions and compute the full transfer terms. This also allows to study the topology of such events following the classification provided in [5] and based on the velocity gradient tensor invariants.

Références

1. <https://www.claymath.org/millennium-problems/navier%E2%80%93stokes-equation> [Online; accessed 11-December-2018]
2. J. LERAY, Sur le mouvement d'un liquide visqueux emplissant l'espace, *Acta Math. J.*, **63**, 193–248 (1934).
3. J. & R. ROBERT, Inertial energy dissipation for weak solutions of incompressible Euler and Navier–Stokes equations, *Nonlinearity*, **13**, 249–255 (2000).
4. E.-W. SAW, D. KUZZAY, D. FARANDA, A. GUITTONNEAU, F. DAVIAUD, C. WIERTEL-GASQUET, V. PADILLA & B. DUBRULLE, Experimental characterization of extreme events of inertial dissipation in a turbulent swirling flow, *Nat. Commun.*, **7**, 12466 (2016).
5. M. S. CHONG, A. E. PERRY & B.J. CANTWELL, A general classification of three-dimensional flow fields, *Phys. Fluids A*, **2**, 765 (1990).

Mathematical models of self-organization

Pierre Degond

Imperial College, London
p.degond@imperial.ac.uk

Self-organization happens when agents interacting through local rules generate large-scale coherent structures. It occurs across all living and social systems and through a formidable variety of mechanisms. However, common features among the different systems suggest that some “universal” models may provide valuable insight. In this talk, I will discuss models of alignment dynamics of self-propelled particles and highlight the challenges that they pose.

Comportement asymptotique de populations hétérogènes avec interactions

Antonin Della Noce¹, Amélie Mathieu² & Paul-Henry Cournède¹

¹ Laboratoire MICS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 9 rue Joliot-Curie, 91190, Gif-sur-Yvette

² UMR ÉcoSys, INRA AgroParisTech, Route de la ferme, 78850 Thiverval-Grignon

antonin.della-noce@centralesupelec.fr

Le formalisme de limite de champ moyen a été historiquement appliqué à des systèmes étudiés en physique statistique pour décrire leurs comportements macroscopiques à partir de modèles d'interaction à l'échelle microscopique. Il s'est développé à partir d'équations décrivant des gaz et des fluides. Cette limite peut être interprétée comme une approximation du milieu continu : elle permet le passage d'un système différentiel décrivant la dynamique d'une population finie de particules à une équation de transport non-locale donnant l'évolution de la densité de probabilité représentant le système comme un continuum. Ce formalisme a récemment été généralisé à des populations d'organismes vivants, notamment aux essaims d'oiseaux et aux bancs de poissons [1], ou encore aux réseaux de neurones naturels [2]. Pour des populations d'individus vivants, il peut être pertinent de supposer que les individus ne sont pas identiques, ont des caractéristiques propres. Introduire de la diversité dans la population rompt la symétrie et a des conséquences notables sur la dynamique. Dans des populations dont la taille est bien en deçà de l'Avogadro, il est aussi intéressant d'identifier la taille critique de la population au delà de laquelle les trajectoires microscopiques sont proches de la trajectoire donnée par la limite de champ moyen pour une précision donnée.

Nous nous intéressons donc à une population d'individus décrits par $((X_i, \theta_i))_{1 \leq i \leq N}$ où $X \in \mathcal{X}$ est l'état de l'individu (e.g. sa position, sa vitesse,...) et $\theta \in \Theta$ est un vecteur de paramètres regroupant les caractéristiques propres de l'individu qui sont supposées fixées dans le modèle considéré (e.g. sa masse, sa couleur,...). La limite de champs moyen obtenu en appliquant une méthodologie similaire à [3] a pour flot caractéristique

$$\forall X, \theta \in \mathcal{X} \times \Theta, \begin{cases} \mathbf{X}(0, X, \theta) = X \\ \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t}(t, X, \theta) = \int_{\mathcal{X} \times \Theta} g(\mathbf{X}(t, X, \theta), \theta, \mathbf{X}(t, X', \theta'), \theta') \mu_0(dX', d\theta') \end{cases}$$

Dans l'équation ci-dessus, g est une fonction d'interaction et μ_0 est une mesure de probabilité représentant la configuration initiale de la population. Le flot caractéristique $t \mapsto \mathbf{X}(t, X, \theta)$ représente la trajectoire d'une particule interagissant avec un continuum d'autres individus, eux-mêmes mus par une dynamique identique. Nous proposons un schéma numérique pour approcher $t \mapsto \mathbf{X}(t, X, \theta)$ sur l'ensemble $\mathcal{X} \times \Theta$. Le schéma n'utilise qu'une discrétisation en temps, car discrétiser l'espace $\mathcal{X} \times \Theta$ est prohibitif numériquement même pour des modèles simples. À chaque pas de temps de la discrétisation, $(X, \theta) \mapsto \mathbf{X}(t, X, \theta)$ est approchée en utilisant une régression par processus gaussiens, dont le noyau de corrélation k_t est calculée à partir de la fonction de transition g . La simulation du flot caractéristique permet entre autre de valider l'hypothèse de l'approximation de champ moyen et ouvre des perspectives pour l'inférence statistique sur de grandes populations avec interactions, notamment l'inférence par méthode bayésienne variationnelle.

Références

1. P. DEGOND, A. FROUVILLE & S. MERINO-ACEITUNO, *Math. Models Methods Appl. Sci.*, **27**, 1005–1049 (2017)
2. B. PERTHAME, D. SALORT & G. WAINRIB, *Physica D*, **353–354**, 20–30 (2017)
3. F. GOLSE, On the Dynamics of Large Particle Systems in the Mean Field Limit, in *Macroscopic and Large Scale Phenomena: Coarse Graining, Mean Field Limits and Ergodicity*, A. Muntean, J. Rademacher & A. Zagaris (éditeurs), Springer, pp. 1–144 (2016).

Dynamiques transitoires de sillage dans le « pinball fluïdique »

Nan Deng^{1,2}, Luc R. Pastur¹, Bernd R. Noack^{2,3,4}, Guy Cornejo-Maceda², François Lusseyran², Jean-Christophe Loiseau⁵ & Marek Morzyński⁶

¹ IMSIA – UMR9219 , ENSTA ParisTech, Palaiseau, France

² LIMSI – CNRS, Université Paris Saclay, Orsay, France

³ Harbin Institute of Technology, China

⁴ Technische Universität Berlin, Allemagne

⁵ Laboratoire DynFluid, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France

⁶ Poznań University of Technology, Pologne

nan.deng@ensta-paristech.fr

La configuration d'écoulement dite du « pinball fluïdique », ou « flipper fluïdique », a été récemment introduite avec l'objectif de proposer un système à la fois simple et rapide à simuler numériquement pour expérimenter différentes techniques de contrôle en mécanique des fluïdes, et suffisamment riche pour adresser les problèmes liés aux entrées et sorties multiples dans ces systèmes, dont la dynamique est intrinsèquement non-linéaire et la dimension de l'espace des états virtuellement infinie (équations Navier-Stokes). Il s'agit de trois cylindres disposés sur les sommets d'un triangle équilatéral en écoulement transverse, dont les actionneurs sont les cylindres eux-mêmes, susceptibles de tourner sur leur axe propre, tandis que les capteurs sont des sondes de vitesse ou de pression placées dans le sillage ou à la surface des cylindres, respectivement [1, 2]. La dynamique *naturelle*, non forcée, de cette configuration d'écoulement s'est révélée étonnamment riche [3, 4]. C'est ce que nous souhaitons mettre en évidence dans cette contribution, où les dynamiques transitoires du système dynamique sous-jacent, étudiées du point de vue des coefficients de portance et de traînée du système fluïde, sont instructives quant aux mécanismes à l'œuvre dans cet écoulement, en particulier vis-à-vis des deux bifurcations, Hopf puis fourche supercritiques, subies par le système, à nombre de Reynolds croissant, sur sa route vers le chaos [5, 6].

Références

1. B. R. NOACK, K. AFANASIEV, M. MORZYŃSKI, G. TADMOR & F. THIELE, A hierarchy of low-dimensional models for the transient and post-transient cylinder wake, *J. Fluid Mech.*, **497**, 335–363 (2003).
2. B. R. NOACK & M. MORZYŃSKI, *The Fluidic Pinball: A Toolkit for Multiple-Input Multiple-Output Flow Control (version 1.0)*, Tech. Rep. 02/2017. Chair of Virtual Engineering, Poznan University of Technology, Poland (2017).
3. N. DENG, B. R. NOACK, M. MORZYŃSKI & L. R. PASTUR, Low-order model for successive bifurcations of the fluidic pinball, *arXiv preprint arXiv:1812.08529* (2018).
4. J. C. LOISEAU, N. DENG, L. R. PASTUR, M. MORZYŃSKI, B. R. NOACK & S. L. BRUNTON, Sparse reduced-order modeling of the fluidic pinball, in *Journées du GDR Contrôle des Décollements* (2017).
5. N. DENG, L. R. PASTUR, M. MORZYŃSKI & B. R. NOACK, Reduced-order modeling of the pinball fluïdique, in *International Conference on Chaotic Modeling, Simulation and Applications* (2018).
6. N. DENG, L. R. PASTUR, M. MORZYŃSKI & B. R. NOACK, Route to chaos in the fluidic pinball, in *ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting* (p. V001T01A005), American Society of Mechanical Engineers (2018).

Solutal convection induced by dissolution

Julien Philippi¹, Michael Berhanu², Sylvain Courrech du Pont² & Julien Derr²

¹ TIPs, Université Libre de Bruxelles, C.P. 165/67, Avenue F. D. Roosevelt 50, 1050 Bruxelles, Belgium

² Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Université Paris Diderot, CNRS UMR 7057, 10 Rue Alice Domont et Léonie Ducquet, 75205 Paris Cedex 13, France

`julien.derr@univ-paris-diderot.fr`

The dissolution of minerals into water which erodes and shapes exposed solid surfaces made of soluble rocks becomes significant in geomorphology, when the erosion rate is controlled by the hydrodynamics transport of the solute [1–3]. This situation can occur even in absence of an external flow, when the dissolution induces itself a convection flow due to the action of gravity (see our experimental work [4]). Here we perform a study of the physics of solutal convection by the means of numerical simulations of the hydrodynamics and of the solute transport in 2D geometry, corresponding to the case, where a soluble body is suddenly plunged and suspended in water. The convection flow starts after an onset time, which is characterized. Then, after a time of few onset times, a quasi-stationary regime is reached corresponding to a constant global erosion rate, controlled by the structure of the concentration boundary layer at the dissolving interface. Assuming that the destabilization of this boundary layer occurs at a specific value of the solutal Rayleigh number, we derive scaling laws both for fast and slow dissolution kinetics. These laws are then successively validated by the simulations. As a consistency test, a common value of the Rayleigh number is found *a posteriori* during the quasi-stationary regime, showing that the structure of the boundary layer is well controlled by the hydrodynamics. Finally, by applying the scaling laws previously established to the case of real dissolving minerals, we can predict the typical dissolution rate in presence of solutal convection. Our results suggest that the solutal convection could occur in more natural situations than expected even for minerals with a quite low saturation concentration, leading to an increased erosion rate as the dissolution is controlled by the hydrodynamics.

References

1. P. MEAKIN & B. JAMTVEIT, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **466**, 659 (2010).
2. J. COLOMBANI & J. BERT, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 1913 (2007).
3. S. BRANTLEY, *Kinetics of Water-Rock Interaction*, Springer (2008).
4. C. COHEN, M. BERHANU, J. DERR & S. COURRECH DU PONT, *Phys. Rev. Fluids*, **1**, 050508 (2016).

Rivers in the lab

Olivier Devauchelle¹, Anaïs Abramian², Éric Lajeunesse¹, Pauline Delorme³, François Métivier¹ & Laurie Barrier¹

¹ Institut de Physique du Globe de Paris, 1 rue Jussieu, Paris, France

² Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge

³ Department of Geography and Environment, University of Southampton

devauchelle@ipgp.fr

Alluvial rivers transport sediment, and build their own bed out of it. The flow entrains sediment grains and deposit them downstream, thus deforming the channel that confines it. This fluid-structure coupling generate ripples, dunes, bars and meanders through various instabilities. More fundamentally, it also selects the size and the slope of a river. Indeed, to entrain a sediment grain, the flow-induced shear stress must overcome its weight. This threshold, typical of granular materials, sets the characteristic size of alluvial rivers [1–4]. Beyond this threshold, however, gravity pulls the traveling grains toward the center of the stream. To maintain its banks, a river thus needs to balance this transverse flux of sediment [5].

Creating small rivers in laboratory experiments is an old idea, but only now can we track thousands of individual grains as they travel downstream, to reveal the statistics of sediment transport [6]. In a small laboratory flume, we track plastic grains entrained by a laminar flow. Their trajectories show that the roughness of the underlying sediment layer causes the particles to disperse across the bed’s surface as they travel downstream. This random walk induces a Fickian flux which tends to homogenize the sediment flux across the stream [7]. Meanwhile, the bed assumes a convex shape which gathers the traveling grains near its center. As a result, the sediment flux distributes itself in this self-organized potential well according to Boltzman statistics.

The same mechanism allows laboratory rivers to adjust their cross-section and their width to the sediment discharge: they widen and shallow to accommodate a larger input. Beyond a critical sediment discharge, however, a river destabilizes into a braid of intertwined channels. We suggest that a new instability, driven by bedload diffusion, might explain this transition [8].

Finally, we investigate how these dynamics express themselves in large sedimentary structures deposited by rivers: alluvial fans [9].

References

1. R. E. GLOVER & Q. L. FLOREY, *Stable Channel Profiles*, Technical report, U.S. Bur. Reclamation (1951).
2. F. M. HENDERSON, Stability of alluvial channels, *J. Hydraul. Div.*, **87**, 109–138 (1961).
3. F. MÉTIVIER, E. LAJEUNESSE & O. DEVAUCHELLE, Laboratory rivers: Lacey’s law, threshold theory, and channel stability, *Earth Surface Dynamics*, **5**, 187–198 (2017).
4. G. SEIZILLES, O. DEVAUCHELLE, E. LAJEUNESSE & F. MÉTIVIER, Width of laminar laboratory rivers, *Phys. Rev. E*, **87**, 052204 (2013).
5. G. PARKER, Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 2. The gravel river, *J. Fluid Mech.*, **89**, 127–146 (1978).
6. J. C. ROSEBERRY, M. W. SCHMEECKLE & D. J. FURBISH, A probabilistic description of the bed load sediment flux: 2. Particle activity and motions, *J. Geophys. Res.*, **117**, F03032 (2012).
7. G. SEIZILLES, E. LAJEUNESSE, O. DEVAUCHELLE & M. BAK, Cross-stream diffusion in bedload transport, *Phys. Fluids*, **26**, 013302 (2014).
8. A. ABRAMIAN, O. DEVAUCHELLE & E. LAJEUNESSE, Streamwise streaks induced by bedload diffusion, *J. Fluid Mech.*, **863**, 601–619 (2019).
9. P. DELORME, O. DEVAUCHELLE, L. BARRIER & F. MÉTIVIER, Growth and shape of a laboratory alluvial fan, *Phys. Rev. E*, **98**, 012907 (2018).

Vers une standardisation des ultrasons non linéaires pour le contrôle non destructif du futur

Serge Dos Santos¹, Ali Masood^{1,2}, Martin Lints^{1,3}, Denis Arruga¹ & Giuseppe Nardoni⁴

¹ INSA Centre Val de Loire, UMR 1253, iBrain, Université de Tours, Inserm, Academia NDT International
3 rue de la Chocolaterie, CS 23410 F-41034 Blois Cedex, France

² Institute of Cybernetics, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia

³ Thomas Johann Seebeck Department of Electronics, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia

⁴ IT Nardoni Via D.C. Pontevia n21, 25010 – Fozzano - Brescia – Italy

serge.dossantos@insa-cvl.fr

L'acoustique non linéaire permet d'expliquer la propagation non linéaires d'ondes mécaniques dans les solides, les liquides et les milieux complexes à bulles ou composites, par exemple. Les ultrasons non linéaires sont ainsi rentrés progressivement dans le quotidien des métrologues du fait de l'amplitude de leur signature proche du niveau de bruit mesuré au cours d'expérimentations conduites dans le domaine du Contrôle Non Destructif (CND) ou de l'échographie médicale [1]. C'est ainsi que l'imagerie harmonique, exploitant la signature non linéaire du second ordre, a pu profiter de la réponse acoustique non linéaire plus importante dans les fluides que dans les solides, milieux d'exploration du CND au sein desquels la réponse est nettement plus faible et donc peu émergente du niveau de bruit de mesure. De plus, grâce aux nouvelles méthodes de traitement du signal, l'extraction, l'identification et la localisation de sources acoustiques non linéaires ont pu être conduites ces dernières années au sein de la communauté de l'acoustique non linéaire. Après une vingtaine d'années de modélisations, de simulations et d'expérimentations, la communauté internationale de CND reconnaît l'émergence et le potentiel des ultrasons non linéaire pour faire rentrer le CND dans la transition numérique de l'industrie du futur, sous réserves de lui faire bénéficier de toutes les nouvelles technologies numérique comme l'IoT, le big data ou l'intelligence artificielle [2].

Lors de cet exposé, nous proposons de présenter quelques résultats expérimentaux obtenus depuis les vingt dernières années dans le contexte du CND de structures complexes. Afin d'illustrer ces résultats, nous proposons de présenter les développements récents dans le domaine du CND permettant de localiser temporellement une source acoustique de nonlinéarité. En imagerie harmonique non destructive, c'est par l'utilisation d'une symbiose du processus de retournement temporel (TR) et de la spectroscopie d'ondes élastiques non linéaires (NEWS) qui permettent, *via* l'utilisation d'un processus de codage d'excitation [3], de proposer à la communauté l'instrumentation TR-NEWS confirmant le concept de "Retournement Temporel Non Linéaire" comme un formidable potentiel pour la localisation des nonlinéarités physiques d'un système complexe [4]. Nous présenterons le dispositif expérimental TR-NEWS appliqué à l'étude de la propagation acoustique non linéaire dans une cale d'étalonnage V3 en cours de standardisation.

Références

1. S. DOS SANTOS *et al.*, Application de l'acoustique non linéaire dans le contrôle non destructif : mesure du paramètre non linéaire de la silice par une méthode de modulation de phase, in *Comptes-Rendus de la 6^e Rencontre du Non-Linéaire*, Institut H. Poincaré, Paris, pp. 107–112 (2003).
2. S. DOS SANTOS, M. LINTS, D. ARRUGA, A. MASOOD & A. SALUPERE, Standards for acousto-mechanical evaluation of multiscale hysteretic properties of complex material with nonlinear time reversal imaging, *Proceedings of the 14th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*, pp. 49–57 (2017).
3. M. LINTS, ANDRUS SALUPERE & S. DOS SANTOS, Simulation of detecting contact nonlinearity in carbon fibre polymer using ultrasonic nonlinear delayed time reversal, *Acta Acustica united Ac.*, **103**, 978–986 (2017), Open access paper <https://doi.org/10.3813/AAA.919127>
4. M. FRAZIER, B. TADDESE, T. ANTONSEN & S. M. ANLAGE, Nonlinear time reversal in a wave chaotic system, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 063902 (2013).

Dynamique non-linéaire du centre guide d'un électron soumis à un champ laser de forte intensité

Jonathan Dubois¹, Simon A. Berman^{1,2}, Cristel Chandre¹ & Turgay Uzer²

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, I2M, Marseille, France

² School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332-0430, USA

jonathan.dubois@univ-amu.fr

Le but ultime de la physique à champs forts et ultra courts est de capturer des images instantanées de biomolécules en mouvement [1]. Outre des difficultés techniques évidentes, il y a toujours eu un obstacle fondamental à l'interprétation de ces images : le mouvement d'un électron dans un champ laser et un champ de Coulomb est un problème irrésolu. Le hamiltonien décrivant la dynamique de l'électron actif — ou électron de valence — dépendant du temps est principalement composé d'un terme d'interaction avec le laser et d'un terme d'interaction avec son ion parent. Nous utilisons un changement de coordonnées pour décrire la dynamique de l'électron à l'aide de la dynamique de son centre guide [2,3]. Nous dérivons une hiérarchie de modèles réduits, sous certaines hypothèses, basée sur la moyennisation du mouvement de l'électron en utilisant les transformées canoniques de Lie. Le hamiltonien résultant qui gouverne la dynamique non linéaire du centre guide ne dépend plus du temps, et peut être utilisé pour interpréter et prédire la dynamique de l'électron.

Références

1. C. I. BLAGA *et al.*, Imaging ultrafast molecular dynamics with laser-induced electron diffraction, *Nature*, **483**, 194 (2012).
2. J. DUBOIS *et al.*, Capturing photoelectron motion with guiding centers, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 113202 (2018).
3. J. DUBOIS *et al.*, Guiding-center motion for electrons in strong laser fields, *Phys. Rev. E*, **98**, 052219 (2018).

Du tout simple au très compliqué : itinéraire dans la non-linéarité des plasmas

Dominique Escande

PIIM, Aix-Marseille Université
dominique.escande@univ-amu.fr

La non-linéarité des plasmas est un sujet extrêmement vaste. Cet exposé de 40 minutes donne un coup de projecteur sur quelques-uns de ses aspects que l'orateur connaît bien et qui sont présentables de façon imagée à un public de non spécialistes. Les plasmas considérés dans l'exposé sont classiques, faiblement couplés et faiblement collisionnels. L'aspect « tout simple » correspond à un plasma de « manuel », de densité uniforme et non magnétisé avec des électrons vivant sur un fond ionique neutralisant uniforme. Les non-linéarités considérées agissent au niveau cinétique. Aux échelles spatiales inférieures à la longueur de Debye, les collisions produisent une auto-organisation du plasma qui se traduit par l'écrantage de Debye [1]. Aux échelles spatiales supérieures à la longueur de Debye, les ondes de Langmuir signent le comportement collectif du plasma. Une onde peut piéger des particules avec un portrait de phase identique à celui du pendule non linéaire [2]. Deux ondes créent du chaos plus ou moins étendu dans l'espace des phases. Une approche de type « groupe de renormalisation » régit le comportement des barrières de transport dans cet espace (tores de Kolmogorov–Arnold–Moser) [2, 3]. L'aspect « très compliqué » correspond au plasma d'une configuration toroïdale de confinement magnétique pour la fusion thermonucléaire contrôlée appelée *Reversed Field Pinch*. La non-linéarité s'y manifeste de trois façons : (i) par un auto-renversement du champ magnétique toroïdal impliquant un effet dynamo et une déformation hélicoïdale du plasma [4]; (ii) par une bifurcation menant d'un renflement hélicoïdal du plasma à une déformation hélicoïdale régulière, et menant parallèlement d'un chaos à un ordre magnétiques [5–7]; (iii) par une seconde bifurcation menant d'une topologie de surfaces magnétiques avec une séparatrice à une topologie unique de surfaces magnétiques sans séparatrice [8], et menant parallèlement à la constitution d'une barrière de transport renfermant un plasma très chaud [9].

Références

1. D. F. ESCANDE, Y. ELSKENS & F. DOVEIL, Direct path from microscopic mechanics to Debye shielding, Landau damping and wave-particle interaction, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **57**, 025017 (2015).
2. D. F. ESCANDE, From thermonuclear fusion to Hamiltonian chaos, *Eur. Phys. J. H*, **43**, 397–420 (2018).
3. D. F. ESCANDE & F. DOVEIL, Renormalization method for the onset of stochasticity in a Hamiltonian system, *Phys. Lett. A*, **83**, 307–310 (1981)
4. D. F. ESCANDE *et al.*, Single helicity: A new paradigm for the reversed field pinch, *PLASMA PHYS. CONTR. FUSION*, **42**, B243 (2000).
5. S. CAPPELLO & R. PACCAGNELLA, Nonlinear plasma evolution and sustainment in the reversed field pinch, *Phys. Fluids B*, **4**, 611 (1992).
6. S. CAPPELLO & D. F. ESCANDE, Bifurcation in viscoresistive MHD: The Hartmann number and the reversed field pinch, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 3838 (2000).
7. D. F. ESCANDE *et al.*, Quasi-single-helicity reversed-field-pinch plasmas, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1662 (2000)
8. D. F. ESCANDE *et al.*, Chaos healing by separatrix disappearance and quasisingle helicity states of the reversed field pinch, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 3169 (2000).
9. R. LORENZINI *et al.*, Self-organized helical equilibria as a new paradigm for ohmically heated fusion plasmas, *Nat. Phys.*, **5**, 570 (2009).

Contrôle d'une instabilité spatio-temporelle affectant les électrons relativistes dans les centres de rayonnement synchrotron

Clément Evain¹, C. Sz waj¹, E. Roussel¹, M. Le parquier¹, M.-A. Tordeux², M. Labat², F. Ribeiro², N. Hubert², J.-B. Brubach², P. Roy², S. Bielawski¹

¹ Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers, Atomes et Molécules, Centre d'Étude Recherches et Applications (CERLA), F-59000 Lille, France

² Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91192 Gif-sur-Yvette, France

`clement.evain@univ-lille.fr`

Les paquets d'électrons relativistes, utilisés pour produire de la lumière dans les centres de rayonnement synchrotron, sont des milieux complexes en interaction constante avec leur environnement extérieur et avec eux mêmes. Un phénomène « universel » dans ces centres est l'apparition, lorsque le nombre d'électrons dans le paquet dépasse une valeur seuil, d'une instabilité qui vient modifier la dynamique longitudinale des électrons. Cette instabilité, appelée *microbunching instability*, est caractérisée par l'apparition spontanée de micro-structures dans le profil longitudinal du paquet (à l'échelle du millimètre, associée à des fréquences téraHertz). Ces micro-structures permettent l'émission d'un rayonnement cohérent très intense ; cependant leur utilisation en tant que source THz est limitée car ces micro-structures apparaissent très généralement sous la forme de bouffées irrégulières.

En utilisant des techniques inspirées des méthodes de contrôle du chaos (type OGY), nous avons réussi à stabiliser un état périodique régulier (mais instable sans l'utilisation d'une boucle de rétroaction), permettant une émission stable du rayonnement THz [1]. Les résultats d'études numériques (basée sur l'équation de Vlasov-Fokker-Planck) et expérimentales (effectué aux synchrotron SOLEIL) seront présentés.

