



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

*Poincaré*

---

Résumés des exposés de la 13<sup>e</sup>  
Rencontre du Non-Linéaire  
Paris 2010

---

13 janvier 2010



Institut Henri Poincaré

Non-Linéaire Publications



## RENCONTRE DU NON-LINÉAIRE

Institut Henri Poincaré, PARIS

10–12 Mars 2010

Nous remercions vivement Cédric Villani, Directeur de l'Institut Henri Poincaré, pour son aide à l'organisation de ces *Rencontres* ainsi que le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, le Centre National de la Recherche Scientifique, l'Institut Jean le Rond d'Alembert, le Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules (PhLAM), le Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA) pour leur soutien matériel et financier.

Le comité scientifique est composé de :

|                      |  |
|----------------------|--|
| Amandine AFTALION    | CMAP — Polytechnique                       |
| Yacine AMAROUCHÈNE   | CPMOH — Bordeaux                           |
| Arezki BOUDAUD       | RDP — ENS Lyon                             |
| Jean-René CHAZOTTES  | CPhT — Polytechnique                       |
| Silvia DE MONTE      | Ecologie & Evolution — ENS Paris           |
| John DUDLEY          | FEMTO-ST — Besançon                        |
| Sébastien GALTIER    | IAS — Orsay                                |
| Christophe JOSSERAND | Institut Jean le Rond d'Alembert — Paris 6 |
| Marc LEFRANC         | PhLAM — Lille                              |
| Patrice MEUNIER      | IRPHE — Marseille                          |
| Thomas PODGORSKI     | LSP — Grenoble                             |
| Laurette TUCKERMAN   | PMMH — ESPCI, Paris                        |

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

|                      |  |
|----------------------|--|
| Christophe JOSSERAND | Institut Jean le Rond d'Alembert — Paris 6 |
| Marc LEFRANC         | PhLAM — Lille                              |
| Christophe LETELLIER | CORIA — Rouen                              |

Le Colloque *Le non-linéaire, une clé des énergies de demain ?* est organisé par :

|                      |  |
|----------------------|--|
| François DAVIAUD     | CEA Saclay                                 |
| Christophe JOSSERAND | Institut Jean le Rond d'Alembert — Paris 6 |
| Patrice MEUNIER      | IRPHE — Marseille                          |

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

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

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

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

Renseignements :

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



## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| <b>Fusion par confinement inertiel</b><br><i>Laurent Masse</i> .....   | 1  |
| <b>Piles à combustible : principes et quelques effets non linéaires</b><br><i>Pascal Brault</i> .....  | 2  |
| <b>Analyse du rôle des conditions aux limites acoustiques non linéaires dans les instabilités de combustion</b><br><i>T. Schuller, N. Tran, N. Noiray, D. Durox, S. Ducruix, S. Candel</i> ..... | 3  |
| <b>Identités de Jarzynski-Crooks, Théorème de fluctuation et Thermodynamique.</b><br><i>Kirone Mallick</i> .....   | 4  |
| <b>Simulation des contributions régionales au forçage radiatif du CO<sub>2</sub>, un exemple de résolution numérique du non-linéaire</b><br><i>Thomas Gasser</i> .....                           | 5  |
| <b>Nonlinearities in energy saving material processing with electromagnetic coupling</b><br><i>V. Bojarevics, K. Pericleous, S. Easter and A. Roy</i> .....                                      | 6  |
| <b>Effets non linéaires et récupération de l'énergie des vagues</b><br><i>Aurélien Babarit</i> .....   | 7  |
| <b>Aerodynamic Aspects of Wind Energy</b><br><i>Jens N. Sorensen</i> .....   | 8  |
| <b>Dynamique non uniformément hyperbolique : le cas de l'application standard</b><br><i>Jean-Christophe Yoccoz</i> .....   | 9  |
| <b>Métastabilité, friction mutuelle et effets du "counter-flow" dans l'équation de Gross-Pitaevskii tronquée.</b><br><i>Giorgio KRSTULOVIC, Marc BRACHET</i> .....                               | 10 |
| <b>Des renversements de champ magnétique aux dynamos hémisphériques</b><br><i>Basile Gallet, François Pétrélis</i> .....   | 11 |
| <b>Statistiques spatiales en turbulence d'ondes de gravité</b><br><i>Eric Herbert, Nicolas Mordant, Eric Falcon</i> .....  | 12 |
| <b>Étude de la dynamique de nappes visqueuses</b><br><b>Stabilité linéaire et étude non-linéaire</b><br><i>Gilles Pfingstag, Arezki Boudaoud, Basile Audoly</i> .....                            | 13 |
| <b>Analyse de stabilité d'un modèle multiphase : application à la croissance d'un mélanome</b><br><i>Chatelain, Ciarletta, Ben Amar</i> .....  | 14 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Formation spontanée d'un réseau de veines</b><br><i>P. Dély, C. Sz waj, S. Biela wski, E. Lacot, O. Hugon, T. Nakagaki</i> .....   | 15 |
| <b>Identification des cycles respiratoires en ventilation non invasive par des modèles globaux</b><br><i>G. Rodrigues, L. A. Aguirre, L. Achour, A. Cuvelier, J.-F. Muir &amp; C. Letellier</i> .....                                   | 16 |
| <b>Robustesse des horloges circadiennes aux fluctuations d'éclairement : le cas du picoeucaryote <i>Ostreococcus</i></b><br><i>Quentin Thommen, Pierre-Emmanuel Morant, Florence Corellou, François-Yves Bouget, Marc Lefranc</i> ..... | 17 |
| <b>Pluie de solitons dans un laser à fibre</b><br><i>S.Chouli, Ph.Grelu</i> .....   | 18 |
| <b>Effet de « Pulse-splitting » dans un laser à électrons libres</b><br><i>M. Labat, N. Joly, S. Biela wski, C. Sz waj, C. Bruni, M.E. Coupr ie</i> .....   | 19 |
| <b>Générateur de chaos opto-électronique à double retard pour les télécommunications optiques sécurisées à haut débits</b><br><i>Mourad Nourine, Laurent Larger, Yanne Kouomou Chembo, Kirill Volyanskiy, Michael Peil</i> .....        | 20 |
| <b>Cryptage par chaos haut-débit sur réseau optique installé</b><br><i>Laurent Larger, Roman Lavrov, Maxime Jacquot</i> .....   | 21 |
| <b>Comment Otto Rö s sler se cache derrière une manière inhabituelle de rédiger</b><br><i>Christophe Letellier</i> .....  | 22 |
| <b>'Compressive Sensing' en utilisant le Chaos</b><br><i>L. Yu, J-P Barbot G. Zheng &amp; H. Sun</i> .....  | 23 |
| <b>Formes normales réduites non linéaires d'observabilité</b><br><i>Driss Boutat, Gang Zheng</i> .....  | 24 |
| <b>Les courbes singulières : invariants unidimensionnels des systèmes dynamiques</b><br><i>Jean-Marc Ginoux, Robert Gilmore, Timothy Jones, Ubiratan Freitas &amp; Christophe Letellier</i> .....                                       | 25 |
| <b>Deux flots chaotiques minimaux avec des symétries différentes gouvernés par le même ordre unimodal</b><br><i>Christophe Letellier, Jean-Marc Malasoma</i> .....  | 26 |
| <b>Détection de non-linéarité par titrage du bruit : encore une technique dépendant du choix de l'observable.</b><br><i>E. Roulin, U. Santos Freitas, C. Letellier</i> .....  | 27 |
| <b>Diffusion et adsorption en milieu poreux : profil expérimental et modélisation</b><br><i>Christophe Joss erand, Jean-Marc Bauchire, Pascal Brault, François James</i> .....  | 28 |
| <b>Fusion bidimensionnelle d'un cristal de pics de ferrofluide</b><br><i>François Boyer, Eric Falcon</i> .....  | 29 |
| <b>Propagation d'un front de fracture en présence d'un désordre contrôlé</b><br><i>J. Chopin, A. Prévost, A. Boudaoud, M. Adda-Bedia</i> .....  | 30 |
| <b>Synchronisation de bursts dans des réseaux d'oscillateurs</b><br><i>Nathalie Corson, Stefan Balev, M. A. Aziz-Alaoui</i> .....   | 31 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Bifurcations dans l'espace hyperbolique en relation avec un modèle de perception des structures visuelles par le cortex</b><br><i>Pascal Chossat, Olivier Faugeras</i> .....                                 | 32 |
| <b>Ondes modulées dans le système de Couette-Taylor soumis à un fort gradient radial de température</b><br><i>Guillerm Raphael, Prigent Arnaud &amp; Mutabazi Innocent</i> .....                                | 33 |
| <b>Contrôle du transport turbulent dû à la dérive <math>E \times B</math> dans les plasmas de fusion.</b><br><i>IZACARD Olivier, CHANDRE Cristel, CIRAOLLO Guido</i> .....                                      | 34 |
| <b>Loi de conservation de la quantité de mouvement gyrocinétique</b><br><i>N. Tronko, A.J. Brizard</i> .....  | 35 |
| <b>Optique non linéaire dans des paquets d'électrons relativistes : génération d'harmoniques élevées</b><br><i>Clément Evain, Marie-Emmanuelle Couprie, Jean Marc Filhol, Amor Nadji, Alexander A. Zholents</i> | 36 |
| <b>Dynamiques toroïdales non triviales dans un laser spatio-temporel</b><br><i>Dalila Amroun Aliane, Christophe Letellier &amp; Luc Pastur</i> .....  | 37 |
| <b>Observation de spirales dans le profil transverse d'intensité d'un laser saphir-titane</b><br><i>Marco Romanelli, Marc Brunel et Marc Vallet</i> .....   | 38 |
| <b>Entraînement robuste d'oscillateurs biologiques</b><br><i>Benjamin Pfeuty, Quentin Thommen, Marc Lefranc</i> .....   | 39 |
| <b>Modélisation à retard : dynamique du vecteur et transmission du virus chikungunya</b><br><i>Moulay, Aziz-Alaoui</i> .....  | 40 |
| <b>Oscillations d'expression d'un gène auto-régulé : interaction d'un délai de transport avec la réponse transcriptionnelle</b><br><i>Jingkui Wang, Quentin Thommen, Marc Lefranc</i> .....                     | 41 |
| <b>Initialisée par Mos, activée par MPF - la cascade MAPK dans les ovocytes de <i>Xénope</i></b><br><i>Christophe Russo, Ralf Blossey</i> .....   | 42 |
| <b>Dynamo de marées</b><br><i>Cebren D., Le Bars M., Le Gal P., Maubert P.</i> .....  | 43 |
| <b>Instabilité centrifuge d'un écoulement de Taylor-Couette elliptique</b><br><i>Sauret A., Le Dizès S., Le Bars M.</i> .....   | 44 |
| <b>Mise en évidence numérique d'une évolution statistique universelle auto-similaire pour une nappe tourbillonnaire</b><br><i>Marie-Line Chabanol, Jean Duchon</i> .....  | 45 |
| <b>Perturbations non-linéaires optimales dans un écoulement de Couette plan</b><br><i>Yohann Duguet, Luca Brandt, Robin B. Larsson</i> .....  | 46 |
| <b>Repliement élastocapillaire contrôlé par un impact de goutte</b><br><i>Marco Rivetti, Sébastien Neukirch, Christophe Josserand, Basile Audoly, Arnaud Antkowiak</i> .....                                    | 47 |
| <b>Dynamique de dégazage dans un milieu granulaire immergé : différents aspects</b><br><i>Valérie Vidal, Germán Varas, Jean-Christophe Géminard</i> .....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Déplacement et oscillations de gouttes sous l'effet d'ondes de surface ultrasonores</b><br><i>P. Brunet, M. Baudoin, O. Bou-Matar, F. Zoueshtiagh</i> .....   | 49 |
| <b>Ionisations multiples d'atomes et de molécules en champ laser intense</b><br><i>Mauger, Chandre, Uzer</i> .....   | 50 |
| <b>L'Histoire des Oscillations de Relaxation :<br/>de Gérard-Lescuyer à Van der Pol</b><br><i>Jean-Marc Ginoux</i> .....   | 51 |
| <b>Dynamique des interactions entre écoulements naturels et végétaux</b><br><i>Emmanuel de Langre</i> .....  | 52 |
| <b>Ethology of amoeba viewed from nonlinear dynamics</b><br><i>Toshiyuki Nakagaki</i> .....  | 53 |
| <b>Dynamique des interactions patient-ventilateur durant une assistance ventilatoire nocturne.</b><br><i>R. Naeck, D. Bounoiare, U. S. Freitas, H. Rabarimanantsoa, A. Portmann, A. Cuvelier, J.-F. Muir, C. Letellier</i> ..... | 54 |
| <b>Instabilités de fils visqueux : des spirales, des bulles et une machine à coudre fluide.</b><br><i>Brun Pierre-Thomas</i> .....   | 55 |
| <b>Une vague auto-similaire pour l'atomisation</b><br><i>Jérôme Hoepffner, Ralf Blumenthal, Stéphane Zaleski</i> .....   | 56 |
| <b>Adhésion d'une plaque mince sur une sphère<br/>par capillarité</b><br><i>Jérémy Hure, Benoît Roman, José Bico</i> .....   | 57 |
| <b>Blister shapes of thin films randomly deposited on adhesive substrates</b><br><i>Y. Aoyanagi, J. Hure, B. Roman, J. Bico</i> .....  | 58 |
| <b>Propagation des ondes dans une structure élastique compactée</b><br><i>Seizilles, Bayart, Adda-Bedia, Boudaoud</i> .....  | 59 |
| <b>Turbulence d'onde sur une plaque élastique mince :<br/>analyse du spectre d'énergie spatio-temporel</b><br><i>N. Mordant, P. Cobelli, P. Petitjeans, A. Maurel, V. Pagneux</i> .....  | 60 |
| <b>Propriétés statistiques d'un fil élastique compacté</b><br><i>Elsa Bayart, Arezki Boudaoud, Mokhtar Adda-Bedia</i> .....  | 61 |
| <b>Thermalisation anormale d'ondes unidimensionnelles</b><br><i>Suret Pierre, Picozzi Antonio, Hans R. Jauslin, Randoux Stéphane</i> .....   | 62 |
| <b>Auto-résonance de l'instabilité Raman stimulée due à une non-linéarité d'origine cinétique<br/>dans un plasma inhomogène</b><br><i>T. Chapman, S. Hüller, P.E. Masson-Laborde, W. Rozmus</i> .....                            | 63 |
| <b>Mécanismes et mesures du mélange chaotique des fluides visqueux</b><br><i>Emmanuelle Gouillart, Olivier Dauchot, Jean-Luc Thiffeault</i> .....  | 64 |
| <b>Fluctuations hors équilibre d'une interface entre deux fluides visqueux</b><br><i>M. Thiébaud, T. Bickel</i> .....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Événements extrêmes dans les systèmes optiques temporels et spatiaux</b><br><i>A. Mussot, A. Kudlinski, M. Kolobov, E. Louvergneaux, V. Odent, M. Douay, and M. Taki</i> . . . . . | 66 |
| <b>Dégonflement de surfaces élastiques sphériques</b><br><i>Catherine Quilliet, François Quémeneur, Philippe Marmottant, Brigitte Pépin-Donat</i> . . . . .                           | 67 |
| <b>Trafic de gouttes à une jonction</b><br><i>D. A. Sessoms, L. Courbin, P. Panizza, A. Amon</i> . . . . .  | 68 |
| <b>Structures stationnaires de réaction-diffusion : derniers développements et comment les construire expérimentalement</b><br><i>Patrick de Kepper</i> . . . . .                     | 69 |

# Fusion par confinement inertiel

Laurent Masse<sup>1</sup>

CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France  
laurent.masse@cea.fr

Avec les premières expériences dans le régime du MégaJoule laser le début de la décennie 2010 marque l'aboutissement de quarante ans de recherches dans le domaine de la fusion par confinement inertiel (FCI). Les premières expériences de combustion thermonucléaires donnant des gains énergétiques supérieur à l'unité devraient être obtenues dans les deux années avenir sur le laser américains NIF (National Ignition Facility) [1] puis sûr le Laser MégaJoule (LMJ) [2] français ouvrant la porte à la fusion inertielle pour l'énergie.

Au delà des perspectives énergétiques que ce type d'installation laser nous permet d'envisager, la richesse et la complexité des phénomènes physiques non linéaire auxquels nous allons nous confronter promet de belles heures à la recherche.

Durant cet exposé nous présenterons les objectifs et les principes généraux de la FCI en mettant en avant les zones d'ombre dans notre maîtrise et notre compréhension des phénomènes. Nous verrons que la violence et la grande instationnarité des phénomènes donnent lieux à des comportements fortement non linéaire. Nous nous intéresserons plus précisément aux instabilités hydrodynamiques particulièrement délétères pour l'obtention des conditions d'allumage. Le développement fortement non linéaire de ces instabilités et les conditions de transition vers des régimes turbulents sont des domaines de recherche actifs dans lequel la communauté du non-linéaire a un rôle à jouer.

## Références

1. S. GLENZER *et al.*, *Science*, 1 (2010).
2. C. CHERFILS *et al.*, *Journal of Physics Conference Series*, **112** (2), 022023 (2008).

# Piles à combustible : principes et quelques effets non linéaires

Pascal Brault

Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés, UMR6606 CNRS-Université d'Orléans BP 6744,  
45067 Orléans Cedex 2, France

Pascal.Brault@univ-orleans.fr

La pile à combustibles est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique (c'est un générateur de courant) qui attire de nouveau l'attention compte tenu de ses rendements élevés (95%) et de sa dite "propreté". Les applications sont très variées et concernent les domaines nomades (téléphonie mobile, ordinateur portable, auxiliaires de puissance, ...), le stationnaire (électricité et chauffage urbains, groupe de secours de grande puissance, ...), les transports (flotte captive, autobus, véhicule personnel, bateau, avion, ...). Le principe de base est un système à trois éléments : une anode (catalysée), un électrolyte, et une cathode (catalysée). Les électrodes sont le siège de la production et de la circulation de courant et l'électrolyte du transport des ions. Si le combustible est de l'hydrogène (mais ce n'est pas obligatoire), on a l'une ou l'autre des réactions,

A l'anode :  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  (électrolyte acide) ou bien  $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$  (électrolyte alcalin)

A la cathode :  $O_2 + H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$  ou bien  $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ . la réaction globale est alors :  
 $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O + \text{électricité} + \text{chaleur}$

Il y a un regain d'activités autour des piles actuellement, et un effort particulier pour la réduction des coûts de fabrication pour envisager une industrialisation. De plus, le développement des piles est indissociable de la problématique de la fabrication, du stockage et de la distribution de l'hydrogène.

Les enjeux scientifiques et technologiques concernent l'optimisation des composants et leur utilisation. C'est dans ce contexte que des effets non-linéaires peuvent exister. Les plaques bipolaires servent à la fois de collecteurs de courant et d'homogénéiseur des gaz ( $H_2$  et  $O_2$ ). Les différences de flux de ces gaz dans l'électrode peuvent induire des différences de réactivité et donc de température, ce qui est néfaste pour le fonctionnement de la pile. Le transport des espèces dans les électrodes poreuses est aussi un facteur limitant, en particulier la tortuosité semble jouer un rôle. La résistance électrique de l'électrolyte joue un rôle important dans le transport ionique, lequel dépend aussi de la porosité aux échelles pertinentes. La bonne gestion de l'eau, dont l'évacuation, permet d'éviter le noyage des électrodes. En conclusion le développement des piles à combustible génère des études très fondamentales visant à résoudre de beaux problèmes de microfluidique, de nanothermique, de transport anormal dans les poreux désordonnés. Soit autant de sources potentielles de non-linéarités à étudier...