Références

1. C. EVAIN, C. SZWAJ, E. ROUSSEL, J. RODRIGUEZ, M. LE PARQUIER, M.-A. TORDEUX, F. RIBEIRO, M. LABAT, N. HUBERT, J.-B. BRUBACH, P. ROY & S. BIELAWSKI, Coherent Terahertz synchrotron radiation mastered by controlling the irregular dynamics of relativistic electron bunches, <https://arxiv.org/abs/1810.11805>

Analyse d'échelles dans un écoulement de Von Kármán numérique

Hugues Faller^{1,2}, Caroline Nore¹, Bérengère Dubrulle², Loïc Cappanera³ & Jean-Luc Guermond⁴

¹ Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, CNRS, Orsay, France

² Service Physique de l'État Condensé, UMR CEA/CNRS, Gif sur Yvette, France

³ Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Houston, USA

⁴ Department of Mathematics, Texas A&M University, College Station, USA

hugues.faller@normalesup.org

Les écoulements turbulents sont caractérisés par la coexistence de multiples échelles entre l'échelle d'injection et l'échelle de dissipation d'énergie. Le transfert local d'énergie entre échelles jusqu'à l'échelle de Kolmogorov a été étudié expérimentalement par Saw *et al.* [2] en utilisant l'outil développé par J. Duchon et R. Robert [1]. Ils ont constaté que le transfert d'énergie local a une distribution très large et atteint des valeurs extrêmes aux endroits où le champ de vitesse a une topologie en front ou en spirale. Je propose de faire une analyse similaire dans une simulation numérique directe à haute résolution de l'écoulement expérimental de Von Kármán étudié dans [2]. Le code numérique (SFEMaNS) utilise une discrétisation spatiale hybride combinant éléments spectraux et éléments finis. L'approximation dans l'espace se fait en utilisant une décomposition de Fourier dans l'espace azimutale et les éléments continus Hood–Taylor Lagrange pour les champs de pression et de vitesse dans la section méridienne. Le schéma temporel utilise une méthode de prédiction-correction décrite dans [4]. La prise en compte des pales en mouvement à est assurée par une technique de pseudo-pénalité décrit dans [5].

Dans cet exposé, nous discutons du problème du calcul du transfert entre échelles sur un maillage d'éléments finis, souvent utilisé pour simuler des écoulements turbulents réels. Nous montrons la distribution du terme de transfert inter-échelle et la structure des champs de vitesse autour de grandes valeurs du transfert d'énergie locale et discutons de la comparaison avec les résultats expérimentaux.

Références

1. J. DUCHON & R. ROBERT, Inertial energy dissipation for weak solutions of incompressible Euler and Navier–Stokes equations, *Nonlinearity*, **13**, 249–255 (2000).
2. E.-W. SAW, D. KUZAY, D. FARANDA, A. GUITTONNEAU, F. DAVIAUD, C. WIERTEL-GASQUET, V. PADILLA & B. DUBRULLE, Experimental characterization of extreme events of inertial dissipation in a turbulent swirling flow, *Nat. Commun.*, **7**, 12466 (2016).
3. C. NORE, D. CASTANON QUIROZ, L. CAPPANERA & J.-L. GUERMOND, Numerical simulation of the von Karman sodium dynamo experiment, *J. Fluid Mech.*, **854**, 164–195 (2018).
4. J.-L. GUERMOND, R. LAGUERRE, J. LÉORAT & C. NORE, Nonlinear magnetohydrodynamics in axisymmetric heterogeneous domains using a Fourier/finite element technique and an interior penalty method, *J. Comput. Phys.*, **228**, 2739–2757 (2009).
5. R. PASQUETTI, R. BWEMBA & L. COUSIN, A pseudo-penalization method for high Reynolds number unsteady flows, *Appl. Numer. Math.*, **58**, 946–954 (2008).

Condensation sous-critique en convection de Rayleigh–Bénard en rotation

Benjamin Favier¹, Céline Guervilly² & Edgar Knobloch³

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE, Marseille, France

² School of Mathematics, Statistics and Physics, Newcastle University, UK

³ Department of Physics, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

`favier@irphe.univ-mrs.fr`

La possibilité d'un régime sous-critique de cascade inverse en turbulence géostrophique est explorée. En particulier, on s'intéresse numériquement au cas de la convection de Rayleigh–Bénard en rotation rapide. Il existe un régime où des transferts d'énergie non-locaux, qui condensent l'énergie aux grandes échelles spatiales, entrent en compétition avec la cascade directe, plus traditionnelle [1–3]. Nous montrons qu'une transition sous-critique vers un vortex condensé à grande échelle peut exister, et ce pour des paramètres de contrôle pour lesquels aucune cascade inverse n'avait été observée jusqu'à maintenant [4]. Cette transition est déclenchée en initialisant le système avec une circulation tourbillonnaire à grande échelle d'amplitude arbitraire. Ce nouvel et rare exemple de bi-stabilité entre deux états turbulents, qui n'est sans doute pas spécifique à la convection en rotation, ouvre des perspectives nouvelles pour l'étude des transferts d'énergie dans les écoulements turbulents anisotropes comme les circulations atmosphériques et océaniques.

Références

- [1] B. FAVIER, L. J. SILVERS & M. R. E. PROCTOR, Inverse cascade and symmetry breaking in rapidly rotating Boussinesq convection, *Phys. Fluids*, **26**, 096605 (2014).
- [2] C. GUERVILLY, D. W. HUGHES & C. A. JONES, Large-scale vortices in rapidly rotating Rayleigh–Bénard convection, *J. Fluid Mech.*, **758**, 407–435 (2014).
- [3] A. ALEXAKIS & L. BIFERALE, Cascades and transitions in turbulent flows, *Phys. Rep.*, **767–769**, 1–101 (2018).
- [4] B. FAVIER, C. GUERVILLY & E. KNOBLOCH, *J. Fluid Mech. Rapids*, sous presse (2019).

La bataille d'Actium et le Mythe de l'échéneis-remora.

Johann Fourdrinoy¹, Clément Caplier¹, Yann Devaux¹, Areti Gianni², Ierotheos Zacharias², Isabelle Jouteur³, Paul Martin⁴, Julien Dambrine⁵, Madalina Petcu⁵, Morgan Pierre⁵ & Germain Rousseaux¹

¹ CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA - Institut Pprime, France

² University of Patras, Greece

³ Université de Poitiers, Forellis France

⁴ Université de Montpellier, France

⁵ Université de Poitiers, Laboratoire de Mathématiques et Applications, France

`johan.fourdrinoy@univ-poitiers.fr`

La bataille d'Actium fut déterminante dans l'avènement de l'empire romain avec la victoire d'Octave contre Marc-Antoine et Cléopâtre. Depuis vingt siècles, historiens et scientifiques ont essayé de comprendre les raisons de la défaite Antonienne. En effet, la flotte de Marc-Antoine, composée de navires imposants, aurait dû vaincre les plus petits navires d'Octave. L'amiral et le naturaliste Pline l'Ancien invoqua une légende pour expliquer les difficultés d'avancement rencontrées par Marc-Antoine, et le résultat de la bataille qui en découla : Neptune aurait défavorisé Marc-Antoine via un poisson, l'échéneis-remora accroché aux bateaux de sa flotte. Avec une approche pluridisciplinaire, nous cherchons à expliquer les pics de résistance à l'avancement, et à réinterpréter le mythe via des nouvelles connaissances. Sur la base de nouvelles données océanographiques, nous calculons la résistance à l'avancement des galères représentatives des deux armadas et recréons les conditions de bataille dans un bassin de traction. Nous observons différents motifs de sillage et suggérons que la résistance rencontrée par les galères Antoniennes possède une signature visuelle, définie par le rapport entre le tirant d'eau et la profondeur du navire. Ce sillage particulier se compose à la fois d'un sillage de poupe et d'un sillage de proue. À l'arrière du navire, un système supplémentaire d'ondes quasi-parallèles de type divergentes se superpose au sillage classique de Kelvin (eau profonde) pour créer un motif plus complexe. À l'avant, un système de double vagues se forme et suit une évolution de type cône de Mach. Lors de l'arrêt du navire, une des deux vagues de proue est éjectée à la manière d'un soliton à la Scott Russell.

Fluidisation d'un empilement granulaire bidimensionnel par le fond mobile d'un plan incliné

Nathalie Fraysse & Cyrille Claudet

Université Côte d'Azur, CNRS, UMR 7010, Institut de Physique de Nice, France
nathalie.fraysse@inphyni.cnrs.fr

Étudier la dynamique d'un empilement granulaire nécessite une injection continue d'énergie, le moyen le plus utilisé pour y parvenir étant de soumettre le milieu granulaire à des vibrations. Nous proposons de considérer un type d'excitation original, appliqué ici à un empilement bidimensionnel : le fond mobile d'un plan incliné entraîne les particules en s'opposant à l'écoulement gravitaire. L'apport d'énergie au milieu granulaire est alors continu et réparti uniformément, contrairement à ce qui peut être obtenu par vibrations.

Notre travail porte sur le comportement d'une monocouche de billes millimétriques non-cohésives et monodisperses en taille. Un cadre métallique délimite les bords du canal et présente également des parois aval et amont qui définissent une zone rectangulaire accessible aux particules. Au repos, du fait de l'inclinaison du canal, le système cristallise spontanément en un empilement bidimensionnel hexagonal compact avec défauts. La mise en mouvement conduit à une décompaction de l'empilement suivant la direction de l'entraînement et détruit partiellement ou totalement l'ordre cristallin.

Une caractérisation systématique de l'état de fluidisation du milieu granulaire 2D est en cours. L'analyse d'images avec suivi de particules donne la distribution instantanée des billes et le champ des déplacements entre deux images successives, d'où l'on peut déduire des quantités telles que le profil de densité (nombre de grains par unité de longueur perpendiculaire à l'entraînement), la fonction de distribution radiale des particules et des gradients de distribution des vitesses.

À inclinaison fixée, nous observons pour une vitesse d'entraînement croissante une transition remarquable dans la structure de l'empilement, qui rappelle des phénomènes de fusion d'un solide. Nous rechercherons de possibles analogies entre ce système expérimental macroscopique très simple et les phénomènes microscopiques de transition de phase.

Ondes de relief et sillage émis par un courant géostrophique

Cruz Garcia-Molina, Chantal Staquet, Joël Sommeria, Bruno Voisin & Adekunle Ajayi

LEGI - Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels 1209-1211 rue de la piscine - Domaine Universitaire 38400 Saint Martin d'Hères

cruz.garcia-molina@univ-grenoble-alpes.fr

Des récentes campagnes à la mer ont montré une intense activité des ondes internes de gravité dans l'océan austral profond [1]. Le déferlement des ondes internes dans l'océan austral profond est supposé être responsable des taux de dissipation d'énergie anormalement élevés [2–4]. Les estimations de [5] suggèrent que la quantité de mouvement et l'énergie transportées dans la colonne d'eau par la propagation de ces ondes contribuent significativement au transfert d'énergie et au mélange dans l'océan austral.

Quand un écoulement géostrophique s'écoule vers une topographie dans un environnement stratifié, tout ou partie de l'écoulement peut s'écouler autour de la topographie, aucun champ d'ondes n'étant émis dans le premier cas. À l'arrière de la topographie se forme un sillage turbulent, qui peut aussi induire un mélange local. Les rôles respectifs des ondes et du sillage turbulent dans le transport de quantité de mouvement issue du courant et le mélange induit ont été très peu étudiés. Les études sur ce sujet sont le plus souvent en deux dimensions dans un plan vertical. En trois dimensions, l'effet de la rotation généralement est ignoré ou l'attention est portée sur le sillage [6]. Seule une équipe au plan international a considéré le cas tridimensionnel avec rotation, dans le contexte de l'océan austral [7].

Basée sur des simulations numériques, [8] a montré que des oscillations inertielles sont générées au sein du champ d'ondes par interactions résonantes. Dans le but d'étudier le transport de quantité de mouvement par les ondes internes et le sillage turbulent des expériences de laboratoire ont été faites [9]. Dans le présent travail, les contributions relatives au profil vertical du mélange dues au sillage turbulent et au déferlement des ondes, en combinant les expériences de laboratoire et des simulations numériques tridimensionnelles utilisant le modèle NHM (Non-Hydrostatic Model) développé par [10], sont montrés.

Références

1. A. GARABATO *et al.*, Widespread intense turbulent mixing in the Southern Ocean, *Science*, **303**, 210–213 (2004).
2. K. J. HEYWOOD *et al.*, High mixing rates in the abyssal Southern Ocean, *Nature*, **415**, 1011–1014 (2002).
3. A. C. NAVEIRA GARABATO *et al.*, Short-circuiting of the overturning circulation in the Antarctic Circumpolar Current, *Nature*, **447**, 194–197 (2007).
4. K. L. SHEEN *et al.*, Modification of turbulent dissipation rates by a deep Southern Ocean eddy, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 3450–3457 (2015).
5. M. NIKURASHIN & R. FERRARI, Global energy conversion rate from geostrophic flows into internal lee waves in the deep ocean, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L08610 (2011).
6. D. ETLING, Mesoscale vortex shedding from large islands: A comparison with laboratory experiments of rotating stratified flows, *Meteorol. Atmos. Phys.*, **43**, 145–151 (1990).
7. M. NIKURASHIN *et al.*, The impact of finite-amplitude bottom topography on internal wave generation in the Southern Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 2938–2950 (2014).
8. M. NIKURASHIN & R. FERRARI, Radiation and dissipation of internal waves generated by geostrophic motions impinging on small-scale topography: Application to the Southern Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 2025–2042 (2010).
9. J. SOMMERIA *et al.*, Laboratory modelling of momentum transport by internal gravity waves and eddies in the Antarctic circumpolar current, in *VIIIth International Symposium on Stratified Flows (ISSF)* (2016).
10. H. AIKI & T. YAMAGATA, A numerical study on the successive formation of Meddy-like lenses, *J. Geophys. Res. Oceans*, **109**, C6 (2004).

L'adhésion élastocapillaire permet aux coléoptères de marcher la tête en bas

Tristan Gilet¹, Sophie Marie Gernay^{1,2} & Pierre Lambert²

¹ Microfluidics Lab, Dept. Aerospace & Mech. Eng., ULiège (Belgium)

² TIPS, Université Libre de Bruxelles (Belgium)

Tristan.Gilet@uliege.be

Les forces capillaires sont capables de déformer significativement des structures suffisamment flexibles et élastiques. Ces forces dépendent néanmoins de la configuration géométrique des interfaces liquides et de leur raccord avec la structure déformée. Ce couplage entre forces capillaires et déformation des structures porte le nom d'élastocapillarité. Celle-ci façonne le monde microscopique, et permet notamment aux coléoptères de se déplacer avec aisance sur n'importe quelle surface solide, y compris tête en bas [1]. Les coléoptères possèdent sur leurs tarsi des coussinets adhésifs velus, chacun formé de centaines de soies. Ces dernières sont des microstructures élastiques, encastrées sur le coussinet, et dont le diamètre est de l'ordre du micromètre. L'extrémité libre de ces soies est très flexible, et elle est seule à toucher la surface. Un liquide sécrété par le coussinet forme un pont capillaire entre le substrat et l'extrémité de chaque soie [2], et force ainsi cette dernière à épouser au mieux les aspérités microscopiques de la surface pour obtenir un maximum d'adhésion [3]. Ensuite, en une fraction de seconde, l'insecte peut annuler cette adhésion et détacher son tarse, simplement en l'inclinant. L'élastocapillarité procure donc aux coléoptères un mécanisme d'adhésion apparemment réversible, robuste et contrôlable.

Dans la présente étude expérimentale et théorique, nous proposons un modèle physique de l'adhésion élastocapillaire des soies, composé d'une poutre encastrée à une extrémité et dont l'autre est approchée d'un substrat plan solide sous-jacent. L'encastrement est faiblement incliné par rapport au substrat. Nous étudions la déformation de cette poutre lorsqu'un pont liquide est formé entre l'extrémité libre et le substrat. Nous identifions trois régimes, obtenus successivement lorsque la poutre s'approche : (1) la poutre ne touche pas le substrat, (2) l'arête de l'extrémité libre de la poutre touche le substrat avec un angle fini, et (3) l'extrémité de la poutre épouse le substrat et forme une zone de contact apparent d'aire finie. Ces trois régimes ont été observés dans d'autres configurations similaires (par exemple, [4, 5]). Nous mesurons également la force de réaction exercée par la poutre sur son encastrement dans la direction normale au substrat. Cette force correspond à l'adhésion potentielle que l'insecte peut attendre de chacune de ses soies. Sa variation avec la distance au substrat n'est pas monotone. Le régime 2 est faiblement adhésif (voire même répulsif dans certaines conditions), et il présente une hystérèse directionnelle. Dans le régime 3, la force d'adhésion augmente fortement lorsque la poutre s'approche du substrat. Nous proposons un modèle bidimensionnel de poutre pour expliquer ces mesures. Les équations correspondantes présentent plusieurs non-linéarités induites par les contraintes géométriques. Le modèle reproduit qualitativement et quantitativement les courbes de force-déplacement, sous deux conditions : les forces de friction sont prises en compte dans le régime 2, et la force de réaction est distribuée sur la surface de contact dans le régime 3. Cette dernière hypothèse est en contradiction avec la plupart des modèles proposés pour rendre compte des configurations élastocapillaires similaires.

Références

1. S. M. GERNAY *et al.*, Multi-scale tarsal adhesion kinematics of freely-walking dock beetles, *J. R. Soc. Interface*, **14**, 20170493 (2017).
2. S. M. GERNAY *et al.*, Elasto-capillarity in insect fibrillar adhesion, *J. R. Soc. Interface*, **13**, 20160371 (2016).
3. T. GILET *et al.*, Liquid secretion and setal compliance: The beetle's winning combination for a robust and reversible adhesion, *Curr. Opin. Insect Sci.*, **30**, 19–25 (2018).
4. H.-M. KWON *et al.*, Equilibrium of an elastically confined liquid drop, *J. Appl. Phys.*, **103**, 093519 (2008).
5. J. M. ARISTOFF *et al.*, Elastocapillary imbibition, *Int. J. Non-linear Mech.*, **46**, 648–656 (2011).

Keplerian turbulence in astrophysical accretion discs

Christophe Gissinger

Laboratoire de Physique, École normale supérieure, Paris

christophe.gissinger@lps.ens.fr

Accretion discs, one of the most studied problem in astrophysical fluid dynamics, are structures in which diffused material is in rotation around a central massive body. These objects are a ubiquitous phenomenon in astrophysics: active galactic nuclei, proto-stars or even quasars all involve turbulent accretion of gas and matter towards the center of the disc. Because of the balance between centrifugal and gravitational forces, these discs involve Keplerian rotation profiles.

Interestingly, the exact mechanisms by which angular momentum is transported in these discs remain mostly unknown: indeed, there is no purely hydrodynamical linear process able to explain the transition to turbulence in Keplerian discs. To circumvent this mystery, different mechanisms have been proposed, such as subcritical (non-linear) transition to turbulence or turbulent viscosity. But the most accepted scenario is the so-called magnetorotational instability (MRI), which explains how a conducting fluid in differential rotation can be destabilized by the presence of magnetic field and become turbulent. However, the impossibility of generating a stable Keplerian flow in usual (boundary-driven) laboratory experiments makes MRI experiments still out of reach.

In this seminar, I will describe a new laboratory experiment aiming to study this problem by generating a fully developed turbulent flow in Keplerian rotation and subject to a strong magnetic field. The aim of the present experiment, quite different from previous MRI experimental attempts, is to directly generate a turbulent Keplerian flow, and to discuss different aspects of magnetized turbulence: what type of energy cascade is obtained? What controls the angular momentum transport in the disc? How turbulence in Keplerian flow is affected by magnetic field.

Le tenseur complexe de Faraday pour comprendre la non validité de la théorie de Born–Infeld

Michel Gondran¹, Abdel Kenoufi¹ & Alexandre Gondran²

¹ Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences, Paris, France

² Ecole Nationale de l’Aviation Civile, 31000 Toulouse, France

michel.gondran@polytechnique.org

Pour construire une électrodynamique non linéaire covariante, Born et Infeld [1] ont proposé une densité lagrangienne construite sur les deux invariants de Lorentz $\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2$ et $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$. Cependant les expériences n’ont jamais exhibé les effets non linéaires attendus. Cette théorie connaît depuis 1985 une renaissance en théorie des membranes et des cordes comme étant une partie de l’action effective.

Nous reconsidérons ici l’approche de Born–Infeld en faisant l’hypothèse que le tenseur de Faraday \mathcal{F} et son dual \mathcal{F}^* doivent être remplacés [2] dans les densités lagrangiennes par le tenseur complexe $\mathcal{F}_\mathbb{C} = \mathcal{F} + i \cdot \mathcal{F}^*$ qui correspond à l’invariant de Lorentz $(\mathbf{E} + i\mathbf{B})^2$. Nous montrons d’abord que, par une extension du principe de moindre action aux densités lagrangiennes à valeur complexe et grâce à un nouvel outil de calcul variationnel complexe [3–5], on retrouve les équations de Maxwell à partir de ce tenseur complexe de Faraday. Nous montrons ensuite que l’on obtient directement les équations de Maxwell par le simple remplacement de \mathcal{F} par $\mathcal{F}_\mathbb{C}$ dans une des formulations de la densité lagrangienne de Born–Infeld [6]. Cela permet d’expliquer pourquoi les expériences n’ont jamais mis en évidence les effets non linéaires prédits par la théorie de Born–Infeld.

Finalement, si le tenseur complexe de Faraday $\mathcal{F}_\mathbb{C}$ peut être considéré comme le tenseur électrodynamique pertinent, cela suggère que c’est lui qui doit être utilisé dans la recherche du lien entre relativité générale et électrodynamique.

Références

1. M. BORN & L. INFELD, Foundations of the new field theory, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **144**, 425–451 (1934).
2. L. SILBERSTEIN, Nachtrag zur Abhandlung über Electromagnetische Grundgleichungen in bivectorieller Behandlung, *Ann. Phys. Leipzig*, **24**, 783–784 (1907).
3. M. GONDRAN, Analyse MinPlus complexe, *C. R. Acad. Sci. Paris*, **333**, 592–598 (2001).
4. M. GONDRAN, Calcul des variations complexes et solutions explicites d’équations d’Hamilton–Jacobi complexes, *C. R. Acad. Sci. Paris*, **332**, 677–680 (2001).
5. M. GONDRAN & R. HOBLOS, Complex calculus of variations, *Kybernetika*, **39**, 249–263 (2003).
6. M. GONDRAN, A. KENOUIFI & A. GONDRAN, Complex variational calculus with mean of (min,+)-analysis, *Tema*, **18** 385–403 (2017).

Flambage d'une tige dans un milieu granulaire

Antoine Seguin & Philippe Gondret

Laboratoire FAST, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, F-91405, Orsay, France

antoine.seguin@u-psud.fr, philippe.gondret@u-psud.fr

Les milieux granulaires ont des comportements complexes provenant notamment des non-linéarités et de la dissipation au niveau des contacts entre les grains. Le mouvement d'objets à travers les milieux granulaires est important à comprendre dans plusieurs domaines : la géophysique s'intéresse par exemple aux cratères d'impacts sur les planètes et astéroïdes [1–3], tandis que la biophysique se préoccupe de la locomotion animale sur ou dans le sable ou encore du développement racinaire dans le sol [4, 5]. Après avoir étudié le mouvement d'objets isotropes, tels des sphères ou des disques, à travers des empilements de grains [6–10], nous nous intéressons maintenant au mouvement d'une structure mince et de la possibilité de son flambement. Lorsqu'une tige pénètre verticalement dans un empilement granulaire, elle peut flamber à une certaine profondeur d'enfoncement à condition que l'étreinte ne soit pas suffisante pour empêcher ce phénomène [11]. La profondeur critique atteinte par la tige au moment du flambement évolue en fonction de la longueur L de la tige, avec deux régimes possible en $1/L$ ou $1/L^2$. Ces deux régimes résultent des deux termes de force qui interviennent sur la tige en pénétration : une force de pression en bout de tige qui augmente linéairement avec la profondeur, et une force frictionnelle sur son pourtour qui augmente quadratiquement avec la profondeur. Nous proposons une limite d'apparition du flambage dans un diagramme de deux paramètres sans dimensions, le rapport d'aspect de la tige et le rapport de rigidité de la tige par rapport à l'empilement granulaire.

Références

1. A. SEGUIN, Y. BERTHO & P. GONDRET, Influence of confinement on granular penetration by impact, *Phys. Rev. E*, **78**, 010301 (2008).
2. A. SEGUIN, Y. BERTHO, P. GONDRET & J. CRASSOUS, Sphere penetration by impact in a granular medium: A collisional process, *Europhys. Lett.*, **88**, 44002 (2009).
3. S. DEBOEUF, P. GONDRET & M. RABAUD, Dynamics of grain ejection by sphere impact on a granular bed, *Phys. Rev. E*, **79**, 041306 (2009).
4. E. KOLB, C. HARTMANN & P. GENET, Radial force development during root growth measured by photoelasticity, *Plant Soil*, **360**, 19 (2012).
5. N. ALGARRA, P. G. KARAGIANNPOULOS, A. LAZARUS, D. VANDEMBROUCQ & E. KOLB, Bending transition in the penetration of a flexible intruder in a two-dimensional dense granular medium, *Phys. Rev. E*, **97**, 022901 (2018).
6. A. SEGUIN, Y. BERTHO, P. GONDRET & J. CRASSOUS, Dense granular flow around a penetrating object: Experiment and hydrodynamic model, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 048001 (2011)
7. A. SEGUIN, F. MARTINEZ, Y. BERTHO, J. CRASSOUS & P. GONDRET, Experimental velocity fields and forces for a cylinder penetrating into a granular medium, *Phys. Rev. E*, **87**, 012201 (2013).
8. A. SEGUIN, C. COULAIS, F. MARTINEZ, Y. BERTHO, & P. GONDRET, Local rheological measurements in the granular flow around an intruder, *Phys. Rev. E*, **93**, 012904 (2016).
9. A. SEGUIN, A. LEFEBVRE-LEPOT, S. FAURE & P. GONDRET, Clustering and flow around a sphere moving into a grain cloud, *Eur. Phys. J. E*, **39**, 63 (2016).
10. A. SEGUIN & P. GONDRET, Drag force in a cold or hot granular medium, *Phys. Rev. E*, **96**, 032905 (2017).
11. A. SEGUIN & P. GONDRET, Buckling of a rod penetrating into granular media, *Phys. Rev. E*, **98**, 012906 (2018).

Mélange et démixtion induits par des particules actives de camphre.

Clément Gouiller¹, Laurent Maquet¹, Florence Raynal², Mickael Bourgoïn³, Romain Volk³, Cécile Cottin-Bizonne¹ & Christophe Ybert¹

¹ Institut Lumière Matière / CNRS -10 Rue Ada Byron, 69100 Villeurbanne

² Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique / CNRS - 6 Avenue Guy de Collongue, 69130 Écully

³ Laboratoire de Physique - ENS de Lyon / CNRS - 46, allée d'Italie, 69007 Lyon

clement.gouiller@univ-lyon1.fr

Le mélange et la dispersion de particules fines sont des processus fondamentaux intervenant dans d'innombrables systèmes depuis les nuages de poussières interstellaires jusqu'aux poudres dans les mélangeurs industriels, en passant par les polluants atmosphériques et océaniques. La plupart des études existantes ont abordé le problème sous l'angle du couplage dit d'advection/diffusion, où la mobilité microscopique des particules transportées se limite, pour le mélange, aux seuls effets de diffusivité moléculaire [1, 2]. L'originalité du problème étudié ici provient de l'utilisation de sources chimiques mobiles, provoquant un écoulement (de l'advection) induisant le mélange des particules.

Les résultats présentés ici concernent l'étude d'une interface air/eau, sur laquelle sont déposés deux types d'objets : des nageurs interfaciaux ainsi que des bulles de verre. Les nageurs interfaciaux sont des disques d'agarose imprégnés de camphre, selon un protocole proche de celui décrit par Soh *et al.* [3]. Le camphre présent à l'intérieur du disque se dissout continûment. Cela engendre des hétérogénéités chimiques ainsi que des écoulements Marangoni en raison de la faible tension de surface du camphre conduisant à une auto-propulsion du nageur. Sur la même interface sont déposées des bulles de verre, particules micrométriques flottantes en raison de leur faible densité. C'est leur mélange par les nageurs interfaciaux que nous étudions.