# Analyse du rôle des conditions aux limites acoustiques non linéaires dans les instabilités de combustion

T. Schuller<sup>1</sup>, N. Tran<sup>1</sup>, N. Noiray<sup>1</sup>, D. Durox<sup>1</sup>, S. Ducruix<sup>1</sup>, & S. Candel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire EM2C, Ecole Centrale Paris et CNRS, 92295 Châtenay-Malabry, France

<sup>2</sup> Ecole Centrale Paris et Institut Universitaire de France

thierry.schuller@em2c.ecp.fr

Mini-colloque : Le non-linéaire, une clé pour les énergies de demain ?

Les instabilités de combustion sont un frein au développement de foyers à haute performance environnementale. Elles apparaissent notamment dans les turbines à gaz pour la production d'électricité, les chaudières thermiques de faible puissance (quelques kW) ou à grande puissance (quelques centaines de MW), les fours, les procédés industriels, les foyers de moteurs d'avions et les moteurs fusées. Elles sont caractérisées par des oscillations périodiques importantes du dégagement de chaleur et de la pression dans la chambre de combustion. Les déclenchements à partir de seuil, les décalages de fréquence, les commutations de mode et les phénomènes d'hystérésis sont souvent observés dans ces régimes instables. Ces mécanismes ne peuvent pas être décrits par des analyses classiques de stabilité linéaire et la réponse non linéaire de la flamme est souvent évoquée pour interpréter ces phénomènes. Il existe cependant d'autres mécanismes responsables de fortes non linéarités. Plusieurs études récentes montrent que les interactions de l'écoulement avec les conditions aux limites acoustiques de la chambre de combustion dépendent également du niveau des perturbations. Ces phénomènes doivent être pris en compte dans l'analyse de la dynamique du système. Ceci est illustré à l'aide de deux exemples. La réponse acoustique non linéaire de deux configurations souvent rencontrées dans des foyers est étudiée expérimentalement. La première correspond à une plaque perforée située sur une cavité résonante et traversée par un écoulement lent. La seconde correspond à une collection de petites flammes coniques stabilisées à la sortie d'un brûleur. Ces éléments sont soumis à des perturbations acoustiques d'amplitude croissante, jusqu'à atteindre des niveaux couramment rencontrés lors d'instabilités de combustion. On montre que la réponse des limites du système peut être analysée par une impédance qui dépend du niveau de la perturbation. On généralise pour cela la notion d'impédance  $Z(\omega)$  par son extension non linéaire qui tient compte du niveau d'amplitude  $Z(\omega, |p'|$  ou  $|u'|)$  où  $|p'|$  et  $|u'|$  représentent les niveaux des perturbations de pression ou de vitesse. En utilisant ce concept, on montre qu'une plaque perforée utilisée comme système de contrôle passif pour atténuer des instabilités perd ses propriétés absorbantes pour des niveaux d'amplitude élevée. On montre également que la réflexion des ondes acoustiques sur une flamme est modifiée à forte amplitude. L'influence de ces éléments sur la stabilité non linéaire d'un brûleur générique peut être décrite par une méthode d'analyse basée sur le calcul de l'évolution de l'harmonique principal de la réponse de la flamme (Flame Describing Function) [1]. Cette méthode est ici étendue à des systèmes présentant des interactions complexes avec les conditions aux limites décrites par des fonctions  $Z(\omega, |p'|$  ou  $|u'|)$  (Impedance Describing Function) .

## Références

1. N. NOIRAY, D. DUROX, T. SCHULLER, S. CANDEL, A unified framework for nonlinear stability analysis based on the flame describing function, *Journal of Fluid Mechanics*, **615** 139-167 (2008).

# Identités de Jarzynski-Crooks, Théorème de fluctuation et Thermodynamique.

Kirone Mallick

IPhT, CEA Saclay

`kirone.mallick@cea.fr`

L'objet de cet exposé est de décrire quelques résultats remarquables, obtenus pendant la dernière décennie, concernant les systèmes hors d'équilibre thermodynamique. Nous présenterons les identités de Jarzynski et de Crooks qui permettent de quantifier les "violations transitoires" du Second Principe. Nous expliquerons également le théorème de fluctuation, de Gallavotti-Cohen, qui traduit l'invariance par renversement temporel de la dynamique microscopique comme symétrie d'une fonction, dite de grandes déviations. Celle-ci joue loin de l'équilibre, un rôle analogue à celui d'un potentiel thermodynamique.

Ces relations seront illustrées à l'aide d'exemples simples.

# Simulation des contributions régionales au forçage radiatif du CO<sub>2</sub>, un exemple de résolution numérique du non-linéaire

Thomas Gasser

LSCE, CEA Saclay

# Nonlinearities in energy saving material processing with electromagnetic coupling

V. Bojarevics, K. Pericleous, S. Easter and A. Roy

University of Greenwich, Park Row, London SE10 9LS, UK

v.bojarevics@gre.ac.uk

The interface stability problem for aluminium electrolysis cells is of great practical importance due to significant electrical energy losses, disruptions in the technology and increased environmental pollution rate. The electric current with the associated magnetic field are intricately involved in the oscillation process at the interface between liquid aluminium and electrolyte, which results in the observed wave frequencies being shifted from the purely hydrodynamic ones. The theory and numerical model of the electrolysis cell are extended to the cases of variable bottom and top solid surfaces. We present instructive analysis of different physical coupling factors affecting the magnetic field, electric current, velocity and wave development with animated examples for the high amperage cells. The results indicate that the 'rotating wave' instability is dominant in the idealized linear cases, while the inclusion of nonlinear interaction exerts a stabilizing effect with a 'sloshing' parametrically excited MHD wave development in the aluminium production cells.

A number of different methods have been developed, which allow the noncontact electromagnetic levitation of liquid metal droplets to investigate the melting/solidification process and measure the properties of these highly reactive materials. The intense AC magnetic field required to produce levitation in terrestrial conditions, along with the buoyancy and thermo-capillary forces, results in turbulent convective flow within the droplet. The presented numerical results show that the use of a homogenous DC magnetic field allows the large scale flow to be damped. However the turbulence properties are affected at the same time, leading to a lower turbulent damping. The reduction in the AC field driven flow in the main body of the drop leads to a noticeable thermo-capillary convection at the edge of the droplet. An alternative method without internal electric currents, using high gradient D.C. magnetic levitation, is analyzed analytically and numerically. A comparison is made between the analytical perturbation theory and the numerical pseudo spectral approximation solutions for small amplitude oscillations.

Intense AC magnetic field can be used to levitate larger volumes of liquid metal in terrestrial conditions, as it is known from experiments and industrial applications of cold crucible melting systems. The confinement mechanism in this case is considerably different from the case of a small droplet where the surface tension plays a key role to constrain the liquid outflow at the critical bottom point. The dynamic interaction of the turbulent flow with the oscillating interface, confined by the magnetic force needs to be accounted in a unified model for the time dependent liquid metal and magnetic field generating coil system. The MHD modified turbulence model is used to describe the mixing and damping properties at smaller scales not resolved by the macro model. The numerical multiphysics simulations demonstrate the possibility to levitate liquid metal of few kilograms mass in a cold crucible type melting system without the contact to container walls. Possible applications to processing of reactive metals are discussed.

# Effets non linéaires et récupération de l'énergie des vagues

Aurélien Babarit

Laboratoire de Mécanique des Fluides CNRS UMR 6598 Ecole Centrale de Nantes 1, rue de la Noë 44300 Nantes  
aurelien.babarit@ec-nantes.fr

Les vagues qui animent la surface des océans représentent une source d'énergie renouvelable considérable, dont la part exploitable est estimée à environ 20000TWh par l'agence internationale de l'énergie [1]. De part le monde, de nombreux systèmes destinés à la récupérer sont en cours de développement. On qualifie ces systèmes de houlomoteurs. Un état de l'art sur les différents principes a récemment été publié dans [2].

Pour la plupart, ces systèmes mécaniques se comportent comme des oscillateurs mécaniques, dont les performances en terme de production d'énergie ne sont intéressantes que lorsque les périodes de houle sont proches des périodes de résonance. Malheureusement, la houle est un processus aléatoire dont les caractéristiques -notamment la période- varient vague après vague. L'efficacité des systèmes houlomoteurs est donc bien souvent décevante par rapport à leurs dimensions. C'est pourquoi, il y a déjà trente ans, un contrôle original et non linéaire du mouvement, dit contrôle par latching, a été introduit par [3] dans le cadre de la récupération de l'énergie des vagues. Il consiste à bloquer le degré de liberté productif du système lorsque sa vitesse s'annule, et à le relâcher lorsque la phase de la force d'excitation est plus favorable. Ce contrôle permet de générer des résonances paramétriques dans la réponse des systèmes, et par ce biais d'améliorer la production d'énergie. On abordera ce contrôle dans la première partie de cette communication.

Les systèmes houlomoteurs sont des systèmes qui interagissent avec l'océan. Ces interactions fluide structure peuvent être complexes et conduire à des comportements exotiques des structures. Dans la seconde partie de cette communication, en se basant sur l'exemple technologique du système SEAREV qui a été développé à l'Ecole Centrale de Nantes entre 2002 et 2007, on présentera plusieurs de ces effets hydrodynamiques non linéaires, bien souvent pénalisant en terme d'efficacité énergétique des machines. On montrera comment les effets d'impacts viennent limiter les amplitudes du mouvement, et donc la production d'énergie, ainsi que des effets non linéaire de roulis paramétrique, générant des réponses du système à des périodes doubles de celle de la houle.

## Références

1. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IMPLEMENT AGREEMENT ON ENERGY SYSTEMS, *Annual Report 2008* (2008).
2. A. F. DE O. FALCÃO, *Wave energy utilization : A review of the technologies* Renewable and Sustainable Energy Reviews (2009).
3. K. BUDAL ET J. FALNES, Interacting point absorbers with controlled motion. *in Power from Sea Waves, BM Count, Academic Press, 381-399* (1980).

# Aerodynamic Aspects of Wind Energy

Jens N. Sorensen

Technical University of Denmark, Nils Koppels Alle, batiment 403, 2800 Lyngby, DANEMARK  
jns@mek.dtu.dk

The aerodynamics of wind turbines concerns, briefly speaking, modelling and prediction of the aerodynamic forces on the solid structures of a wind turbine and in particular on the turbine rotor blades. Aerodynamics is the most central discipline for predicting performance and loadings on wind turbines. Aerodynamic modelling may also concern design of specific parts of wind turbines, such as rotor blade geometry, or performance predictions of wind farms. In this presentation I will present and discuss different wind turbine concepts and especially focus on the aerodynamic properties of wind turbine rotors and associated wakes.

The wake behind a rotor consists essentially of a number of helical vortices that owing to roll-up effects mainly concentrates in tip and root vortices. The wake can generally be divided into two distinct parts, the near wake and the far wake. Near wake features are related to the genesis of the vortex system where the presence of the rotor is felt directly. The far wake is usually the downstream position where the wake dynamics no longer depends on the rotor characteristics. In the past five years we have been studying wakes behind wind turbine blades using analytical tools as well as numerical simulations based on LES methodology and the so-called actuator line technique. From these studies we have shown that helical wakes are inherent unstable and we have elucidated how the ambient turbulence influences the stability properties. Furthermore, we have identified one of the main instability mechanisms to be related to vortex pairing. Another part of the work has been focused on the interaction of wakes originating from two or more rotors placed close to each other. This is in particular of importance for wind turbines located in wind farms. In the presentation I will first give the theoretical background for the stability analysis and present the numerical techniques used. Next, I will show some basic results from the stability analysis and numerical simulations of both single wakes and interacting wakes, including comparisons to experimental results.

# Dynamique non uniformément hyperbolique : le cas de l'application standard

Jean-Christophe Yoccoz

Collège de France

# Métastabilité, friction mutuelle et effets du “counter-flow” dans l’équation de Gross-Pitaevskii tronquée.

Giorgio KRSTULOVIC<sup>1</sup> & Marc BRACHET<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique de l’Ecole Normale Supérieure,  
associé au CNRS et aux Universités Paris VI et VII, 24 Rue Lhomond, 75231 Paris, France  
[krstulov@lps.ens.fr](mailto:krstulov@lps.ens.fr)

L’équation de Gross-Pitaevskii tronquée possède des solutions stationnaires données par une répartition statistique de modes des Fourier connues comme des équilibres absolus. Quand l’impulsion est prise en compte dans l’ensemble statistique, une asymétrie dans la répartition des ondes est produite donnant lieu à un “counter-flow” et à des états métastables.

Dans ce travail, on étudie la métastabilité des équilibres absolus de l’équation de Gross-Pitaevskii tronquée en présence du “counter-flow” à l’aide d’un algorithme grand canonique. On montre ensuite des résultats sur l’interaction des vortex avec ces quasi équilibres. On obtient ainsi que des effets de la dynamique superfluide à température finie, comme la friction mutuelle ou les forces transverses, sont naturellement présentes dans l’équation de Gross-Pitaevskii tronquée.

# Des renversements de champ magnétique aux dynamos hémisphériques

Basile Gallet<sup>1</sup> & François Pétrélis<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris  
[basile.gallet@ens.fr](mailto:basile.gallet@ens.fr)

Les renversements de champ magnétique ont été décrits récemment comme résultant du couplage entre deux modes magnétiques, l'un de symétrie dipolaire et le second de géométrie quadrupolaire. Au sein d'une étoile ou d'une planète, ce couplage a lieu quand l'écoulement interne brise la symétrie équatoriale de l'objet considéré. A l'aide d'un modèle de dynamo  $\alpha^2$  en géométrie sphérique, nous avons calculé les deux modes magnétiques en jeu à partir de l'équation d'induction. Lorsque l'effet alpha appliqué brise la symétrie équatoriale, ces deux modes sont couplés et présentent alors soit des renversements de champ magnétique, soit une localisation du champ magnétique dans un seul des deux hémisphères. Le premier régime correspond aux renversements erratiques du champ magnétique terrestre, tandis que le second pourrait décrire le champ magnétique de la planète Mars, qui semble avoir été localisé uniquement dans l'hémisphère Sud de la planète, ou encore le minimum de Maunder, durant lequel les taches solaires n'étaient présentes que dans l'hémisphère Sud du Soleil. A l'aide d'une analyse de système dynamique de basse dimensionalité, on peut montrer que ces comportements sont génériques et s'étendent bien au-delà du modèle d'effet alpha considéré ici.

# Statistiques spatiales en turbulence d'ondes de gravité

Eric Herbert<sup>1</sup>, Nicolas Mordant<sup>2</sup>, & Eric Falcon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC), Université Paris-Diderot, CNRS – UMR 7057  
10 rue A. Domon et L. Duquet 75013 Paris, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, CNRS – UMR 8550  
24 rue Lhomond 75 005 Paris, France

[eric.herbert@univ-paris-diderot.fr](mailto:eric.herbert@univ-paris-diderot.fr) ; [nicolas.mordant@lps.ens.fr](mailto:nicolas.mordant@lps.ens.fr) ; [eric.falcon@univ-paris-diderot.fr](mailto:eric.falcon@univ-paris-diderot.fr)

La turbulence d'ondes étudie les propriétés statistiques et dynamiques d'un ensemble d'ondes en interaction non linéaire. Son domaine d'application s'étend des ondes internes ou de surface en océanographie aux ondes dans les plasmas astrophysiques en passant par les ondes de spins dans les solides. Contrairement à turbulence hydrodynamique, la théorie de la turbulence d'ondes permet d'obtenir des résultats analytiques exactes, tel que l'expression du spectre de puissance de l'amplitude des ondes [1]. Les études expérimentales en laboratoire sont pourtant peu nombreuses sur le sujet. Ces mesures sont majoritairement localisée en espace [2], tandis que les prédictions théoriques sont souvent relative à l'espace de Fourier. Un challenge important est donc d'accéder, comme récemment pour le cas d'ondes élastiques [3], à la mesure spatio-temporelles de l'amplitudes des ondes en régime turbulent.

Nous avons étudié la statistique spatiale de la turbulence d'ondes de gravité à la surface d'un fluide [4]. Une méthode optique basée sur la profilométrie par Transformée de Fourier [5] a été utilisée et permet d'accéder au champ de déformations des vagues sur une certaine zone spatiale au cours du temps. Nous avons ainsi obtenu, pour la première fois, la mesure de la relation de dispersion *non linéaire* des ondes de gravité qui met en évidence, outre la branche linéaire  $\omega(k)$ , l'apparition de branches secondaires  $\omega(2k)$ ,  $\omega(3k)$  lorsque l'intensité du forçage augmente. Ces branches secondaires proviennent des non linéarités des vagues engendrant des ondes de Stokes ou des singularités à la surface du fluide. Nous accédons aussi au spectre spatial des vagues au cours du temps, à la distribution de probabilité de l'amplitude des vagues à un nombre d'onde  $k$  donné, et les comparons aux prédictions théoriques.

## Références

1. V. E. Zakharov, G. Falkovich & V. S. L'vov, *Kolmogorov Spectra of Turbulence I : Wave Turbulence* (Springer-Verlag, Berlin, 1992).
2. E. Falcon, C. Laroche & S. Fauve, Phys. Rev. Lett. **98**, 094503 (2007) ; F. Boyer & E. Falcon, Phys. Rev. Lett. **101**, 244502 (2008) ; N. Mordant, Phys. Rev. Lett. **100**, 234505 (2008)
3. P. Cobelli *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 204301 (2009)
4. E. Herbert, N. Mordant & E. Falcon, *Nonlinear dispersion relation and space statistics of gravity wave turbulence*, en préparation (2010)
5. M. Takeda & K. Mutoh, Appl. Opt. **22**, 3977 (1983) ; A. Maurel *et al.*, Appl. Opt. **48**, 380 (2009) ; P. Cobelli *et al.*, Exp. Fluids **46**, 1037 (2009)

# Étude de la dynamique d'une nappe visqueuse flottante

Gilles Pfingstag<sup>1,2</sup>, Arezki Boudaoud<sup>1</sup> & Basile Audoly<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CNRS and UPMC Univ. Paris 06, UMR 7190, Institut Jean le Rond d'Alembert, Paris, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris Diderot, CNRS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France

gilles.pfingstag@lps.ens.fr

Le but de l'étude, inspirée par le procédé "float" de fabrication du verre plat [1], est de décrire l'apparition et l'évolution de la position des interfaces d'une nappe visqueuse flottante ou tombante. En particulier, on étudie la stabilité de la nappe et les phénomènes de flambage visqueux dans différentes configurations et sous différents types de déformation (étirement, compression, cisaillement).

Dans une première partie, un modèle de nappe visqueuse est développé sous l'hypothèse d'une nappe de faible épaisseur. Cette étude s'appuie sur les travaux de P. D. Howell [2] et de N. Ribe [3], [4]. Par rapport au modèle de Howell, on ajoute la prise en compte de forces (volumiques et surfaciques) s'appliquant sur la nappe. Le modèle décrit des forces dans le cadre le plus général, c'est à dire de direction quelconque et de dépendance spatiale quelconque. Par la suite, pour notre étude, nous reviendrons à l'exemple du float où les forces appliquées à la nappe sont les forces de gravité, la présence d'un bain d'étain supportant la nappe de verre et les tensions de surfaces aux deux interfaces. Le modèle ainsi développé se prête à une analyse de stabilité linéaire et non-linéaire. L'obtention des équations d'amplitude dans le régime faiblement non-linéaire renseigne sur l'évolution de l'amplitude de défauts de type ondulation de la nappe.

Un développement récent du modèle est la prise en compte d'une viscosité spatialement variable dans l'épaisseur et le plan de la nappe. Cette prise en compte fait apparaître de nouveaux modes de déformation de la nappe et de nouveaux régimes de croissance.

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

## Références

1. A. PILKINGTON, The Float Glass Process, *Proceedings of the Royal Society of London A.*, **314**, 1-25 (1969).
2. P. D. HOWELL, Models for thin viscous sheets, *Eur. J. Appl. Math.*, **7**, 321-343 (1996).
3. N. M. RIBE, *Bending and stretching of thin viscous sheets J. Fluid Mech.*, **433**, 135-160 (2001).
4. N. M. RIBE, *A general theory for the dynamics of thin viscous sheets J. Fluid Mech.*, **457**, 255-283 (2002).

# Analyse de stabilité d'un modèle multiphase : application à la croissance d'un mélanome

Chatelain<sup>1</sup>, Ciarletta<sup>1</sup> & Ben Amar<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique, École Normale supérieure  
clement.chatelain@lps.ens.fr

Ces dernières années, la théorie des mélanges a été utilisée avec succès pour décrire plusieurs problèmes concernant la croissance de tumeurs [2,1]. Même si les modèles les plus élaborés peuvent être spécifiques du type de tumeur considérée (avasculaire/vasculaire), tous gardent une structure similaire. Nous nous intéressons à la possibilité d'apparition d'instabilités de croissance pour ce type de modèle. Pour cela, nous considérons un modèle simple à deux composants, cellules et liquide interstitiel, présentant les principales caractéristiques des ces modèles. Pour certaines valeurs des paramètres, nous montrons numériquement la possibilité d'instabilités lors d'une croissance radiale ou en front plan. Dans ce dernier cas, une étude analytique de stabilité pour des perturbations dans la limite des courtes et grandes longueurs d'onde indique les paramètres possiblement déstabilisants [3].

Une application importante de ce problème considérée est l'étude des mélanomes. Ceux-ci sont des cancers de la peau apparaissant dans l'épiderme et caractérisés par une prolifération anormale des cellules responsables de la pigmentation, les mélanocytes, au détriment des autres types cellulaires constituant l'épiderme. Ce dérèglement se traduit par un envahissement du tissu sain et par le développement d'une tache visible à la surface de la peau, dont la forme, la taille et la vitesse de développement aident les dermatologistes à en pronostiquer la dangerosité. Des irrégularités de contour et un écart à la symétrie circulaire sont notamment interprétés comme les signes d'une tumeur agressive. Une meilleure compréhension du lien entre croissance tumorale et instabilité de forme pouvant alors aider à améliorer la procédure de pronostic.

## Références

1. H. BYRNE ET L. PREZIOSI, Modelling solid tumor growth using the theory of mixture, *Math. Med. and Biol.*, **20**, 341-366 (2003)
2. S. ASTANIN ET L. PREZIOSI, Multiphase models of tumor growth, *Selected Topics in Cancer Modeling*, Birkhäuser Boston, 1-31 (2008).
3. P. CIARLETTA, L. FORET ET M. BEN AMAR, The radial growth phase of malignant melanoma : multiphase modeling, numerical simulations and linear stability analysis, A paraitre

# Formation spontanée du réseau de veines et oscillations d'épaisseur dans *Physarum polycephalum*

P. Dély<sup>1</sup>, C. Szwarz<sup>1</sup>, S. Bielawski<sup>1</sup>, E. Lacot<sup>2</sup>, O. Hugon<sup>2</sup>, T. Nakagaki<sup>3</sup>

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

(2) : Laboratoire de Spectrométrie Physique (UMR 5588), Université Joseph Fourier de Grenoble, BP. 87, 38402 Saint Martin d'Hères, France

(3) : RIES, Hokkaido university, Sapporo, Japan.

`serge.bielawski@univ-lille1.fr`

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

Nous présentons des résultats expérimentaux sur l'observation directe en fonction du temps par microscopie infrarouge, de la formation des veines à partir du liquide cytoplasmique. Nous présentons également des premiers résultats sur l'observation des oscillations d'épaisseur de *Physarum*, au moyen de technique d'imagerie laser de type LOFI.

La formation du réseau de veines à partir des zones liquides passe par la formation de zones solides (transition sol-gel), due à une réaction de polymérisation réversible des filaments d'actomyosine. Un des objectifs est d'obtenir des données expérimentales qui serviront de base au développement et au test de modèles (de type microfluidique) pour *Physarum*.

## Références

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

# Identification des cycles respiratoires en ventilation non invasive par des modèles globaux

G. Rodrigues, L. A. Aguirre, L. Achour, A. Cuvelier, J.-F. Muir & C. Letellier

<sup>1</sup> CORIA UMR 6614 — Université et INSA de Rouen, BP. 12, 76801 Saint-Etienne du Rouvray cedex

<sup>2</sup> MACSIN Group, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antonio Carlos, Belo Horizonte, Brazil  
giovani@des.cefetmg.br

La modélisation globale désigne les techniques consistant à extraire un jeu d'équations différentielles ou aux différences finies à partir de données expérimentales. Ces modèles peuvent être utilisés pour démontrer la nature chaotique de la dynamique sous-jacente aux données expérimentales. Lorsque le modèle est de nature entrée-sortie, il est possible d'utiliser la modélisation globale pour estimer la nature du couplage qui peut exister entre une variable (l'entrée) et une autre (la sortie). Le modèle alors obtenu peut être utilisé comme un *observateur* pour estimer l'évolution d'une grandeur physique — non mesurée — en fonction d'une quantité mesurée. Une première application a été développée dans le contexte du système cardio-respiratoire afin de prédire l'apparition des apnées du sommeil [1].

Dans ce travail, nous utilisons des modèles entrée-sortie pour l'identification des cycles ventilatoires lors de sessions d'assistance mécanique non-invasive. La ventilation non-invasive consiste à soulager le travail respiratoire et à assurer une meilleure oxygénation du sang des insuffisants respiratoires chroniques par un apport d'air délivré par un ventilateur. En mode spontané, l'apport d'air est déclenché sur les efforts inspiratoires du patient. Malheureusement, ceux-ci ne sont pas toujours suffisants pour assurer un déclenchement correct du ventilateur et le patient inspire sans apport d'air par le ventilateur : on parle alors d'asynchronismes [1,3]. Les modèles entrée-sortie que nous avons obtenus permettent de prédire l'évolution de la pression à partir de celle du débit, deux quantités mesurées couramment au cours de sessions de ventilation. Nous montrons que les modèles obtenus prédisent des montées en pression significatives, même lorsque la variation du débit n'est pas suffisante pour déclencher le ventilateur (la plupart des ventilateurs actuels fonctionnent sur des déclenchement basés sur la mesure du débit). Nos modèles entrée-sortie se révèlent donc plus sensibles que les algorithmes de détection des meilleurs ventilateurs.

## Références

1. L. A. AGUIRRE & A. V. P. SOUZA, Stability analysis of sleep apnea time series using identified models : a case study, *Computers in Biology and Medicine*, **34**, 241–257, 2004.
2. R. RABARIMANANTSOA, *Caractérisation des asynchronismes durant la ventilation non invasive nocturne*, Thèse de l'Université de Rouen, Décembre 2008.
3. L. VIGNAUX, F. VARGAS, J. ROESLER, D. TASSAUX, A. W. THILLE, M. P. KOSSOWSKY, L. BROCHARD & P. JOLLIET, Patient-ventilator asynchrony during non-invasive ventilation for acute respiratory failure : a multicenter study, *Intensive Care Medicine*, **35**, 840-846, 2009.

# Robustesse des horloges circadiennes aux fluctuations d'éclairement : le cas du picoeucaryote *Ostreococcus*

Quentin Thommen<sup>1,2,3</sup>, Pierre-Emmanuel Morant<sup>1,2,3</sup>, Florence Corellou<sup>4,5</sup>, François-Yves Bouget<sup>4,5</sup>, & Marc Lefranc<sup>1,2,3</sup>

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

<sup>2</sup> Université Lille 1, Institut de Recherche Interdisciplinaire, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>3</sup> CNRS, UMR 8523, F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

<sup>4</sup> Université Pierre and Marie Curie Paris 06, Laboratoire d'Océanographie Microbienne, Observatoire Océanologique, F-66651 Banyuls/Mer, France

<sup>5</sup> Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire d'Océanographie Microbienne, Observatoire Océanologique, F-66651 Banyuls/Mer, France

quentin.thommen@univ-lille1.fr

Les horloges circadiennes, présentes chez la plupart des organismes vivants, leurs permettent d'anticiper les changements de leur environnement, liés par exemple l'alternance jour/nuit, et d'adapter leur comportement en conséquence. Les rouages de cette horloge se trouvent dans des réseaux biochimiques où interagissent gènes et protéines. Les principaux composants des horloges circadiennes de plusieurs organismes (*Arabidopsis*, *Neurospora*, *Drosophila* ...) ont pu être identifiés ainsi que leurs interactions [1,2]. La synchronisation nécessaire des horloges sur le cycle jour/nuit se fait principalement par un couplage paramétrique (par exemple, par un taux de dégradation protéique dépendant de l'éclairement). Or, l'intensité lumineuse perçue en conditions naturelles présente de grandes fluctuations, induisant un parasitage potentiel de l'horloge.

Nous présentons les résultats de modélisation pour l'horloge circadienne de l'algue verte unicellulaire *Ostreococcus tauri*, dont deux acteurs centraux ont été récemment identifiés [3]. En particulier, nous montrons qu'un modèle minimal permet de reproduire, au delà de toute espérance, les données expérimentales de l'horloge entraînée par un cycle jour/nuit artificiel. Fait remarquable, le meilleur ajustement des données est obtenu pour un forçage nul, en l'absence de couplage entre l'oscillateur et l'éclairement [4].

Ceci suggère que le couplage à la lumière est confiné dans des intervalles de temps spécifiques et n'a aucun effet lorsque l'oscillateur est entraîné en régime permanent par le cycle diurne. Nous montrons qu'il est effectivement possible de créer des profils de modulation paramétrique ne laissant aucune signature sur les profils temporels des acteurs de l'horloge lorsque celle-ci est en phase avec le cycle jour/nuit (« est à l'heure »), mais permettant néanmoins une synchronisation efficace de l'horloge [4].

Cette propriété intrigante reflète probablement une stratégie visant à minimiser l'impact des fluctuations d'intensité de la lumière du jour sur l'oscillateur circadien, un type de perturbation qui a rarement été pris en compte pour évaluer la robustesse des horloges circadiennes [4].

## Références

1. J.C. Dunlap. Molecular bases for circadian clocks. *Cell*, **96** 271 (1999).
2. M.W. Young and S. Kay. Time zones : a comparative genetics of circadian clocks. *NATURE GENETICS*, **2** 702 (2001).
3. Corellou F, Schwartz C, Motta JP, Djouani-Tahri EB, Sanchez F, et al. Clocks in the green lineage : comparative functional analysis of the circadian architecture in the picoeukaryote *ostreococcus*. *Plant Cell*, **21** 3436 (2009).
4. Q. Thommen, P.-E. Morant, F. Corellou, F.-Y. Bouget and M. Lefranc, « Robustness of circadian clocks to daylight fluctuations : hints from the picoeukaryote *Ostreococcus tauri* », soumis à PLoS Computational Biology.

# Pluie de solitons dans un laser à fibre

S.Chouli<sup>1</sup> & Ph.Grelu<sup>2</sup>

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne UMR 5209 CNRS, Université de Bourgogne, 21078 Dijon, France

Souad.Chouli@u-bourgogne.fr

L'étude des solitons dissipatifs dans un laser à blocage de modes présente une dynamique riche et complexe, en particulier pour les régimes multi-impulsionnels. Les premiers travaux théoriques [1,2] et expérimentaux portaient sur la dynamique d'un petit nombre de solitons en interaction, par exemple les états liés stables, "molécules de solitons" [3] Les collisions des solitons [4,5], les vibrations de paires de solitons [6,7]. Avec plusieurs dizaines ou centaines de solitons en interaction, des comportements collectifs complexes se sont manifestés [8,9,10], comme la dynamique révélée dans cette étude proposée [11]. Nous avons repéré cette dynamique dans une gamme de paramètres de cavité où des impulsions solitons coexistent avec un fond quasi-continu dans la cavité. Dans le cas présent, un grand nombre de composants quasi-continues produisent des fluctuations du fond continu. Quand le niveau du fond est suffisant, des solitons isolés peuvent surgir spontanément de ses fluctuations, ils dérivent à une vitesse presque constante jusqu'à ce qu'ils rejoignent la phase condensée. Cette phase condensée se compose de plusieurs solitons liés et se propage à l'intérieur de la cavité. Nous avons nommé ce processus "pluie de soliton". Il peut être indéfiniment reproduit d'une façon quasi-stationnaire. Le nombre de solitons qui forme la pluie de soliton ainsi que leur vitesse de dérive, peuvent être ajustés en fonction des paramètres de cavité tel que la puissance de pompage et la polarisation. Il est aussi possible de contrôler le déclenchement de la pluie de soliton via l'injection d'un laser cw externe.

## Références

1. N.AKHMEDIEV,A.ANKIEWICZ, and J.M.SOTO-CRESPO,"Multisoliton of the Complex Ginzburg-Landau Equation", *Phys.Rev.Lett* , **79**, 4046-4051, (1997).
2. N.AKHMEDIEV,A.ANKIEWICZ,and J.M.SOTO-CRESPO, "Stable soliton pairs in optical transmission lines and fiber lasers", *JOSA B* , **15** (1), 515, (1998).
3. PH. GRELU,J.M.SOTO-CRESPO, "Temporal soliton molecules in mode-locked lasers : Collisions,Pulsations and Vibrations",*In Dissipative solitons : from optics to biology and medicine.*, N.Akhmediev and A.Ankiewicz, eds. (Springer-Verlag, Berlin,2008).
4. J. M. SOTO-CRESPO,M. GRAPINET, Ph. Grelu, and N. Akhmediev, "Bifurcations and multiple-period soliton pulsations in a passively mode-locked fiber laser",*Phys.Rev.E Stat.Nolin.Soft Matter Phys* **70**(6), 066612, (2004).
5. PH.GRELU, and, N.Akhmediev, "Group interactions of dissipative solitons in a laser cavity : the case of 2+1", *Opt.Express* **12**(14), 3184-3189 ,(2004)
6. M.OLIVIER, V.Roy, M.Piché, and F.Babin, "Pulse collisions in the stretched-pulse fiber laser", *Opt Lett* **29**(13),1461-1463,(2004)
7. M.GRAPINET and Ph.Grelu, "Vibrating solitons pairs in a mode-locked laser cavity", *Opt Lett* **31**(14), 2115-2117 ,(2006)
8. J.M.SOTO-CRESPO,Ph.Grelu, N.Akhmediev, and N.Devine, "Soliton complexes in dissipative systems :Vibrating,Shaking and Mixed soliton pairs", *Phys.Rev.E Stat.Nolin.Soft Matter Phys*, **75**(1), 016613, (2007).
9. A.HABOUCHA,H.LEBLOND,M.SALH,A.KOMAROV,and F.SANCHEZ, " Analysis of soliton pattern formation in passively mode -locked of fiber lasers" *Phys.Rev.A* **78**(4), 043806, (2008)
10. F AMRANI,A.HABOUCHA,M.SALHI,H.LEBLON,A.KOMAROV,andF.SANCHEZ, "Dissipative solitons compounds in a fiber laser. Analogy with the states of matter", *Appl.Phys.B* (2009)
11. S.CHOULI and Ph. Grelu, " Rains of solitons in a fiber laser" *Opt.Express*, **17**,(14), 11776-11781, (2009)

# Effet de « Pulse-splitting » dans un laser à électrons libres

M. Labat<sup>1</sup>, N. Joly<sup>2</sup>, S. Bielawski<sup>3</sup>, C. Sz waj<sup>3</sup>, C. Bruni<sup>4</sup>, & M.E. Couprie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91192 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> University of Erlangen-Nürnberg, Günther-Scharowsky str.1/bau 24, D-91059, Allemagne

<sup>3</sup> Laboratoire PhLAM, UMR CNRS 8523, CERLA, Université de Lille 1, F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

<sup>4</sup> LAL, Université Paris-Sud 11, UMR 8607, bâtiment 200, 91898 Orsay Cedex, France

marie.labat@synchrotron-soleil.fr

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

Les besoins actuels en terme de sources de courtes longueurs d'onde  $\lambda_R$  tendent à réduire fortement  $S_e$ . Or, pour  $S_e \ll 1$ , le LEL entre dans un régime où l'impulsion injectée se scinde en deux sous-impulsions. Ce régime spatio-temporel complexe affecte fortement la cohérence temporelle et spectrale du profil de la radiation émise.

Nous avons étudié ce régime particulier à l'aide d'un modèle microscopique à 1D [1] tenant compte de l'interaction de chaque électron du paquet avec l'onde lumineuse et de la propagation de l'onde elle-même le long de l'onduleur et en fonction du temps. Nous présentons ici les évolutions de l'intensité de l'impulsion injectée et de l'espace des phases des électrons, en les comparant au cas du régime de superradiance. Dans le cas  $S_e \ll 1$ , nous verrons que l'évolution de l'impulsion injectée en forme de fourche qui caractérise ce régime, résulte de la saturation non homogène du gain. La forme des ailes de l'impulsion injectée détermine la forme des deux sous-impulsions et leur évolution le long de la distribution électronique [2]. Par ailleurs au cours de cette étude, nous avons pu constater l'influence du chirp linéaire de l'impulsion initiale. Nous montrons ici, que selon son signe, il est possible d'accentuer le phénomène de scission ou bien de l'éliminer complètement ; le système évolue dans ce cas vers un régime de superradiance.

## Références

1. W. B. Colson, Phys. Lett. A 59, 187 (1976) ; R. Bonifacio *et al.*, Opt. Commun. 50, 373 (1984).
2. M. Labat *et al.*, Phys. Rev. Lett. 103, 264801 (2009).

# Générateur de chaos opto-électronique à double retard pour les télécommunications optiques sécurisées à haut débits

Mourad Nourine, Laurent Larger, Yanne Kouomou Chembo, Kirill Volyanskiy, & Michael Peil

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

`mourad.nourine@univ-fcomte.fr`

Depuis que Pecora et Carroll [1] ont réussi à démontrer la possibilité de synchronisation du chaos déterministe, les travaux sur la cryptographie physique par chaos n'ont cessé de se développer, en particulier dans le domaine des télécommunications optiques [5] : améliorations des systèmes pour augmenter la qualité et le débit de transmission, mais aussi diversifications des architectures de génération de chaos afin d'en augmenter la complexité, et donc la sécurité. La qualité de la transmission est liée à la qualité de la synchronisation entre chaos. Dans la configuration des systèmes auto-synchronisants, cette qualité de synchronisation dépend fortement du degré d'appariement entre les éléments "clé" (secrets) du récepteur et de l'émetteur. De manière antagoniste, la sécurité dépend de la complexité des transformations dynamiques qui mènent au chaos ; cette complexité rend cependant l'opération de synchronisation plus délicate d'un point de vue expérimental.

Le système dynamique étudié pour la génération de chaos appartient à la catégorie des systèmes d'Ikeda [3]. Il est construit à l'aide d'un composant électro-optique spécifique réalisant une non linéarité bi-dimensionnelle, adapté aux télécommunications haut débits. Ce composant est un interféromètre à ondes multiples, réalisé en optique intégré (LiNbO<sub>3</sub>), et disposant de 2 électrodes de modulation indépendantes : un modulateur QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Le but de cette architecture est d'augmenter la complexité[4] du chaos généré, sur le principe d'une dynamique non linéaire à double retard.