Expérimentalement, la détermination du champ de concentration en bulles de verre nous permet d'étudier l'évolution temporelle du mélange. L'étude de l'écart-type du champ de concentration nous a permis de mettre en évidence l'existence d'un état stationnaire de mélange imparfait. Pour l'expliquer, nous avons calculé le champ de concentration moyen autour d'un nageur interfacial, ce qui fait apparaître une zone de déplétion en bulles de verre au voisinage du nageur, puis une zone d'accumulation à sa frontière. Cela met en évidence qu'un nageur interfacial démixtionne dans son voisinage, d'où le fait que l'état stationnaire ne corresponde pas à un état où le champ de concentration est homogène. Des expériences complémentaires ont permis de prouver que l'existence de ces zones de déplétion est due aux effets chimiques et non pas à des effets de Reynolds finis.

Enfin, le spectre moyen du champ de concentration en régime stationnaire fait apparaître une loi d'échelle d'exposant $-5/3$ sur une décade, motivant une analogie entre notre système et le mélange d'un scalaire dans un environnement turbulent, en dépit du Reynolds bien plus faible dans notre cas (environ 50).

Références

1. M. A. CELIA, T. F. RUSSELL, I. HERRERA & R. E. EWING, Analogy between higher instabilities in fluids and lasers, *Adv. Water Resour.*, **13**, 187–206 (1990).
2. W. HUNSDORFER & J. G. VERWER, *Numerical Solution of Time-Dependent Advection-Diffusion-Reaction Equations*, Springer Series in Computational Mathematics vol. 33, Springer (2013).
3. S. SOH, M. BRANICKI & B. A. GRZYBOWSKI, Swarming in shallow waters, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2**, 770–774 (2011).

Érosion par dissolution : ruissellement sur plan incliné

Adrien Guérin, Julien Derr, Sylvain Courrech du Pont & Michael Berhanu

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Université Paris-Diderot, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75013 Paris

adrien.guerin@univ-paris-diderot.fr

L'érosion par dissolution est un processus important dans la morphogenèse des paysages et donne lieu à une grande variété de formes [1]. En particulier, des motifs caractéristiques d'érosion connus sous le nom de *Rillenkarren* (ou cannelures) peuvent être observés à la surface de roches solubles comme le gypse, le sel ou le calcaire. Ces motifs d'érosion apparaissent lorsque la surface de la roche est inclinée et soumise à l'action d'un ruissellement. Des sillons régulièrement espacés et orientés dans le sens de l'écoulement se forment alors à la surface de la roche. Ces motifs d'érosion sont courants, cependant les conditions de leur formation ne sont pas tout-à-fait comprises [2]. Lors de cette présentation, nous étudions dans une expérience de laboratoire les motifs d'érosion qui apparaissent à la surface de deux matériaux solubles (blocs de sel et de plâtre).

Des blocs de sel rectangulaires (10×20 cm et 3 cm d'épaisseur) sont inclinés suivant un angle contrôlé. Un écoulement de ruissellement est alimenté par un débit constant d'eau fraîche. L'eau s'écoule le long de la pente, formant un film d'eau uniforme et peu profond. La surface supérieure de ce film est une surface libre : la profondeur du film et la vitesse de l'écoulement s'adaptent naturellement aux deux paramètres de contrôle de l'expérience (le débit et l'angle de la pente).

Nous observons que le taux d'érosion d'un bloc de sel est proportionnel à la racine carrée de la vitesse moyenne de l'écoulement. Un modèle simple de transport de soluté (advection-diffusion) permet d'expliquer cette loi d'échelle, qui se vérifie également sur un deuxième jeu d'expériences réalisées avec du plâtre. Deuxièmement, nous observons que la surface initialement plane des blocs de sels (respectivement de plâtre) s'érode en creusant spontanément des motifs d'érosion caractéristiques. Des sillons espacés régulièrement, orientés dans le sens de l'écoulement et de longueur d'onde ~ 1 mm se forment en moins d'une minute (respectivement en ~ 30 min). L'interaction entre l'écoulement et la surface de la roche induit un champ de vitesse hétérogène, qui entraîne à son tour une distribution hétérogène du champ de concentration en solutés, et donc de la vitesse de dissolution. Cet effet hydrodynamique explique la formation des sillons.

Références

1. P. MEAKIN & B. JAMTVEIT, Geological pattern formation by growth and dissolution in aqueous systems, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **466**, 659–694 (2010).
2. M. PERNE & F. GABROVŠEK, The problem of rillenkarren development: A modelling perspective, *Carsologica*, **9**, 55–61 (2009).

Le ludion dans un fluide stratifié : une dualité onde corpuscule ?

Benjamin Castillo Morales¹, Sergio Hernández Zapata¹, Gerardo Ruiz Chavarria¹ & Patrice Le Gal²

¹ Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México

² Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE UMR 7342, 49 rue F. Joliot-Curie, F-13384, Marseille, France

legal@irphe.univ-mrs.fr; shernandezzapata@yahoo.com.mx; gruiz@unam.mx

Il est quelquefois appelé « plongeur de Descartes » mais la première description du ludion est due à Raffaello Magiotti dans son ouvrage de 1648 intitulé : *Renitenza certissima dell'acqua alla compressione* [1]. Le ludion est un petit objet plus dense que l'eau dans laquelle il est plongé, mais qui enferme une poche d'air. En diminuant la pression de l'eau, cette poche d'air peut être dilatée et peut donc faire accroître la force d'Archimède qui s'oppose au poids du ludion. Au contraire, si la pression est augmentée, l'air se comprime et la force d'Archimède diminue. Ainsi, en modifiant la pression de l'eau, il est possible de piloter la position verticale du ludion. Une position d'équilibre existe mais celle-ci n'est pas stable : un mouvement vers le bas (respectivement vers le haut) du ludion, augmente (diminue) la pression hydrostatique et donc le pousse à poursuivre sa descente (montée).

Contrairement au ludion dans un fluide pur, le ludion placé dans une couche de fluide stratifié possède un point d'équilibre stable. Inspirés par les gouttes rebondissantes de Couder [2], nous proposons ici nos premiers résultats expérimentaux sur la dynamique d'un ludion oscillant dans une couche d'eau stablement stratifiée en sel. En faisant osciller un piston dans une chambre communiquant avec une enceinte close contenant une couche d'eau stratifiée, il est aisé de faire varier périodiquement la pression hydrostatique du fluide. Un ludion de forme cylindrique, positionné à son altitude d'équilibre, mais libre de tout mouvement horizontal, peut osciller verticalement tout en émettant des ondes de gravité internes sous la forme très reconnaissable de croix de saint André. Nos résultats expérimentaux décrivent la résonance du mouvement du ludion quand celui-ci est excité à différentes fréquences. Des mesures par PIV permettent également d'observer l'émission des ondes internes quand la fréquence d'oscillation du ludion est inférieure à la fréquence de Brunt-Väisälä du milieu ambiant. Dans certains cas, nous avons observé que le ludion se déplaçait dans la direction horizontale. Si ces excursions horizontales étaient confirmées, nous aurions alors à faire à un véritable nageur constitué tout comme les gouttes marcheuses de Couder, de l'association d'une particule (le ludion lui-même) et d'une onde interne de gravité. Plusieurs effets permettent aujourd'hui d'interpréter ces excursions horizontales : interaction entre ondes internes et ludion ou encore existence d'un écoulement secondaire à grande échelle généré par les interactions non linéaires entre ondes. Notons pour terminer qu'il est aussi possible de munir notre ludion d'une palme ou d'un flagelle qui lui permettrait très certainement de nager efficacement.

Références

1. R. MAGIOTTI, *Renitenza certissima dell'acqua alla compressione*, Roma (1648).
<https://archive.org/details/Magiotti1648>
2. Y. COUDER, S. PROTIÈRE, E. FORT & A. BOUDAUD, Walking and orbiting droplets, *Nature*, **437**, 208 (2005).

Dynamics of a reactive spherical particle falling in a linearly stratified layer

Ludovic Huguet & Michael Le Bars

CNRS, Aix Marseille Univ, Centrale Marseille, IRPHE, Marseille (France)
huguet@irphe.univ-mrs.fr

Rocky planets such as Earth, Mercury or Ganymede have a liquid iron core which may be totally or partly stably stratified [1, 2]. The sedimentation of iron particles crystallizing due to the secular cooling of the planet [3] or the precipitation of oxides [4] implies complex dynamic features involving a turbulent wake, the generation of internal waves, collective behaviour of the solid crystals, etc. It also involves reactive solid particles which may crystallize/melt.

Beyond the geophysical application, this problem is, therefore, related to several current problems in fluid dynamics, which we address with the help of a laboratory-scale experiment. The behaviour of a particle falling in a stratified layer has already been studied for different regimes of small Reynolds or Froude numbers [5, 6]. However, the influence of a reactive particle on a stratified medium has been unexplored, especially for regimes of interest for geophysical applications (large Reynolds and Froude numbers). In a stratified environment, the fall velocity is reduced due to the higher drag coefficient. During its fall, a particle drags a less dense liquid mixed with the product of the melting/dissolution. Then, the drag coefficient depends on the mixing in the wake, and on the melting/dissolution rate.

I am conducting experiments in a large water tank with salinity stratification where an icy, salty sphere is released from the top. I use two cameras and particle image velocimetry (PIV) to track the fall of the particle and the dynamics of the surrounding environment. I examine the velocity and the rate of dissolution of the spherical particle in comparison to a theoretical model. I also characterize the influence on its surrounding environment — generation of internal waves, the quantity of energy dissipated, and the mixing of the stratified layer. All these quantities are nonlinearly coupled, leading to complex and interesting dynamics.

References

1. H. GOMI, K. OHTA, K. HIROSE, S. LABROSSE, R. CARACAS, M. J. VERSTRAETE & J. W. HERNLUND, The high conductivity of iron and thermal evolution of the Earth's core, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **224**, 88–103 (2013).
2. T. RÜCKRIEMEN, D. BREUER & T. SPOHN, The Fe snow regime in Ganymede's core: A deep-seated dynamo below a stable snow zone, *J. Geophys. Res.*, **120**, 1095–1118 (2015).
3. S. A. HAUCK, J. M. AURNOU & A. J. DOMBARD, Sulfur's impact on core evolution and magnetic field generation on Ganymede, *J. Geophys. Res.*, **111**, 2156–2202 (2006).
4. J. BADRO, J. SIEBERT & F. NIMMO, An early geodynamo driven by exsolution of mantle components from Earth's core, *Nature*, **536**, 326–328 (2016).
5. R. MEHADDI, F. CANDELIER & B. MEHLIG Inertial drag on a sphere settling in a stratified fluid, *J. Fluid Mech.*, **855**, 1074–1087 (2016).
6. K. Y. YICK, C. R. TORRES, T. PEACOCK & R. STOCKER, Enhanced drag of a sphere settling in a stratified fluid at small Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, **632**, 46–68 (2009).

Long-time evolution of optical pulses in a nonlinear medium

Mathieu Isoard¹, Anatoly M. Kamchatnov^{2,3} & Nicolas Pavloff¹

¹ LPTMS, UMR 8626, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France

² Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Institutsky lane 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia

`mathieu.isoard@u-psud.fr`

Nous décrivons de façon théorique la propagation transverse d'un signal lumineux quasi-1D dans un milieu optique non-linéaire et en présence d'un fond d'intensité lumineuse constante. Dans un premier temps, le signal initial se divise en deux signaux qui se propagent dans des directions opposées. Ce phénomène peut être décrit théoriquement à l'aide d'une approche non dispersive en combinant la méthode de Riemann et celle de Ludford [1].

Pour des temps de propagation plus longs, une onde de choc dispersive commence à se former en aval de chacun des deux signaux, tandis qu'une onde de raréfaction apparaît en amont. Il est possible de décrire la forme de l'onde de choc et ses caractéristiques grâce à la théorie de modulation de Whitham [2]. Les résultats théoriques sont en très bon accord avec les simulations numériques. Notre approche fournit également des expressions analytiques simples pour décrire le comportement asymptotique des paramètres de l'onde de choc.

Références

1. G. S. S. LUDFORD, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **48**, 499–510 (1952).
2. G. B. WHITHAM, *Linear and Nonlinear Waves*, Wiley Interscience, New York (1974).

Fluid-particle suspension by gas release from a granular bed

Valérie Vidal¹, Tess Homan¹, Clément Picard¹ & Sylvain Joubaud¹

Univ Lyon, ENS de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France
sylvain.joubaud@ens-lyon.fr

Gas release at the ocean floor is a widespread phenomenon which can have drastic consequences on the environment or the industry [1, 2]. Striking examples include natural seep areas [3], possible links between giant methane release and climate change [4], gas blowout and subsequent bubble plumes during offshore drilling [2]. A key question that may be addressed is how particles are entrained by the gas and then mixed into the ambient fluid. Polluting particles from Canadian oil sands have for example drastic consequences on the environment [5].

This process is studied experimentally by injecting gas in water-saturated sands in a vertical Hele-Shaw cell. We focus on the short and long-term dynamics of gas rising at a constant flow rate through the sediment layer, as well as bubble rise, sediment transport and particle suspension in the above liquid layer. The existence of a stationary state, resulting from the competition between particle entrainment and sedimentation is observed. A phenomenological model based on the balance between particle lift by bubbles at the center of the cell and their settling on its sides demonstrates that most of the particle entrained come from the fluid recirculation.

When inclining the cell, the existence of a stationary state depends on the tilt angle and the gas release rate. Indeed, a puzzling behavior is observed with an alternance between a slow growth of the settled particle layer and violent particle resuspension events.

References

1. A. WOODS, Turbulent plumes in nature, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **42**, 391–412 (2010).
2. J. E. OLSEN & P. SKJETNE, Current understanding of subsea gas release: A review, *Can. J. Chem. Eng.*, **94**, 209–219 (2016).
3. A. GAY & S. MIGEON, Geological fluid flow in sedimentary basins, *BSGF - Earth Sciences Bulletin*, **188**, E3 (2017).
4. S. S. S. CARDOSO & J. H. E. CARTWRIGHT, Increased methane emissions from deep osmotic and buoyant convection beneath submarine seeps as climate warms, *Nat. Commun.*, **7**, 13266 (2016).
5. G. A. LAWRENCE, E. W. TEDFORD & R. PIETERS, Suspended solids in an end pit lake: Potential mixing mechanisms, *Can. J. Civil Eng.*, **43**, 211–217 (2016).

Rare transitions to a thin-layer turbulent condensate

Adrian van Kan¹, Takahiro Nemoto², Alexandros Alexakis¹

¹ Laboratoire de Physique de l'École normale supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris-Diderot, Sorbonne Paris Cité, Paris, France

² Philippe Meyer Institute for Theoretical Physics, Physics Department, École Normale Supérieure & PSL Research University, 24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05, France

avankan@ens.fr

A turbulent flow in a thin layer spontaneously develops an inverse cascade of energy and a spectral condensate of energy when the layer height is smaller than a threshold, [1] & [2]. Recently, evidence for bistability was found in this system close to the critical height: for the same value of the parameters and depending on the initial conditions the flow is either in a condensate state with most of the energy in the two-dimensional large scale modes or it is in a three-dimensional turbulent state with most of the energy in the small scale modes [3]. Bistable behaviour has been identified in a number of turbulent flows, such as fast rotating convection [4] and von Kármán flows [5]. The presence of noise induces random transitions between the two locally stable states whose statistics characterise the bistable regime.

Here, we report our results on the statistical properties of the thin-layer flow in this bistable regime for both stochastic and deterministic forcing inferred from a large number of direct numerical simulations and measuring the decay time τ_d of the condensate to a three-dimensional and the build-up time τ_b of the condensate. It is shown that both of these times τ_d, τ_b display an exponential distribution with their mean value increasing (and possibly diverging) close to the threshold.

We further show that the dynamics of large-scale kinetic energy E_2 may be approximated by solving a Langevin equation with multiplicative noise,

$$\partial_t E_2 = -\frac{\partial U(E_2)}{\partial E_2} + \sqrt{2D(E_2)}E_2.$$

A transition through a bistable regime as a function of layer height is clearly identified via a transition of $U(E_2)$ from a single minimum to two minima back to one minimum. Small memory effects are identified via non-Gaussian tails of the conditional transition probability.

References

1. L. M. SMITH, J. R. CHASNOV & F. WALEFFE, Crossover from two-to three-dimensional turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 2467 (1996).
2. A. CELANI, S. MUSACCHIO & D. VINCENZI, Turbulence in more than two and less than three dimensions, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 184506 (2010).
3. A. VAN KAN & A. ALEXAKIS, Condensates in thin-layer turbulence, *J. Fluid Mech.*, **864**, 490–518 (2019).
4. B. FAVIER, C. GUERVILLY & E. KNOBLOCH, Subcritical turbulent condensate in rapidly rotating Rayleigh–Bénard convection, *J. Fluid Mech.*, **864**, 490–518 (2019).
5. F. RAVELET *et al.*, Multistability and memory effect in a highly turbulent flow: Experimental evidence for a global bifurcation, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 164501 (2004).

Multiples attracteurs climatiques dans une planète-océan couplée

Maura Brunetti¹, Jérôme Kasparian¹ & Christian Vérard²

¹ Institut des Sciences de l'Environnement et Groupe de physique appliquée, Université de Genève, 66 bd Carl-Vogt, 1211 Genève 4, Suisse

² Section des Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Genève, 13 rue des Maraîchers, 1211 Genève 4, Suisse

jerome.kasparian@unige.ch

Le climat terrestre est un système dynamique qui évolue, sous l'effet de la distribution inhomogène de l'irradiance solaire, vers un état de quasi-équilibre. Même en négligeant d'éventuels forçages dépendants du temps (par exemple d'origine anthropique), les interactions non linéaires entre l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la biosphère rendent son étude extrêmement complexe. Cette complexité a été historiquement appréhendée par une hiérarchie de modèles de plus en plus complets, depuis les modèles de bilan d'énergie jusqu'aux modèles de circulation générale (GCM). Nous utilisons le GCM du MIT (MITgcm) [1,2] pour étudier numériquement une planète-océan couplée, c'est-à-dire un système où le couplage entre l'atmosphère, l'océan et la banquise est pris en compte, mais leurs mouvements est simplifié par l'absence de continents.

Sous l'effet d'un forçage externe constant, et pour des conditions initiales fixées, les solutions d'un système dynamique sont attirées vers des bassins d'attraction, ou attracteurs, qui représentent le squelette de leur dynamique non perturbée. Aux frontières des attracteurs, la dynamique est fortement non linéaire et de petites perturbations peuvent causer des modifications abruptes et potentiellement irréversibles correspondant au passage d'un bassin à l'autre. De telles crises endogènes sont généralement nommées points de bascule dans la dynamique climatique, ou transitions critiques en physique statistiques. Le climat actuel présente de tels points de bascule, tels que la circulation des courants dans l'océan Atlantique, le relargage de méthane par la fonte du permafrost, ou la disparition de la forêt amazonienne [3].

Dans une planète-océan, seulement trois attracteurs avaient été identifiés [4], Nous avons mis en évidence jusqu'à cinq bassins d'attraction distincts pour le même forçage radiatif [5]. De plus, la structure globale du squelette du système non perturbé dépend du détail de la description physique implémenté dans les simulations, et notamment de la prise en compte de la réinjection sous forme thermique de l'énergie cinétique dissipée ainsi que la dépendance en altitude de l'albédo des nuages. Une planète-océan couplée est donc un système suffisamment riche pour produire une structure dynamique complexe.

Chaque attracteur correspond à un climat différent, depuis un océan totalement englacé jusqu'à un océan complètement libre de glace. Nous avons déterminé les rétroactions qui conditionnent chaque attracteur en décrivant pour chacun la circulation océanique, le transport de chaleur, la couverture nuageuse et la distribution de température de surface. L'analyse s'appuie notamment sur la dimension instantanée, la persistance, l'entropie d'échantillon, et l'analyse en composantes principales.

Références

1. J. MARSHALL, A. ADCROFT, C. HILL, L. PERELMAN & C. HEISEY, *J. Geophys. Res.*, **102**, 5753 (1997).
2. J. MARSHALL, C. HILL, L. PERELMAN & A. ADCROFT, *J. Geophys. Res.* **102**, 5733 (1997).
3. T. M. LENTON, H. HELD, E. KRIEGLER, J. W. HALL, W. LUCHT, S. RAHMSTORF & H. J. SCHELLNHUBER, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **105**, 1786 (2008).
4. D. FERREIRA, J. MARSHALL & B. ROSE, *J. Climate*, **24**, 992 (2011).
5. M. BRUNETTI, J. KASPARIAN & C. VÉRARD, Co-existing attractors in coupled aquaplanet, soumis à *Climate Dyn.* (2019)

Instabilité modulationnelle d'une onde plane en présence de perturbations bruyantes et localisées : expérience dans les fibres optiques

Adrien Kraych¹, Dmitry Agafontsev², Pierre Suret¹, Gennady El³ & Stéphane Randoux¹

¹ Université de Lille, CNRS, UMR 8523 - Physique des Lasers Atomes et Molécules (PhLAM), Lille, France

² P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia

³ Department of Mathematics, Physics and Electrical Engineering, Northumbria University, Newcastle upon Tyne, NE1 8ST, United Kingdom

adrien.kraych@univ-lille.fr

L'instabilité modulationnelle (aussi appelée instabilité de Benjamin-Feir en hydrodynamique) découverte en 1967, est un phénomène bien connu en physique non linéaire. L'instabilité modulationnelle (modulation instability, MI) est un processus d'amplification de faibles perturbations de fréquences $\Omega \pm \omega$ en interaction avec une onde plane de fréquence Ω [1]. En régime d'amplification dit linéaire, les perturbations croissent de façon exponentielle. Ce n'est plus le cas lorsque l'amplitude des perturbations devient comparable à celle de l'onde plane, on parle alors du stade non linéaire de l'instabilité modulationnelle.

Dans le régime non linéaire, on observe des dynamiques spatio-temporelles riches qui ont été, jusqu'à récemment, la source de vifs intérêts dans plusieurs domaines de la physique expérimentale et théorique [2, 3]. Nous rapportons ici, la première observation expérimentale de la dynamique spatio-temporelle d'une onde plane perturbée localement [4]. Nous utilisons une boucle fibrée dans laquelle, l'onde plane perturbée se propage sur quelques centaines de kilomètres avec des pertes très faibles car compensées par amplification Raman. On observe notamment l'expansion de structures non linéaires oscillantes, conjointement à l'amplification du bruit optique de l'onde plane présent à l'état initial. Les comportements expérimentaux observés sont en accord avec les simulations numériques de l'équation de Schrödinger non linéaire (1D-NLSE) avec un terme d'amortissement. Ils démontrent la robustesse au bruit et à la dissipation du scénario théorique considéré dans la référence [3].

Par ailleurs nous reportons également la première observation expérimentale de la dynamique spatio-temporelle d'une onde plane bruitée sujette au processus d'instabilité modulationnelle dans les fibres optiques. Notre dispositif permet de mesurer le moment d'ordre deux des fluctuations d'intensité. Nous observons que celui-ci est caractérisé par une évolution quasi-périodique amortie en fonction de la longueur de propagation. Ces résultats sont en accord avec les simulations numériques décrites dans la référence [5].

Références

1. V. E. ZAKHAROV & L. A. OSTROVSKY, Modulation instability: The beginning, *Physica D*, **238**, 540 (2009).
2. M. ERKINTALO, K. HAMMANI, B. KIBLER, C. FINOT, N. AKHMEDIEV, J. M. DUDLEY & G. GENTY, Higher-order modulation instability in nonlinear fiber optics, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 253901 (2011).
3. G. BIONDINI & D. MANTZAVINOS, Universal nature of the nonlinear stage of modulational instability, *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 043902 (2016).
4. A. E. KRAYCH, P. SURET, G. EL & S. RANDOUX, Nonlinear evolution of the locally induced modulational instability in fiber optics, *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 054101 (2019).
5. D. S. AGAFONTSEV & V. E. ZAKHAROV, Integrable turbulence and formation of rogue waves, *Nonlinearity*, **28**, 2791 (2015).

Agrégation de radeaux granulaires à une interface

Antoine Lagarde & Suzie Protière

Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, UMR 7190, Institut Jean Le Rond
d'Alembert, F-75005 Paris, France
antoine.lagarde@dalembert.upmc.fr

Placez deux objets à une interface liquide, et vous assisterez à un phénomène étonnant bien que quotidien : les deux objets interagissent pour générer une force attractive ou répulsive. Les célèbres céréales toroïdales cheerios qui s'agglutinent à la surface du lait ont d'ailleurs donné leur nom à ce phénomène [1]. Mais loin de se limiter au monde du petit déjeuner, cet effet se retrouve dans nombres d'applications industrielles. C'est ainsi qu'en jouant avec la forme et l'état de surface de "briques" microscopiques, il est aujourd'hui possible d'assembler de complexes structures tout en contrôlant finement leur microstructure.

Comme bien souvent, de nombreux systèmes naturels n'ont pas attendu que l'homme mette en équation un phénomène physique pour en tirer parti. C'est notamment le cas des fourmis rouges, capables de s'associer en radeau pour flotter à la surface de l'eau et survivre aux inondations, ou de certains insectes qui en déformant l'interface autour d'eux parviennent à se propulser [2].

Un objet de taille micrométrique doit compter sur les imperfections géométriques et chimiques de sa surface pour déformer l'interface autour de lui, alors qu'une bille millimétrique n'utilise que de son poids pour courber la surface liquide qui l'entoure. C'est ce dernier cas uniquement qui nous intéressera par la suite. L'attraction mutuelle d'un couple de billes sphériques est aujourd'hui relativement bien comprise, mais les effets collectifs qu'un système à n particules identiques peut engendrer comportent encore de nombreuses zones d'ombre. C'est dans ce cadre que nous nous positionnons.

Ici, nous proposons une étude expérimentale des forces capillaires exercées entre deux assemblages de particules millimétriques à une interface eau-huile. Un tel objet, que nous appellerons radeau granulaire de par son aspect, est constitué d'une mono-couche de billes agglomérées à l'interface. Parce que la déformation qu'un tel radeau impose surpasse de plus d'un ordre de grandeur la déformation d'une particule unique, les forces capillaires engendrées sont anormalement grandes, et dépendent fortement du nombre de particules composant le radeau. Parallèlement, avec l'ajout de nouvelles particules, le radeau croît en taille, ce qui conduit à une forte augmentation du frottement visqueux. En jouant expérimentalement avec le nombre de billes, nous parvenons à quantifier son influence tant sur la force capillaire que sur le frottement. Une étude numérique nous permet par ailleurs de décrire le lien qui relie la morphologie d'un radeau au nombre de ses constituants.

À partir de cette compréhension fine de l'interaction entre deux radeaux granulaires de taille donnée, nous généralisons à un système à n radeaux, chacun étant constitué d'un nombre aléatoire de particules. Nous caractérisons la statistique d'agrégation d'un tel système.