Nous présentons les premières simulations numériques d'une architecture émetteur-récepteur, et de ses performances en terme de synchronisation. Le codage et décodage d'une information binaire est analysé pour ce type d'architecture, avec laquelle nous espérons pouvoir atteindre des débits d'au moins 3 Gbit/s.

## Références

1. L. M. PECORA, AND T. L. CARROLL, Synchronization in chaotic systems, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(8), 821–824 (1990).
2. L. LARGER, J. P. GEODDGEBUER, AND V. UDALTSOV, Ikeda-based nonlinear delayed dynamics for application to secure optical transmission systems using chaos, *C. R. Physique*, **5**, 669-681 (2004).
3. K. IKEDA, Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system, *Optics Communications*, **30**, 257-261 (1979).
4. M. NOURINE, M. PEIL, AND L. LARGER, Chaos généré par une non linéarité 2D et une dynamique à retard, *C. R. 12èmes Rencontres du Non Linéaire*, 149-154 (2009).

# Cryptage par chaos haut-débit sur réseau optique installé

Laurent Larger, Roman Lavrov & Maxime Jacquot

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

laurent.larger@univ-fcomte.fr

Nous présentons les derniers résultats d'un domaine d'application particulier des comportements chaotiques, celui de la cryptographie par chaos. Depuis la démonstration du principe de synchronisation entre chaos en 1990[1], les télécommunications optiques sont apparus dans ce contexte comme le mode de transmission présentant le plus de potentiel, tant en termes applicatifs qu'en termes de performances[2]. Cette nouvelle approche de la sécurisation des données intervient au niveau de la couche physique des systèmes de transmission, en noyant les signaux intelligibles (typiquement les successions de 0 et de 1 des données binaires), dans un comportement chaotique contrôlé, et surtout synchronisable au niveau d'un récepteur autorisé. L'optique, outre ses formidables propriétés largement exploitées dans les réseaux fibrés actuels, offre aussi l'avantage de permettre une réalisation relativement aisée de systèmes dynamiques à comportements chaotiques de grande complexité, grâce au principe des dynamiques à retard. Après avoir exploré plusieurs pistes de réalisation pratique de systèmes de communications sécurisés par chaos [3,4], nos derniers résultats ont permis de mettre au point une nouvelle architecture[6] avec laquelle des performances inégalées ont pu être atteintes. Une transmission de données binaires masquées par un onde lumineuse dont la phase optique présente des fluctuations chaotiques ultra-rapides, a pu être réalisées jusqu'à 10Gb/s, non seulement en laboratoire, mais également sur des réseaux à fibre optique installés. Des tests sur le réseau "Lumière" de la ville de Besançon, et sur le réseau métropolitain d'Athènes ont été accomplis avec succès.

Au delà de l'efficacité obtenue dans le cadre des communications optiques par chaos, l'architectures présentées de chaos en phase électro-optique semble également être un excellent candidat pour d'autres applications, comme la génération de séquences aléatoires à très haut débit[7], ou encore pour la mise en œuvre de calculateurs analogiques d'un nouveau type, le "Reservoir Computing" aussi appelé "Liquid State Machine" [8].

## Références

1. L. M. PECORA, T. L. CARROLL, Synchronization in chaotic systems, *Phys. Rev. Lett.*, **64** (8), 821–824 (1990).
2. G. VANWIGGEREN AND R. ROY, Communicating with chaotic lasers, *Science*, **279**(3), 1198–1200 (1998).
3. J. P. GOEDGEBUER, L. LARGER, AND H. PORTE,, Optical cryptosystem based on synchronization of hyperchaos generated by a delayed feedback tunable laserdiode, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 2249–225 (1998).
4. A. ARGYRIS *et al.*, Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber-optic links, *Nature*, **438**, 343–346 (2005).
5. L. LARGER, J.-P. GORDEGBUER AND V.S UDALSOV, Ikeda-based nonlinear delayed dynamics for application to secure optical transmission systems using chaos, *C.R. de Physique 4* **5** (6), 669–681 (2004).
6. R. LAVROV *et al.*, Electro-optic delay oscillator with non-local non linearity : optical phase dynamics, chaos, and synchronization, *Phys. Rev. E*, **80**, 026207 (2009).
7. A. UCHIDA *et al.*, Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers, *Nature Photonics*, **2**, 728–732 (2008).
8. W. MAASS, TH. NATSCHLÄGER AND H. MARKAM, Real-Time Computing Without Stable States : A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations *Neural Comput.*, **14** (11), 2531–2560 (2002).

# Comment Otto Rössler se cache derrière une manière inhabituelle de rédiger

Christophe Letellier

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

Otto Rössler est connu pour avoir publié l'un des deux systèmes les plus utilisés dans le développement de techniques d'analyse des systèmes chaotiques. Pour la plupart, la contribution d'Otto Rössler se limite ainsi à un jeu de trois équations différentielles ordinaires publié en 1976 et produisant un attracteur chaotique très simple, résultant d'un étirement et d'un repliement [?]. Plus techniquement, il s'agit de la suspension la plus simple qui soit du fer-à-cheval de Smale. La seconde contribution qui est ensuite mentionnée assez souvent est celle concernant l'hyperchaos relatif à un jeu de quatre équations différentielles qu'il publia en 1979 [2]. Ensuite, très peu savent que Rössler ne s'est pas limité à ces deux systèmes et les commentaires qui viennent ensuite sont très variés bien que convergeant vers le constat d'une personnalité atypique assez insaisissable.

Ce que nous proposons ici se construit autour d'une relecture du premier article publié par Otto Rössler sur un système chaotique qui n'est pas celui couramment cité [3]. Par une analyse détaillée du contenu de cet article, nous montrons qu'il avait déjà une vision très pointue des concepts qui furent utilisés par la suite pour caractériser les comportements chaotiques, y compris une approche topologique relativement avancée pour le milieu des années 70, approche qui ne sera réellement développée en mathématique en 1983 par Birman et Williams [4,5] et en physique par Mindlin et Gilmore en 1992 [6].

Il est finalement montré qu'en fait Otto Rössler masque volontairement sa compréhension profonde des systèmes dynamiques derrière une écriture très imagée, au vocabulaire bigarré et décalé, s'opposant à une appréhension sérieuse de son travail. Couplé au fait que la majeure partie des articles d'Otto Rössler est publiée dans les *Zeitschrift für Physik*, revue à la diffusion restreinte comparée à celle des *Physics Letters A* dans lesquelles il a publié le « système de Rössler » et le système quadri-dimensionnel hyperchaotique, il est alors aisé de comprendre pourquoi la contribution réelle d'Otto Rössler reste très largement sous-estimée.

*mots-clés : épistémologie, Otto Rössler.*

## Références

1. O. E. RÖSSLER, An equation for continuous chaos, *Physics Letters A*, **57** (5), 397-398, 1976.
2. O. E. RÖSSLER, An equation for hyperchaos, *Physics Letters A*, **71**, 155-157, 1979.
3. O. E. RÖSSLER, Chaotic behavior in simple reaction systems, *Zeitschrift für Naturforschung A*, **31**, 259-264, 1976.
4. J. S. BIRMAN & R. F. WILLIAMS, Knotted periodic orbits in dynamical systems I : Lorenz's equations, *Topology*, **22** (1), 47-82, 1983.
5. J. S. BIRMAN & R. F. WILLIAMS, Knotted periodic orbits in dynamical systems II : Knot holders for fibered knots, *Contemporary Mathematics*, **20**, 1-60, 1983.
6. G. B. MINDLIN & R. GILMORE. Topological analysis and synthesis of chaotic time series, *Physica D*, **58**, 229-242, 1992.

# ‘Compressive Sensing’ en utilisant le Chaos

L. Yu<sup>1,2,3</sup>, J-P Barbot<sup>2,3</sup> G. Zheng<sup>3</sup> &and H. Sun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Signal Processing Laboratory, Whuan University, China

<sup>2</sup> ECS-EA 3649, ENSEA, 6 Avenue du Ponceau, 95014, Cergy-Pontoise

<sup>3</sup> EPI-ALIEN INRIA

barbot@ensea.fr

La méthode dite de l’acquisition comprimée plus connue sous le vocable anglo-saxon de ‘Compressive Sensing’ est une nouvelle méthode qui permet de capturer et de retrouver par la suite un signal échantillonné à des fréquences sous Nyquist. Afin de garantir la reconstitution parfaite du signal cette méthode requière la construction d’une matrice dite ‘sensing’ matrice possédant des propriétés d’inversion particulières. Ici, une construction de cette matrice à l’aide de séquences issues d’un système chaotique est proposée et il est prouvé que cette matrice vérifie avec une écrasante probabilité (supérieure à une construction aléatoire de type Gaussien) les propriétés de reconstruction requises.

## Références

1. R. Baraniuk, ‘Compressing sensing’ in proc. 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems CISS 2008.
2. E.J Candès, ‘The restricted isometry Property and its implications for compressed sensing’ *Compte Rendus de l’Academie des Sciences, Serie I*, Vol 346, no 9-10 Mai 2008.
3. etc

# Formes normales réduites non linéaires d'observabilité

Driss Boutat<sup>1</sup> & Gang Zheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ENSI de Bourges 10, Boulevard Lahitolle 18020 Bourges Cedex

<sup>2</sup> INRIA Lille

`driss.boutat@ensi-bourges.fr`

Dans ce papier on donne une nouvelle forme normale d'observabilité non linéaire adaptée à l'observateur réduit ([2]). Puis, on expose les conditions géométriques nécessaires et suffisantes qui permettent de dire si un système non linéaire multi sorties peut se mettre, à un changement de coordonnées près, sous une telle forme normale. D'une part, Ces formes normales permettent d'éviter la redondance des mesures et d'autre part, elles élargissent la classe de systèmes dynamiques non linéaires qui admettent un observateur robuste ([1],[3], [4], [5]).

## Références

1. M. Fliess and I. Kupka, "A finiteness criterion for nonlinear input-output differential systems", *SIAM Journal of Control and Optimization* 21(5), 721–728, 1983.
2. D.G. Leunberger, An introduction to the observer, *IEEE Transactions on Automatica Control*, Vol 16, 1971.
3. A.J. Krener et A. Isidori, *Linearization by output injection and nonlinear observers*, *Systems. Control Lett.*, 3, 1983.
4. D. Boutat and K. Busawon, "Extended Nonlinear Observable Canonical Form for Multi-Output Dynamical Systems", *Proceedings of the IEEE CDC*, 2009.
5. D. Boutat, A. Benali, H. Hammouri and K. Busawon "New algorithm for observer error linearization with a diffeomorphism on the outputs", *Automatica*, 2009.

# Les courbes singulières : invariants unidimensionnels des systèmes dynamiques

Jean-Marc Ginoux<sup>1</sup>, Robert Gilmore<sup>2</sup>, Timothy Jones<sup>2</sup>, Ubiratan Freitas<sup>3</sup> & Christophe Letellier<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Physics Department, Drexel University, Philadelphia, Pennsylvania 19104, USA

<sup>3</sup> CORIA UMR 6614 — Université de Rouen, BP 12, F-76801 Saint-Etienne du Rouvray cedex, France  
ginoux@univ-tln.fr

Les courbes singulières sont des invariants unidimensionnels qui sont introduits de manière à décrire les contraintes d'évolution des courbes intégrales d'un système dynamique de dimension  $n$ . Ces courbes qui fournissent plus d'information sur le système que les invariants de dimension nulle (les points fixes) sont appelées "singulières" parce qu'elles passent par les points fixes. Elles peuvent être définies de deux manières différentes mais équivalentes, l'une issue de la théorie des systèmes dynamiques, l'autre issue de la géométrie différentielle. Ce travail a pour but de décrire les deux méthodes de calcul de ces courbes et d'illustrer leurs propriétés en montrant les courbes singulières de plusieurs systèmes dynamiques de type Rössler et Lorenz de dimensions 3 et 4.

## Références

1. R. GILMORE & M. LEFRANC, *The topology of chaos*, Wiley, 2002.
2. J. M. Ginoux and B. Rossetto, Slow manifold of a neuronal bursting model, in : *Understanding Complex Systems*, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006.
3. J. M. GINOUX, B. ROSSETTO & L. O. CHUA, Slow Invariant Manifolds as Curvature of the flow of Dynamical Systems, *International Journal of Bifurcation & Chaos*, **11** (18), 3409-3430 (2008).
4. J. M. GINOUX, *Differential Geometry Applied to Dynamical Systems*, World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A, **66**, Singapore : World Scientific, (2009).
5. H. GLUCK, Higher curvatures of curves in Euclidean space, *American Mathematics Monthly*, **73**, 699-704 (1966).
6. H. GLUCK, Higher curvatures of curves in Euclidean space II, *American Mathematics Monthly*, **74**, 1049-1056 (1967).
7. E. N. LORENZ, Deterministic nonperiodic flow, *Journal of Atmospheric Science*, **20**, 130-141 (1963).
8. E. N. LORENZ, Irregularity : a fundamental property of the atmosphere, *Tellus A*, **36**, 98-110 (1984).
9. O. E. RÖSSLER, An equation for continuous chaos, *Physics Letters A*, **57** (5), 397-398 (1976).
10. O. E. RÖSSLER, An equation for hyperchaos, *Physics Letters A*, **31**, 155-157 (1979).

# Deux flots chaotiques minimaux avec des symétries différentes gouvernés par le même ordre unimodal

Christophe Letellier<sup>1</sup> & Jean-Marc Malasoma<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CORIA UMR 6614 — Université et INSA de Rouen, BP. 12, 76801 Saint-Etienne du Rouvray cedex

<sup>2</sup> DGCB FRE 3237— Université de Lyon, ENTPE, rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin cedex, France

Christophe.Letellier@coria.fr et Jean-Marc.Malasoma@entpe.fr

Les symétries sont souvent présentes dans les systèmes dynamiques, à l’instar du système de Lorenz qui présente une symétrie de rotation  $\mathcal{R}_z(\pi)$ , c’est-à-dire une rotation de  $\pm\pi$  autour de l’axe  $Oz$ . Par ailleurs, l’identification des systèmes les plus simples non équivalents sous un changement de variables constitue un sujet de recherche assez suivi [1,2]. Ses systèmes sont intéressants dans la mesure où leur simplicité algébrique permet d’envisager des études analytiques qui restent généralement hors de portée pour des systèmes plus compliqués. Dans cette optique, l’un d’entre nous a identifié deux systèmes chaotiques minimaux pourvus de propriétés de symétrie différentes, soient respectivement une rotation  $\mathcal{R}_z(\pi)$  et une symétrie centrale [2].

Nous montrons que leurs systèmes images — correspondants sans symétrie des systèmes originaux — respectifs correspondent sont tous deux caractérisés par la même topologie et qu’ils sont gouvernés par le même ordre unimodal, à savoir, celui associé à la fonction logistique comme cela est le cas pour le système de Burke et Shaw [3]. Par ailleurs, il est montré que deux solutions exactes de ces systèmes pilotent la crise de frontière conduisant à la destruction de l’attracteur chaotique. Cette crise survient lorsque la dynamique symbolique est complète, c’est-à-dire lorsque l’ensemble des orbites périodiques pouvant être décrit par la dynamique symbolique est réalisé.

## Références

1. J. C. Sprott & S. J. Linz. Algebraically simple chaotic flows, *International Journal of Chaos Theory & Applications*, **5** (2), 3-22, 2000.
2. J.-M. Malasoma. What is the simplest dissipative chaotic jerk equation which is parity invariant?, *Physics Letters A*, **264**, 383-389, 2000.
3. C. Letellier, P. Dutertre, J. Reizner, G. Gouesbet. Evolution of multimodal map induced by an equivariant vector field, *Journal of Physics A*, **29**, 5359-5373, 1996.

# Détection de non-linéarité par titrage du bruit : encore une technique dépendant du choix de l'observable.

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

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

L'identification d'une **dynamique chaotique** à partir de données expérimentales constitue un véritable défi, principalement parce qu'elle requiert la preuve formelle d'un déterminisme sous-jacent. Même si des modèles déterministes ont déjà été obtenus à partir de données expérimentales [1,2], il est rare de pouvoir fournir cette preuve de façon satisfaisante dans le cas de systèmes biologiques [3,4].

Toutefois, un aspect plus simple à aborder est la détection de la présence ou non d'un **processus non-linéaire** gouvernant la dynamique. La technique dite de « titrage du bruit » (*noise titration technique*) développée par Mauricio Barahona et Chi-Sang Poon [5,6], et basée sur la comparaison entre les prédictions à un pas en avant d'un modèle linéaire et celles issues d'un modèle non-linéaire, est relativement efficace, à condition qu'elle soit utilisée dans de bonnes conditions, c'est-à-dire à partir de données correctement enregistrées (fréquence d'échantillonnage adaptée, par exemple) et avec des modèles qui permettent une comparaison non biaisée (par de grandes différences dans leurs structures), d'un enregistrement à l'autre.

En procédant à l'analyse de la dynamique sous-jacente au système de Rössler [7] par titrage du bruit, nous montrons qu'il existe un lien entre les difficultés de détection de la composante non-linéaire d'une dynamique et la notion d'**observabilité** [8] dépendant de la variable choisie pour l'analyse. Enfin, nous montrons qu'il existe des conditions d'échantillonnage des données et des valeurs optimales des paramètres de structure des modèles prérequis à la technique de titrage du bruit. Il est également montré que le titrage du bruit ne peut pas être utilisé comme une estimation absolue du « degré de chaoticité » comme cela avait été annoncé initialement [6].

*mots-clés : déterminisme, détection de non-linéarité, observabilité.*

## Références

1. J. MAQUET, C. LETELLIER & L. A. AGUIRRE, Global models from the Canadian Lynx cycles as a first evidence for chaos in real ecosystems, *Journal of Mathematical Biology*, **55** (1), 21-39, 2007.
2. L. A. AGUIRRE, C. LETELLIER & J. MAQUET, Forecasting the time series of sunspot numbers, *Solar Physics*, **241**, 103, 2008.
3. U. S. FREITAS, E. ROULIN, J.-F. MUIR & C. LETELLIER, Identifying determinism underlying heart rate : the right task?, *Chaos*, **19**, 028505, 2009.
4. U. S. FREITAS, E. ROULIN & C. LETELLIER, Failure for distinguishing colored noise from chaos by the "Noise titration" technique, *Physical Review E.*, **79**, 035201, 2009.
5. M. BARAHONA & C.-S. POON, Detection of nonlinear dynamics in short noisy time series, *Nature*, **381**, 215-217, 1996.
6. C.-S. POON & M. BARAHONA, Titration of chaos with added noise, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, **98**, 7107-7112, 2001.
7. O. E. RÖSSLER, An equation for Continuous Chaos, *Physics Letters A*, **57** (5), 397-398, 1976.
8. C. LETELLIER, J. MAQUET, L. LE SCHELLER, G. GOUESBET & L. A. AGUIRRE, On the non-equivalence of observables in phase space reconstructions from recorded time series, *Journal of Physics A*, **31**, 7913-7927, 1998.

# Diffusion et adsorption en milieu poreux : profil expérimental et modélisation

Christophe Josserand<sup>1,2</sup>, Jean-Marc Bauchire<sup>3</sup>, Pascal Brault<sup>3</sup> & François James<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert F-75005 Paris, France

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

<sup>3</sup> Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés, UMR6606 CNRS-Université d'Orléans BP 6744, 45067 Orléans Cedex 2, France

<sup>4</sup> Laboratoire de Mathématiques et Applications, Physique Mathématique d'Orléans, UMR6628

CNRS-Université d'Orléans, BP 6759, 45067 Orléans Cedex 2, France

[christophe.josserand@upmc.fr](mailto:christophe.josserand@upmc.fr)

La projection d'atomes de platine sur un substrat poreux de carbone par pulvérisation plasma permet notamment de réaliser couches minces catalytiques de grande qualité. La connaissance et le contrôle de la densité de platine adsorbé dans le milieu poreux au cours du temps  $y$  sont donc cruciales. A partir des mesures expérimentales donnant le profil de densité d'atomes adsorbés en fonction de la profondeur dans le poreux au cours du temps, nous montrons que le processus de diffusion dans le poreux est super-diffusif. De plus, nous retrouvons ces résultats expérimentaux à partir d'un modèle classique de diffusion fractale dans laquelle les coefficients dépendent du temps afin de tenir compte de l'adsorption. Finalement, nous proposons un modèle plus complet d'adsorption-diffusion en milieu poreux qui permet d'interpréter ces résultats.

## Références

P. Brault, C. Josserand, J.-M. Bauchire, A. Caillard, C. Charles and R.W. Boswell, "Anomalous diffusion mediated by atom deposition into a porous substrate", *Phys. Rev. Lett.* **102**, 045901 (2009).

# Fusion bidimensionnelle d'un cristal de pics de ferrofluide

François Boyer<sup>1</sup> & Eric Falcon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut Universitaire des Systèmes Thermique Industriels (IUSTI), Université de Provence, CNRS (UMR 6595), 5 rue Enrico Fermi 13453 Marseille cedex 13, France

<sup>2</sup> Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC), Université Paris-Diderot, CNRS (UMR7057), 10 rue A. Domon et L. Duquet 75013 Paris, France

francois.boyer@polytech.univ-mrs.fr ; eric.falcon@univ-paris-diderot.fr

La transition de phases solide – liquide est l'un des problèmes majeurs de la physique de la matière condensée depuis plus d'un siècle. La fusion des solides tridimensionnels est relativement bien comprise, grâce notamment au succès prédictif du critère de Lindemann [1]. La fusion pour les systèmes bidimensionnels (2D) est, pour sa part, un phénomène dont les mécanismes font encore aujourd'hui débat. Dans ce contexte, l'étude expérimentale de la fusion d'un analogue macroscopique du réseau cristallin 2D est d'un intérêt primordial.

Nous avons étudié la transition entre une phase ordonnée (solide) et une phase désordonnée (liquide) d'un réseau de pics à la surface d'un ferrofluide soumis à des vibrations horizontales périodiques. La surface libre d'un ferrofluide se couvre de pics, organisés en un réseau régulier, sous l'action d'un champ magnétique [2]. Nous montrons que la transition de fusion de ce réseau a lieu pour un déplacement critique des pics en bon accord avec le critère de Lindemann, pour une large gamme de longueurs d'ondes du réseau et pour deux topologies différentes (hexagonale et carrée). Une phase intermédiaire, dite hexatique, entre les phases liquide et solide est aussi observée et est caractérisée par les fonctions de corrélations structurales via une méthode optique. Le seuil de la transition et les changements structuraux lors de la transition sont trouvés en bon accord avec les prédictions théoriques de la fusion 2D des systèmes à l'équilibre, et notamment avec la théorie KTHNY (Kosterlitz, Thouless, Halperin, Nelson et Young) [3] dont l'universalité est controversée.

Bien que notre système soit dissipatif et hors d'équilibre, avec des interactions ferrohydrodynamiques complexes, il montre de fortes similarités avec la fusion 2D à l'équilibre de la physique du solide. Cette analogie peut alors servir de base à l'élaboration d'une théorie des transitions de phase hors d'équilibre en physique statistique.

Ces travaux ont été publiés dans *Physical Review Letters* [4].

## Références

1. F. A. Lindemann, *Phys. Z* **11**, 609 (1910) ; J. J. Gilvarry, *Phys. Rev.* **102**, 308 (1956).
2. R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics* (Dover, New York, 1997).
3. J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, *J. Phys. C* **5**, L124 (1972) ; B. I. Halperin and D. R. Nelson, *Phys. Rev. Lett.* **41**, 121 (1978) ; A. P. Young, *Phys. Rev. B* **19**, 1855 (1979).
4. F. Boyer and E. Falcon, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 144501 (2009).

# Propagation d'un front de fracture en présence d'un désordre contrôlé

J. Chopin<sup>1</sup>, A. Prévost<sup>1</sup>, A. Boudaoud<sup>1</sup>, & M. Adda-Bedia<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond 75231 Paris Cedex 05  
chopin@lps.ens.fr

Les interfaces (fronts de mouillage, fissures, parois de domaines magnétiques, etc...) qui se propagent dans un milieu hétérogène présentent des propriétés morphologiques et dynamiques dont la compréhension reste encore imparfaite. En particulier, dans le domaine de la fracture, le débat sur la nature des fluctuations dans le plan de la fissure reste entier. Les difficultés proviennent en partie de la grande sensibilité des résultats expérimentaux avec les méthodes d'analyse et d'un mauvais contrôle du désordre présent dans le système.

Pour tenter de répondre à ce problème, nous avons monté une expérience de pelage où un front de fracture se propage à l'interface d'une lame de verre et d'un élastomère de PDMS. Les hétérogénéités chimiques, préalablement imprimées à la surface du verre, modulent spatialement l'énergie de fracture du matériau. Il s'agit en pratique d'une répartition aléatoire de disques de  $20\mu\text{m}$  de diamètre où la surface de verre affleure et où le front est piégé. Le reste de la lame est couverte d'une couche nanométrique de chrome. L'utilisation des techniques de lithographie optique permet un très grand contrôle sur le désordre imprimé.

Après avoir caractérisé la rhéologie du front de fracture et son comportement vis-à-vis d'un défaut unique, nous avons étudié avec précision les propriétés statistiques du front, en particulier ses corrélations spatio-temporelles en relation avec le désordre imposé.

## Références

# Synchronisation de bursts dans des réseaux d'oscillateurs

Nathalie Corson<sup>1</sup>, Stefan Balev<sup>2</sup>, & M. A. Aziz-Alaoui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMAH, Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon, BP540, 76058 Le Havre Cedex

<sup>2</sup> LITIS, Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon, BP540, 76058 Le Havre Cedex

nathalie.corson@univ-lehavre.fr

Au sein de nombreux réseaux d'interaction, des phénomènes de synchronisation peuvent être détectés. Il est ainsi fréquent d'étudier le cas de la synchronisation complète, qui signifie que les constituants du réseau ont le même état au même moment. Cependant, dans le cas de réseaux constitués de modèles neuronaux couplés par des fonctions synaptiques non-linéaires, l'apparition de la synchronisation complète impose à la topologie du réseau des conditions très restrictives et biologiquement peu réalistes. Il est donc justifié de s'intéresser à d'autres types de synchronisation, telle que la synchronisation *de bursts*.

Dans ce travail, nous nous intéressons à des oscillateurs de type Hindmarsh-Rose (1), modélisant le fonctionnement d'un neurone, connectés en réseau avec matrice d'adjacence  $\{c_{ij}\}$ . Les neurones sont couplés par des fonctions non-linéaires (2), modélisant les synapses chimiques qui permettent la transmission de l'influx nerveux entre les neurones.

$$\begin{cases} \dot{x}_i = ax_i^2 - x_i^3 + y_i - z_i - \sum_{j=1}^n c_{ij}h(x_i, x_j) \\ \dot{y}_i = (a + \alpha)x_i^2 - y_i \\ \dot{z}_i = \epsilon(bx_i + c - z_i) \end{cases} \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$h(x_i, x_j) = g_{\text{syn}}^{(n)} \frac{(x_i - V)}{1 + \exp(-\lambda(x_j - \Theta))} \quad (2)$$

Le modèle de Hindmarsh-Rose permet de reproduire différents comportements caractéristiques des neurones, tels que l'émission de potentiels d'action ou encore d'oscillations en salves, aussi appelées *bursts*. Le *bursting* correspond à des poussées de potentiel d'action séparées les unes des autres par des périodes lentes. C'est à ce comportement particulier que nous nous intéressons dans ce travail.

On dit qu'un réseau d'oscillateurs couplés présente un phénomène de synchronisation de bursts lorsque les  $n$  oscillateurs du réseau émettent des bursts débutant deux à deux au même moment. Si la synchronisation complète dans un réseau est facile à détecter numériquement, ce n'est pas le cas de la synchronisation de bursts.

Ainsi, dans ce travail, nous proposons un algorithme qui permet de détecter la synchronisation de bursts au sein de différents réseaux. L'algorithme est décomposé en plusieurs phases : détection des spikes, détection des débuts de bursts pour chaque neurone et détection des groupes de bursts associés, pour finalement déterminer si les bursts sont synchronisés. On peut ainsi déterminer les valeurs de forces de couplage  $g_{\text{syn}}^{(n)}$  pour lesquelles ce phénomène apparaît. Cet algorithme est ensuite appliqué à des réseaux de différentes topologies. Nous avons observé par exemple, que dans le cas de topologies en chaîne et en graphe complet, le seuil de synchronisation  $g_{\text{syn}}^{(n)}$  ne dépend pas de la taille du réseau.

# Bifurcations dans l'espace hyperbolique en relation avec un modèle de perception des structures visuelles par le cortex

Pascal Chossat<sup>1</sup> & Olivier Faugeras<sup>2</sup>

<sup>1</sup> laboratoire J-A Dieudonné, Université de Nice Sophia Antipolis, F-06108 Nice Cedex 2

<sup>2</sup> INRIA, 2004, route des Lucioles - BP 93 - F-06902 Sophia Antipolis Cedex

`pascal.chossat@unice.fr`

Il est expérimentalement établi qu'une correspondance existe entre la localisation de petites portions d'image dans le champ visuel et de petits domaines (de l'ordre de  $1 \text{ mm}^2$  chez les primates) à la surface de l'aire nommée V1 dans le cortex visuel. Ces petites portions du cortex visuel sont nommées hypercolonnes. Elles sont composées d'un ensemble de neurones interconnectés (quelques dizaines de milliers). Ces neurones réagissent sélectivement aux propriétés géométriques de l'image locale correspondant à l'hypercolonne : contours, contraste, etc. Nous proposons dans [1] un modèle fonctionnel de ces hypercolonnes basé sur la notion de tenseur de structure, bien connu dans le traitement d'image. Ceci revient à supposer que le potentiel de membrane moyenné  $V$  dans chaque hypercolonne est fonction du tenseur de structure (et du temps). De façon naturelle les équations pour  $V$ , du type Wilson-Cowan (donc non linéaires), sont invariantes par le groupe des isométries de l'espace, noté  $H$ , des tenseurs de structure. Une activité spontanée de l'hypercolonne sera observable si ces équations présentent une bifurcation à partir de l'état de repos. Ceci se traduira par l'apparition d'une structure résultant de la brisure spontanée de l'invariance par le groupe des isométries de  $H$ . L'intérêt de cette observation est qu'elle est susceptible de vérification expérimentale. Cependant la bifurcation de structures dans l'espace hyperbolique (ou dans le plan hyperbolique pour simplifier un peu), est un problème très complexe pour lequel nous n'avons à ce jour que des résultats partiels.

## Références

1. P. Chossat, O. Faugeras. *Hyperbolic Planforms in Relation to Visual Edges and Textures Perception*. PLoS Comput. Biology, Dec. 2009.

# Ondes modulées dans le système de Couette-Taylor soumis à un fort gradient radial de température

Guillerm Raphael, Prigent Arnaud & Mutabazi Innocent

LOMC - FRE 3102, 53 Rue de Prony, 76 058 Le Havre cedex  
arnaud.prigent@univ-lehavre.fr

Nous étudions l'écoulement lié au couplage de la force centrifuge et des effets thermiques dans un système de Couette-Taylor soumis à un fort gradient radial de température [[1,2,3]]. Pour cela, nous avons développé une technique de mesure non-intrusive de la température et de la vitesse basée sur l'utilisation de cristaux liquides thermochromiques [[4,?]]. Elle nous permet de caractériser complètement l'écoulement produit dans un système de Couette-Taylor soumis à un gradient radial de température dont le rapport des rayons et le rapport d'aspect valent respectivement 0,8 et 112. Pour un tel système, les paramètres de contrôle sont le nombre de Grashof  $Gr$  relié au gradient radial de température et le nombre de Taylor  $Ta$ , relié à la vitesse de rotation du cylindre intérieur. Les résultats que nous présentons sont obtenus en imposant une forte valeur du nombre de Grashof et en augmentant progressivement le nombre de Taylor. Pour les faibles valeurs du nombre de Taylor, l'écoulement de base est composé de l'écoulement de Couette circulaire et d'un écoulement vertical correspondant à une cellule convective induite par le gradient radial de température. Au-dessus d'une valeur critique du nombre de Taylor, l'écoulement de base devient instable. Pour les faibles valeurs du nombre de Grashof, il est remplacé par un écoulement de vortex corotatifs inclinés formant un motif propagatif présent en bas du système [[3]]. Pour les grandes valeurs du nombre de Grashof, l'écoulement de base est remplacé par une onde modulée présente sur toute la longueur du système et tournant à la vitesse angulaire moyenne de l'écoulement. Le motif prend alors la forme de paquets d'onde dont nous avons étudié l'enveloppe. Elle peut être modélisée sous la forme  $A(t) = A_{max} \cdot \cosh^{-1}[(t - t_{max})/T_{mod}]$  où  $A_{max}$  est le maximum de l'amplitude d'un paquet,  $t_{max}$  l'instant auquel se trouve ce maximum et  $T_{mod}$  la période de modulation correspondant à la durée d'un paquet.

## Références

1. Snyder, H. A., Karlsson S. K. F. 1964 Experiments on the stability of Couette motion with a radial thermal gradient. *Phys. Fluids* **7** 1696-1706
2. Kuo, J. Y., Ball, K. S. 1997 Taylor- Couette flow with buoyancy : Onset of spiral flow. *Phys. Fluids* **9** 2872-2884
3. Lepiller, V., Goharzadeh, A., Prigent, Mutabazi, I. 2008 Weak temperature gradient effect on the stability of the circular Couette flow *Euro. Phys. J. B.*
4. Akino, N., Kunugi, T., Ueda, M., Kurosawa, A. 1989 Liquid crystal thermometry based on automatic colour evaluation and applications to measure turbulent heat transfer *Transport phenomena in turbulent flows (New York : Hemisphere)* pp. 807-827
5. Hay, J.L., Hollingsworth, D.K. 1998 Calibration of micro-encapsulated liquid crystals using hue angle and a dimensionless temperature *Experimental thermal and fluid science* **18** 251-257

# Contrôle du transport turbulent dû à la dérive $E \times B$ dans les plasmas de fusion.

IZACARD Olivier<sup>1</sup>, CHANDRE Cristel<sup>1</sup>, & CIRAOLO Guido<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CPT, Centre de Physique Théorique - UMR 6207, Campus de Luminy, Case 907, 13288 Marseille Cedex 9.

<sup>2</sup> M2P2, Laboratoire de Mécanique, Modélisation & Procédés Propres, 38 Rue Frédéric Joliot-Curie, 13451 Marseille Cedex 20.

`olivier.izacard@cpt.univ-mrs.fr`

Le principe des tokamaks tels que celui d'ITER réside dans le confinement d'un plasma dans une chambre toroïdale grâce à un champ magnétique intense. Cependant, plusieurs instabilités qui ont pour origine des fluctuations de potentiel électrique ou de densité, ou encore le gradient ou la courbure du champ magnétique, peuvent dégrader le confinement du plasma. Ici nous considérons l'instabilité créée par la vitesse de dérive  $E \times B$  qui est à l'origine du transport turbulent dans la direction radiale (vers les murs de la chambre toroïdale) où  $E$  est le champ électrique (créé par le plasma) et  $B$  est le champ magnétique (dont la principale contribution est fournie par les bobines magnétiques externes). Afin de réduire ce transport (et donc améliorer le confinement et aussi protéger les murs de la chambre), un grand effort interdisciplinaire est effectué pour étudier des méthodes de contrôle.

Le but est de réduire le transport radial en créant une barrière de transport. Dans la volonté de simplifier le problème, nous considérons une géométrie "déroulée" (appelé SLAB) et avec uniquement des fluctuations du champ électrostatique. Le champ magnétique est constant et uniforme. Ceci est une première approximation pour des machines linéaires (comme VINETA de l'IPP, Max-Planck-Institut für Plasma-Physik à Greifswald, Allemagne) qui ont une géométrie plus simple que les tokamaks et permettent l'étude disjointe des différentes instabilités.

Dans ces conditions, nous considérons le potentiel électrostatique contrôlé  $V_c$  suivant :

$$V_c(x, y, t) = V(x + f(y, t), y, t) \tag{1}$$

où  $V$  est le potentiel électrostatique généré par le plasma et  $f(y, t)$  est un terme de contrôle. Les coordonnées  $x$  et  $y$  représentent la position des centre-guides dans le plan transverse au champ magnétique (qui guident les particules chargées dans un champ magnétique intense). Toute la difficulté réside dans la détermination de  $f$  qui permet d'établir la barrière de transport appropriée. Des simulations numériques sont utilisées afin de simuler le mouvement des centre-guides des particules tests (telles que les impuretés). L'effet du terme de contrôle sera observé par les sections de Poincaré des trajectoires des centre-guides et quantifié par le coefficient de diffusion.

# Loi de conservation de la quantité de mouvement gyrocinétique

N. Tronko<sup>1</sup> & A.J. Brizard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de Physique Théorique - UMR 6207, Marseille, France

<sup>2</sup> Saint-Michael's College, Colchester, Vermont

nathalie.tronko@gmail.com

L'approche gyrocinétique de Maxwell-Vlasov [1,2] représente un paradigme pour l'étude théorique et numérique du comportement turbulent des plasmas de fusion. Ce sont des plasmas de faible densité dont la mise en oeuvre en laboratoire nécessite un confinement par un fort champ magnétique.

Un nouveau principe variationnel pour le système de Maxwell-Vlasov et sa réduction gyrocinétique a été présenté dans [3]. Il s'agit d'un principe variationnel eulérien qui considère les variations contraintes de la fonction de distribution de Vlasov sur l'espace des phases étendu à 8 dimensions. Ces variations sont exprimées en termes d'un crochet de Poisson, et d'une fonction génératrice scalaire  $S$  qui joue le rôle d'un générateur des déplacements virtuels dans l'espace des phases étendu. On utilise ce principe variationnel pour dériver la loi de conservation de la quantité de mouvement pour le système Maxwell-Vlasov avec la réduction gyrocinétique. Il est important de remarquer que la méthode de Noether donne la possibilité de dériver une quantité conservée exacte, même pour un modèle réduit. Cela rend notre méthode différente des méthodes classiques[4], qui permettent uniquement l'obtention de quantités approximées.

La loi de conservation de la quantité de mouvement peut être utile pour l'étude de son transport, lequel influence la rotation du plasma. Dans une machine de fusion, la rotation du plasma est responsable de la réduction de la turbulence, ce qui améliore les performances des tokamaks. Actuellement, la rotation du plasma est initiée par l'injection de neutres. Cependant, cette procédure peut s'avérer inapplicable dans les futures machines, telle ITER, dû au fait que le plasma sera plus dense et plus chaud [5]. Une solution peut être trouvée grâce à la rotation intrinsèque observée dans beaucoup de tokamaks actuels. L'étude théorique de ce phénomène représente un grand intérêt scientifique et a déjà été traité à partir d'autres approches, telle que l'approche fluide. Par exemple dans [6], l'équation pour le transport de la quantité de mouvement angulaire est obtenue à partir du calcul des moments de l'équation de Vlasov collisionnelle.

L'identification de nouveaux mécanismes de rotation spontanée du plasma, à partir de la loi de conservation de la quantité de mouvement, est un des buts principaux de notre étude [7].