Références

1. D. VELLA & L. MAHADEVAN, The Cheerios effect, *Am. J. Phys.*, **73**, 817 (2005).
2. D. L. HU & J. W. M. BUSH, Meniscus-climbing insects, *Nature*, **437**, 733–736 (2005).

Oceanic vortices in a jar: Laboratory experiments in stratified rotating flows

Patrice Le Gal

IRPHE, Aix-Marseille Université, France
 legal@irphe.univ-mrs.fr

Oceanic meso-scale lenticular vortices play an important role in the redistribution of heat, salt and momentum in oceans and thus contribute to the climate equilibrium on Earth. Moreover, because of their internal recirculations and of the upwelling they induce, they also isolate, mix, transport, nutrients and phytoplanktons and in consequence participate to the general ecological diversity of the oceans. These vortices are governed by geostrophic and hydrostatic balances between pressure gradients, Coriolis and buoyancy forces from where they get their shape and aspect ratio. We will first derive a relationship for the vortex aspect ratio (vertical half-thickness over horizontal length scale) for steady and slowly evolving vortices in rotating stratified fluids, as a function of the Brunt–Väisälä frequencies within the vortex and in the background fluid outside the vortex, the Coriolis parameter and the Rossby number of the vortex [1]. Our law significantly differs from the generally admitted conjecture derived from quasi-geostrophy. It is however verified by means of stratified flow experiments performed on a rotating table [2], but also with observations of Atlantic meddies and oceanic floating lenses [3] described in the oceanographic literature. Our study also explains the exceptional longevity of these vortices in the oceans [4]. Finally, motivated by the understanding of the way energy escapes from the mesoscopic oceanic turbulence to feed the smallest oceanic scales where dissipation and mixing occurs, we will describe our ongoing experiments [5] on the unbalanced dynamics of the merging of two lenticular anticyclones where gravity waves emission and vorticity filamentation are expected [6–8].

References

1. P. HASSANZADEH, P. S. MARCUS & P. LE GAL, The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows: Theory and simulation, *J. Fluid Mech.*, **706**, 46–57 (2012).
2. O. AUBERT, M. LE BARS, P. LE GAL & P. S. MARCUS, The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows: Experiments and observations, *J. Fluid Mech.*, **706**, 34–45 (2012).
3. H. M. DE LA ROSA ZAMBRANO, A. CROS, R. CRUZ GOMEZ, M. LE BARS & P. LE GAL, A laboratory study of floating lenticular anticyclones, *Eur. J. Mech. B*, **61**, 1–8 (2017).
4. G. FACCHINI & M. LE BARS, On the lifetime of a pancake anticyclone in a rotating stratified flow, *J. Fluid Mech.*, **804**, 688–711, (2016).
5. P. LE GAL, R. CRUZ GOMEZ & A CROS, On the coalescence of anticyclones in stratified rotating flows, *Geophys. Res. Abstr.*, **20**, EGU2018-10718 (2018).
6. D. G. DRITSCHEL, Vortex merger in rotating stratified flows, *J. Fluid Mech.*, **455**, 83–101 (2002).
7. Á. VIÚDEZ, Spiral patterns of inertia-gravity waves in geophysical flows, *J. Fluid Mech.*, **562**, 73–82 (2006).
8. J. N. REINAUD & D. DRITSCHEL, The merger of geophysical vortices at finite Rossby and Froude number, *J. Fluid Mech.*, **848**, 388–410 (2018).

Ondes internes de gravité générées par convection turbulente

Pierre Léard, Patrice Le Gal & Michael Le Bars

CNRS, Aix Marseille Université, Centrale Marseille, IRPHE, Marseille (France)

leard@irphe.univ-mrs.fr

Le couplage entre une couche convective et une couche stratifiée est exploré. On trouve cette configuration en deux couches dans l'atmosphère terrestre, dans le coeur de la Terre et dans les étoiles. La dynamique de la couche stratifiée a longtemps été négligée. Cependant, la convection génère des ondes internes de gravité. Ces ondes se propagent dans la couche stratifiée, transportent énergie et quantité de mouvement et peuvent, par interactions non linéaires, donner naissance à un écoulement grande échelle (par exemple le phénomène de Quasi Biennial Oscillation dans l'atmosphère [1]). L'étude du couplage entre ces deux couches est donc primordiale.

Pour étudier ce couplage expérimentalement, on utilise une propriété peu commune de l'eau : son maximum de densité est à 4°C. Ainsi, en refroidissant une cuve à 0°C par en dessous et en chauffant le haut de la cuve, la configuration voulue en deux couches apparait spontanément, avec la couche convective située en dessous de la couche stratifiée.

Je présenterai les résultats des expériences PIV menées : caractéristiques spectrales de la convection et des ondes générées, et je discuterai de la présence d'un écoulement grande échelle ainsi que d'une couche intermédiaire située entre la couche convective et la couche stratifiée. Des calculs numériques approfondissant le modèle 1D de Plumb [2] seront aussi présentés.

Références

1. M. P. BALWIN, The quasi-biennial oscillation, *Rev. Geophys.*, **39**, 179–229 (2001).
2. R. A. PLUMB, The interaction of two internal waves with the mean flow : Implications for the theory of the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1847–1858 (1977)

Mesure complète et ultra-rapide de structures non linéaires générées par l'instabilité modulationnelle en optique

Alexandre Lebel¹, Alexey Tikan¹, Stéphane Randoux¹, Pierre Suret¹ & François Copie¹

Université de Lille, CNRS, UMR 8523 - Physique des Lasers Atomes et Molécules (PhLAM), Lille, France
alexandre.lebel@univ-lille.fr

Le développement de techniques de mesures en temps réel pour des signaux optiques ultra-rapides a suscité une attention considérable ces dernières années, et a contribué à d'impressionnants progrès en recherche tant appliquée que fondamentale. Par exemple, le développement de systèmes appelés lentille temporelle (time-lens) a permis l'observation en intensité d'événements uniques, ultra-courts (ps) typiques de l'instabilité modulationnelle démarrant du bruit autour d'une onde monochromatique [1].

Dans nos travaux, une étape supplémentaire est franchie, grâce à l'enregistrement instantané du champ complexe résolu dans le temps à la sortie d'une fibre optique. Ceci est rendu possible grâce à notre dispositif de lentille temporelle amélioré donnant accès à la phase du champ électrique en plus de son intensité [2]. Il nous est alors possible de réaliser des acquisitions sur une large fenêtre temporelle de 200 ps avec une résolution de l'ordre de la picoseconde, couvrant ainsi un nombre sans précédent de structures non linéaires adjacentes. L'accès à la phase est rendu possible en créant un battement entre le signal à analyser et un signal de référence.

Nous étudions ici le cas d'une onde monochromatique déstabilisée par le bruit (un des scénarios les plus courant de l'instabilité modulationnelle), se propageant dans 500 m de fibre optique. Dans ce système, l'apparition d'une grande variété de solutions exactes de l'équation de Schrödinger non linéaire (1D-NLSE) a été théoriquement prédit, notamment les solitons de Peregrine, les solitons de Kuznetsov–Ma ou les breathers d'Akhmediev [3]. Dans notre cas, nous avons mis à profit la grande fenêtre temporelle d'acquisition de notre système pour observer des structures similaires à ces derniers [4].

Pour ce faire, nous avons ajusté la puissance à l'entrée de la fibre afin que la probabilité d'apparition de structures proches des breathers d'Akhmediev soit maximale en sortie de fibre. Après traitement des données, nous observons effectivement que des trains quasi périodiques d'impulsions apparaissent et notamment que chaque impulsion s'accompagne d'un saut de phase de π comme attendu par la théorie.

Ce dispositif expérimental peut s'appliquer à d'autres régimes d'instabilité et peut être utilisé pour étudier l'impact de différents paramètres, tel que le niveau de bruit qui est susceptible de jouer un rôle crucial pour la dynamique et les propriétés statistiques du système [5].

Références

1. M. NÄRHI, B. WETZEL, C. BILLET, S. TOENGER, T. SYLVESTRE, J. M. MEROLLA, R. MORANDOTTI, F. DIAS, G. GENTY & J. M. DUDLEY, Real-time measurements of spontaneous breathers and rogue wave events in optical fibre modulation instability, *Nat. Commun.*, **7**, 13675 (2016).
2. A. TIKAN, S. BIELAWSKI, C. SZWAJ, S. RANDOUX & P. SURET, Single-shot measurement of phase and amplitude by using a heterodyne time-lens system and ultrafast digital time-holography, *Nat. Photon.*, **12**, 228–234 (2018).
3. S. TOENGER, T. GODIN, F. DIAS, M. ERKINTALO, G. GENTY & J. M. DUDLEY, Emergent rogue wave structures and statistics in spontaneous modulation instability, *Sci. Rep.*, **5**, 10380 (2015).
4. S. RANDOUX, P. SURET & G. EL, Inverse scattering transform analysis of rogue waves using local periodization procedure, *Sci. Rep.*, **6**, 29238 (2016).
5. D. AGAFONTSEV & V. ZAKHAROV, Integrable turbulence and formation of rogue waves, *Nonlinearity*, **28**, 2791–2821 (2015).

Turbulence d'ondes inertielles générée par instabilité elliptique

Thomas Le Reun, Benjamin Favier & Michael Le Bars

Aix Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, IRPHE UMR 7342, Marseille, France
lereun@irphe.univ-mrs.fr

L'interaction gravitationnelle exercée par un objet astrophysique sur une planète produit une déformation de marée et, entre autres, conduit à des oscillations de son taux de rotation appelées « libérations ». La combinaison de ces deux effets provoque l'excitation d'ondes inertielles dans le noyau de la planète, ondes qui existent du fait de la force de Coriolis. Ces ondes, dont la fréquence est la moitié de celle des libérations, croissent exponentiellement via un mécanisme de résonance paramétrique subharmonique, appelé « instabilité elliptique », pour finalement s'effondrer en turbulence. Cet état turbulent est particulièrement important puisqu'il peut conduire à un effet dynamo et à l'amplification d'un champ magnétique protégeant la planète. L'instabilité elliptique est donc une alternative intéressante aux dynamos convectives qui n'expliquent pas les champs magnétiques des petits astres comme Ganymède. La saturation turbulente de cette instabilité reste cependant mal caractérisée. Elle diffère par ailleurs grandement des écoulements turbulents en rotation étudiés usuellement par forçage stochastique car l'énergie est ici injectée par l'instabilité seulement à travers des ondes inertielles à une fréquence spécifique.

Pour étudier cette saturation turbulente de l'instabilité elliptique, nous avons mis en place une expérience visant à reproduire les effets des marées dans un intérieur planétaire. Un ellipsoïde est monté sur une table tournante imposant un taux de rotation moyen et les oscillations de libérations sont imposées par un moteur secondaire embarqué. La taille de l'ellipsoïde et la vitesse de rotation nous permettent d'atteindre des régimes de faibles forçages et faibles taux de dissipation qui sont hors d'atteinte des précédentes expériences et simulations.

Nous observons des résonances d'ondes inertielles dont nous caractérisons la saturation turbulente par des mesures de vélocimétrie par images de particules (PIV). L'analyse temporelle des écoulements ainsi obtenus indique qu'aux faibles amplitudes de libération, la turbulence excitée par l'instabilité elliptique est dominée par la présence d'ondes inertielles à des fréquences diverses et qui ne sont pas résonantes avec le forçage. Celles-ci sont excitées par les ondes instables primaires via une interaction non-linéaire résonante appelée « résonance triadique ». En augmentant l'amplitude des libérations, cet état s'efface au profit d'un écoulement dominé par un vortex géostrophique dont l'émergence est due à une instabilité secondaire que nous caractérisons.

Finalement, nous discutons la pertinence de ces deux régimes dans les noyaux planétaires, dans lesquels à la fois les forçages de libérations et la dissipation sont très faibles. Nous montrons que dans cette limite, la saturation turbulente de l'instabilité elliptique conduit à une turbulence d'ondes, i.e. un état où un grand nombre d'ondes inertielles interagissent entre elles de manière non-linéaire et résonante. L'existence et les propriétés de la dynamo et du champ magnétique produit par un tel état restent à explorer.

Transition to turbulence in Couette-Poiseuille flow

Tao Liu¹, Lukasz Klotz², Benoît Semin¹, Ramiro Godoy-Diana¹ & José Eduardo Wesfreid¹

¹ Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), UMR 7636 CNRS, ESPCI, Paris, France

² Institute of Science and Technology Austria (IST Austria)

tao.liu@espci.fr

The transition to turbulence in confined shear flow, like plane Couette flow and circular Poiseuille flow, is sub-critical. It is characterized by the coexistence of laminar and turbulent regions. The flow is organised in the form of turbulent spots in the transition regime. In order to study this scenario, an experimental setup has recently been constructed by combining plane Couette and plane Poiseuille flow to generate a zero mean flux flow in the channel [1]. The turbulent spots are advected with a velocity close to the mean velocity which is near zero in this setup. This allows us to measure the evolution of the spots for a long time with one single camera.

By using Particle Image Velocimetry (PIV), we characterize the flow inside turbulent spots, where streamwise streaks and rolls can be observed. We obtain experimental evidence of transient growth of turbulent spots introduced by external forcing localized in time and space. Experimental results for the maximal gain and the time when it occurs are compared to theoretical prediction [2]. At moderate Reynolds number, we observe large scale flows and oblique turbulent bands with an angle around 44° which is close to the numerical prediction in plane Poiseuille flow at $Re = 700$ [3].

We are currently employing a stereo-PIV system to measure 3D velocity fields and investigate quantitatively the traveling waves that have been observed in plane Poiseuille flow experiments [4].

References

1. L. KLOTZ & J. E. WESFREID, *Phys. Rev. Fluids*, **2**, 043904 (2017).
2. L. KLOTZ *et al.*, *J. Fluid Mech.*, **829**, R4 (2017).
3. X. XIANGMING *et al.*, *Phys. Fluids*, **27**, 041702 (2015).
4. G. LEMOULT *et al.*, *Eur. Phys. J. E*, **37**, 25 (2014).

Un modèle fractionnaire de trafic

Erick Javier López-Sánchez¹ & Patricia Eugenia Olivera-Martínez²

¹ Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Coyoacan CDMX 04510, México

² Seminario Estudios Urbanos Críticos, Depto. Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Coyoacan CDMX 04510, México

`lsej@ciencias.unam.mx`

La croissance démographique mondiale a entraîné une augmentation de la demande de biens et de services au sein de la population. Cela implique qu'il devient nécessaire de transporter de la nourriture, des vêtements, du carburant, de l'eau, des personnes, etc. pour répondre aux besoins humains. La circulation des automobiles dans les villes grandes et moyennes est devenue un problème de mobilité urbain important, en particulier dans les pays où la planification urbaine est mauvaise ou inexistante. La vitesse moyenne de déplacement a tendance à diminuer, ce qui entraîne une augmentation du temps de parcours. Dans la zone métropolitaine de la vallée du Mexique, le trajet dure en moyenne 90 minutes. Parmi les nombreux modèles trouvés dans la littérature, le modèle de trafic de Greenberg [1] a été développé comme une analogie de la dynamique d'un écoulement compressible. Dans ce travail, une étude sur le comportement des solutions du modèle macroscopique fractionnaire modifié de Greenberg est développée. Les résultats sont comparés aux solutions du modèle d'origine. Nous montrons que le modèle fractionnaire réduit la vitesse par rapport au modèle non fractionnel.

Références

1. H. GREENBERG, An analysis of traffic flow, *Oper. Res.*, **7**, 79–85 (1959).

Dynamics of single rising bubble in suspension

Madec Christopher¹, Joseph John Soundar Jerome² & Joubaud Sylvain¹

¹ Univ. Lyon, ENS de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon, France

² Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, CNRS-UMR 5509, Boulevard 11 novembre, 69622 Villeurbanne CEDEX, Lyon, France
`christopher.madec@ens-lyon.fr`

Suspensions (i.e. particle-laden fluids) are prevalent in a wide range of industrial [1] and natural processes [2]. Mixing and instabilities occurring during gas release in such multiphase flows [3] may be crucial, for example, in oil recovery, gas sequestration, deep-sea mining. In this context, the present work studies the motion of a single bubble using a simple table-top experiment which consist of a neutrally buoyant non-Brownian suspension inside a Hele-Shaw cell. By carefully controlling the volume fraction of grains in the suspending Newtonian fluid (water/UCONTM mixture), the bubble rise velocity is measured for various bubble diameters. The evolution of the bubble rising velocity with its diameter is similar to that the one it would have in a classical Newtonian fluid [4]. As expected, when the packing fraction is increased and therefore, the suspension effective viscosity [5], the rise velocity drops. Nonetheless, the bubble can present a deformed shape and may fragment at large packing fraction.

References

1. L.-S. FAN, *Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering*, Butterworths, Stoneham, MA, USA (1989).
2. H. SVENSEN *et al.*, Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming, *Nature*, **429**, 542–545 (2004).
3. A. WOODS, Turbulent plumes in nature, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **42**, 391–412 (2010).
4. T. MAXWORTHY, Bubble formation, motion and interaction in a Hele-shaw, *J. Fluid Mech.*, **173**, 95–114 (1986).
5. E. GUAZZELLI & O. POULIQUEN, Rheology of dense granular suspensions, *J. Fluid Mech.*, **852**, P1 (2018).

Subcritical transition to turbulence in wall-bounded flows: The case of plane Poiseuille flow

Paul Manneville¹ & Masaki Shimizu²

¹ Hydrodynamics Laboratory, CNRS-UMR7646, École Polytechnique, Palaiseau, 91128 France

² Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka, 560-0043 Japan

paul.manneville@ladhyx.polytechnique.fr

In wall-bounded flows the transition to turbulence is sub-critical and develops all along a transitional range marked by the spatial coexistence of laminar and nontrivial flow at intermediate values of the Reynolds number R [1]. Pomeau's early conjecture [2] that this transition is governed by directed percolation (DP) has recently received some support from experiments in a quasi-one-dimensional (1D) cylindrical Couette flow configuration [3] and by numerical simulations of a model of shear flow without walls in a quasi-two-dimensional (2D) geometry [4], among a few other cases. Pressure-driven flow through a wide rectangular duct, usually called *channel flow* or plane Poiseuille flow, is one such case for which agreement has been found with 2D-DP universality in a decay experiment from uniform turbulence [5]. This result is however contradicted by the observation of oblique localized turbulent bands (LTBs) in numerical [6] or laboratory experiments [7]. Our numerical study reveals how these two contradictory results can be reconciled by identifying a transition that preempts the DP scenario slightly above its critical point. When the turbulent fraction is small enough, at decreasing R , LTBs develop from an intermittent loose continuous laminar-turbulent network. Within the LTB regime, a threshold is found separating an upper range where LTBs obliquely propagate symmetrically with respect to the stream-wise direction, hence genuinely 2D turbulence invasion, from a lower range where all the LTBs move essentially in one of the two in-plane directions allowed by the flow symmetries. A simple differential model is developed for this symmetry breaking, supporting the super-critical pitch-fork character of the bifurcation at decreasing R . The DP process however keeps some relevance since, above that threshold and within the laminar-turbulent network regime, the turbulent fraction is seen to grow as $(1 - R_{\text{DP}}/R)^\beta$ where R_{DP} is the extrapolated DP critical point and $\beta \approx 0.58$ is close to the standard value for DP in 2D. We conclude that the development of LTBs is impeded when the particular protocol described in [5] is followed, while the DP critical point becomes unreachable in more typical circumstances. On general grounds, we observe that abstract considerations legitimating an expectation for universality may be smashed by the existence of specific processes developing in the system of interest.

References

1. P. MANNEVILLE, *Mech. Eng. Rev.*, **3**, 15 (2016).
2. Y. POMEAU, *Physica D*, **23**, 3 (1986).
3. G. LEMOULT *et al.*, *Nat. Phys.*, **12**, 254 (2016).
4. M. CHANTRY *et al.*, *J. Fluid Mech.*, **824**, R1 (2017).
5. M. SANO & K. TAMAI, *Nat. Phys.*, **12**, 249 (2016).
6. J. TAO *et al.*, *Phys. Rev. Fluids*, **3**, 011902 (2018).
7. C. S. PARANJAPE *et al.*, http://www.delegia.com/app/data/8684/Abstract/29766/ETC16_Paranjape.pdf

Description N -corps de l'interaction onde-particule dans une structure périodique

Damien F. G. Minenna^{1,2,3}, Yves Elskens², Frédéric André³, Fabrice Doveil² & Alexandre Poyé²

¹ Centre National d'Études Spatiales, FR-31401 Toulouse cedex 9, France

² Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM, UMR 7345, FR-13397 Marseille, France

³ Thales, FR-78140 Vélizy, France

damien.minenna@univ-amu.fr

En électrodynamique classique et en physique microscopique des plasmas, la description N -corps de l'interaction onde-particule a longtemps été jugée impraticable. Suivant [1, 2], nous montrons que cette description est une alternative viable à la traditionnelle approche vlasovienne (cinétique), notamment pour la modélisation temporelle des turbulences et instabilités engendrées par la dynamique non-linéaire des particules (piégeage, chaos, couplages à trois ou quatre ondes).

Le principal problème avec la dynamique N -corps est le nombre, a priori farouche, de degrés de liberté, plus important que pour les descriptions cinétiques. Dans les structures périodiques (tubes à ondes progressives, lasers à électrons libres ou accélérateurs de particules), nous contournons cette difficulté grâce à un modèle de réduction [3] des champs en domaine temporel. Cette réduction nous a permis de construire un modèle hamiltonien auto-cohérent N -corps [4] reposant sur l'échange de quantité de mouvement près de la résonance (lorsque la vitesse de phase de l'onde est proche de la vitesse des particules).

Dans notre exposé, nous présentons notre approche théorique et nos résultats numériques. Notre cas d'étude est la modélisation des tubes à ondes progressives qui, en plus d'être des amplificateurs d'ondes, constituent un outil indispensable pour étudier l'amortissement Landau [5] et plus généralement la turbulence plasma [6, 7]. Grâce au modèle hamiltonien, nous avons construit [8] un algorithme symplectique [9] permettant une caractérisation détaillée des instabilités de l'interaction. Les performances de notre algorithme sont comparées avec des approches cinétiques (*particle-in-cell PIC*) et démontrent bien la viabilité de la description N -corps.

Références

1. Y. ELSKENS & D. F. ESCANDE, *Microscopic dynamics of plasmas and chaos*, IoP publishing, Bristol (2003).
2. D. F. ESCANDE, D. BÉNISTI, Y. ELSKENS, D. ZARZOSO & F. DOVEIL, Basic microscopic plasma physics form N -body mechanics, A tribute to Pierre-Simon de Laplace, *Rev. Mod. Plasma Phys.*, **2**, 9–76 (2018).
3. F. ANDRÉ, P. BERNARDI, N. M. RYSKIN, F. DOVEIL & Y. ELSKENS, Hamiltonian description of self-consistent wave-particle dynamics in a periodic structure, *Europhys. Lett.*, **103**, 28004 (2013).
4. D. F. G. MINENNA, Y. ELSKENS, F. ANDRÉ & F. DOVEIL, Electromagnetic power and momentum in N -body Hamiltonian approach to wave-particle dynamics in a periodic structure, *Europhys. Lett.*, **122**, 44002 (2018).
5. F. DOVEIL, D. F. ESCANDE & A. MACOR, Experimental observation of nonlinear synchronization due to a single Wave, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 085003 (2005).
6. A. MACOR, F. DOVEIL & Y. ELSKENS, Electron climbing a “devil’s staircase” in wave-particle interaction, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 264102 (2005).
7. F. DOVEIL, Y. ELSKENS & D. F. G. MINENNA, Wave-particle interaction studied in a traveling wave tube, in *20th International Congress on Plasma Physics ICPP 2018, Vancouver*, conférence invitée (2018).
8. D. F. G. MINENNA *et al.*, DIMOHA: Traveling-wave tube simulations including band edge and multitone operations, in *20th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2019), Busan*, soumis (2019).
9. E. HAIRER, C. LUBICH & G. WANNER, *Geometric numerical integration*, Springer, New York (2010).

Morphogenesis and morphodynamics of sandy beaches

Eduardo Monsalve¹, S. Courrech du Pont¹ & B. Thiria²

¹ Lab. MSC, Université Paris Diderot, UMR 7057 CNRS, Paris, France

² Lab. PMMH, ESPCI-Paris, UMR 7636 CNRS, Paris, France

eduardo.monsalvegutierrez@univ-paris-diderot.fr

In this experimental project, we study the development of a granular cross-shore beach profile under water wave forcing. We generate waves in a narrow flume 3 m long and 8 cm wide, which contains light plastic particles. Waves propagate through a deep water region ($h_0 \approx 10$ cm) before attaining an erodible beach. The shear stress exerted by the waves on the granular bottom produces transport and modifies the beach profile until an equilibrium is reached. Using a homogeneous lighting from the side, we measure by contrast the incident wave amplitude and reflection coefficient in the deep region, as well as the wave asymmetry and wave height in the breaking zone. Thus far two parameters are controlled: incident wavenumber k_0 and wave amplitude a_0 . By keeping constant the deep water depth, we change the initial beach slope, showing that this initial condition does not influence the final profile in the zone after breaking (swash zone).

By using wave energy conservation and wave breaking criteria, we predict and measure experimentally the breaking depth h_b and the length of the swash zone, where the breaking point is indicated by the maximum wave height H_b and the minimum mean water level. Our experiments follow the relation $h_b = (\tanh k_0 h_0 / (\gamma k_0))^{1/5} H_0^{4/5}$ [1], where k_0 , h_0 and H_0 correspond to the incident wavenumber, depth and wave height, respectively; and $\gamma = H_b/h_b$ is the breaking ratio ($\gamma \approx 0.8$, given by the literature in ocean waves, agrees very well with our experiments).

The beach length, slope and curvature are determined by the several contributions, among which stand out the grain density and size, the shear stress and the wave dissipation [2]. By measuring the surface displacement in the swash zone and using mass conservation, we estimate the fluid velocity near the bottom and consequently the critical shear stress. In addition, we measured experimentally the viscous fall velocity of the grains u_∞ . These variables, together with the reflection coefficient which sets the net mass transport, permit us to model and verify experimentally the beach cross-shore profile. Particular attention is given to the beach step [3, 4] generated by a backwash vortex [5] under certain physical conditions.

In the following, our goal is to obtain quantitative results describing the dynamic of the phenomenon and contributing to the physical understanding of the beach morphology.

References

1. A. SALEH SALEM, A. JARNO-DRUAUX & F. MARIN, *J. Coastal Res.*, **57**, 139–143 (2011).
2. L. D. WRIGHT & A. D. SHORT, *Mar. Geol.*, **56**, 93–118 (1984).
3. B. O. BAUER & J. R. ALLEN, *Mar. Geol.*, **123**, 143–166, 1995.
4. M. LARSON & T. SUNAMURA, *J. Sediment. Res.*, **63**, 495–500 (1993).
5. N. MATSUNAGA & H. HONJI, *J. Fluid Mech.*, **99**, 813–815 (1980).