## Références

1. A.J.Brizard,T.S.Hahm, Rev. Mod.Phys, 79, 421 (2007).
2. R.G. Littlejohn,J.Plasma Phys., 29, 111 (1983).
3. A.J.Brizard, Phys. Re. Letters, 84,85(2000)
4. F.I.Parra, P.J. Catto Control Fusion, 50, 065014 (2008)
5. I.Hohod, Z.Lin, Phys. of Plasmas, 15, 092302(2008)
6. R.E.Watz, Phys. of Plasmas 14, 122507 (2007)
7. A.J.Brizard, N.Tronko, in preparation (2010)

# Optique non linéaire dans des paquets d'électrons relativistes : génération d'harmoniques élevées

Clément Evain<sup>1</sup>, Marie-Emmanuelle Couprie<sup>1</sup>, Jean Marc Filhol<sup>1</sup>, Amor Nadji<sup>1</sup>, & Alexander A. Zholents<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91 192 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> Center for Beam Physics, Accelerator and Fusion Research Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720

`clement.evain@synchrotron-soleil.fr`

**Résumé.** De la même manière que dans un milieu “classique” (dans un cristal, un gaz ou un liquide), l’interaction d’une impulsion laser intense avec un paquet d’électrons relativistes peut mener à des phénomènes non linéaires. En particulier, il est possible d’obtenir de la génération d’harmonique ; après avoir interagi avec une impulsion laser, les électrons peuvent émettre un rayonnement synchrotron à une harmonique de la fréquence laser. Alors qu’une seule interaction laser/électrons permet d’accéder à des numéros d’harmoniques faibles (typiquement  $< 10$ ), nous montrons qu’une double interaction combinée à la dynamique intrinsèque des électrons dans un anneau de stockage permet d’accéder à des numéros d’harmoniques élevés. L’étude appliquée au synchrotron SOLEIL montre qu’avec ce schéma, appelé EEHG (Echo Enable Harmonic Generation) [1], il est envisageable d’obtenir un rayonnement synchrotron intense à des numéros d’harmoniques de l’ordre de 200 de la longueur d’onde laser (800 nm).

## Références

1. G. STUPAKOV, Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation *Physics Review Letters*, **102**, 074801 (2009).

# Dynamiques toroïdales non triviales dans un laser spatio-temporel

Dalila Amroun Aliane<sup>1</sup>, Christophe Letellier<sup>2</sup> & Luc Pastur<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LEQ, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, BP 32, Bab Ezzouar, 16111 Alger

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

<sup>3</sup> LIMSI-CNRS, Université de Paris Sud , BP 133, Bât 508, 91403 Orsay cedex

amroun\_dalila@yahoo.fr

La dynamique d'un laser monomode à élargissement homogène [1] est étudiée par l'intermédiaire de portraits de phase, d'applications de premier retour et de diagrammes spatio-temporels [2,3]. Une route vers le chaos est plus particulièrement décrite, montrant que le chaos suit un scénario de Ruelle-Takens [4] se terminant par une transition vers le chaos selon le scénario de Curry-Yorke (plissements du tore)[5]. Les dynamiques toroïdales qui en résultent sont non triviales dans la mesure où les tores  $T^n$  doivent être plongés dans des espaces de dimension au moins  $n + 2$ . C'est la première fois à notre connaissance qu'un tel scénario est mis en évidence dans un système dynamique, et de surcroît spatio-temporel.

## Références

1. D. AMROUN, M. BRUNEL, C. LETELIER, H. LEBLOND & F. SANCHEZ, Complex intermittent dynamics in large-aspect-ratio homogeneously broadened single-mode lasers, *Physica D*, **203**, 185-197 (2005).
2. D. AMROUN, C. LETELIER, L. PASTUR, M. BRUNEL, H. LEBLOND & F. SANCHEZ, Spatio-temporal dynamics versus temporal analysis : What can we learn ?, *First International Seminar on Fluid Dynamics and Materials Processing FDMP'2007*, Alger, 2-4 juin (2007).
3. D. AMROUN ALIANE, L. PASTUR, M. BRUNEL, H. LEBLOND, F. SANCHEZ & C. LETELIER, Analyse de dynamiques spatio-temporelles d'un laser, *Comptes-Rendus de la 12e Rencontre du Non-Linéaire*, 1-6, Paris, 12-13 Mars 2009.
4. D. RUELLE & F. TAKENS, On the nature of turbulence, *Communications in Mathematical Physics*, **20**, 167-192 (1971) .
5. J. H. CURRY & J. A. YORKE, The structure of attractors in dynamical systems, *Lecture Notes in Mathematics*, **668**, 48-66 (1978).

# Observation de spirales dans le profil transverse d'intensité d'un laser saphir-titane

Marco Romanelli, Marc Brunel et Marc Vallet

Institut de Physique de Rennes UMR CNRS 6251, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, F-35042  
Rennes Cedex, France  
`marco.romanelli@univ-rennes1.fr`

Les premières études détaillées de structures transverses, ou *patterns*, en optique ont débuté il y a une vingtaine d'années [1]. Depuis, différents types de structures transverses ont été observées dans une grande variété de configurations expérimentales, tant dans des systèmes actifs que passifs [2,3,4]. Nous rapportons ici l'observation expérimentale de structures stationnaires inédites dans le profil transverse d'intensité d'un laser saphir-titane continu.

La géométrie du résonateur est linéaire, les miroirs de cavité sont respectivement plan et concave. Le cristal de saphir-titane est placé contre le miroir plan. Le laser est pompé longitudinalement par un Nd :YAG doublé. En limite de stabilité, les modes transverses d'une telle cavité sont dégénérés en fréquence. Le paramètre qui régit le comportement du système est la longueur de la cavité, qui fixe la taille du mode laser et donc le nombre de Fresnel de l'oscillateur. Trois régimes distincts sont alors identifiés.

Premièrement, lorsque la cavité est géométriquement stable, loin de la limite de stabilité, on observe des distributions spatiales d'intensité de symétrie approximativement cylindrique, facilement interprétables en termes de superposition d'un faible nombre de modes de Laguerre-Gauss, c'est-à-dire les modes propres "standard" du résonateur vide. Deuxièmement, en s'approchant de la limite de stabilité géométrique, la taille du mode de cavité tend vers zéro dans le milieu actif, le nombre de Fresnel effectif augmente, et on observe l'apparition de structures complexes en forme de spirales ou de réseaux. Enfin, en augmentant davantage la longueur de la cavité laser, ces structures disparaissent subitement, donnant lieu à une émission caractérisée par une forte intensité concentrée autour de l'axe du résonateur. Cette transition se produit lorsque la cavité laser devient géométriquement instable [5].

A la différence de ce qui se passe dans le premier régime, où l'on reconnaît les modes de Laguerre-Gauss, les structures en spirale ne sont pas déductibles simplement des modes propres du résonateur. Elles semblent indépendantes des conditions aux limites géométriques imposées par la cavité, et plutôt déterminées par la dynamique non-linéaire intrinsèque au système. Finalement, en insérant une ouverture rectangulaire dans le résonateur, on observe des motifs "cristallins" [2] dont la symétrie reflète celle de l'ouverture.

## Références

1. S.A. Akhmanov, M.A. Vorontsov, V. Iu. Ivanov, Large-scale transverse nonlinear interactions in laser beams - New types of nonlinear waves, generation of 'optical turbulence', *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, vol. 47, June 25, 1988, p. 611-614.
2. M. Brambilla et al., Transverse laser patterns. I. Phase singularity crystals, *Phys. Rev. A*, vol. 43, p. 5090-5113, 1999.
3. F.T. Arecchi, S. Boccaletti, P. Ramazza, Pattern formation and competition in nonlinear optics, *Physics Reports*, 318, p. 1-83, 1999.
4. S. Residori, Patterns, fronts and structures in a Liquid-Crystal-Light-Valve with optical feedback, *Physics Reports*, 416 (5-6), p. 201-272, 2005.
5. A. E. Siegman, Unstable Optical Resonators, *Appl. Opt.* 13, p. 353-367, 1974.

# Entraînement robuste d'oscillateurs biologiques

Benjamin Pfeuty<sup>1,2</sup>, Quentin Thommen<sup>1,2</sup> & Marc Lefranc<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université Lille 1, Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules, UMR CNRS 8523, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>2</sup> Université Lille 1, Institut de Recherche Interdisciplinaire, USR CNRS 3078, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France

pfeuty@phlam.univ-lille1.fr

L'horloge circadienne est un oscillateur biologique qui se synchronise avec précision au cycle jour-nuit en se couplant aux variations périodiques de la lumière et de la température, lesquelles peuvent présenter d'importantes fluctuations d'amplitude. La nécessité pour l'horloge circadienne de se synchroniser de manière robuste soulève la question suivante : quelles sont les propriétés que doivent posséder un oscillateur forcé pour être entraîné indépendamment des variations d'amplitude du forçage. Afin de répondre à cette question, nous étudions la dynamique d'un circuit génétique oscillant contenant une simple boucle négative et soumis à une modulation périodique d'amplitude variable de ses paramètres. Cette étude révèle qu'un entraînement robuste nécessite que la période de l'oscillateur auto-entretenu soit différente de la période de forçage et que la courbe de réponse de phase associée à la modulation ait une forme spécifique caractérisée par ses dérivés première et seconde près de la phase d'accrochage.

## Références

1. A. PIKOVSKY, M. ROSENBLUM & J. KURTHS, Synchronization : a universal concept in nonlinear sciences, *Cambridge University Press* (2000).
2. J.C. DUNLAP, Molecular bases for circadian clocks, *Cell*, **96**, 271-290 (2002).
3. W.M. YOUNG, S.A. KAY, Time zones : a comparative genetics of circadian clocks, *Nature Genetics*, **2**, 702-715 (2002).
4. J.L. LELOUP, D. GONZE & A. GOLDBETER, Limit cycle models for circadian rhythms based on transcriptional regulation in *Drosophila* and *Neurospora*, *J Biol Rythm*, **14**, 433-448 (1999).

# Modélisation à retard : dynamique du vecteur et transmission du virus chikungunya

Moulay<sup>1</sup> & Aziz-Alaoui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LMAH, Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon, BP540, 76058 Le Havre Cedex

<sup>2</sup> LMAH, Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon, BP540, 76058 Le Havre Cedex  
djamila.moulay@univ-lehavre.fr

Beaucoup de modèles mathématiques ont été établis pour décrire les relations entre, d'une part, les espèces vivantes et leur environnement et d'autre part, les interactions entre espèces vivantes d'une même communauté. Nous nous intéressons à la modélisation et l'étude de systèmes dynamiques dans le cadre de la transmission du chikungunya, maladie vectorielle. Les agents responsables du chikungunya (maladie de l'homme courbé), tout comme ceux de la Dengue [1,2,3], sont des arbovirus (de l'anglais arthropode borne virus). Ce sont des maladies virales transmises par des insectes de la famille des arthropodes (mouches, tiques, puces...). Nous abordons la dynamique de croissance du moustique *Aedes Albopictus*, vecteur du Chikungunya entre autres, sur l'île de la Réunion, ainsi que de la transmission du virus à la population humaine de plusieurs points de vue. En effet, les observations biologiques, notamment sur le développement et la croissance du moustique, ont permis la construction de modèles mathématiques basés notamment sur l'utilisation de modèles structurés par classes et de modèles de type SIR. Après la description et l'étude d'équations différentielles ordinaire [4,5], nous nous intéressons ici aux systèmes dynamiques à retard associés. En effet, plusieurs facteurs sont à prendre en compte, notamment la durée de chaque stade du cycle biologique du moustique ou encore les période d'incubation du virus chez le moustique, ainsi que la période de virémie. C'est donc afin de décrire au mieux ces phénomènes que l'on utilise les équations différentielles à retard.

## Références

1. M. DEROUICH, A. BOUTAYEB, E.H. TWIZELL, A model of Dengue fever, *BioMed. Eng. Online* 2 (2003).
2. L. ESTEVA, C. VARGAS, Analysis of a Dengue disease transmission model, *Mathematical Biosciences*, **150**, 131-151 (1998).
3. L. ESTEVA, C. VARGAS, A model for Dengue disease transmission model, *J. Math. Biol.*, **vol. 38**, (1999) 220.
4. D. MOULAY, M.A. AZIZ ALAOU, M. CADIVEL, The Chikungunya Disease : Modeling, Vector and Transmission Global Dynamics, *soumis à Mathematical Bioscience* (2010).
5. D. MOULAY, M. CADIVEL, M.A. AZIZ ALAOU, L'épidémie de chikungunya : modélisation et stabilité, *12ème Rencontre du non linéaire* (2009).

# Oscillations d'expression d'un gène auto-régulé : interaction d'un délai de transport avec la réponse transcriptionnelle

Jingkui Wang<sup>1,2</sup>, Quentin Thommen<sup>1,2</sup>, & Marc Lefranc<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université Lille 1, Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules, UMR CNRS 8523, UFR de Physique, Cité Scientifique, F-59655 Villeneuve d'Ascq

<sup>2</sup> Université Lille 1, Institut de Recherche Interdisciplinaire, USR CNRS 3078, Cité Scientifique, F-59655 Villeneuve d'Ascq

marc.lefranc@univ-lille1.fr

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

La modélisation mathématique de réseaux génétiques suppose généralement que l'activité d'un gène réagit immédiatement aux variations de concentration de ses protéines régulatrices. Or, des expériences récentes ont montré l'existence d'une dynamique transcriptionnelle intrinsèque, à des échelles de temps comparables aux autres processus cellulaires [1]. Dans un travail récent, nous avons montré comment la prise en compte d'un temps de réponse fini pour le gène pouvait modifier la dynamique d'un petit circuit génétique, et en particulier induire des oscillations spontanées de l'activité d'un gène régulé par sa propre protéine [2], un circuit qui a été largement étudié théoriquement et expérimentalement [3,4,5].

Mais le délai d'activation du gène coexiste dans ce circuit avec plusieurs autres sources de délai (temps nécessaire à la transcription et à la traduction, délais de transport entre noyau et cytoplasme et réciproquement,...) qui peuvent être significativement plus grands que le temps de réponse génique. On pouvait donc craindre que l'effet de ce dernier soit masqué par les autres délais. Nous avons considéré une extension du modèle de [2], en rajoutant un délai de transport de la protéine entre le cytoplasme et le noyau. Nous avons pu obtenir un critère analytique pour le seuil d'instabilité des oscillations spontanées :

$$H_{\epsilon,\eta}(\Sigma, T) = \left[ \frac{\epsilon^2 \Sigma^2}{4} T^2 + \left( \Sigma - \frac{1}{\Sigma} \right) T + 1 \right] + T \eta^2 \left( \frac{\epsilon^4 \Sigma^4 T^3 \eta^2 - 64 \Sigma - 32 \epsilon^2 \Sigma^2 T}{64(\Sigma T \eta^2 + 4)} - \frac{T}{4} \right) < 0 \quad (1)$$

où  $\Sigma$  et  $\epsilon$  caractérisent les taux de dégradation de l'ARN et de la protéine,  $T$  est le délai total (temps de réponse plus délai de transport) et  $\eta$  quantifie l'asymétrie des deux délais ( $\eta = 1$  quand ils sont égaux,  $\eta = 0$  quand l'un des deux est nul). Cela nous a permis de montrer qu'un petit temps de réponse rajouté à un grand délai de transport peut toujours constituer un facteur déclenchant des oscillations.

## Références

1. I. GOLDING, J. PAULSSON, S.M. ZAWILSKI, E.C. COX, *CELL* **123**, 1025-1036 (2005).
2. P.-E. MORANT, Q. THOMMEN, F. LEMAIRE, C. VANDERMOERE, B. PARENT AND M. LEFRANC, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 183901 (2009).
3. J. S. GRIFFITH, Mathematics of cellular control processes I. Negative feedback to one gene, *J. Theor. Biol.* **20**, 202 (1968).
4. H. HIRATA *et al.*, Oscillatory expression of the bHLH factor Hes1 regulated by a negative feedback loop, *Science* **298**, 840 (2002).
5. M. H. JENSEN, K. SNEPPEN & G. TIANA, Sustained oscillations and time delays in gene expression of protein Hes1, *FEBS Lett.* **541**, 176 (2003).

# Initialisée par Mos, activée par MPF - la cascade MAPK dans les ovocytes de *Xénope*

Christophe Russo<sup>1</sup> & Ralf Blossey<sup>1</sup>

Interdisciplinary Research Institute, University of Sciences and Technology Lille, USR3078 CNRS, 50 Avenue Halley, F-59658 Villeneuve d'Ascq, France  
`ralf.blossey@iri.univ-lille1.fr`

**Résumé.** La cascade MAPK (Mitogen-Activated Protein Kinase) est une voie de signalisation paradigmatique qui joue un rôle essentiel dans plusieurs évènements cellulaires. Dans les ovocytes de *Xénope* la cascade est initialisée par l'oncoprotéine Mos. Après son activation, la cascade est stabilisée par MAPK via une boucle de rétroaction. Le niveau de concentration de Mos n'est pas seulement contrôlé par MAPK. Une molécule essentielle impliquée dans la régulation de la cascade est le complexe MPF. Nous avons développé un modèle détaillé de la dynamique non-linéaire du réseau Mos-MPF-MAPK qui tient compte des trois états de phosphorylation de Mos. Ce modèle nous permet de déterminer l'évolution de Mos sous contrôle de MPF. Notre modèle ouvre une nouvelle voie à la compréhension quantitative de l'interdépendance de Mos et de MPF dans les ovocytes de *Xénope*.

## Références

1. C. RUSSO, R. BEAUJOIS, J.-F. BODART, R. BLOSSEY, Kicked by Mos and tuned by MPF - the initiation of the MAPK cascade in *Xenopus* oocytes, *HFSP Journal*, **3** (6), Advance Online Publication (2009).

# Dynamo de marées

Cebbron D., Le Bars M., Le Gal P., & Maubert P.

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

13384 Marseille Cedex 13, France

cebron@irphe.univ-mrs.fr

De nombreux objets astrophysiques (planètes, étoiles, galaxies...) possèdent un champ magnétique. Dès 1919, Larmor propose que ces champs magnétiques apparaissent spontanément par effet dynamo ayant pour source les mouvements d'un fluide conducteur. Un certain nombre d'écoulements modèles montrent la réalité de l'effet dynamo mais seuls deux types de forçage ont effectivement été identifiés comme capables de générer une dynamo dans les corps célestes : (i) la convection thermo-solutale, probablement responsable du champ terrestre actuel, et (ii) l'instabilité de précession. Depuis les années 70, deux autres candidats ont été proposés, sans confirmation jusqu'à présent : il s'agit de (iii) l'écoulement issu des librations des corps célestes et (iv) l'écoulement généré par l'instabilité elliptique. C'est ce dernier cas qui nous intéresse ici.

L'instabilité elliptique (ou instabilité de marées) correspond à la déstabilisation tridimensionnelle d'écoulements tournants bidimensionnels dont les lignes de courant sont elliptiques (cf. [4]). C'est une instabilité générique qui intervient dans de nombreux systèmes naturels ou industriels. Sa présence est ainsi suggérée dans les noyaux liquides des planètes ([4],[1],[2]) et les étoiles doubles ([5]) déformés elliptiquement par les marées gravitationnelles.