États transitoires dans l'écoulement de Couette plan

Romain Monchaux & David De Souza

IMSIA, ENSTA ParisTech, CNRS, CEA, EDF, Institut Polytechnique de Paris, 828 Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex, France
 monchaux@ensta.fr

Les écoulements cisailés de paroi sont le siège d'une transition à la turbulence complexe du fait de son caractère sous-critique [1, 2]. Cette transition constitue l'un des plus vieux problèmes ouverts de la mécanique et la comprendre davantage ouvrirait la voie à des stratégies de contrôle. Dans le voisinage du seuil de transition, la dynamique des zones turbulentes met en jeu un grand nombre d'échelles temporelles et spatiales. Comme ces structures turbulentes sont advectées à la vitesse débitante moyenne, la plupart des dispositifs expérimentaux ne permettent pas de les étudier sur des temps longs.

Nous utilisons un dispositif de Couette plan à deux parois mobiles pour lequel la vitesse débitante est nulle [4] et nous pouvons donc analyser les structures turbulentes sur des temps arbitrairement longs. Les mesures sont réalisées à l'aide de vélocimétrie par Imagerie de particules à haute résolution spatiale qui nous permettent d'avoir accès à toutes les échelles temporelles et spatiales de l'écoulement considéré. Notre étude se concentre sur le régime transitionnel pour lequel zones laminares et turbulentes coexistent dans l'espace physique. Nous cherchons à caractériser les états stationnaires (s'ils existent) dans ce régime transitionnel. Pour ce faire, nous préparons l'écoulement dans un état uniformément turbulent à un nombre de Reynolds initial $R_i = 480$ puis nous abaissons le nombre de Reynolds à un rythme donné $\Delta R/s$ jusqu'à un nombre de Reynolds final R_f . La fraction de l'espace physique qui est dans l'état turbulent (la fraction turbulente) est mesurée en fonction du temps pour permettre un suivi global de la dynamique complexe sur plusieurs milliers de temps d'advection. Nous posons les questions suivantes : (i) le système relaxe-t-il sur des états asymptotiques donnés, et si oui, de quoi dépendent les états observés (R_f , $\Delta R/s$, ...)? (ii) indépendamment de ces éventuels états asymptotiques, quelles sont les caractéristiques de la dynamique y conduisant ?

Nous avons fait varier les deux paramètres de contrôle de notre système dans une large gamme : R_f entre 300 et 410 (pour $R > 300$ la turbulence ne se maintient jamais, pour $R > 410$, l'écoulement est uniformément turbulent) ; $\Delta R/s$ entre 0,3 et 1000. Nous montrons qu'un état asymptotique semble toujours être atteint par le système et que cet état ne semble dépendre que de R_f , du moins en ce qui concerne sa fraction turbulente. La dynamique de retrait de la turbulence dépend elle en revanche fortement de $\Delta R/s$. En particulier, nous montrons que dans environ la moitié de nos expériences la dynamique de retrait ralentit sur des états transitoires pour lesquels la fraction turbulente reste statistiquement stationnaire. Ces états sont associés à des valeurs quantifiées de la fraction turbulente (typiquement 5%, 10%, 30% et 50%) autour desquelles le système fluctue pendant un temps arbitrairement long avant de relaxer vers l'état asymptotique ou vers un autre état stationnaire de fraction turbulente éventuellement plus élevée. Si ces états transitoires avaient déjà été mentionné brièvement dans la littérature [3], nous en proposons ici une caractérisation complète et nous soulevons des questions concernant leur nature et particulièrement leur lien avec la topologie de l'espace des phases.

Références

1. F. DAVIAUD, J. HEGSETH & P. BERGE, *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 2511–2514 (1992).
2. N. TILLMARK & P. H. ALFREDSSON, *J. Fluid Mech.*, **235**, 89–102 (1992).
3. A. PRIGENT & O. DAUCHOT, in *IUATM Symposium on laminar-turbulent transition and finite amplitude solutions*, T. Mullin & R. Kerswell (éditeurs), pp. 195–219 (2005).
4. M. COULIOU & R. MONCHAUX, *Phys. Rev. E*, **93**, 013108 (2016).

Encodage d'une information sinusoïdale dans un circuit neuronal et résonances induites par une perturbation

Savério Morfu, Maxime Bordet & Mathieu Rossé

ImVia EA 7535, Univ Bourgogne Franche-Comté, Aile des sciences de l'ingénieur BP 47870, 21078 Dijon Cedex
smorfu@u-bourgogne.fr

Comprendre comment les systèmes neuronaux encodent l'information est toujours une question ouverte qui continue de faire l'objet de bon nombre de travaux de recherche. En effet, l'efficacité des systèmes neuronaux à traiter l'information a permis le développement d'une grande variété de traitements bio-inspirés. Plus particulièrement, les réseaux cellulaires non linéaires (CNN) peuvent être vus comme des circuits électroniques qui s'inspirent du comportement des neurones pour réaliser des tâches de traitement du signal et des images [1, 2]. En effet, ces circuits neuronaux sont décrits par les mêmes équations différentielles non linéaires que les modèles neuronaux dont ils s'inspirent ; ce qui leur permet de tirer profit des propriétés des systèmes non linéaires. Parmi les propriétés des systèmes non linéaires se trouvent les phénomènes de résonances induits par des perturbations, telles que la résonance stochastique et la résonance vibrationnelle [3–8]. Ces phénomènes consistent à améliorer la réponse d'un système non linéaire à une excitation d'entrée par une quantité appropriée d'une perturbation.

Dans ce contexte de circuits bio-inspirés, il est crucial de caractériser, dans un premier temps, la réponse d'un seul neurone, ou circuit neuronal, à différents type de stimulation. Par exemple, il a pu être montré qu'un stimulus sinusoïdal pouvait donner naissance à différents types de mode dépendant de l'amplitude et de la fréquence du stimulus [9]. Ces modes correspondent à la production d'un certains nombres de potentiels d'action durant une période de l'excitation sinusoïdale et permettent d'établir le diagramme d'encodage de cette excitation.

Cependant, il convient de prendre en compte les perturbations qui peuvent entrer en jeu lors du processus d'encodage de l'excitation [10, 11]. En ce sens, il a pu être montré qu'un neurone pouvait utiliser une perturbation haute fréquence pour améliorer la détection d'un stimulus basse fréquence via les phénomènes de résonance vibrationnelle. En effet, si on analyse l'amplitude du spectre du signal en sortie du système, il peut présenter des résonances multiples en fonction de la fréquence de la perturbation. La prédiction de ces résonances s'avère donc crucial pour en tirer bénéfice. C'est l'objet de cette communication. Après avoir brièvement présenté le circuit neuronal et précisé son régime de fonctionnement, nous établissons un diagramme d'encodage du stimulus sinusoïdal. Nous étudions ensuite l'impact d'une perturbation haute fréquence sur la détection de ce stimulus basse fréquence. En particulier, nous interprétons les résonances qui ont lieu à l'aide du diagramme d'encodage précédemment établi.

Références

1. L.O. CHUA & T. ROSKA, Cellular Neural Networks and Visual Computing : Foundation and Application, Cambridge University Press (2002).
2. S. MORFU, B. NOFIELE & P. MARQUIÉ, *Phys. Lett. A*, **367**, 192–198 (2007).
3. L. GAMMAITONI, P. HÄNGGI, P. JUNG & F. MARCHESONI, *Rev. Mod. Phys.*, **70**, 223–287 (1998).
4. P. BALENZUELA, H. BRAUN & D. R. CHIALVO, *Contemp. Phys.*, **53**, 17–38 (2011).
5. P. S. LANDA & P. V. E. MCCLINTOCK, *J. Phys. A*, **33**, L433–L438 (2000).
6. E. ULLNER, A. ZAIKIN, J. GARCÍA-OJALVO, R. BÁSCONES & J. KURTHS, *Phys. Lett. A*, **312**, 348 (2003).
7. M. BORDET & S. MORFU, *Electron. Lett.*, **48**, 903–905 (2012).
8. M. BORDET, S. MORFU & P. MARQUIÉ, *Chaos Soliton. Fract.* **78**, 205–214 (2015).
9. Y.-Q. CHE, J. WANG, W. JIE SI & X. Y. FEI, *Chaos Soliton. Fract.*, **39**, 454 (2009).
10. L. YANG, W. LIU, M. YI, C. WANG, Q. ZHU, X. ZHAN & Y. JIA, *Phys. Rev. E*, **86**, 016209 (2012).
11. S. MORFU & M. BORDET, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, **55**, 277–286 (2018).

États stationnaires des plasmas de tokamak en MHD visco-résistive

Hanen Oueslati^{1,2}, Marie-Christine Firpo¹ & Aziz Salhi²

¹ Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), Ecole polytechnique, Palaiseau, France

² Laboratoire Matériaux Organisations et Propriétés (LMOP), Université de Tunis el Manar, Tunisie

hanen.oueslati@lpp.polytechnique.fr

La détermination classique des états d'équilibre des plasmas de tokamaks repose sur la résolution de l'équation de Grad-Shafranov. On y suppose que le plasma, vu comme un fluide conducteur, a une vitesse nulle. Experimentalement, il existe de nombreuses observations d'une rotation spontanée dans les tokamaks notamment dans la direction toroidale. Cette rotation du plasma s'avère avoir des effets très importants sur l'amélioration du confinement et le passage dans le mode H de confinement amélioré.

Pour éclaircir ces observations expérimentales, nous nous proposons de déterminer numériquement les états stationnaires axisymétriques des équations non-linéaires de la magnétohydrodynamique visco-résistive obtenues en réintroduisant le terme convectif. Cette étude doit prendre en compte le forçage dû à la présence d'un champ électrique extérieur dans la direction toroïdale servant à créer le courant toroïdal nécessaire dans un tokamak à la création de la composante poloïdale du champ magnétique.

Nous présenterons des résultats numériques préliminaires obtenus en utilisant le code open source FreeFem++ dans les géométries des tokamaks JET et ITER. Nous avons considéré des valeurs réalistes de la résistivité η et nous avons fait varier la viscosité ν , dont l'ordre de grandeur réaliste est mal connu. Un résultat intéressant est que l'ordre de grandeur de la vitesse toroidale pour des grandes valeurs du nombre de Hartmann $Ha = (\eta\nu)^{-1/2}$ est comparable à celui donné par les mesures expérimentales dans JET. De plus, toutes choses égales par ailleurs, la vitesse toroidale maximale est une fonction croissante de la température du plasma et est plus grande en géométrie ITER que dans JET.

Caractérisation et modélisation de la morphogenèse urbaine

Romain Pousse & Stéphane Douady

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes - UMR CNRS - Université Paris Diderot , 10 rue Domon et Léonie Duquet, 75205 Paris Cedex 13

romain.pousse@univ-paris-diderot.fr

La ville est un système composé de multiples structures, d'activités, d'espaces ou de réseaux en perpétuelle évolution. Au vu de sa complexité, elle devient un objet d'étude difficile à appréhender dans sa globalité. Par contre, s'intéresser à une de ses composantes a été à l'origine de nombreuses études scientifiques de tout horizons et de tout domaines. C'est cette démarche que nous avons entrepris en s'intéressant au réseau viaire. A partir de cet élément, nous n'essayons pas de comprendre le développement de la ville dans son ensemble mais d'en déduire le maximum d'information en lien avec la morphogenèse urbaine. Nous faisons l'hypothèse que ce réseau est un indicateur sensible au développement urbain. En effet, ce réseau est d'une forte stabilité temporelle comme on peut le constater encore actuellement dans de nombreuses villes où des rues datent de plusieurs siècles malgré diverses catastrophes naturelles ou humaines qui ont pu les frapper. Il n'en reste pas moins une structure complexe n'ayant pas forcément la même utilité ou la même architecture. C'est pourquoi le pari qui a été fait est d'étudier, non pas toutes les caractéristiques de ce réseau, mais simplement son squelette, sa trace spatiale. L'intérêt est de développer des outils de compréhension de cette structure et de trouver des mécanismes analogues dans la nature ou par l'intermédiaire de modèles artificiels. Une collaboration transversale entre « modélisateurs » et spécialistes de Sciences Humaines et Sociales devient alors essentielle afin que les principes méthodologiques de ces premiers soient validés par les seconds. Nous montrerons les premières tentatives de modèles artificiels de création de réseaux de voies effectuées depuis le début de ma thèse, qui essaient de reproduire la distribution des longueurs, distribution en loi log-normale dont nous avons pu constater son caractère universel dans de nombreuses villes (de Paris à San Francisco jusqu'à l'île de Manhattan) ainsi que différents essais méthodologiques pour caractériser les formes de réseaux observées.

Références

1. T. COURTAT, C. GLOAGUEN & S. DOUADY, Mathematics and morphogenesis of cities: A geometrical approach, *Phys. Rev. E*, **83**, 036106 (2011).
2. T. COURTAT, *Walk on City Maps-Mathematical and Physical phenomenology of the City, a Geometrical approach*, PhD Thesis, Université Paris-Diderot-Paris (2012).
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00714310>
3. C.-N. DOUADY ET L'ÉQUIPE MORPHOCITY, *De la trace à la trame. La voie, lecture du développement urbain*, L'Harmattan (2014).
4. E. KATIFORI & M. O. MAGNASCO, Quantifying loopy network architectures, *PLoS ONE*, **7**, e37994 (2012).
5. C. LAGESSE, P. BORDIN, S. DOUADY, A spatial multi-scale object to analyze road networks, *Network Sci.*, **3**, 156–181 (2015).
6. C. LAGESSE, *Lire les lignes de la ville. Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Diderot-Sorbonne-Paris Cité (2015).

Étude de la turbulence à très hauts Re et Gr dans le grand Taylor–Couette thermique

Harminder Singh, Arnaud Prigent, Hugues Besnard, Antoine Bonnesoeur, Olivier Crumeyrolle & Innocent Mutabazi

LOMC, 53 rue de Prony, CS 80 540, 76058 Le Havre - France
 arnaud.prigent@univ-lehavre.fr

Ces dernières années, la turbulence ultime, quand même les couches limites deviennent turbulentes, a fait l'objet de plusieurs études dans le système de Taylor–Couette où la rotation de l'un ou des deux cylindres était à son origine [1–5]. Dans le système de Rayleigh–Bénard, où l'écoulement et donc la turbulence sont induits par un gradient de température, le régime de turbulence ultime a aussi été l'objet de plusieurs travaux ces derniers temps [6–9]. Nous présentons ici le grand Taylor–Couette thermique (GTCT), un nouveau système expérimental de Taylor–Couette de grande dimension dédié à l'étude de la turbulence développée générée par l'action simultanée de l'instabilité centrifuge liée à la rotation du cylindre intérieur et de la convection induite par un gradient radial de température. Le système est constitué de trois cylindres concentriques. Les rayons de ses cylindres intérieur et extérieur mesurent 132,5 et 152,5 mm produisant un entrefer de 20 mm et un rapport des rayons $\eta = 0,869$. La hauteur de 960 mm confère au système un rapport d'aspect $\Gamma = 43$. Le cylindre extérieur est fixe et la vitesse de rotation maximale du cylindre intérieur permet d'atteindre un nombre de Reynolds $Re_i = 0,5 \times 10^6$. Les températures des cylindres sont contrôlées indépendamment à $\pm 1\%$. Le cylindre intérieur peut être chauffé à 40°C par le rayonnement de résistances contrôlées à l'aide de pyromètres et le cylindre extérieur peut être refroidi à 10°C par une circulation d'eau entre lui et le cylindre d'isolation. Nous pouvons obtenir ainsi une différence de température de 30°C et un nombre de Grashof $Gr \simeq 10^6$. Le fond et le cylindre extérieur et le cylindre d'isolation sont en verre transparent et permettent un accès optique complet depuis le côté ou le bas dont nous profité pour réaliser des mesures de vitesse par PIV et des mesures de température à l'aide de cristaux liquides thermochromiques (CLT) et par LIF dans les plans $(r-\theta)$ ou $(r-z)$. Le système est également équipé d'un couplemètre dont nous présentons les mesures.

Références

1. B. ECKHARDT, S. GROSSMANN & D. LOHSE, Torque scaling in turbulent Taylor–Couette flow between independently rotating cylinders, *J. Fluid Mech.*, **581**, 221–250 (2007).
2. S. GROSSMANN, D. LOHSE & C. SUN, High–Reynolds number Taylor–Couette turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **48**, 53–80 (2016).
3. S. G. HUISMAN, D. P. M. VAN GILS, S. GROSSMANN, C. SUN & D. LOHSE, Ultimate turbulent Taylor–Couette flow, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 024501 (2012).
4. S. G. HUISMAN, S. SCHARNOWSKI, C. CIERPKA, C. J. KÄHLER, D. LOHSE & C. SUN, Logarithmic boundary layers in strong Taylor–Couette turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 264501 (2013).
5. R. OSTILLA-MÓNICO, E. P. VAN DER POEL, R. VERZICCO, S. GROSSMANN & D. LOHSE, Boundary layer dynamics at the transition between the classical and the ultimate regime of Taylor–Couette flow, *Phys. Fluids*, **26**, 015114 (2014).
6. S. GROSSMANN & D. LOHSE, Multiple scaling in the ultimate regime of thermal convection, *Phys. Fluids*, **23**, 045108 (2011).
7. S. GROSSMANN & D. LOHSE, Logarithmic temperature profiles in the ultimate regime of thermal convection, *Phys. Fluids*, **24**, 125103 (2012).
8. F. CHILLÀ, M. RASTELLO, S. CHAUMAT & B. CASTAING, Ultimate regime in Rayleigh–Bénard convection: The role of plates, *Phys. Fluids*, **16**, 2452–2456 (2004).
9. G. AHLERS, E. BODENSCHATZ & X. HE, Ultimate-state transition of turbulent Rayleigh–Bénard convection, *Phys. Rev. Fluids*, **2**, 054603 (2017).

Forces on capillary floaters

Giuseppe Pucci^{1,2}, Ian Ho¹ & David M. Harris¹

¹ Brown University, School of Engineering, 184 Hope St., Providence (RI), United States

² Current affiliation: Univ Rennes, CNRS, IPR (Institut de Physique de Rennes) UMR 6251, F35000 Rennes, France

giuseppe.pucci@univ-rennes1.fr

A body can be supported at the water–air interface by virtue of the equilibrium among its weight, surface tension and hydrostatic forces. Quantifying the forces these bodies experience is of critical importance for understanding the motion of living organisms at the water-air interface [1] and can inform the design of aerial-aquatic microrobots for environmental exploration and monitoring [2]. Here we measure and rationalize two forces experienced by *centimetric bodies* at the water-air interface: capillary attraction force and sliding friction.

It is well known that two particles trapped at a fluid interface may interact due to the deformation they induce on the free surface [3]. This capillary force has been previously measured for bodies at the sub-millimetric scale [4]. We present direct measurements of the force between centimetric disks resting at air-water interface. Using a novel experimental setup, we characterize how the attraction force depends on the disk mass, diameter, and relative spacing, and compare our measurements with theoretical predictions.

Second, we experimentally show that the motion of centimetric “sliders” is dominated by skin friction due to the boundary layer that forms in the fluid beneath the body, which results in a friction force $F_D \propto v^{3/2}$ [5]. We develop a simple model that considers the boundary layer as quasi-steady, and is able to capture the experimental behaviour for a range of body sizes, masses, shapes and fluid viscosities. We define a dimensionless *sliding number* as the ratio between the fluid inertia and the body inertia, which allows us to assess the regime of validity of our model. Furthermore, we demonstrate that friction can be reduced by modification of the body’s shape or bottom topography.

References

1. J. W. M. BUSH & D. L. HU, Walking on water: Biocomotion at the interface, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **38**, 339–369 (2006).
2. Y. CHEN *et al.*, Controllable water surface to underwater transition through electrowetting in a hybrid terrestrial-aquatic microrobot, *Nat. Commun.*, **9**, 2495 (2018).
3. D. VELLA & L. MAHADEVAN, The “Cheerios effect”, *Am. J. Phys.*, **73**, 817–825 (2005).
4. C. D. DUSHKIN *et al.*, Lateral capillary forces measured by torsion microbalance, *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 3454–3457 (1995).
5. G. PUCCI, I. HO & D. M. HARRIS, Friction on water sliders, under review in *Sci. Rep.* (2019).

Bi-stabilité diffusive-convective en présence d'un changement de phase

Jhaswantsing Purseed, Benjamin Favier & Laurent Duchemin

Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE, Marseille, France
purseed.j@gmail.com

L'évolution d'un front de changement de phase solide-liquide (le milieu étant supposé pur et incompressible) est étudiée numériquement en présence d'un gradient de température instable dans la phase liquide. Ce problème peut être vu comme un système classique de Rayleigh-Bénard où l'une des parois solides peut fondre ou se solidifier [1]. Ce système présente des états d'équilibre lorsque les flux thermiques à travers le solide et dans le liquide sont égaux. L'équilibre conductif a pour caractéristiques une interface plane, pas de mouvement du liquide et des flux diffusifs dans chacune des phases. L'équilibre convectif présente une interface déformée, des rouleaux de convection dans la phase liquide avec un flux convectif associé. En supposant que la convection dans le liquide se comporte comme la convection classique de Rayleigh-Bénard [2, 3], il est possible de prédire la hauteur à l'équilibre.

La transition entre un équilibre conductif ou un équilibre convectif se déduit de la stabilité de l'équilibre diffusif. Cette dernière dépend du nombre de Rayleigh, $Ra(h_e)$ basé sur la hauteur moyenne de la couche liquide à l'équilibre diffusif. Dans notre configuration, le nombre de Rayleigh critique, au-delà, duquel on observe l'instabilité, décroît lorsque l'épaisseur de la couche solide augmente [4].

Finalement, lorsqu'on se place proche du seuil critique et que l'on fait varier la hauteur initiale de l'interface, on observe une dépendance aux conditions initiales sous la forme d'une bi-stabilité entre deux états, diffusif et convectif. La nature sous-critique de cette transition est confirmée par une étude de perturbation à amplitude finie d'un équilibre diffusif proche du seuil.

Références

1. G. M. VASIL & M. R. E. PROCTOR, Dynamic bifurcations and pattern formation in melting-boundary convection, *J. Fluid Mech.*, **686**, 77–108 (2011).
2. B. FAVIER, J. PURSEED & L. DUCHEMIN, Rayleigh–Bénard convection interacting with a melting boundary, *J. Fluid Mech.*, **858**, 437–473 (2019).
3. B. R. ESFAHANI, S. C. HIRATA, S. BERTI & E. CALZAVARINI, Basal melting driven by turbulent thermal convection, *Phys. Rev. Fluids*, **3**, 053501 (2018).
4. S. H. DAVIS, U. MÜLLER & C. DIETSCHKE, Pattern selection in single-component systems coupling Bénard convection and solidification, *J. Fluid Mech.*, **144**, 133–151 (1984).

Drosophila during early gastrulation is not only a living being

Julien Fierling¹, Alexandre Torzynski¹, Catherine Quilliet¹, Jocelyn Etienne¹, Philippe Marmottant¹, Guy Blanchard², Claire Lye² & Benedicte Sanson²

¹ LIPhy, Grenoble

² PDN, Cambridge

Catherine.Quilliet@univ-grenoble-alpes.fr

We propose a mechanical approach of the beginning of the first morphogenetic event of the development of *Drosophila*, namely the gastrulation. This event is known to happen concomitantly with the recruitment of apical myosin in a ventral region (the mesoderm). Against the grain, that usually invokes local changes in an hypothetical spontaneous curvature of the mesoderm, we suggest that the pulling of myosin in this area (ventral + apical) is sufficient to induce the formation of the longitudinal ventral furrow that initiates the gastrulation. To test this assumption, we performed finite-elements simulations of a purely mechanical model, where the initial shape of the embryo was reproduced. These numerical experiments showed sequences of shapes observed in-vivo, and due to dedicated experimental measurements on developing *Drosophila*, a quantitative correspondence between successive simulations and the developmental time was set up. This allowed to quantitatively retrieve experimental features such as the displacement of cells around the ventral midline (along which the ventral furrow develops), area changes according to the distance to the ventral furrow, the evolution of the furrow depth and the signature of a buckling. These results show the importance of myosin location in the mesoderm, and the crucial role of the three-dimensional geometry, in the folding of the epithelium during the early gastrulation in *Drosophila*.

Contrôle de vitesse de flamme par un forçage paramétrique

Basile Radisson, Bruno Denet & Christophe Almarcha

Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHÉ, UMR 7342, 13384 Marseille, France
radisson@irphe.univ-mrs.fr

Sous l'effet de l'instabilité inhérente à la propagation d'un front de flamme de prémélange [1], l'interface réactive se plisse et évolue selon une dynamique complexe. Ces fluctuations de la surface de flamme entraînent une variation de la vitesse de consommation du mélange. La maîtrise de la forme de l'interface permet donc un contrôle direct de la puissance dégagée par la réaction de combustion. Dans cette étude, on montre au travers d'une expérience de laboratoire, qu'un tel contrôle est possible en profitant d'interactions vibroacoustiques entre la flamme et la structure du brûleur. Dans notre expérience, une flamme de prémélange se propage dans une chambre confinée entre deux vitres espacées de 5 mm [2]. En forçant un mode propre de l'une des deux vitres, on génère un écoulement oscillant dans la cavité qui agit sur l'interface comme un forçage paramétrique [3,4]. En ajustant l'intensité du forçage on obtient la stabilisation de la flamme et/ou sa déstabilisation secondaire. Dans notre dispositif simplifié, on obtient ainsi un contrôle « à la demande » de la vitesse de propagation de la flamme.

Références

1. G. DARRIEUS, oeuvre présentée à la technique moderne (1938).
2. E. AL SARRAF, C. ALMARCHA, J. QUINARD, B. RADISSON & B. DENET, Quantitative analysis of flame instabilities in a Hele-Shaw burner, *Flow Turbul. Combust.*, **101**, 851–868 (2018).
3. G. H. MARKSTEIN, Interaction of flow pulsations and flame propagation, *J. Aeronaut. Sci.*, **18**, 428–429 (1951).
4. G. SEARBY & D. ROCHWERGER, A parametric acoustic instability in premixed flames, *J. Fluid Mech.*, **231**, 529–543 (1991).

Zonostrophic beta-plumes, zonal jets and particle diffusivity in locally-forced shallow water experiments

Peter Read¹, Boris Galperin², Stefania Espa³, Enrico Ferrero⁴, Simon Cabanes³, Federica Ive⁴, Massimiliano Manfrin⁴, H el ene Scolan¹ & Roland Young¹

¹ Department of Physics, University of Oxford, UK

² College of Marine Science, University of South Florida, St Petersburg, USA

³ DICEA, Sapienza University of Rome, Italy

⁴ Department of Physics, University of Torino, Italy

`peter.read@physics.ox.ac.uk`

Eddy-driven zonal jets and Rossby waves are common features of planetary atmospheres and oceans, organising the large-scale flow and influencing the dispersion and transport of material tracers and constituents. In the presence of relatively weak friction and forcing, zonal jets form a dominant component of the flow in a regime known as “zonostrophic”, characterized by strongly anisotropic energy spectra and the formation of slowly evolving systems of alternating zonal jets [1, 2]. This regime is characterized by two scales, $L_\beta \sim (\epsilon/\beta^3)^{1/5}$ and $L_R \sim (U_{\text{rms}}/\beta)^{1/2}$, where ϵ is the transfer rate of the inverse energy cascade and β is the radial gradient of the Coriolis parameter, and their ratio, known as the zonostrophy index, $R_\beta = L_R/L_\beta$ [2]. In unaveraged flows, zonal jets become discernible at $R_\beta \sim 2$ while much stronger jets are found for $R_\beta \gg 1$. Achieving such high values of R_β in a laboratory is a non-trivial task. The zonally-banded atmospheres of the gas giant planets are probably well inside such a regime with $R_\beta \sim 5$ [3], though the Earth’s atmosphere and oceans are in a more friction-dominated state where $R_\beta \sim 1.5\text{--}1.8$ [1, 2]. In this study we have investigated the flow obtained in a rapidly rotating fluid on a topographic beta-plane in a cylindrical tank, subject to localised periodic mechanical forcing along a radius. The experiments were carried out in the 5 m diameter rotating tank at the Turlab facility in Turin, Italy under the European High-Performance Infrastructures in Turbulence (EUHiT) programme [4]. Horizontal velocity measurements were obtained using PIV in a horizontal plane a short distance below the free surface, while discrete particles floating on the surface were tracked to obtain their Lagrangian trajectories. The flow exhibited the spontaneous formation of persistent zonal jets, topographic Rossby waves and intense vortical eddies close to the forcing. The large-scale flow was found to lie within the zonostrophic regime with a zonostrophic index $R_\beta \gtrsim 2.0$ in at least some cases. This contribution will present the first results from the analysis of these experiments, focusing on characterising the potential vorticity dynamics of the large-scale flow and its particle transport properties.

References

1. B. GALPERIN, S. SUKORIANSKY & N. DIKOVSKAYA, Geophysical flows with anisotropic turbulence and dispersive waves: flows with a β -effect, *Ocean Dyn.*, **60** 427–441 (2010)
2. B. GALPERIN, S. SUKORIANSKY, R. M. B. YOUNG, R. CHEMKE, Y. KASPI, P. L. READ & N. DIKOVSKAYA, Barotropic and Zonostrophic Turbulence, in *Zonal Jets: Phenomenology, Genesis, Physics*, B. Galperin & P. L. Read (Editors), Cambridge University Press, Chap. 13 (2019).
3. B. GALPERIN, R. M. B. YOUNG, S. SUKORIANSKY, N. DIKOVSKAYA, P. L. READ, A. J. LANCASTER & D. ARMSTRONG, Cassini observations reveal a regime of zonostrophic macroturbulence on Jupiter, *Icarus*, **229**, 295–320 (2014).
4. Waves, turbulence and diffusion in beta plumes, β -WTD, European High-Performance Infrastructures in Turbulence funded project.

Unraveling nonlinearities in elastic knots

Pedro Reis

EPFL, Suisse

pedro.reis@epfl.ch

Even though most of us tie our shoelaces wrongly (i.e., not with the most mechanically performant configuration), knots in ropes and filaments have been used for millennia as functional structural mechanisms. Applications include mooring ships to docks, ensuring the safety of a falling climber, wrapping presents or fastening surgical suture threads. Despite their importance, our knowledge on tight physical knots is mostly empirical and there is a striking lack of predictive models that quantitatively capture their mechanical behavior. For tight knots, highly nonlinear and coupled behavior arise from intricate three-dimensional geometries, large deformations at the material level, (self)contact and friction between rod strands. Furthermore, tight knots do not exhibit separation of the relevant length scales, thereby precluding usage of thin rod models (e.g., ‘à la’ Kirchhoff). We have approached the problem by performing precision model experiments that comprise X-ray computed tomography (to probe the underlying complex geometry) and mechanical testing (to quantify the interplay of bending curvature, elasticity, and friction). These experimental data are contrasted to both Finite Element (FE) simulations and to formal results for geometrically rigid strings (that exclude elasticity), finding that the latter tends to act as an underlying ‘backbone’ for the full elastic solution. Through the combination of X-ray tomography and FE modeling, we gained quantitative access to the regions of self-contact where friction is activated to confer functional performance, e.g., holding strength. Our results are starting to yield invaluable insight that we hope will help unravel the highly nonlinear but fascinating behavior of knotted structures.

This work was done in collaboration with Paul Grandgeorge, Paul Johanns, Tomohiko Sano, Changyeob Baek, Alastair Flynn, and John Maddocks.

Modélisation probabiliste de la structure spatio-temporelle du champ de vitesse turbulente

Jason Reneuve & Laurent Chevillard

Laboratoire de Physique (UMR CNRS 5672), ENS de Lyon, 46, allée d'Italie F-69364 LYON CEDEX 07, FRANCE

`jason.reneuve@ens-lyon.fr`

La description probabiliste des signaux de vitesse est à la base de la phénoménologie moderne de la turbulence homogène et isotrope, introduite principalement en 1941 par Kolmogorov [1, 2]. Face à la difficulté de prédire depuis les équations de Navier-Stokes les fluctuations observées en soufflerie ou dans une simulation numérique, nous proposons de construire des champs aléatoires de vitesse capables de rendre compte de quelques propriétés statistiques importantes, notamment une régularité holderienne moyenne de l'ordre de $1/3$, les transferts d'énergie inter-échelles (reliés au caractère asymétrique des densités des incréments), et le phénomène d'intermittence. De telles représentations stochastiques synthétiques ont déjà été proposées dans la littérature, aussi bien dans un cadre Eulérien [3] que Lagrangien [4].

Nous proposons ici une généralisation de ces modèles à un cadre spatio-temporel : nous construirons donc un champ aléatoire de vitesse eulérienne $u(x, t)$ à une dimension d'espace et une de temps. De telles cartes spatio-temporelles sont accessibles à la communauté au travers de la base de données hébergée à l'université Johns Hopkins [5], cartes que nous proposons de reproduire de manière synthétique. Nous commencerons par construire un modèle Gaussien capable de reproduire, notamment, la structure de corrélation du champ de vitesse $C(\ell, \tau) = \langle u(x, t)u(x + \ell, t + \tau) \rangle$, et les comportements spectraux associés. Ensuite, nous montrerons comment généraliser ces modèles afin d'inclure les phénomènes de skewness et d'intermittence.

Références

1. A. N. KOLMOGOROV, The local structure of turbulence in a incompressible viscous fluid for very large Reynolds number, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **30**, 301–305 (1941).
2. U. FRISCH *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov* Cambridge University Press, Cambridge (1995).
3. R. PEREIRA, L. MORICONI & L. CHEVILLARD, A dissipative random velocity field for fully developed fluid turbulence, *J. Fluid Mech.*, **794**, 369–408 (2016).
4. N. MORDANT, J. DELOUR, E. LÉVEQUE, A. ARNÉODO & J.-F. PINTON, Long time correlations in Lagrangian dynamics: A key to intermittency in turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 254502 (2002).
5. Données obtenues du JHTDB à <http://turbulence.pha.jhu.edu>

Un modèle de lithosphère en couche mince pseudo-plastique

Guillaume Richard¹ & François James²

¹ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, Obs. Sciences de l'Univers en région Centre, Université d'Orléans

² Institut Denis Poisson, Université d'Orléans, Université de Tours, CNRS

guillaume.richard@univ-orleans.fr

La convection du manteau des planètes telluriques produit une couche limite thermique nommée lithosphère. Cette coquille a une rhéologie complexe qui influence la convection sous-jacente et peut générer différents types de tectonique (déformation de la lithosphère). Pour l'étudier numériquement, on peut utiliser des modèles à géométrie sphérique. Pour construire la grande majorité de ceux-ci, leurs auteurs ont utilisé une approximation rhéologique non-linéaire : la pseudo-plasticité [1] (également nommée viscoplasticité [2]).

Afin de mieux contraindre les limites et les avantages de cette approximation, nous avons restreint le modèle à la seule lithosphère et nous l'avons traitée comme une couche mince [3]. Notre formalisme décrit une lithosphère de très haute viscosité se déformant sous la contrainte d'un manteau convectant et pouvant atteindre un seuil pseudo-plastique. L'isostasie de la lithosphère est également assurée.

La simplicité du modèle permet d'explorer facilement la grande variété des conditions aux limites possibles pour une lithosphère. On l'utilisera pour simuler la tectonique de plaques observée sur Terre ou celle sans plaques des autres planètes telluriques. Dans un premier temps, il nous permet de proposer un mode de formation des Coronae, ces objets géologiques endémiques à Vénus [4].

Références

1. P. J. TACKLEY, Self-consistent generation of tectonic plates in time-dependent, three-dimensional mantle convection simulations, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **1**, 1021 (2000).
2. D. BERCOVICI, P. J. TACKLEY & Y. RICARD, 7.07 - The generation of plate tectonics from mantle dynamics, *Treatise on Geophysics (Second Edition)*, G. Schubert (Editor), Elsevier, pp. 271–318 (2015).
3. P. ENGLAND & D. MCKENZIE, A thin viscous sheet model for continental deformation, *Geophys. J. Intl.*, **70**, 295–321 (1982).
4. E. STOFAN, S. SMREKAR, S. TAPPER, J. GUEST & P. GRINDROD, Preliminary analysis of an expanded corona database for Venus, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4267–4270 (2001).

Effet de confinement lors de l'étalement de suspensions non-browniennes

Menghua Zhao, Alice Pelosse, Laurent Limat, Élisabeth Guazzelli & Matthieu Roché

Matière et Systèmes Complexes, Université Paris Diderot et CNRS UMR 7057, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75013 Paris

`matthieu.roche@univ-paris-diderot.fr`

Français : Les suspensions non-browniennes sont omniprésentes dans notre environnement. Cependant la compréhension de leur écoulement, en particulier dans les régimes de concentration élevée en particules, n'est que récente, et beaucoup reste à faire. Nous montrons ici comment ces liquides complexes se comportent durant leur étalement sur une surface solide, avec un intérêt pour les propriétés de cet écoulement au voisinage de la ligne de contact triple. Nous montrons que la viscosité apparente de la suspension durant l'étalement dépend à la fois de la fraction volumique en particules et de la taille de ces dernières. Nous proposons un modèle simple prenant en compte le confinement des particules au voisinage de la ligne de contact et qui décrit des données expérimentales de façon satisfaisante. Nous évoquerons quelques implications de nos observations.

English: Non-Brownian suspensions are ubiquitous in our environment. Their flow, in particular in the high-particle-concentration regime, has been understood only recently, and there is still ample room for investigation. Here we show how these complex liquids spread on a solid substrate, with a focus on the region around the triple-phase contact line. We bring evidence that the apparent viscosity of suspensions during spreading is dependent on both the particle volume fraction and the particle size, in contrast to the particle-size-independent bulk viscosity. We propose a simple model that accounts for particle confinement in the vicinity of the contact line and that captures the experimental data well. We will discuss the implications of our findings.

Méthodes d'événements rares pour l'effondrement et le développement de la turbulence de Couette plan

Joran Rolland

Laboratoire de Physique de l'ens de Lyon
 joran.rolland@ens-lyon.fr

L'écoulement de Couette plan est l'écoulement d'un fluide newtonnien entre deux parois planes parallèles séparées de $2h$ en mouvement à vitesse $\pm U$. Cet écoulement est intéressant car c'est un prototype de beaucoup d'écoulements de paroi (conduites, artères pulsées à géométrie variable, couches limites aérodynamiques et planétaires stables, etc.) en ce qui concerne le mode de transition vers la turbulence. La transition est contrôlée par le nombre de Reynolds $R = Uh/\nu$ avec ν la viscosité cinématique du fluide. L'écoulement de base est linéairement stable pour tout nombre de Reynolds. Cependant, la turbulence peut exister dès que le nombre de Reynolds est plus grand que quelques centaines $R \gtrsim 325$. Ce comportement sous critique va de paire avec la possibilité de faire coexister en espace écoulement laminaire et turbulent (de manière quasipermanente si $325 \lesssim R \lesssim 400$), et l'existence de « points cols » dans l'espace des phases entre écoulement laminaire et écoulement turbulent. Ce dernier point implique qu'il faut soit des perturbations d'amplitude finie pour déclencher la turbulence, soit imposer un forçage à l'écoulement laminaire et suivre sa réponse entièrement non-linéaire. D'autre part, la turbulence peut avoir un temps de vie fini (mais très grand devant le temps de retournement) si le domaine de l'écoulement a une taille finie.

Tous ces ingrédients font que l'on peut étudier la turbulence de paroi transitionnelle sous la forme d'un problème de multistabilité. Pour capturer clairement toutes les étapes du développement de la turbulence lorsque l'écoulement laminaire est forcé, il est nécessaire de réduire la variance dudit forçage. Cela rend les transitions très rares. De manière similaire, le temps de vie de la turbulence augmente au moins exponentiellement en Reynolds et en taille de domaine : les relaminarisations sont elles aussi extrêmement rares. Dans cette communication, je présente l'utilisation d'une méthode d'étude d'événements rares, l'Adaptive Multilevel Splitting [1], adaptée sur l'écoulement de Couette plan pour étudier la physique du développement de la turbulence sous forçage et son effondrement sous l'effet de ses propres fluctuations. La méthodologie et les quantités physiques suivies sont guidées par une étude numérique et théorique de ces événements dans des systèmes modèles des écoulements de paroi [2].

Ainsi, je montrerai que la trajectoire allant de l'écoulement laminaire vers la turbulence prend la forme d'un instanton lorsque la variance du forçage tend vers zéro : le système se dirige vers un point col puis relaxe de manière déterministe vers la turbulence. Le point col choisi (qui a des propriétés d'*edge state* [3]), et la trajectoire suivie une fois qu'il est franchi, ne dépendent pas de la forme du forçage : le seul paramètre de contrôle est le taux d'injection d'énergie. Je montrerai ensuite comment adapter les méthodes d'études d'événements rares à la question de la relaminarisation [4]. Je montrerai les premières déterminations du « point de sortie » et de la dépendance du nombre du temps de vie de la turbulence en nombre de Reynolds et taille de domaine.

Références

1. F. CÉROU & A. GUYADER, *Stoch. Anal. Appl.*, **25**, 417–443 (2007).
2. J. ROLLAND, *Phys. Rev. E*, **97**, 023109 (2018).
3. T. SCHNEIDER, B. ECKHARDT & J. A. YORKE, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 034502 (2007).
4. T. LESTANG, F. RAGONE, C.-E. BRÉHIER, C. HERBERT & F. BOUCHET, *J. Stat. Mech.*, **2018**, 043213 (2018).

Application de l'effet d'*echo* pour la génération d'harmonique d'ordre élevé dans des paquets d'électrons relativistes

Éléonore Roussel

Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM, Physique des Lasers, Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France
eleonore.roussel@univ-lille.fr

Le principe de fonctionnement des lasers à électrons libres (LELs), tout comme celui des lasers traditionnels, est basé sur l'amplification de la lumière au sein d'un milieu amplificateur. Dans le cas des LELs, ce milieu se trouve être un paquet d'électrons relativistes généré à partir d'un accélérateur. Les LELs sont actuellement les sources aux courtes longueurs d'onde (ultraviolet extrême EUV et rayons X) les plus performantes mais leur cohérence longitudinale est encore marginalement maîtrisée. Des techniques telles que l'injection par une source cohérente externe (*seeding*) associée à un processus de conversion d'harmonique, permettent de pallier le manque de cohérence [1]. Cependant, les mécanismes de ce processus de conversion non-linéaire limitent la génération de lumière aux harmoniques d'ordre inférieur à 10–15 et ne permettent pas d'atteindre le domaine des X.

Ces dernières années, une nouvelle stratégie de conversion d'harmonique dans les LELs a vu le jour. Le principe, appelé *Echo-Enabled Harmonic Generation* (EEHG) [2], est basé sur le phénomène d'écho, effet dynamique connu depuis les années 60 [3], et qui peut être interprété comme un effet de mémoire à long terme. Dans un premier temps, une première modulation permet d'imprimer une modulation dans l'espace des phases mais sans conséquences visibles (par exemple un feuilletage). L'existence de cette structure est ensuite révélée lorsqu'une seconde modulation est appliquée au système.

Cet effet a été observé dans des domaines variés comme les plasmas [4], l'hydrodynamique [5], l'équation de Kuramoto [6], les gaz classiques [7], les atomes froids [8]. Ici, la manipulation d'électrons relativistes à l'aide de deux lasers externes permet de générer du rayonnement X cohérent via le phénomène d'écho. L'EEHG est actuellement considéré comme une technique révolutionnaire pour la génération de rayonnement laser dans les domaines EUV et les rayons X.

Nous développons ici le principe de fonctionnement du feuilletage de l'espace des phases de paquets d'électrons relativistes et montrons des résultats numériques démontrant la possibilité de générer du rayonnement X cohérent. Ensuite, nous présentons la première démonstration expérimentale de l'utilisation de ce principe d'écho pour la génération de rayonnement X cohérent sur le LEL italien FERMI [9].

Références

1. L. H. YU, Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers, *Phys. Rev. A*, **44**, 5178–5193 (1991).
2. G. STUPAKOV, Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 074801 (2009).
3. R. W. GOULD, Plasma wave echo, *Phys. Rev. Lett.*, **19**, 219 (1967).
4. J. H. MALMBERG, C. B. WHARTON, R. W. GOULD & T. M. O'NEIL, Observation of plasma wave echoes, *Phys. Fluids*, **11**, 1147 (1968).
5. J. VANNESTE, P. J. MORRISON & T. WARN, Strong echo effect and nonlinear transient growth in shear flows, *Phys. Fluids*, **10**, 1398 (1998).
6. E. OTT, J. H. PLATIG, T. M. ANTONSEN & M. GIRVAN, Echo phenomena in large systems of coupled oscillators, *Chaos*, **18**, 037115 (2008).
7. T. W. MOSSBERG, R. KACHRU, E. WHITTAKER & S. R. HARTMANN, Temporally recurrent spatial ordering of atomic population in gases: Grating echoes, *Phys. Rev. Lett.*, **43**, 851 (1979).
8. D. V. STREKALOV, ANDREY TURLAPOV, A. KUMARAKRISHNAN & TYCHO SLEATOR, Periodic structures generated in a cloud of cold atoms, *Phys. Rev. A*, **66**, 023601 (2002).
9. E. ALLARIA *et al.*, Two-stage seeded soft-X-ray free-electron laser, *Nat. Photonics*, **7**, 913–918 (2013)

Ondes de surface produites par le déplacement d'un objet solide

Jose Antonio Trejo Gutierrez¹, Ivonne Judith Hernandez Hernandez¹ & Gerardo Ruiz Chavarria¹

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de Mexico, Mexique
gruiz@unam.mx

Nous présentons dans cette contribution une étude sur la production des ondes de surface par le déplacement d'une plaque. On considère deux cas : a) production des ondes de surface par un batteur partialement immergé [1] et b) production des ondes de surface par le déplacement d'une plaque située au fond [2]. D'abord on présente les solutions de la théorie linéaire non visqueuse. Dans les deux cas le déplacement de la plaque produit un écoulement de volume mais également une onde de surface liée elle-même à un champ de vitesse. Ensuite nous présentons des résultats expérimentaux et numériques dans lesquelles la viscosité et les effets non-linéaires sont pris en compte. Dans les expériences, nous avons reconstruit la forme de la surface libre avec la méthode de Schlieren synthétique [3] tandis que pour les simulations numériques nous avons utilisé Gerris [4], un outil numérique pour résoudre les équations de Navier–Stokes et continuité. Pour le cas du déplacement de la plaque situé au fond il y a un bon accord entre la théorie linéaire et les données expérimentales, sauf quand la vitesse de déformation du fond est comparable ou supérieure à la vitesse de phase [5]. En revanche pour le cas des vagues produites par l'oscillation vertical d'un batteur, il apparaît un champ de vitesse dont la grandeur croît avec l'amplitude de l'oscillation de la plaque. Nos résultats nous indiquent que cet écoulement est lié au détachement de la couche limite qui se forme sur les parois verticales du batteur. Ce détachement apparaît quand la vitesse et l'accélération de la plaque ont des signes opposés. Ces résultats pourraient expliquer la formation des cellules de recirculations qui ont été rapportés par Ruiz Chavarria *et al.* [1] et par Punzmann *et al.* [6].

Remerciements : Les auteurs remercient la DGAPA-UNAM pour le soutien dans le contrat PAPIIT IN114218 (Vorticidad y ondas (internas y de superficie) en dinamica de fluidos). Ivonne Judith Hernandez Hernandez remercie la DGAPA-UNAM pour l'attribution d'une bourse posdoctorale.

Références

1. G. RUIZ CHAVARRIA, P. LE GAL & M. LE BARS, Geometrical focusing of surface waves, *Phys. Rev. Fluids*, **3**, 094803 (2018).
2. T. JAMIN, L. GORDILLO, G. RUIZ CHAVARRIA, M. BERHANU & É. FALCON, Experiments on generation of surface waves by an underwater moving motion, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **471**, 20150069 (2015).
3. F. MOISY, M. RABAUD & K. SALSAC, A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid surface, *Exp. Fluids*, **46**, 1021–1036 (2009).
4. <http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php>
5. M. LE GAL, D. VIOLEAU & M. BENOIT, Influence of timescales on the generation of seismic tsunamis, *Eur. J. Mech. B*, **65**, 257–273 (2017).
6. N. PUNZMANN, H. FRANCOIS, H. XIA, G. FALCOVICH & M. SHATS, Generation and reversal of surface flows by propagating waves, *Nat. Phys.*, **10**, 658–663 (2014).

Un modèle simplifié de locomotion aquatique

Jesus Sanchez-Rodriguez, Christophe Raufaste & Médéric Argentina

UCA, CNRS, INPHYNI UMR7010, Nice, France

`jesus.sanchez@inphyni.cnrs.fr`

Nous avons développé un modèle simplifié de locomotion aquatique. En utilisant la théorie des fonctions complexes nous avons estimé les forces hydrodynamiques agissant sur une plaque infiniment fine, suivant le travail fondamental de Theodorsen [1].

En considérant les différents mouvements possibles du nageur nous calculons le potentiel de vitesse pour dériver la pression via la relation généralisée de Bernoulli ; nous montrons que l'effet de la non stationarité de l'écoulement est le mécanisme principal pour la locomotion [2].

Nous imposons une rotation périodique de la nageoire afin d'approximer le mouvement ondulatoire du nageur. Nous montrons la dépendance linéaire de la vitesse longitudinale par rapport à la fréquence angulaire prédite par Gazzola *et al.* [3]. Nous prédisons aussi que le mouvement transverse présente la même fréquence que le forçage tandis que le comportement du mouvement longitudinal est une fonction linéaire du temps plus un terme périodique avec fréquence double que celle de la rotation de la nageoire.

Un analyse des différents termes produisant la poussée a été réalisée. Une équation fonctionnelle pour l'oscillation de la plaque a été dérivée avec le termes dominants : sa résolution confirme notre forçage simple et linéaire.

Références

1. T. THEODORSEN, *General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter*, NACA Tech. Rep. No. 496 (1934).
2. I. E. GARRICK, *Propulsion of a Flapping and Oscillating Airfoil*, NACA Tech. Rep. No. 567 (1936).
3. M. Gazzola, M. Argentina & L. Mahadevan, Scaling macroscopic aquatic locomotion, *Nat. Phys.*, **10**, 758–761 (2014).

Modèle mathématique de la dynamique de transmission de l'infection par *Taenia-cysticercose*

Norma Yanet Sánchez-Torres & Marco V. José

Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM. Circuito Exterior S/N Ciudad Universitaria. 04510 CDMX, Mexique

`nyst@ciencias.unam.mx`

Un modèle mathématique de la dynamique de transmission de l'infection par *Taenia solium* est formulé. Le modèle consiste en un système de couples d'équations différentielles non linéaires que décrit le cycle de vie du parasite. Le modèle peut reproduire les tendances épidémiologiques observées de la ténia humaine, de la cysticercose du porc et de la cysticercose humaine. Les variables sont la charge moyenne parasite et la prévalence de l'infection. La dynamique comprend les équilibres multiples, les régions stables et instables, les points de rupture et le seuil connu sous le nom de nombre de reproductions de base, R_0 . Cette dynamique est présentée dans les espaces de phase. Une simulation numérique est réalisée pour comparer les résultats obtenus en utilisant certaines variations des paramètres trouvés.

Références

1. M. V. JOSÉ, J. R. BOBADILLA, N. Y. SÁNCHEZ-TORRES & J. P. LACLETTE, Mathematical model of the life cycle of taenia-cysticercosis: Transmission dynamics and chemotherapy (Part 1), *Theor. Biol. Med. Model.*, **15**, 18 (2018).

Ségrégation granulaire dans les astéroïdes

Jérémy Sautel, Charles-Édouard Lecomte & Nicolas Taberlet

Laboratoire de Physique à l'ENS de Lyon, 46 allée d'Italie, 69007 LYON

jeremy.sautel@ens-lyon.fr

Notre étude porte sur le problème de la ségrégation granulaire (en taille des grains), abordé dans des conditions et sous une géométrie originales. Celles-ci sont directement inspirées des astéroïdes granulaires, non monolithiques. Bien que le problème de l'effet « Noix du Brésil » ait déjà été au cœur de nombreuses études, la ségrégation dans un agrégat auto-gravitant demeure inexplorée. La motivation de cette étude s'ancre dans les observations récentes de la surface des astéroïdes granulaires (principalement dues aux missions Hayabusa et Hayabusa 2), qui révèle la concentration des plus gros composants à la surface. On peut cependant remarquer que cette concentration n'est pas uniforme, et que certaines parties de la surface sont recouvertes de composants beaucoup plus petits, allant jusqu'à de fines poussières. L'explication de ce phénomène est d'un intérêt majeur pour la compréhension de la géologie des astéroïdes, mais également dans l'optique de faire des prédictions quant à la composition des couches situées immédiatement sous la surface des astéroïdes granulaires. En effet, aucune mesure concernant ces couches plus profondes n'a pu être réalisée au cours des dernières missions.

À l'aide de simulations numériques, nous avons pu étudier la ségrégation granulaire dans un agrégat à 2 dimensions périodiquement perturbé. Cela nous a permis de montrer que la ségrégation dans les astéroïdes n'est pas un phénomène surfacique, mais qu'elle résulte bien de mouvements impliquant l'ensemble de l'agrégat. De plus, faire varier les paramètres pertinents des simulations nous a permis de bien comprendre ces mouvements. En particulier, l'importance des forces de frottement entre les grains, et leur influence sur les grandeurs caractéristiques du phénomène de ségrégation sont expliquées en détail.

An experimental study of turbulence generation and decay in Taylor–Couette system due to an abrupt stoppage

Harminder Singh, Arnaud Prigent & Innocent Mutabazi

Laboratoire des Ondes et Milieux Complex (LOMC) CNRS UMR 6294, Université Le Havre, 75 Rue Bellot, Le Havre 76600, France

harminder.singh@univ-lehavre.fr

Cette étude présente une approche novatrice de la génération et de la décroissance de la turbulence dans l'écoulement de Taylor–Couette, l'écoulement entre deux cylindres coaxiaux en rotation. À partir d'un écoulement initialement laminaire, les cylindres sont soumis à un arrêt brutal qui génère l'apparition de turbulence transitoire. Deux approches expérimentales différentes, les visualisations et les mesures stéréo-PIV, ont été utilisées pour mieux comprendre le phénomène présenté pour plusieurs vitesses initiales de rotation correspondant toujours à un écoulement laminaire. Trois configurations différentes peuvent être distinguées rotation du cylindre extérieur seulement, co-rotation et contra-rotation. Lorsque seul le cylindre extérieur est en rotation, le seuil d'apparition de la turbulence correspond à nombre de Reynolds extérieur $Re_o = 606$. En co- ou contra- rotation, ce seuil diminue jusqu'à une valeur minimale de $Re_o = 433$. D'autre part, si l'état initial avant l'arrêt brusque est turbulent, la turbulence s'estompe en quelques secondes. Contrairement à l'étude de Verschoof *et al.* [1], une décroissance auto-similaire de la turbulence n'a pas été observée.