Jusqu'à présent, les calculs de dynamos stellaires ou planétaires, très exigeants du point de vue numérique, sont menés en supposant une symétrie sphérique ou sphéroïdale des corps considérés, ce qui élimine de fait l'éventualité d'une instabilité elliptique. Cette approximation peut paraître justifiée en raison de la faible amplitude des déformations de marées. Toutefois, l'instabilité elliptique provenant d'un mécanisme de résonance paramétrique, même une infime déformation peut modifier complètement l'écoulement. Nous avons donc cherché à quantifier son influence en développant notamment les premiers calculs numériques de magnétohydrodynamique dans un ellipsoïde triaxial. Dans un premier temps, l'interaction de l'instabilité elliptique et d'un champ magnétique imposé a été étudiée par notre équipe d'un point de vue théorique, expérimental et numérique. En prenant comme exemple la lune Io, nous avons ainsi démontré l'induction d'un champ magnétique par instabilité elliptique à partir du champ de Jupiter. Puis, dans un second temps, notre approche numérique a confirmé la possibilité d'une dynamo de marées, validant ainsi ce mécanisme comme source possible de champ magnétique dans les étoiles et les planètes.

## Références

1. Arkani-Hamed, J., 2009. Did tidal deformation power the core dynamo of Mars? *Icarus*, 201, 1, pp. 31-43.
2. Cebbron, D., Le Bars, M., Leontini, J., Maubert, P., Le Gal, P., 2010. A systematic numerical study of the tidal instability in a rotating ellipsoid. Submitted.
3. Kerswell, R. R., 2002. Elliptical instability. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 34, 83-113.
4. Kerswell, R. R., Malkus, W. V. R., 1998. Tidal instability as the source for Io's magnetic signature. *Geophys. Res. Lett.* 25, 603-6.
5. Le Bars, M., Lacaze, M., Le Dizès, S., Le Gal, P., Rieutord, M., 2010. Tidal instability in stellar and planetary binary system. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 178, 48-55.

# Instabilité centrifuge d'un écoulement de Taylor-Couette elliptique

Sauret A., Le Dizès S., & Le Bars M.

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

L'étude de l'instabilité de l'écoulement de Taylor-Couette entre deux cylindres concentriques en rotation a suscité un grand intérêt depuis les travaux initiaux de G.I. Taylor [1]. Bien que cette instabilité soit aujourd'hui bien connue théoriquement et expérimentalement, des effets extérieurs peuvent être ajoutés à cet écoulement qui le rendent alors plus complexe : champ magnétique, parois compliantes, fluide viscoélastique, flux thermique, stratification [2],[3], etc.

Dans notre cas, nous nous intéressons à l'effet d'un forçage elliptique sur un écoulement de Taylor-Couette à large gap. La stabilité d'un tel écoulement est étudiée par des méthodes asymptotique, numérique et expérimentale lorsque le cylindre extérieur est déformé elliptiquement en gardant la section du cylindre intérieur circulaire.

Des expériences montrent que l'écoulement déformé elliptiquement peut devenir instable pour des configurations où l'écoulement de Taylor-Couette non déformé serait stable. L'instabilité ne semble pas être du type "instabilité elliptique" [4] mais plutôt de nature centrifuge. Cette instabilité est caractérisée par l'apparition de structures stationnaires et principalement axisymétriques localisées au voisinage du cylindre intérieur.

Dans l'étude analytique, nous montrons par une approche perturbative, que les corrections non-linéaires à l'écoulement de Taylor-Couette induites par la déformation elliptique sont non négligeables au voisinage du cylindre intérieur. Avec les paramètres expérimentaux utilisés, ces corrections non-linéaires ne sont pas suffisantes pour rendre l'écoulement instable centrifuge. Néanmoins, nous montrons également que cette correction, qui peut conduire à une contra-rotation au voisinage du cylindre intérieur, peut devenir très importante durant la phase de spin-up, ce qui est en accord avec les expériences effectuées.

## Références

1. Taylor G.I., 1923. Stability of a viscous fluid contained between two rotating cylinder. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 223, A, 289-343
2. Le Bars M., Le Gal P., 2007. Experimental analysis of the Strato-Rotational Instability in a cylindrical Couette flow. *Phys. Rev. Lett.*, (99), 064502.
3. Rüdiger G., Shalybkov D. A., 2009. Stratorotational instability in MHD Taylor-Couette flows. *Astronomy and Astrophysics*, 493, 375-383.
4. Kerswell, R. R., 2002. Elliptical instability. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 34, 83-113.

# Mise en évidence numérique d’une évolution statistique universelle auto-similaire pour une nappe tourbillonnaire

Marie-Line Chabanol<sup>1</sup> & Jean Duchon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Mathématiques de Bordeaux

<sup>2</sup> Institut Fourier, Université Grenoble 1

chabanol@math.u-bordeaux1.fr

Une nappe tourbillonnaire circulaire uniforme de longueur  $L$  et de circulation totale  $\Gamma$  est approchée par un grand nombre  $N$  de tourbillons ponctuels de circulation  $\Gamma/N$ , placés aléatoirement sur des cercles de rayon  $\lambda L/N$  centrés aux sommets d’un polygone régulier. Prenant successivement  $N = 200$ ,  $N = 1000$ ,  $N = 5000$  (avec  $\lambda$  variant de 0,1 à 0,3), et laissant le système des tourbillons évoluer, on n’observe aucun signe de convergence (pour  $N$  grand) vers la solution triviale (qui est la limite de l’approximation non perturbée avec des tourbillons équidistants), mais au contraire une limite aléatoire, dont la loi (distribution) ne dépend pas de  $\lambda$  et, pour certains temps et certaines longueurs, a des statistiques à deux points compatibles avec une croissance auto-similaire. Nous croyons qu’une telle hypothétique “nappe tourbillonnaire aléatoire auto-similaire” devrait donner une description adéquate de la “turbulence” bidimensionnelle de Kelvin-Helmholtz pleinement développée.

# Perturbations non-linéaires optimales dans un écoulement de Couette plan

Yohann Duguet<sup>1</sup>, Luca Brandt<sup>2</sup>, & Robin B. Larsson<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LIMSI-CNRS, UPR 3251, 91403 Orsay, France

<sup>2</sup> KTH Mechanics, Linné Flow Centre, Osquars Backe 18, SE-10044 Stockholm, Suède  
duguet@limsi.fr

Dans de nombreux écoulements cisailés, la transition vers la turbulence s'observe en l'absence d'instabilité linéaire de l'écoulement de base. Nous nous proposons d'étudier numériquement les mécanismes qui permettent d'initier un écoulement turbulent avec une perturbation initiale de moindre énergie [1]. L'exemple choisi est celui d'un écoulement de Couette plan incompressible entre deux parois planes se déplaçant parallèlement avec des vitesses opposées. Le nombre de Reynolds est de 400, et le domaine de calcul est une cellule tridimensionnelle périodique de taille comparable au Minimal Flow Unit, la taille critique pour qu'un écoulement turbulent puisse se maintenir. Cette perturbation est recherchée comme une superposition de modes linéaires optimaux, dont l'amplification linéaire transitoire est maximale [2]. Un algorithme d'optimisation non-linéaire de l'énergie initiale met en évidence le rôle prépondérant des modes 'obliques' par rapport aux perturbations essentiellement bidimensionnelles [3]. Le scénario complet de la transition peut être suivi dans l'espace de Fourier associé : interactions nonlinéaires et croissance transitoire des modes excités amènent l'écoulement au voisinage d'un état non-linéaire non identifié auparavant [4]. Il s'agit d'un écoulement stationnaire dominé par des streaks de faible amplitude. Cet état limite (*edge state*) instable est la dernière étape cohérente avant d'atteindre l'état turbulent. L'énergie critique des perturbations initiales de type oblique ou longitudinal est aussi étudiée en fonction du nombre de Reynolds et de la longueur du domaine de calcul. Des calculs avec une bonne résolution numérique suggèrent un seuil critique évoluant comme  $E_c = O(Re^{-2})$ , en accord avec plusieurs prédictions théoriques [5,6,7].

## Références

1. C. Cossu, An optimality condition on the minimum energy threshold in subcritical instabilities, *Comptes Rendus Mécanique*, **333**, 4, 331 2005.
2. S.C. Reddy and D. S. Henningson, Energy growth in viscous channel flows, *Journal of Fluid Mechanics*, **252**, 209-238, 1993.
3. P.J. Schmid, D.S. Henningson, A new mechanism for rapid transition involving a pair of oblique waves, *Phys. Fluids*, **4**(9), 1992.
4. T. M. Schneider, J. F. Gibson, M. Lagha, F. De Lillo and B. Eckhardt, Laminar-turbulent boundary in plane Couette flow, *Phys. Rev. E*, 037301 (2008).
5. J.S. Chapman, Subcritical transition in channel flows, *Journal of Fluid Mechanics*, **451**, 35, 2002.
6. F. Waleffe, J. Wang, Transition Threshold and the Self-Sustaining Process, IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition and Finite Amplitude Solutions, Springer, Dordrecht, 2005.
7. B. Hof, A. Juel and T. Mullin, Scaling of the turbulence transition threshold in a pipe, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 244502, 2003.

# Repliement élastocapillaire contrôlé par un impact de goutte

Marco Rivetti<sup>1,2</sup>, Sébastien Neukirch<sup>1,2</sup>, Christophe Josserand<sup>1,2</sup>, Basile Audoly<sup>1,2</sup>, & Arnaud Antkowiak<sup>1,2</sup>

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

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

`rivetti@lmm.jussieu.fr`

Lorsqu'une goutte est déposée sur une fine membrane polymère, on peut observer une déformation de la feuille par la force capillaire pouvant aller jusqu'à l'encapsulation complète de la goutte. Ce type d'interaction élastocapillaire, abondant dans la Nature, suscite un fort intérêt dans la communauté scientifique, car il offre un nombre considérable d'applications technologiques. On montre que le repliement élastocapillaire, jusqu'ici observé de façon quasi-statique, peut être obtenu sur l'échelle de temps capillaire très rapide. Grâce à cette propriété, on utilise l'impact de goutte pour former des 'origamis capillaires'. On montre que des feuilles et gouttes identiques peuvent se replier en origamis totalement différents, selon la vitesse d'impact. Un contrôle précis du repliement peut alors être envisagé en utilisant simplement un impact de goutte. Pour détecter les acteurs-clé de ce phénomène, on emploie une expérience modèle 1D.

## Références

1. J. Bico, B. Roman, L. Moulin and A. Boudaoud, "Adhesion : Elastocapillary coalescence in wet hair", *Nature*, **7018**, 690, (2004)
2. C. Py, P. Reverdy, L. Doppler, J. Bico, B. Roman and C.N. Baroud, "Capillary Origami : Spontaneous Wrapping of a Droplet with an Elastic Sheet", *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 156103–4, (2007)

# Dynamique de dégazage dans un milieu granulaire immergé : différents aspects

Valérie Vidal, Germán Varas & Jean-Christophe Géminard

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

Les phénomènes naturels mettant en jeu le passage d'un fluide (liquide ou gaz) dans un milieu granulaire immergé sont nombreux. On peut citer, parmi eux, l'émission d'hydrocarbures en surface des sédiments marins [1,2], les fractures hydrauliques [3], ou la formation de cratères en milieu océanique [4]. Les expériences de laboratoire représentent un moyen de reproduire, à petite échelle, ces phénomènes naturels dans le but de comprendre et éventuellement prédire leur dynamique. De nombreuses études réalisées dans le cas des systèmes diphasiques (solide/liquide), montrent l'existence de différents régimes d'invasion et l'apparition éventuelle de branches pouvant migrer dans le lit granulaire, fluidisant ainsi le milieu [5,6,7]. Cependant, les systèmes mettant en jeu trois phases (solide, liquide, gaz) présentent une dynamique encore plus complexe, qui n'a pas été entièrement caractérisée à l'heure actuelle.

Nous présentons ici une revue non exhaustive des expériences menées dans notre laboratoire, concernant la dynamique de passage de l'air à travers un lit granulaire immergé. Dans un premier temps, nous regardons comment le gaz pénètre le milieu à partir d'un point d'injection (expérience 2D). La localisation de l'émission en surface dépend fortement de la géométrie de l'invasion, et l'on observe, en 3D, la distribution des points de sortie du gaz. Aux temps longs, le gaz injecté forme une zone fluidisée au centre de la couche de grains immergée. On observe alors différents régimes de dégazage [8] : émission de bulles, formation d'un canal ouvert, ou intermittence spontanée entre ces deux régimes. Pour une hauteur d'eau suffisamment grande au-dessus du lit granulaire, un cratère se forme, composé de deux talus symétriques par rapport au point d'injection du gaz. Contrairement à l'intuition, nous montrons que la dynamique de formation de ce cratère ne dépend pas du régime d'émission du gaz [9].

## Références

1. T. MÖRZ, E. A. KARLIK, S. KREITER & A. KOPF, An experimental setup for fluid venting in unconsolidated sediments : New insights to fluid mechanics and structures, *Sedimentary Geology*, **196**, 251-267 (2007).
2. L. NAUDTS *et al.*, Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea, *Marine Geology*, **251**, 253-267 (2008).
3. E. G. FLEKKØY, A. MALTHER-SØRENSEN & B. JAMTVEIT, Modeling hydrofracture, *Journal of Geophysical Research*, **107**, 2151 (2002).
4. M. HOVLAND, J. V. GARDNER & A. G. JUDD, The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards, *Geofluids*, **2**, 127-136 (2002).
5. T. WILHELM & K. WILMAŃSKI, On the onset of flow instabilities in granular media due to porosity inhomogeneities, *International Journal of Multiphase Flow*, **28**, 1929-1944 (2002).
6. P. RIGORD, A. GUARINO, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, Localized instability of a granular layer submitted to an ascending liquid flow, *Granular Matter*, **7**, 191-197 (2005).
7. F. ZOUESHTIAGH & A. MERLEN, Effects of a vertically flowing water jet underneath a granular bed, *Physical Review E*, **75**, 056313 (2007).
8. L. GOSTIAUX, H. GAYVALET & J.-C. GÉMINARD, Dynamics of a gas bubble rising through a thin immersed layer of granular material : an experimental study, *Granular Matter*, **4**, 39-44 (2002).
9. G. VARAS, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, Dynamics of crater formations in immersed granular materials, *Physical Review E*, **79**, 021301 (2009).

# Déplacement et oscillations de gouttes sous l'effet d'ondes de surface ultrasonores

P. Brunet, M. Baudoin, O. Bou-Matar, & F. Zoueshtiagh

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologies (IEMN), UMR CNRS 8520, Avenue Poincaré, BP. 60069, 59652 Villeneuve d'Ascq, France  
[philippe.brunet@univ-lille1.fr](mailto:philippe.brunet@univ-lille1.fr)

Pour les applications de microfluidique discrete, on cherche de plus en plus à réaliser des opérations élémentaires sur des gouttes de quelques picolitres à quelques microlitres, posées sur un substrat. Par exemple, l'analyse des réactions enzymatiques dans des puces à ADN [1] nécessite le mélange convectif incessant du liquide biologique dans la goutte, afin d'améliorer l'analyse temps réel par les bio-détecteurs et d'éviter les dépôts de particules en périphérie [2]. Le nécessaire déplacement des gouttes a posteriori n'est pas chose aisée car les forces de rétention au niveau de la ligne de contact sont prédominantes pour ces tailles typiques de gouttes. L'utilisation de Surface Acoustic Waves (SAW) générées par des transducteurs acoustiques interdigités (IDT) est ainsi particulièrement intéressante car elle permet à la fois d'assurer le mélange, le déplacement et d'autres traitements élémentaires (splitting, merging, ...) sur les gouttes [3,4,5,6]. Cependant, l'explication des phénomènes physiques impliqués dans le couplage acousto-fluidique restent mal compris [4]. Notre étude présente des résultats expérimentaux extrayant la forme de l'écoulement interne, la vitesse et la fréquence d'oscillation des gouttes en fonction de paramètres comme le volume des gouttes, l'amplitude des ondes acoustiques ou la viscosité du liquide. Nous mettons en évidence que la dynamique de la goutte résulte d'une combinaison entre deux effets non-linéaires dans la propagation des ondes acoustiques : l'*acoustic streaming* et la *pression de radiation acoustique* [7]. Le poids relatif des deux contributions dépend de la longueur d'atténuation de l'onde dans la goutte  $\lambda_T$ , liée à des grandeurs comme la fréquence acoustique ou les viscosités (shear et bulk) du liquide.

## Références

1. See eg : [http://en.wikipedia.org/wiki/DNA\\_microarray](http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_microarray).
2. R.D. Deegan O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel and T. A. Witten, Nature **389**, 827-829 (1997).
3. A. Renaudin, P. Tabourier , V. Zhang, J.C. Camart and C. Druon, Sensors and Actuators B **113**, 389-397 (2006).
4. A. Qi, L.Y. Yeo and J.R. Friend, Phys. Fluids **20**, 074103 (2008).
5. A. Wixforth, C. Strobl, C. Gauer, A. Toegl, J. Scriba, Z. V. Guttenberg, Anal. Bioanal. Chem. **379**, 982-991 (2004).
6. A. Renaudin, E. Galopin, V. Thomy, C. Druon and F. Zoueshtiagh, Phys. Fluids **19**, 091111-1 (2007).
7. P. Brunet, M. Baudoin, O. Bou-Matar and F. Zoueshtiagh, Phys. Rev. E *En révision favorable*.

# Ionisations multiples d'atomes et de molécules en champ laser intense

Mauger<sup>1</sup>, Chandre<sup>1</sup>, & Uzer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de Physique Théorique, CNRS – Aix-Marseille Universités, Campus de Luminy, case 907, F-13288 Marseille cedex 09, France

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

L'une des plus grandes surprises des ces vingt dernières années dans l'étude de l'interaction laser-matière est venue de l'ionisation multiple d'atomes et de molécules par des impulsions laser intenses : la probabilité de double ionisation non séquentielle (corrélée) est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à ce que le modèle non corrélé prédit. Cette différence a fait du "coude" observé dans les courbes de probabilité de double ionisation en fonction de l'intensité du champ laser l'une des marques de fabrique de la corrélation entre électrons. Différents scénarios ont été proposés pour expliquer le mécanisme sous-jacent. Le mécanisme de la recollision, dans lequel un électron est d'abord ionisé avant de revenir vers le noyau et collisionne avec l'autre électron bénéficie du meilleur accord avec les données expérimentales.

La mécanique classique permet de saisir les éléments caractéristiques de la double ionisation. Le succès de ce modèle réside dans sa capacité à reproduire le rôle prépondérant de la corrélation entre les électrons nécessaire à la double ionisation.

Considérant des systèmes à deux électrons actifs (par exemple l'atome d'hélium et la molécule de H<sub>2</sub>), nous complétons le modèle de la recollision en identifiant les structures, dans l'espace des phases, qui organisent la dynamique et permettent d'expliquer les propriétés statistiques des trajectoires et d'expliquer la forme caractéristique du coude :

- Orbites périodiques qui organisent le mouvement
- Identification d'un électron interne et d'un électron externe
- Hamiltoniens réduits pour les deux électrons
- Indicateurs de Lyapunov en temps fini et sections de Poincaré
- Prédiction du maximum de double ionisation non séquentielle et de la double ionisation complète

En complément de cette étude, nous considérons une analyse statistique des recollisions. Nous confirmons les données recueillies par des modèles réduits qui nous permettent d'identifier les éléments essentiels pour les doubles ionisations. Au final, dans la courbe de double ionisation en fonction de l'intensité du champ laser, nous réussissons à séparer la composante séquentielle (décorrélée) de la composante non séquentielle (corrélée). Plus précisément, nous proposons un modèle réduit pour la dynamique des recollisions sous forme d'une application symplectique analogue à l'application standard.