Références

1. R. A. VERSCHOOF, S. G. HUISMAN, R. C. A. VAN DER VEEN, C. SUN & D. LOHSE, Self-similar decay of high Reynolds number Taylor–Couette turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, **1**, 062402 (2016).

Experimental acoustic eigenmodes measurements: from sphere to spheroid

Sylvie Su, Philippe Cardin, David Cébron & Henri-Claude Nataf

ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, 38000 Grenoble, France
sylvie.su@univ-grenoble-alpes.fr

Acoustic eigenmodes have been widely used in asteroseismology to retrieve physical properties of stars, e.g. internal flows [1]. Application of this method in experimental fluid dynamics has been recently investigated to measure the velocity of rotating flows enclosed in spherical shells [2]. In spheres, acoustic modes are degenerate in the azimuthal direction but this degeneracy can be lifted, e.g. in the presence of rotation. This is responsible for modal splittings, that can be inverted to access information on the flow velocity. However, full azimuthal degeneracy leads to crowded spectral regions after splitting, which can make mode identification difficult. A way to circumvent this difficulty is to partially lift the degeneracy at rest, through the geometry of the resonator. To keep the spherical formalism, for which perturbation methods and variational principles have been widely employed to describe the geometrical splitting [3], we consider a spheroidal geometry that departs slightly from a sphere.

We build two different apparatus, a sphere and an oblate spheroid with a polar flattening of 0.05 aligned with the rotation axis of the apparatus. Both apparatus have the same equatorial radius and same instrumentation. We confront acoustic spectra from both apparatus to analytical calculations [4] and numerical simulations from the finite-element commercial code COMSOL.

References

1. C. AERTS, J. CHRISTENSEN-DALSGAARD & D. W. KURTZ, *Asteroseismology*, Springer Science & Business Media (2010).
2. S. A. TRIANA *et al.*, Helioseismology in a bottle: Modal acoustic velocimetry, *New J. Phys.*, **16**, 113005 (2014).
3. J. B. MEHL, Acoustic resonance frequencies of deformed spherical resonators, *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, 1109–1113 (1982).
4. F. A. DAHLEN, The normal modes of a rotating, elliptical earth, *Geophys. J. Int.*, **16**, 329–367 (1968).

Integrable turbulence in optical fibers and 1D water tank experiments

Pierre Suret

PhLAM, Université de Lille

pierre.suret@univ-lille1.fr

Exactly integrable partial differential equations (PDEs) such as the Korteweg–de-Vries (KdV) or the one-dimensional nonlinear Schrödinger equation (1DNLSE) can be studied in the framework of the Inverse Scattering Transform (IST) also called nonlinear Fourier transform. Integrable PDEs exhibit an infinite hierarchy of invariants that prevent the development of “standard” Wave Turbulence and energy cascade. Despite the existence of the IST technique, there is no general theory describing of the propagation of random waves in integrable systems such as 1DNLSE. For this reason, Integrable Turbulence, which deals with random fields, has been recently introduced as a completely “new chapter of turbulence theory” by V. E. Zakharov, one of the creators both of the wave turbulence theory and of the IST. Optical fibers and 1D water tank are very favourable experimental platforms for the investigation of integrable turbulence. One of the striking phenomena is the emergence of strongly non Gaussian statistics associated to the local emergence of coherent structures (rogue waves) identified for example as fundamental solitons or Peregrine solitons. In this talk, recent experiments both in optical fibres and 1D water tank will be reviewed.

Nonlinear transport by gravity waves inside the ocean

Bruce R. Sutherland^{1,2}, Houssam Yassin¹ & Ton S. van den Bremer³

¹ Department of Physics, University of Alberta, Canada

² Department of Earth & Atmospheric Sciences, University of Alberta, Canada

³ Department of Civil Engineering, Oxford University, United Kingdom

`bruce.sutherland@ualberta.ca`

Because the ocean is stratified, meaning that its density increases with depth due changing temperature and salinity, waves can propagate below the surface being driven by buoyancy forces. These provide an important mechanism through which energy is transported from boundaries into the ocean interior where they drive mixing. Recently oceanographers have come to realize that momentum and mass transport by internal waves may also be important, not just for climatology but also for predicting the motion and redistribution of inert biological or other floating particles such as microplastics. In this work we use perturbation theory for quasi-monochromatic wave packets consisting of vertically bounded, horizontally propagating internal modes in order to predict the vertical variations of their horizontal transport composed of the Stokes drift and the Eulerian induced flow which, combined, result in the net Lagrangian transport of fluid. The magnitude of both flows vary as the squared amplitude of the waves. However, their vertical structure can change significantly depending upon the background density variations and the horizontal wavelength of the modes. In particular, if the stratification is vertically symmetric, then mode-1 waves induce a Stokes drift and Eulerian flows with a mode-2 structure. However, with even small departures from vertical symmetry, the Eulerian flow is dominantly mode-1 and, as well as having finite wavenumber singularities, it also exhibits an “infrared catastrophe” in which the Eulerian induced flows can be larger than the flows due to the waves themselves.

Morphogenèse glaciaire induite par ablation différentielle

Nicolas Taberlet & Nicolas Plihon

Université de Lyon, UCBL, ENS Lyon, CNRS, Laboratoire de Physique à l'ENS de Lyon
nicolas.taberlet@ens-lyon.fr

Les processus d'ablation de la glace sont multiples, la sublimation et la fonte étant dépendantes des conditions climatiques (ensoleillement, température, humidité, précipitations, vent...). Nous avons étudié la morphogenèse des « Zen Stones » qui se forment essentiellement sur le lac Baïkal au cours de la saison hivernale [1]. Ces structures consistent en un piédestal de glace qui se forme sous une pierre posée à la surface gelée du lac. À travers des analyses de terrain, des expériences à l'échelle du laboratoire et des simulations numériques, nous montrons que le processus est dû à la sublimation différentielle de la glace. Nous montrons également que le rayonnement infrarouge des pierres est responsable de la cavité observée autour des pieds.

Références

1. pbs.twimg.com/media/C-1xxxsXgAEeWYL.jpg

Là où l'imprédictabilité s'estompe : étude comparée de l'effet tunnel chez les marcheurs et en mécanique quantique

Loïc Tadrìst¹, Tristan Gilet¹, Peter Schlagheck² & John W. M. Bush³

¹ Laboratoire de Microfluidique, Université de Liège, allée de la Découverte 9, 4000 Liège, Belgique

² IPNAS, CESAM research unit, Université de Liège, Allée du 6 Août 15, Université de Liège, 4000 Liège, Belgique

³ Department of Mathematics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA
loic.tadrìst@uliege.be

La mécanique classique offre une vue assez simple du franchissement d'une barrière de potentiel. Si la particule a une énergie cinétique E_c plus élevée que celle de la barrière de potentiel E_p , alors elle traverse cette dernière à coup sûr. Au contraire si son énergie est plus faible, elle sera toujours réfléchiée par la barrière. En mécanique quantique, le franchissement d'une barrière de potentiel n'est pas aussi manichéen : une particule ayant une énergie cinétique initiale plus faible que l'énergie de la barrière, $E_c < E_p$, possède une probabilité non nulle de la traverser, c'est ce que l'on appelle l'effet tunnel. Réciproquement, une particule plus énergétique a, elle aussi, une probabilité non nulle d'être réfléchiée. L'effet tunnel est emblématique des anomalies au paradigme classique qui ont abouti au fondement de la mécanique quantique.

Le caractère imprédictible du franchissement d'une barrière répulsive par un objet macroscopique a été décrit par A. Eddi en 2009 [1]. Ces objets, des marcheurs, sont de petites gouttelettes d'huile rebondissant sur un bain vibré verticalement. Les rebonds successifs créent des ondes à la surface du bain qui guident en retour la gouttelette, garantissant leur caractère dual onde-particule [2–4]. Lorsqu'une gouttelette est envoyée vers la barrière répulsive, elle peut la franchir ou bien être réfléchiée de manière *apparemment aléatoire*.

Nous revisitons ici ce phénomène en l'analysant finement dans le but de comprendre où et comment naît le caractère imprédictible du franchissement de la barrière. Nous montrons que le franchissement de la barrière n'est pas uniquement lié à l'énergie cinétique du marcheur, mais qu'une variation de la dynamique rapide (rebonds verticaux) lors de l'interaction avec la barrière est responsable du caractère imprédictible du franchissement [5].

Ces résultats expérimentaux sont comparés à ceux d'une simulation d'un effet tunnel quantique. Nous déterminons la trajectoire de la particule quantique lancée vers une barrière de potentiel par des mesures fortes de la position et de l'impulsion, à intervalle régulier. Nous montrons que dans le cas quantique, la levée de l'imprédictibilité a lieu, elle aussi, au pied de la barrière de potentiel. Les convergences et les différences majeures entre les deux phénomènes sont discutées à la lumière des informations recueillies par la simulation et l'expérience.

Références

1. A. EDDI, E. FORT, F. MOISY & Y. COUDER, Unpredictable tunneling of a classical wave-particle association, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 240401 (2009).
2. Y. COUDER, S. PROTIÈRE, E. FORT & A. BOUDAUD, Dynamical phenomena: Walking and orbiting droplets, *Nature*, **437**, 208 (2005).
3. J. W. M. BUSH, Pilot-wave hydrodynamics, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **47**, 269–292 (2015).
4. L. TADRIST, J. B. SHIM, T. GILET & P. SCHLAGHECK, Faraday instability and subthreshold Faraday waves: Surface waves emitted by walkers, *J. Fluid Mech.*, **848**, 906–945 (2018).
5. L. TADRIST, N. SAMPARA, P. SCHLAGHECK & T. GILET, Interaction of two walkers: Perturbed vertical dynamics as a source of chaos, *Chaos*, **28**, 096113 (2018).

Numerical modelling of edge tokamak plasma: Impact of collisionality on turbulence properties

Raffaele Tatali, H. Bufferand, T. Cartier-Michaud, G. Ciraolo, D. Galassi, Ph. Ghendrih, F. Nespoli, E. Serre & P. Tamain²

¹ M2P2, UMR7340 Centrale Marseille Plot 6, 38 rue Joliot-Curie 13451 Marseille, France

² IRFM CEA Cadarache, F-13108 St. Paul-lez-Durance, France

raffaele.tatali@univ-amu.fr

Turbulence developing in the edge plasma of tokamaks is nowadays accepted to play a major role in determining the transport of particles and energy from the hot centre towards the peripheral region. This transport eventually affects the characteristic gradients appearing in the system. Hence, the consequences of turbulent transport are two-fold. First of all, a reduction of turbulent transport would lead to steeper pressure gradients and a better global confinement of plasma, with beneficial consequences on the fusion reaction rates. Turbulence is also involved both in the formation of transport barriers in the closed flux surfaces region, and in the transition from Low to High confinement mode. The latter key feature affected by turbulence in edge plasma is the high heat load exhausted in the region where magnetic field-lines hits on solid components. For ITER, this is an issue of major concern, and the power deposited on the divertor tungsten mono-blocks will have to be maintained below a certain threshold, in order not to compromise the integrity of the material.

The understanding of turbulence and of the related transport is still full of open questions. The aim of turbulence numerical modelling is to fill the gaps in the current understanding of turbulence and experiments, and ultimately reach the ability to be predictive on edge plasma dynamics. In this framework, the TOKAM3X 3D fluid turbulence code that has been developed through a long-term collaboration between the IRFM/CEA institute and the M2P2 laboratory of Marseille as well as the PIIM laboratory [1].

In this contribution, we focus on the impact of collisionality on edge turbulence properties. Among many parameters that can modify the behavior of turbulent transport, the collisionality plays a key role, as shown both from a theoretical [2] and experimental [3] point of view. An initial linear study has been done on a 2D model which has shown that a decreasing resistivity should lead to a shrink of the filamentary structures characteristic of turbulent transport in the border region of the device. This trend has been partially recovered in the 3D fully turbulent simulations showing how the non-linear terms can be mainly responsible to determine the behaviour of the system. Furthermore the main property of plasma turbulence have been recovered related to the change of resistivity and heat conductivity which both depend on collisionality.

References

1. P. TAMAIN *et al.*, The TOKAM3X code for edge turbulence fluid simulations of tokamak plasmas in versatile magnetic geometries, *J. Comput. Phys.*, **321**, 606–623 (2016).
2. S. I. KRASHENINNIKOV, D. A. D'IPPOLITO, J. R. MYRA, Recent theoretical progress in understanding coherent structures in edge and SOL turbulence, *J. Plasma*, **74**, 679–171 (2008).
3. D. CARRALERO *et al.*, Experimental validation of a filament transport model in turbulent magnetized plasmas, *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 215002 (2015).

Wave propagation modelling in shallow water with an entire family of shallow water wave equations

Aurélien Serge Tchakoutio Nguetcho^{1,2}, Jean-Marie Bilbault², Serge Dos Santos³ & Michel Aillerie⁴

¹ Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences et Sciences Appliquées du Sahel (LISSAS), Département de Physique, Faculté des Sciences, Université de Maroua, BP: 814 Maroua - Cameroun

² Laboratoire LE2I, Arts et Métiers, Université de Bourgogne Franche-Comté, Aile de l'Ingénieur - BP 47870, 21078 DIJON Cedex

³ INSA Centre Val de Loire 3, Rue de la Chocolaterie CS 23410, F-41034 BLOIS Inserm U1253, Université de Tours

⁴ Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) - EA 4423, Université de Lorraine and CentraleSupélec, 2 Rue E.Belin, F-57070 Metz Cedex

`serge.nguetcho@u-bourgogne.fr`

An entire family of shallow water wave equations is obtained by a perturbative asymptotic expansion for unidirectional shallow water waves. According to the parameters of the system, this family can lead to different sets of known equations such as Camassa–Holm, Korteweg–de Vries, Degasperis–Procesi and several other dispersive equations of the third order. Using the theory of bifurcation, we provide and find a variety of exotic solutions corresponding to the phase trajectories under different parameter conditions or different parametric situations. We give various sufficient conditions leading to the existence of propagating wave solutions or rupture threshold. The dynamics of singular nonlinear travelling system is completely determined for each of the above-mentioned equations. Moreover, we define sufficient conditions leading to the existence of propagating wave solutions and demonstrate how and why travelling waves lose their smoothness and develop into solutions with compact support or breaking waves.

References

1. H. R. DULLIN, G. GOTTWALD G & D. D. HOLM, An integrable shallow water equation with linear and nonlinear dispersion, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 4501 (2001).
2. A. CONSTANTIN & D. LANNES, The hydrodynamical relevance of the Camassa–Holm and Degasperis–Procesi equations, *Arch. Ration. Mech. Anal.*, **192**, 165 (2009).
3. A. S. TCHAKOUTIO NGUETCHO, JIBIN LI & J. M. BILBAULT, Global dynamical behaviors in a physical shallow water system, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.*, **36**, 285 (2016).
4. A. S. TCHAKOUTIO NGUETCHO, G. M. NKEUMALEU & J. M. BILBAULT, Behavior of gap solitons in anharmonic lattices, *Phys. Rev. E*, **96**, 022207 (2017).

Dispersion relation for unidirectional surface gravity waves

Alexey Tikan¹, Félicien Bonnefoy², Guillaume Michel³, Prabhudesai Gaurav³, Annette Cazaubiel⁴, Francois Copie¹, Eric Falcon⁴, Stéphane Randoux¹ & Pierre Suret¹

¹ Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molecules, UMR-CNRS 8523, Université de Lille, France
Centre d'Etudes et de Recherches Lasers et Applications (CERLA), 59655 Villeneuve d'Ascq, France

² Ecole Centrale de Nantes, LHEEA, UMR 6598 CNRS, F-44 321 Nantes, France

³ Ecole Normale Supérieure, LPS, UMR 8550 CNRS, F-75 205 Paris, France

⁴ Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, MSC, UMR 7057 CNRS, F-75 013 Paris, France

alexey.tikan@univ-lille.fr

1-D focusing Nonlinear Schrödinger (NLS) equation is often considered as a leading order model that governs dynamics of unidirectional surface gravity waves. Studies of the wind-generated ocean waves revealed that the surface elevation has Gaussian distribution which is a result of the superposition of a large number of harmonics with random phases [1,2]. Such random wave (or partially-coherent wave) can be considered as an initial condition for a nonlinear problem governed by 1-D NLS. Together random initial conditions and integrable equation bring us to the field known as Integrable Turbulence [3].

In the present work, we introduce a novel point of view on Integrable Turbulence describing the random wave at the stationary state by corresponding dispersion relation. We write 1-D focusing NLS in the following way:

$$i\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{g}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + k_0^3|A|^2A, \quad (1)$$

where g is the acceleration of gravity, k_0 is a wave number. Complex envelope A is related to the surface elevation η as $\eta(z, t) = \frac{1}{2}(A(z, t)e^{i(k_0z - \omega_0t)} + c.c.)$, where $\omega_0 = 2\pi\nu$, with ν the central frequency. Therefore the dispersion relation in the case of partially-coherent waves can be written as:

$$\tilde{k}(\omega, \epsilon) = \omega^2/g - 2\omega_0^2\epsilon^2/g \quad (2)$$

The first term on the right-hand side is the linear dispersion relation, while the second one is nonlinear correction where $\epsilon = k_0\sqrt{\langle|A|^2\rangle}$ is the steepness.

We provide a numerical investigation of the dynamics of the partially-coherent waves solving the Eq. (1) with a standard pseudo-spectral method. In the weakly nonlinear regime, when dynamics is dominated by dispersive waves, the dispersion relation is simply represented by a parabola with a coefficient $1/g$. Increasing nonlinearity, we found that the shift in k is, indeed, linearly proportional to ϵ^2 until a certain value of nonlinearity ($BFI = \epsilon/(\Delta\omega/\omega_0) > 0.34$). For the higher values of BFI we observe the appearance of straight lines in $k(\omega)$ curve. The lines have a certain distribution in angles and positions. We show that each line corresponds to a fundamental soliton. The slope is related to the group velocity and displacement in k to its amplitude. For a large number of BFI , solitonic content dominates and dispersive waves are no longer represented in the $k(\omega)$ curve. However, we discovered that the growth of the position of the center of mass remains linear with respect to the ϵ^2 , but with another coefficient of proportionality.

We verify these results by providing water tank experiments. The investigated zone of parameters varies from steepness 0.06 to 0.14 with the carrying wave frequency 1.15 Hz and the spectral width is 0.2 Hz. Surface elevation measurements were provided in 20 equidistant points separated by 6 m. Experimental results are in a good agreement with simulations of focusing 1-D NLS equation up to the steepness 0.1. In the case of more nonlinear waves, we observe significant asymmetry which signifies that the higher order terms have to be included in the model.

References

1. R. EL KOUSSAIFI *et al.*, *Phys. Rev. E*, **97**, 012208 (2018).
2. A. CAZAUBIEL *et al.*, *Phys. Rev. Fluids*, **3**, 114802 (2018).
3. V. E. ZAKHAROV, *Stud. Appl. Math.*, **122**, 219–234 (2009).

How to simulate kinetic nonlinear effects in fusion plasmas

Natalia Tronko^{1,2}, Alberto Bottino¹, Cristel Chandre³, Dominique Escande⁴ & Eric Sonnendrücker^{1,2}

¹ Max Planck Institute for Plasma physics, Boltzmannstrasse 2, 85748 Garching, Germany

² Technical University of Munich, Department of Mathematics, Boltzmannstrasse 3, 85478, Garching, Germany

³ Aix Marseille University, CNRS, Centrale Marseille, I2M, Marseille, France

⁴ Aix-Marseille University, UMR 7345, Laboratory PIIM, avenue Escadrille Normandie-Niémen, 13397 Marseille nataliat@ipp.mpg.de

Nonlinear phenomena are ubiquitous in fusion plasmas. They are especially important for understanding the transition towards the high confinement regime, which takes place in the outer *edge* region of the fusion device. In this region due to the strong nonlinearity, a transport barrier is created leading to confinement improvement. This nonlinearity is caused by the interactions between small and large scales requiring nonlinear kinetic turbulence simulations. Perhaps the direct simulations of the Maxwell-Vlasov equations would be a perfect tool for plasma behaviour prediction; they still are unaffordable for nowadays supercomputers [1]. Therefore, the derivation and simulations of reduced kinetic models are required.

When the magnetic field is strong, it is natural to replace particles by their instantaneous centres of rotation around the magnetic field lines and therefore remove the fastest scale of rotation from the description of dynamics. It grounds the idea of the reduced kinetic (*gyrokinetic*) formalism. A multi-scaled Hamiltonian reduction procedure lies behind the construction of gyrokinetic dynamical reduction [2, 3].

It has been proved that the gyrokinetic models accurately predict violent, turbulent transport in the core region of a tokamak [4, 5]. However, understanding of processes in the *edge* of fusion devices, still be lacking. Several groups undertake the gyrokinetic simulations of the edge region across the world, i.e. [6–8]. However, the ordering used for the derivation of the core gyrokinetic models cannot be used for accurate modelling of the edge region. Indeed, concerning the core region, the simulations for the edge should include electromagnetic effects and be fully non-linear. There exist no gyrokinetic code nowadays, which possesses a model with these properties.

This talk will provide a pedagogical presentation of the principles of a unified theoretical framework for gyrokinetic models derivation suitable for code implementation. A historical introduction will show how mechanics made progress since Newton introducing more and more geometry.

References

1. N. TRONKO, Noether method for magnetized plasmas, talk at Mathematical Sciences Research Institut, Berkeley (2018).
<https://www.msri.org/workshops/871/schedules/24664>
2. N. TRONKO & C. CHANDRE, Second order gyrokinetic theory: From the particle to the gyrocenter, *J. Plasma Phys.*, **84**, 925840301 (2018).
3. A. J. BRIZARD & T. S. HAHM, Foundations of nonlinear gyrokinetic theory, *Rev. Mod. Phys.*, **79**, 421 (2007).
4. A. BOTTINO & E. SONNENDRÜCKER, Monte Carlo Particle-In-Cell methods for the simulation of the Vlasov-Maxwell gyrokinetic equations, *J. Plasma Phys.*, **81**, 435810501 (2015).
5. X. GARBET, Y. IDOMURA, L. VILLARD & T. H. WATANABE, Gyrokinetic simulations of turbulent transport, *Nucl. Fusion*, **50**, 043002 (2010).
6. D. R. HATCH *et al.*, A gyrokinetic perspective on the JET-ILW pedestal, *Nucl. Fusion*, **57**, 036020 (2017).
7. Q. PAN, D. TOLD & F. JENKO, Fully nonlinear delta-f gyrokinetics for scrape-off layer parallel transport, *Phys. Plasmas*, **23**, 102302 (2016).
8. L. VILLARD *et al.*, Global and local turbulence features near and far from marginality and nonlocal pedestal-core interactions, to appear in *PPCF* (2019).

Cycles hétéroclines en Taylor–Couette contra-rotatif

Laurette S. Tuckerman & Yacine Bengana

PMMH - CNRS UMR 7636, Sorbonne Université, 7 quai Saint Bernard 75005 Paris

laurette@pmmh.espci.fr

Lorsque deux cylindres tournent dans des directions opposées, la couche de fluide contenue entre eux subit une instabilité qui mène à des tourbillons qui prennent la forme de spirales tournant autour du cylindre intérieur. Deux spirales de directions opposés peuvent aussi se superposer pour former un état nommé rubans [1]. Nous utilisons un code pseudospectral [2] pour effectuer des simulations près des paramètres où ces rubans sont observés. Nous avons découvert que la branche de rubans perd sa stabilité vers un cycle hétérocline, pendant lequel l'écoulement passe d'un état axisymétrique à un autre (tous les deux des écoulements de vortex de Taylor classiques) par des états intermédiaires qui ressemblent à des rubans. Puis ce cycle est remplacé par un deuxième cycle hétérocline contenant que des états axisymétriques qui suit le scénario [3] de l'interaction 1 :2. Ceci est la première observation de ces cycles hétéroclines. Par ailleurs, l'existence de deux cycles hétéroclines en concurrence est une propriété singulière. Nous expliquons les plages d'existence et de stabilité de ces cycles par moyen des valeurs propres associées aux vortex de Taylor classiques qui sert pour les ancrer [4].

Références

1. A. PINTER, M. LÜCKE & C. HOFFMANN, Competition between traveling fluid waves of left and right spiral vortices and their different amplitude combinations, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 044506 (2006).
2. T. DESSUP, L. S. TUCKERMAN, J. E. WESFREID, D. BARKLEY & A.P. WILLIS, The self-sustaining process in Taylor–Couette flow, *Phys. Rev. Fluids*, **3**, 123902 (2018).
3. C. NORE, L. S. TUCKERMAN, O. DAUBE & S. XIN, The 1:2 mode interaction in exactly counter-rotating von Kármán swirling flow, *J. Fluid Mech.*, **477**, 51–88 (2003)
4. Y. BENGANA & L. S. TUCKERMAN, Spirals and ribbons: Frequencies from mean flows and heteroclinic orbits, to be published in *Phys. Rev. Fluids*.

Perturbation theory in algebraic setting

Lorenzo Valvo & Michel Vittot

Centre de Physique Theorique, Campus de Luminy, 13288 Marseille
valvo@cpt.univ-mrs.fr

We propose a perturbation algorithm which works on any Lie algebra \mathbb{V} . We consider a dynamical system on \mathbb{V} , which preserves a subalgebra \mathbb{B} of \mathbb{V} . In general when we add a perturbing term to the original dynamical system, the subalgebra \mathbb{B} won't be preserved anymore. We show that under suitable hypothesis, there exists a new dynamical system, conjugated to the perturbed one, which preserves \mathbb{B} up to terms quadratic in the perturbation. By this formula, classical perturbation theory can be extended to noncanonical Poisson system: for instance, the Euler-Poinsot equations for a rigid body, ideal MHD, the Maxwell-Vlasov and Vlasov-Poisson systems. In particular, we show that, for a time dependent top, it is possible to iterate the formula and to get a KAM theorem: for a large set of initial data, the algebra \mathbb{B} , like the tori of classical mechanics, get deformed into a new algebra preserved by the perturbed flow.

Polynomial expansion of compressible modes in rotating rigid ellipsoids

Jérémie Vidal¹, Sylvie Su² & David Cébron²

Department of Applied Mathematics, School of Mathematics, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK
 Université Grenoble Alpes, CNRS, ISTERre, Grenoble, France
 j.n.vidal@leeds.ac.uk

Fluid eigenmodes are often used to passively infer physical properties of the interiors of rotating planets and stars [1]. A similar method has been also introduced in fluid dynamics [2]. The experimental technique consists in observing and analysing the splitting in frequency of the acoustic modes, by solving an inverse problem. For instance, the presence of an (unknown) rotational profile disturbs the acoustic spectrum. Moreover, a topographic splitting is often superimposed on the rotational splitting. Indeed, rotating celestial objects are rather ellipsoidal than spherical at the leading order [3], as well as laboratory experiments which are weakly non-spherical (due to mechanical deformations). Rotation and topography should be taken into account simultaneously, but the acoustic problem does not admit exact solutions in the presence of rotation. Fully numerical solutions are often computed [8,9]. However, they cannot be easily combined with inversion schemes to yield robust results. Hence, the usual approach is to consider small perturbations [4] to non-rotating solutions [5–7]. As an alternative, we present a new description of the compressible modes, relying on the method of weighted residuals [10]. We introduce an exact spectral Galerkin decomposition of compressible flows, satisfying the vanishing Neumann condition (non-penetration) in triaxial ellipsoids. This decomposition relies on an explicit and global polynomial decomposition in Cartesian coordinates. Within this new framework, we can consistently take into account the global rotation (e.g. the Coriolis force), the compressibility and the ellipsoidal topography. We validate our results against fully numerical simulations performed with the commercial software COMSOL, showing an excellent agreement. Finally, we investigate how the full spectrum of the modes is affected by background density profiles, to consider more realistic models of planetary and stellar interiors.

References

1. T. L. DUVALL JR, W. A. DZIEMBOWSKI, P. R. GOODE, D. O. GOUGH, J. W. HARVEY & J. W. LEIBACHER, *Nature*, **310**, 22–25 (1984).
2. S. A. TRIANA, D. S. ZIMMERMAN, H.-C. NATAF, A. THORETTE, V. LEKIC & D. P. LATHROP, *New J. Phys.*, **16**, 113005 (2014).
3. S. CHANDRASEKHAR, *Ellipsoidal Figures of Equilibrium*, Dover Publications (1969).
4. M. R. MOLDOVER, J. B. MEHL & M. GREENSPAN, *J. Acoust. Soc. Am.*, **79**, 253–272 (1986).
5. C. T. M. CHANG, *J. Acoust. Soc. Am.*, **49**, 611–614 (1971).
6. C. T. M. CHANG, *J. Acoust. Soc. Am.*, **51**, 1–5 (1972).
7. M. WILLATZEN & L. C. LEW YAN VOON, *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**, 3279–3283 (2004).
8. F. LIGNIERES, M. RIEUTORD & D. REESE, *Astron. Astrophys.*, **455**, 607–620 (2006).
9. M. BERGGREN, A. BERNLAND & D. NORELAND, *J. Comput. Phys.*, **371**, 633–650 (2018).
10. B. A. FINLAYSON, *The Method of Weighted Residuals and Variational Principles*, SIAM (2013).

Interactions non linéaires d'ondes basse fréquence dans une colonne de plasma magnétisée

Simon Vincent, Victor Désangles, Nicolas Plihon & Vincent Dolique

Laboratoire de Physique à l'ENS de Lyon, Lyon, France
simon.vincent@ens-lyon.fr

La turbulence d'ondes basses fréquence dans un plasma de fusion est l'un des principaux obstacles à la maîtrise de la fusion par confinement magnétique : responsable d'un transport radial très important sur les bords du plasma, elle empêche un confinement efficace [1]. Nous présentons ici l'analyse par imagerie rapide d'ondes basses fréquences dans une colonne de plasma magnétisée, ainsi que l'impact sur le développement de ces ondes d'une cathode émissive placée au centre du plasma.

Notre installation expérimentale est constituée d'une chambre cylindrique contenant un plasma d'Argon à basse pression (~ 1 mTorr) de 10 cm de diamètre et de taux d'ionisation de 20 %, généré par une source à induction électromagnétique de 1 kW. La colonne de plasma est confinée par un champ magnétique allant de 0,01 T à 0,15 T [2].

Une caméra ultra-rapide filme les fluctuations d'émission spontanée de lumière dans un plan transverse à la colonne de plasma, à une fréquence de 200 kHz, révélant la présence d'ondes azimutales ayant une fréquence de rotation de l'ordre du kHz. Ces images sont analysées par POD (Proper Orthogonal Decomposition, [3]) puis par transformée de Fourier 2D axisymétrique. Les résultats de l'analyse POD montrent des modes m (de la forme $e^{i(m\theta - \omega t)}$) très proches des modes extraits par transformée de Fourier 2D. Ces deux outils complémentaires permettent de suivre l'évolution temporelle des modes m ainsi que leurs interactions. Nous présentons enfin la modification par une cathode émissive placée au centre de la colonne de plasma du développement de ces modes m et de leurs interactions.

Références

1. W. HORTON, *Rev. Mod. Phys.*, **71**, 735 (1999).
2. N. PLIHON *et al.*, *J. Plasma Phys.*, **81**, 345810102 (2015).
3. G. BERKOOZ *et al.*, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **25**, 539–75 (1993).

Concentration préférentielle de chaînes élastiques en turbulence

Jason R. Picardo¹, Dario Vincenzi², Nairita Pal³ & Samriddhi Sankar Ray¹

¹ International Centre for Theoretical Sciences, Tata Institute of Fundamental Research, Bangalore, India

² Université Côte d'Azur, CNRS, LJAD, Nice, France

³ Center for Nonlinear Studies, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA

dario.vincenzi@unice.fr

Une particule ponctuelle et de même densité que celle du fluide qui la transporte se comporte comme un traceur et explore l'écoulement de façon uniforme. Il est bien connu [1,2] que des propriétés telles que l'inertie ou la motilité d'une particule peuvent conduire à un phénomène de concentration préférentielle, c'est-à-dire la particule sélectionne certaines régions de l'écoulement plutôt que d'autres.

Nous proposons un nouveau mécanisme de concentration préférentielle dans les écoulements turbulents engendrée par l'élasticité. Nous considérons une chaîne de billes identiques et avec inertie négligeable. Chaque bille est connectée par des ressorts élastiques non-linéaires aux billes voisines. De plus, la longueur maximum de la chaîne est plus grande que l'échelle du forçage qui maintient l'écoulement turbulent. Une telle chaîne élastique est une généralisation du modèle de polymère de Rouse [3] au cas où la taille du polymère dépasse l'échelle de dissipation visqueuse. L'écoulement turbulent est obtenu par une simulation numérique des équations de Navier–Stokes bidimensionnelles sur un carré périodique. La déformation d'une chaîne est déterminée par le nombre de Weissenberg, défini comme le rapport entre le temps de relaxation de la chaîne vers sa configuration d'équilibre et le temps de retournement de l'écoulement.

Nous montrons que le centre de masse d'une chaîne élastique transportée par un écoulement turbulent sélectionne les régions tourbillonnaires de l'écoulement [4]. Le degré de concentration préférentielle et sa dépendance du nombre de Weissenberg sont quantifiés en analysant la statistique du paramètre d'Okubo-Weiss. Nous examinons également l'effet de la déformabilité de la chaîne, définie comme le rapport entre la longueur maximum de chacun des liens élastiques et la longueur maximum de la chaîne. Le phénomène de concentration préférentielle s'affaiblit au fur et à mesure que la déformabilité de la chaîne diminue et une chaîne suffisamment rigide explore à nouveau l'écoulement de façon uniforme.

Des résultats préliminaires confirment l'existence du phénomène en turbulence tridimensionnelle.

Références

1. J. BEC, *Phys. Fluids*, **15**, L81 (2003).
2. K. GUSTAVSSON & B. MEHLIG, *Adv. Phys.*, **65**, 1 (2016).
3. M. DOI & S. F. EDWARDS, *The Theory of Polymer Dynamics*, Oxford University Press, Oxford (1986).
4. J. R. PICARDO, D. VINCENZI, N. PAL & S. S. RAY, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 244501 (2018).

Quadrupolar circulation in plane Couette flow

Zhe Wang¹, Yohann Duguet² & Romain Monchaux³

¹ Eri@n, Interdisciplinary Graduate School, Nanyang Technological University, 639798 Singapore

² LIMSI-CNRS, Université Paris Saclay, F-91403 Orsay, France

³ IMSIA,ENSTA-ParisTech/CNRS/CEA/EDF, Institut Polytechnique de Paris, F-91762 Palaiseau, France

zhe.wang@ntu.edu.sg

The transition to turbulence in plane Couette flow is subcritical, characterised by a spatial coexistence of laminar and turbulent domains over a finite range of Reynolds numbers, the transitional flow regime. At the lowest Reynolds number, the coexistence takes the form of localised turbulent spots interspersed amidst otherwise linearly stable laminar base flow. Stimulated by the pioneer direct numerical simulation of Lundbladh and Johansson [1], the modification of plane Couette flow by turbulent spots has been studied both experimentally [2] and numerically [3]. It is found that (i) the wall-normal velocity comprises irregular small-scale fluctuations which decay rapidly away from the spot; while (ii) large-scale in-plane velocities are slowly varying and direct inward along the streamwise direction whereas outward along the spanwise direction, giving a quadrupolar shape. Moreover, quadrupolar flows have been observed in direct numerical simulations for a model of plane Couette flow with no-slip boundary conditions [4] and for parallel flows with sinusoidal laminar profile and free-slip boundary conditions [5, 6], as well as in experiments for plane Poiseuille flow driven by pressure gradient with no-slip boundary conditions [7], indicative that their emergence is generic.

Despite accumulating experimental and numerical observations, the origin of quadrupolar flows is poorly understood and a link between their presence and the Navier–Stokes equation is missing. Using scale analysis, a set of reduced Navier–Stokes equations characterising the spatial scaling of large-scale flows is derived and solved analytically. It is found that the wall-normal velocity is exponentially localised; while the wall-normal averaged in-plane velocities take the form of a quadruple and show an exponentially truncated algebraic decay. It is noteworthy that the algebraically decaying velocity component is harmonic, i.e. curl-free and divergence-free, and according to the Hodge decomposition theorem, it is unique per Poincaré index of the localised turbulent spot. If there is only one turbulent spot in the flow system, the index of the spot is also unique and solely determined by the Euler characteristic of the flow system, depicting a topological origin of the quadrupolar flow. Consequently, for quasi-two-dimensional parallel flows, i.e. with two spatially extended directions and one highly confined by the walls, we expect that the large-scale flow surrounding a localised turbulent spot is always quadrupolar. Our solution is in good agreement with previous experimental and numerical results.

References

1. A. LUNDBLADH & A. V. JOHANSSON, Direct simulation of turbulent spots in plane Couette flow, *J. Fluid Mech.*, **229**, 499–516 (1991).
2. M. COULIOU & R. MONCHAUX, Large-scale flows in transitional plane Couette flow: A key ingredient of the spot growth mechanism, *Phys. Rev. E*, **27**, 034101 (2015).
3. Y. DUGUET & P. SCHLATTER, Oblique laminar-turbulent interfaces in plane shear flows, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 034502 (2013).
4. M. LAGHA & P. MANNEVILLE, Modeling of plane Couette flow. I. Large scale flow around turbulent spots, *Phys. Fluids*, **19**, 094105 (2007).
5. J. SCHUMACHER & B. ECKHARDT, Evolution of turbulent spots in a parallel shear flow, *Phys. Rev. E*, **63**, 046307 (2001).
6. M. CHANTRY *et al.*, Turbulent-laminar patterns in shear flows without walls, *J. Fluid Mech.*, **791**, R8 (2016).
7. G. LEMOULT *et al.*, Turbulent spots in a channel: Large-scale flow and self-sustainability, *J. Fluid Mech.*, **731**, R1 (2013).

Wrinkling and folding on soft microcapsules

Kaili Xie^{1,2}, Clément de Loubens¹, Marc Jaeger² & Marc Leonetti¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP UMR 5520, Grenoble, France

² Aix Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, M2P2 UMR 7340, Marseille, France

marc.leonetti@univ-grenoble-alpes.fr, clement.de-loubens@univ-grenoble-alpes.fr

Deformable particles such as cells, vesicles and microcapsules, have rich spatiotemporal dynamics of their shapes under flow. A striking example is the red blood cells (RBCs) in the shear flow: tumbling, swinging oscillations of the shapes.

Other non-linear phenomena, for example buckling, are observed on the stiffened RBCs [1,2]. Inspired by RBCs, we investigate emergence of such elastic instability on biomimetic microcapsules [3]. We found wrinkles and folds on deformed capsules under extensional flow.

Well-defined wrinkles are first observed on the membrane of stretched capsules when the deformation is above a critical deformation. However, further stretching, strongly non-linear phenomenon appears by localizing undulations, which is called folding. The origin and development of membrane instability were directly visualized by two views in our experiment. By combining the contribution of flow constraint and membrane elasticity, a phase diagram is thus obtained to predict the pattern formation on capsules [4]. In the near-threshold region, wavelength of wrinkles is found $\lambda_w \sim h^{1/2}$, where h is the thickness of membrane, in agreement with a theoretical prediction on thin sheets [5].

References

1. T. M. FISCHER *et al.*, The stress-free shape of the red blood cell membrane, *Biophys. J.*, **34**, 409–422 (1981).
2. J. MAUER *et al.*, Flow-induced transitions of red blood cell shapes under shear, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 118103 (2018).
3. K. XIE *et al.*, Interfacial rheological properties of self-assembling biopolymer microcapsules, *Soft Matter*, **13**, 6208–6217 (2017).
4. K. XIE *et al.*, Wrinkling instability on soft biomimetic cells, *submitted* (2019).
5. E. CERDA *et al.*, Geometry and physics of wrinkling, *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 074302 (2003).

Effet de la gravité sur le mûrissement dans un mélange binaire

Raphaël Zanella & Hervé Henry

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, UMR-CNRS 7643, École Polytechnique, Route de Saclay, 91128 Palaiseau cedex

herve.henry@polytechnique.edu

Lorsqu'un mélange binaire est refroidi en dessous d'une température critique, il devient instable thermodynamiquement vis-à-vis de la séparation de phase. Deux phases apparaissent spontanément (l'une riche en une espèce, l'autre en l'autre espèce) et forment une microstructure présentant une taille caractéristique qui est le résultat d'un compromis entre effets énergétiques (minimisation de l'énergie de surface) et cinétiques (efficacité de la diffusion à courte distance) [1,2]. Par la suite, en suivant un principe de minimisation de l'énergie (ici de surface), la microstructure évolue lentement par diffusion puis par écoulement [3], ce qui entraîne une augmentation de la taille caractéristique. En utilisant des simulations numériques, nous cherchons à comprendre les effets de la gravité (les phases ont des densités différentes) sur le mûrissement hydrodynamique.

Notre approche consiste à résoudre par méthode pseudo-spectrale un modèle fortement non linéaire couplant l'équation de Cahn–Hilliard [2], pour le calcul de la composition du mélange, et les équations de Navier–Stokes sous l'approximation de Boussinesq, pour le calcul de la vitesse. Considérer l'équation de Cahn–Hilliard implique de travailler avec un modèle à interface diffuse, qui évite d'avoir à suivre l'interface entre les phases au cours de la simulation. L'équation de Cahn–Hilliard a déjà fait ses preuves dans les écoulements de fluides non miscibles, voir les références [4,5] par exemple. Les termes de forçage dans l'équation de la quantité de mouvement sont la divergence d'un tenseur analogue au tenseur de capillarité de Korteweg [6] et la force de flottaison liée à la variation de la densité avec la composition.

Dans une première étape, le code est validé sur le régime linéaire de l'instabilité de Rayleigh–Taylor. Les taux de croissance théoriques de perturbations de différentes longueurs d'ondes sont estimés numériquement avec une erreur très faible. Dans une deuxième étape, le code est appliqué au cas du mûrissement hydrodynamique dans un système infini (périodique), avec une distribution initiale aléatoire des phases. L'évolution des champs de composition et de vitesse est étudiée en faisant varier les différences de densité des deux phases. Différents régimes et taux de mûrissement sont observés selon les valeurs de ces paramètres.

Références

1. J. W. CAHN & J. E. HILLIARD, Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy, *J. Chem. Phys.*, **28**, 258–267 (1958).
2. J. W. CAHN, Phase separation by spinodal decomposition in isotropic systems, *J. Chem. Phys.*, **42**, 93–99 (1965).
3. E. D. SIGGIA, Late stages of spinodal decomposition in binary mixtures, *Phys. Rev. A*, **20**, 595–605 (1965).
4. A. CELANI, A. MAZZINO, P. MURATORE-GINANNESCHI & L. VOZELLA, Phase-field model for the Rayleigh–Taylor instability of immiscible fluids, *J. Fluid Mech.*, **622**, 115–134 (2009).
5. J. KIM, Phase-field models for multi-component fluid flows, *Commun. Comput. Phys.*, **12**, 3, 613–660 (2009).
6. D. M. ANDERSON, G. B. MCFADDEN & A. A. WHEELER, Diffuse-interface methods in fluid mechanics, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **30**, 139–165 (1998).

Annexes :

Index des auteurs

Index des auteurs

- Abramian Anaïs, 35
Abry Patrice, 21
Agafontsev Dmitry, 57
Aillerie Michel, 96
Ajayi Adekunle, 44
Alboussière Thierry, 3
Alexakis Alexandros, 55
Allende Sofia, 4
Almarcha Christophe, 77
André Frédéric, 67
Antier Romeo, 5
Argentina Médéric, 86
Arruga Denis, 36
Aumaître Sébastien, 16
Ayet Alex, 6
- Bachelier Yohann, 7
Bahrani S. Amir, 8
Barker Adrian John, 62
Barré Julien, 9
Barrier Laurie, 35
Bec Jérémie, 4, 10
Bengana Yacine, 11, 99
Berhanu Michael, 12, 34, 50
Berman Simon, 37
Bertin Nicolas, 24
Besnard Hugues, 73
Bielawski Serge, 13, 39
Bilbault Jean-Marie, 96
Bittner Stefan, 14
Blanchard Guy, 76
Bonnefoy Félicien, 15, 97
Bonnesoeur Antoine, 73
Bordet Maxime, 70
Bottino Alberto, 98
Bouillaut Vincent, 16
Bourgoin Mickael, 49
Boury Samuel, 17
Brasselet Étienne, 24
van den Bremer Ton S., 92
Bres Alexis, 18
Brubach Jean-Blaise, 39
Brunet Maxime, 19
Brunet Philippe, 8
Brunetti Maura, 56
Bui Olivier, 20
- Bush John W. M., 94
Busser Thomas, 21
- Cébron David, 90, 101
Cabanes Simon, 78
Caby Théophile, 22
Cao Hui, 14
Cappanera Loïc, 40
Cardin Philippe, 90
Cazaubiel Annette, 12, 15, 23, 97
Chandre Cristel, 37, 98
Chapron Bertrand, 6
Chesneau Hugo, 24
Chevallard Laurent, 80
Chraïbi Hanza, 24
Ciraolo Guido, 25
Claudet Cyrille, 43
Congy Thibault, 26
Copie François, 15, 61
Copie Francois, 97
Cornejo-Maceda Guy, 33
Cortet Pierre-Philippe, 19
Costalonga Maxime, 8
Cottin-Bizonne Cécile, 49
Cournède Paul-Henry, 32
Courrech du Pont Sylvain, 34, 50, 68
Cros Anne, 27
Crumeyrolle Olivier, 73
Cuvier Christophe, 30
- Dauxois Thierry, 17, 19
Davaille Anne, 28
Daviaud François, 30
De Souza David, 29, 69
Debue Paul, 30
Degond Pierre, 31
Dejoan Anne, 29
Della Noce Antonin, 32
Delorme Pauline, 35
Delville Jean-Pierre, 24
Denet Bruno, 77
Deng Nan, 33
Derr Julien, 34, 50
Devauchelle Olivier, 35
Doppler Delphine, 7
Dorbolo Stéphane, 23

- Dos Santos Serge, 36, 96
 Douady Stéphane, 72
 Doveil Fabrice, 67
 Dubois Jonathan, 37
 Dubrulle Bérengère, 30, 40
 Duguet Yohann, 104
- El Gennady, 15, 26, 57
 Elskens Yves, 67
 Ermanyuk Evgeny, 17
 Escande Dominique, 38, 98
 Espa Stefania, 78
 Etienne Jocelyn, 76
 Evain Clément, 39
 Evain Clément, 13
- Falcon Éric, 12, 15, 23, 97
 Faller Hugues, 40
 Faranda Davide, 22
 Fauve Stéphan, 18
 Favier Benjamin, 41, 62, 75
 Ferrero Enrico, 78
 Fierling Julien, 76
 Firpo Marie-Christine, 71
 Foucaut Jean-Marc, 30
 Fourdrinoy Johan, 42
 Fraysse Nathalie, 43
- Galassi Davide, 25
 Gallet Basile, 16
 Galperin, Boris, 78
 Garcia-Molina Cruz, 44
 Gaurav Prabhudesai, 97
 Gernay Sophie Marie, 45
 Gilet Tristan, 45, 94
 Gissinger Christophe, 46
 Godoy-Diana Ramiro, 5, 63
 Gondran Alexandre, 47
 Gondran Michel, 47
 Gondret Philippe, 48
 Guiller Clément, 49
 Guérin Adrien, 50
 Guazzelli Élisabeth, 82
 Guazzotti Stefano, 14
 Guermond Jean-Luc, 40
 Guervilly Céline, 41
- Harris David M., 74
 Haudin Florence, 12
 Henry Christophe, 4
 Henry Hervé, 106
 Hernández Zapata Sergio, 51
 Hernandez Hernandez Ivonne Judith, 85
 Hess Ortwin, 14
 Ho Ian, 74
 Hofer Mark, 26
 Homan Tess, 54
- Hubert Nicolas, 39
 Huguet Ludovic, 52
- Isoard Mathieu, 53
 Ive Federica, 78
- Jaeger Marc, 105
 James François, 81
 John Soundar Jerome Joseph, 7, 65
 José Marco V., 87
 Joubaud Sylvain, 17, 54, 65
- Kamchatnov Anatoly, 53
 van Kan Adrian, 55
 Kasparian Jérôme, 56
 Kenoufi Abdel, 47
 Kim Kyungduk, 14
 Klotz Lukasz, 63
 Knobloch Edgar, 41
 Kraych Adrien, 57
- Labat Marie, 39
 Lagarde Antoine, 58
 Lajeunesse Éric, 35
 Lambert Pierre, 45
 Lapeyre Guillaume, 6
 Laurent Duchemin, 75
 Laval Jean-Philippe, 30
 Léard Pierre, 60
 Le Bars Michael, 52, 60, 62
 Lebel Alexandre, 61
 Lecomte Charles-Édouard, 88
 Le Gal Patrice, 51, 59, 60
 Leoncini Xavier, 20
 Leonetti Marc, 105
 Le Parquier Marc, 39
 Lepot Simon, 16
 Le Reun Thomas, 62
 Lima Ricardo, 27
 Limat Laurent, 82
 Lints Martin, 36
 Liu Tao, 63
 Loiseau Jean-Christophe, 33
 López-Sánchez Erick, 64
 de Loubens Clément, 105
 Lusseyran François, 33
 Lye Claire, 76
- Métivier David, 9
 Métivier François, 35
 Madec Christopher, 65
 Manfrin Massimiliano, 78
 Manneville Paul, 66
 Maquet Laurent, 49
 Marié Louis, 6
 Marmottant Philippe, 76
 Masood Ali, 36

- Mathieu Amélie, 32
 Matnica Giorgio, 22
 Michel Guillaume, 15, 97
 Minenna Damien F. G., 67
 Monchaux Romain, 29, 69, 104
 Monsalve Eduardo, 68
 Morales Hernández Ricardo, 27
 Morfu Savério, 70
 Morzyński Marek, 33
 Mutabazi Innocent, 73, 89

 Nataf Henri-Claude, 90
 Nemoto Takahiro, 55
 Nicolas Rivière, 7
 Noack Bernd R., 33
 Nore Caroline, 40

 Odier Philippe, 17
 Olivera-Martínez Patricia Eugenia, 64
 Orozco Estrada Arturo, 27
 Ostovan Yasar, 30
 Oueslati Hanen, 71

 Pétrélis François, 18
 Pal Nairita, 103
 Pascal Barabara, 21
 Pastur Luc R., 33
 Pavloff Nicolas, 53
 Pelosse Alice, 82
 Petit Julien, 24
 Philippe Régis, 21
 Philippi Julien, 34
 Picard Clément, 54
 Picardo Jason R., 103
 Plihon Nicolas, 93
 Pousse Romain, 72
 Poyé Alexandre, 67
 Prabhudesai Gaurav, 15
 Prigent Arnaud, 73, 89
 Protière Suzie, 58
 Pucci Giuseppe, 74
 Purseed Jhaswantsing, 75
 Pustelnik Nelly, 21

 Quilliet Catherine, 76

 Radisson Basile, 77
 Ramananarivo Sophie, 5
 Randoux Stéphane, 15, 57, 61, 97
 Raufaste Christophe, 86
 Ray Samriddhi Sankar, 103
 Raynal Florence, 49
 Read Peter, 78
 Redelsperger Jean-Luc, 6
 Reis Pedro, 79
 Reneuve Jason, 80
 Ribeiro Fernand, 39

 Richard Guillaume, 81
 Roché Matthieu, 82
 Rolland Joran, 83
 Rossé Matthieu, 70
 Roussel Éléonore, 13, 39, 84
 Roy Pascale, 39
 Royon Laurent, 8
 Ruiz Chavarria Gerardo, 51, 85

 Salhi Aziz, 71
 Sanchez-Rodriguez Jesus, 86
 Sánchez-Torres Norma Yanet, 87
 Sanson Bénédicte, 76
 Sautel Jérémy, 88
 Schlagheck Peter, 94
 Scolan Hélène, 78
 Seguin Antoine, 48
 Semin Benoît, 63
 Serres Marion, 21
 Shimizu Masaki, 66
 Sibgatullin Ilias, 17
 Singh Harminder, 89
 Sommeria Joël, 44
 Sonnendruecker Eric, 98
 Staquet Chantal, 44
 Su Sylvie, 90, 101
 Suret Pierre, 15, 57, 61, 91, 97
 Sutherland Bruce, 92
 Szwaj Christophe, 39

 Taberlet Nicolas, 88, 93
 Tadrict Loïc, 94
 Tatali Raffaele, 95
 Tchakoutio Nguetcho Aurélien Serge, 96
 Thalabard Simon, 10
 Thiria Benjamin, 5, 68
 Tikan Alexey, 15, 61, 97
 Tordeux Marie-Agnès, 39
 Torzynski Alexandre, 76
 Trejo Gutierrez Jose Antonio, 85
 Tronko Natalia, 98
 Tuckerman Laurette S., 11, 99

 Uzer Turgay, 37

 Vérard Christian, 56
 Vaienti Sandro, 22
 Valori Valentina, 30
 Valvo Lorenzo, 100
 Vidal Jérémie, 101
 Vidal Valérie, 21, 54
 Vincent Simon, 102
 Vincenzi Dario, 103
 Vittot Michel, 100
 Voisin Bruno, 44
 Volk Romain, 49

 Wang Qi Jie, 14

Wang Zhe, 104

Wesfreid José Eduardo, 63

Wunenburger Régis, 24

Xie Kaili, 105

Yamaguchi Yoshiyuki Y., 9

Yassin Houssam, 92

Ybert Christophe, 49

Yiou Pascal, 22

Young Roland, 78

Zanella Raphaël, 106

Zeng Yongquan, 14

Zhao Menghua, 82