## Références

1. F. Mauger, C. Chandre, and T. Uzer - Strong Field Double Ionization : The Phase Space Perspective - Physical Review Letters - 102, 173002 (2009)
2. F. Mauger, C. Chandre, and T. Uzer - Strong field double ionization : What is under the "knee" ? - Journal of Physics B - 42, 165602 (2009)
3. F. Mauger, C. Chandre, and T. Uzer - Strong field double ionization of H<sub>2</sub> : Insights from nonlinear dynamics - Chemical Physics - 366, 64 (2009)
4. F. Mauger, C. Chandre, and T. Uzer - From recollisions to the knee : A road map for double ionization in intense laser fields - Physical Review Letters - To Appear (2010)

# L'Histoire des Oscillations de Relaxation : de Gérard-Lescuyer à Van der Pol

Jean-Marc Ginoux<sup>1</sup>

Laboratoire PROTEE, I.U.T. de Toulon — Université du Sud, BP 20132, F-83957 La Garde Cedex, France  
ginoux@univ-tln.fr

**Résumé.** L'historiographie dans le domaine des oscillations de relaxation se réduit généralement à la contribution de Balthazar Van der Pol [1] intitulée : On "relaxation-oscillations", dans laquelle il utilisa cette terminologie pour désigner un phénomène oscillatoire produit par une triode. Les nombreuses recherches antérieures menées en France et partout dans le monde sur la triode ou sur d'autres dispositifs analogues comme la machine série-dynamo ou l'arc chantant et qui constituent la genèse de la théorie des oscillations non-linéaires ne semblent pas avoir attiré l'attention des historiens des sciences jusqu'à présent. Ainsi, il sera démontré dans cet exposé que les oscillations de relaxation n'ont pas été observées pour la première fois par Van der Pol en 1926 au moyen d'une triode mais par Gérard-Lescuyer [3] en 1880 avec une machine série-dynamo puis par Blondel [4] en 1905 avec un arc chantant. De plus, il sera établi que la toute première mise en équation des oscillations de la triode n'a pas été réalisée par Van der Pol [2] en 1920 mais par Blondel [5] en 1919. En inscrivant en 1929 les oscillations de relaxation dans le cadre théorique des oscillations auto-entretenues, Andronov [6] est depuis considéré comme le tout premier à avoir mis en évidence un lien entre les travaux de Poincaré [8] et la solution de l'équation d'un oscillateur de type Van der Pol. Il sera alors démontré que cette correspondance entre cycle limite et solution périodique a été réalisée vingt ans plus tôt par Poincaré [11,12] lui-même lors d'une série de conférences faite à l'École supérieure d'Électricité en 1908. La découverte de ce texte "oublié" relance ainsi le débat d'une part sur l'implication de Poincaré dans les développements de la technique et notamment de la T.S.F. et, d'autre sur la question de son héritage scientifique.

## Références

1. B. VAN DER POL, On "relaxation-oscillations", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **7** (2), 978-992 (1926).
2. B. VAN DER POL, A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations, *Radio Rev., Lond.*, **1**, 701-710 et 754-762 (1920).
3. J.M.A. GÉRARD-LESCUYER, Sur un paradoxe électrodynamique, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **168**, 226-227 (1880).
4. A. BLONDEL, Sur les phénomènes de l'arc chantant, *Éclairage Électrique*, **XLIV** (28), 41-58 (1905) ; *Éclairage Électrique*, **XLIV** (29), 81-104 (1905).
5. A. BLONDEL, Amplitude du courant oscillant produit par les audions générateurs, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **169**, 943-948 (1919).
6. A. A. ANDRONOV, Les cycles limites de Poincaré et la théorie des oscillations auto-entretenues, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, **189**, 559-561 (1929).
7. H. POINCARÉ, Sur les courbes définies par une équation différentielle, *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 3<sup>e</sup> série, **7**, 375-422 (1881).
8. H. POINCARÉ, Sur les courbes définies par une équation différentielle, *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 3<sup>e</sup> série, **8**, 251-296 (1882).
9. H. POINCARÉ, Sur les courbes définies par une équation différentielle, *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 4<sup>e</sup> série, **1**, 167-244 (1885).
10. H. POINCARÉ, Sur les courbes définies par une équation différentielle, *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 4<sup>e</sup> série, **2**, 151-217 (1886).
11. H. POINCARÉ, Sur la télégraphie sans fil, *Lumière Électrique*, **4**, p. 259-266, p. 291-297, p. 323-327, p. 355-359 et p. 387-393 (1908).
12. H. POINCARÉ, *Conférences sur la télégraphie sans fil*, Éd. La Lumière Électrique, Paris, (1909).

# Dynamique des interactions entre écoulements naturels et végétaux

Emmanuel de Langre

LadhyX, Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau

# Ethology of amoeba viewed from nonlinear dynamics

Toshiyuki Nakagaki

Hokkaido University, Sapporo, Japan

We report here that ability of information processing in an amoeboid organism is higher than we had thought. The model organism is the plasmodium of *Physarum polycephalum* (true slime mold), which is a large aggregate of protoplasm with a large number of nuclei. The organism found the optimal path when it obtained the multiple locations of food. A simple mathematical model for the path finding was proposed in terms of differential equations. As well as the path-finding ability, the organism was able to anticipate the next timing of periodic climate change after experienced some periodic changes of climate, and to show a kind of behaviors that seemed to be 'indecisive' when it encountered the presence of a chemical repellent, quinine. We indicated that a simple dynamics was enough to reproduce these observed behaviors. Mathematical modeling is helpful to understand the mechanism of behavioral smartness in slime mold.

## Références

1. A. Tero, S. Takagi, T. Saigusa, K. Ito, D. P. Bebbler, M. D. Fricker, K. Yumiki, R. Kobayashi and T. Nakagaki : "Rules for biologically-inspired adaptive network design", *Science*, 327 : 439-442 (2010)
2. Dennis Bray : *Wetware : A computer in every living cell-*, Yale University Press (2009)
3. T. Saigusa, A. Tero, T. Nakagaki and K. Yoshiki : "Aomoebae anticipate periodic events", *Physical Review Letters*, Vol. 100, 018101 (2008)
4. T. Nakagaki, M. Iima, T. Ueda, Y. Nishiura, T. Saigusa, A. Tero, R. Kobayashi and K. Showalter : "Minimum-risk path finding by an adaptive amoebal network", *Physical Review Letters*, Vol. 99, 068104 (2007)
5. Kenji Matsumoto, Seiji Takagi and Toshiyuki Nakagaki : "Locomotive Mechanism of *Physarum Plasmodia* based on Spatiotemporal Analysis of Protoplasmic Streaming", *Biophysical Journal*, Vol. 94, 2492-2504 (2008)
6. T. Nakagaki & R. Guy : "Intelligent behaviors of amoeboid movement based on complex dynamics of soft matter", *Soft Matter*, Vol. 4, 57-67 (2008)
7. T. Nakagaki, A. Tero, R. Kobayashi, I. Onishi, and T. Miyaji : Computational ability of cells based on cell dynamics and adaptability, *New Generation Computing* Vol. 27, 57-81 (2009)

# Dynamique des interactions patient-ventilateur durant une assistance ventilatoire nocturne.

R. Naeck<sup>1,2</sup>, D. Bounoiare<sup>1,2</sup>, U. S. Freitas<sup>2</sup>, H. Rabarimanantsoa<sup>2</sup>, A. Portmann<sup>1</sup>, A. Cuvelier<sup>1</sup>, J.-F. Muir<sup>1</sup>, & C. Letellier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GRHV UPRES EA, Université de Rouen

<sup>2</sup> CORIA UMR 6614 — Université de Rouen, BP. 12, 76801 Saint-Etienne du Rouvray cedex  
naeck@coria.fr

La ventilation non invasive est un traitement utilisé pour la prise en charge des patients souffrant d'insuffisance respiratoire chronique qui est le plus souvent appliquée pendant le sommeil. Le succès de ce traitement dépend des interactions patient-ventilateur essentiellement liées à la qualité de la synchronisation entre les efforts inspiratoires du patient et les déclenchements du ventilateur. Notre objectif est d'étudier la dynamique sous-jacente à l'apparition des différents types d'asynchronismes et des fuites. Trente-quatre fichiers de données ont été rétrospectivement extraits de la base de données du Laboratoire de Sommeil de l'Hôpital de Bois-Guillaume. Ils correspondent à des patients habituellement ventilés au long cours à domicile : parmi eux quinze souffrent de Bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) et dix-neuf de syndrome obésité hypoventilation (SOH) [1]. Chaque patient a effectué une polysomnographie au cours de laquelle les variables neurologiques et ventilatoires ont été enregistrées. Un algorithme de détection automatique [2] a permis la mise en évidence et la quantification des différents types d'asynchronismes ainsi que la présence de fuite non intentionnelle.

Afin de mieux comprendre le lien entre les différents événements survenant au cours d'une nuit sous ventilation non invasive, une étude est réalisée sur différents paramètres comme le sommeil, les micro-éveils, les asynchronismes et la présence de fuite non intentionnelle. Pour cela une étude de covariance croisée permettant de mesurer le degré de similarité entre deux signaux est appliquée aux différents taux d'asynchronismes et au taux de fuite. La plupart des patients montre une corrélation positive entre les cycles non déclenchés et les cycles déphasés et les fuites jouent un rôle majeur pour ces patients. Par ailleurs, ces critères permettent de définir quatre groupes. Des mécanismes d'interaction dépendant des stades de sommeil ont ainsi pu être mis en évidence. La fragmentation du sommeil est estimée à l'aide d'une entropie de Shannon [3] calculée à partir d'un diagramme de proches retours basé sur l'hypnogramme. Il est également montré que l'introduction d'une sonde oesophagienne - pour la mesure de la pression gastrique - perturbe significativement la qualité de l'assistance ventilatoire.

## Références

1. H. RABARIMANANTSOA, Qualité des interactions patients-ventilateur en ventilation non invasive nocturne, These de l'université de Rouen, Décembre 2008.
2. A. CUVELIER, L. ACHOUR, H. RABARIMANANTSOA, C. LETELLIER, J.-F. MUIR & B. FAUROUX [2010] A non-invasive method to identify ineffective triggering in patients with noninvasive pressure support ventilation, *Respiration*, published online December 2, 2009.
3. C. LETELLIER, D. BOUNOIARE, R. NAECK, U. S. FREITAS, A. PORTMANN, A. CUVELIER & J.-F. MUIR, Close Return Plots for a Analysing Patient-ventilator Interactions during Nocturn Ventilation, In *3rd International Conference on Complex Systems and Applications - ICCSA 2009*, Le Havre, France June 29 - July 02, 2009.

# Instabilités de fils visqueux : des spirales, des bulles et une machine à coudre fluide.

Brun Pierre-Thomas

IJRLA - UPMC, 4 Place de Jussieu 75005 PARIS  
pierre-thomas.brun@polytechnique.org

Aussi anodine que cela puisse paraître, la chute d'une cuillère de miel sur une tartine présente une richesse mécanique tout à fait remarquable. En effet, les fils minces de fluide visqueux dont la mécanique est régie par des équations non linéaires présentent des instabilités quasi-stationnaires [1][2][3], comme l'enroulement hélicoïdal du miel, aussi bien que dynamiques. Parmi ces dernières, on citera notamment la machine à coudre fluide, où un tel filament chute sur une surface en mouvement et y laisse des motifs très variés [4]. Il est aussi possible d'observer des ondes spirales de bulles d'air qui sont capturées lors de la chute d'un filament visqueux sur un bain de fluide [5]. La compréhension de la mécanique de tels phénomènes est rendue possible par le développement d'un nouvel outil numérique fondé sur la géométrie différentielle discrète qui est utilisé en parallèle avec une approche expérimentale offrant une observation aisée. Seront présentés les résultats apportés par ces deux méthodes dans l'exploration des phénomènes cités ci-avant.

## Références

1. N. M. RIBE. Coiling of viscous jets. *Proc. R. Soc. Lond. A* (2004) **460** 3223-3239
2. N. M. RIBE, H. E. HUPPERT, M. A. HALLWORTH, M. HABIBI AND D. BONN Multiple coexisting states of liquid rope coiling. *J. Fluid Mech.* (2006) **555** 275-297
3. N. M. RIBE, M. HABIBI AND D. BONN Stability of liquid rope coiling. *Phys. Fluids* (2006) **18** 084102
4. S. W. MORRIS, J. H. P. DAWES, N. M. RIBE, AND J. R. LISTER. Meandering instability of a viscous thread. *Phys. Rev. E* (2008) **77** 066218
5. M. HABIBI, P. C. F. MØLLER, N. M. RIBE AND D. BONN Spontaneous generation of spiral waves by a hydrodynamic instability. *Europhys. Lett.* (2007) **81** 38004

# Une vague auto-similaire pour l'atomisation

Jérôme Hoepffner<sup>1,2</sup>, Ralf Blumenthal<sup>1,2</sup> & Stéphane Zaleski<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond D'Alembert, F-75005 Paris, France.

jerome.hoepffner@upmc.fr

L'atomisation est l'ensemble des processus par lesquels un corps liquide peut être transformé en gouttelettes ; c'est une étape essentielle lorsque l'on veut favoriser ce qui se passe à l'interface liquide/gaz, par exemple lors de la combustion de carburant liquide. C'est par le biais d'instabilités que se produit le plus souvent l'atomisation : le filet d'eau qui coule du robinet devient gouttes par une instabilité d'étranglement due à la tension de surface : Rayleigh–Plateau. A plus grande vitesse, des instabilités dynamiques vont jouer le rôle déterminant, notamment l'instabilité de Kelvin–Helmholtz due à la zone de cisaillement entre le jet liquide et son gaz environnant.

Dans le cas dynamique, cette instabilité primaire ne suffit pas à créer des gouttes, il faudra une succession de mécanismes pour passer des ondes d'interface en vagues, qui se déstabiliseront selon la direction transverse pour donner naissance à des ligaments étirés. Ces ligaments seront à leur tour la proie de mécanismes de dislocation via entre autres l'instabilité de tension de surface [1].

La génération des vagues d'interfaces pour l'atomisation est traditionnellement abordée avec les outils du linéaire, en supposant des perturbations d'amplitude infinitésimale. Ici, nous cherchons à déterminer s'il est possible de mettre en évidence des comportements non linéaires singuliers—caractéristiques, représentatifs—qui nous permettront par la suite de mettre en lumière les étapes intermédiaires de la génération de gouttelettes.

Pour cela nous nous plaçons dans le cadre idéal d'une couche de mélange diphasique, caractérisée par sa tension de surface, le rapport des densités et la vitesse relative des deux phases, ainsi que l'épaisseur de la couche de cisaillement. Nous simulons (voir [2] pour les méthodes numériques) l'évolution dans le temps d'une impulsion initiale localisée qui donnera rapidement naissance à une vague non linéaire. L'observation montre qu'au terme d'un court transitoire, notre vague adopte un comportement auto-similaire très simple. L'analyse dimensionnelle montre que plus la vague sera grande, plus les effets de viscosité, tension de surface et d'épaisseur de couche de mélange seront marginaux. La vague voit ainsi son évolution intrinsèquement liée à la croissance de la seule échelle spatiale restante : la vitesse relative des deux phases  $U$  fois le temps  $t$ .

Nous pouvons maintenant nous intéresser à l'impact du rapport de densité des deux phases. Ce sera l'effet physique déterminant quant à la structure de la solution non linéaire. Une analyse basée sur l'équation de Bernoulli, et qui prend en compte la loi d'échelle auto-similaire montre que la vitesse de croissance de la vague va dépendre du facteur  $\sqrt{\rho_{gaz}/\rho_{liq}}$ . Plus le rapport des densités est petit (moins le gaz est porteur d'énergie cinétique...), plus la croissance est lente. Nous aboutissons ainsi à une loi de croissance de la taille de la vague

$$L \propto \sqrt{\rho_{gaz}/\rho_{liq}} Ut.$$

Nous montrerons également comment la forme de la vague change avec le rapport de densité, et surtout, la manière dont la vague peut générer une bulle de recirculation de grande taille dans le gaz en aval, lorsque son avancée devient assez lente pour pouvoir représenter un obstacle au flux gazeux.

## Références

1. Marmottant, P. and Villermaux, E., On spray formation, *J. Fluid Mech.* (2004) vol. 498, pp 73-111.
2. Fuster, D., Bagué A., Boeck, T., Le Moyne, L., Leboissetier, A., Popinet, S., Ray, P., Scardovelli, R., and Zaleski, S., Simulation of primary atomization with an octree adaptive mesh refinement and VOF method, *Int. J. Mult. Flow*, vol. 35, 2009, pp 550-565.

# Adhésion d'une plaque mince sur une sphère par capillarité

Jérémy Hure<sup>1</sup>, Benoît Roman<sup>1</sup>, & José Bico<sup>1</sup>

PMMH, CNRS UMR 7636, Univ. Paris 6 & Paris 7, ESPCI ParisTech, 10, rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05  
jeremy.hure@espci.fr

Le défi relevé par les cartographes de réaliser des planisphères utilisables pour la navigation a vu le développement de la projection conforme, dont l'un des exemples est la projection cylindrique de Mercator, qui conserve les angles mais dilate les distances. Plus généralement, transformer une sphère ou une calotte sphérique en un plan nécessite d'étirer ou de comprimer celle-ci [1]. Ceci découle de la propriété énoncée par Gauss dans son *Theorema Egregium* qui stipule que le produit des courbures principales est invariant pour toute isométrie locale. La situation étudiée est réciproque du problème des cartographes et consiste à enrober une sphère par une plaque [2]. L'expérience consiste à déposer un film mince sur une sphère rigide préalablement recouverte d'un liquide. La tension superficielle du liquide tend à mettre en contact la sphère et le film, mais ce au prix de l'extension et de la courbure de celui-ci. La morphologie résultante est complexe allant, en fonction des paramètres du système, d'un contact quasi-ponctuel à de multiples branches de contact associées à des zones décollées. Nous étudions ce système à la fois expérimentalement et numériquement en utilisant le logiciel Surface Evolver [3] afin de comprendre les traits caractéristiques des motifs observés, locaux comme la taille de la zone de contact ou globaux comme l'aspect général des zones collées et décollées.

## Références

1. T.A. WITTEN, Stress focusing in elastic sheets, *Rev. Mod. Phys.*, **79** (2), 643-675 (2007).
2. C. MAJIDI AND R.S. FEARING, Adhesion of an elastic plate to a sphere, *Proc. Roy. Soc. A*, **464**, 1309-1317 (2008).
3. K. BRAKKE, The surface Evolver, *Exp. Maths*, **1** (2), 141-165 (1992).

# Blister shapes of thin films randomly deposited on adhesive substrates

Y. Aoyanagi, J. Hure, B. Roman, & J. Bico

PMMH-ESPCI, 10 rue Vauquelin 75005 Paris  
jbico@pmmh.espci.fr

When a flexible sheet is randomly deposited on an adhesive substrate bubbles and blisters are usually produced. The same phenomenon is commonly observed during delamination processes of thin layers induced by differences in thermal expansion coefficients or differential swelling of the materials [1]. Although they are usually disastrous, these blisters may be useful for flexible electronics applications if they are produced in a tailored fashion [2]. In the case of liquid adhesion, mechanical properties may also be deduced from monitoring the shape of controlled blisters [3]. We propose here to describe how relevant mechanical properties of the thin sheet can be inferred from the observation of blisters simply obtained by carelessly depositing the flexible sheet on the adhesive substrate.

## Références

- [1] H. Mei, R. Huang, J.Y. Chung, C.M. Stafford, H.H. Yu, “Buckling modes of elastic thin films on elastic substrates”, *Appl. Phys. Lett.*, v. 90, p. 151902, 2007. [2] D. Vella, J. Bico, A. Boudaoud, B. Roman, and P.M. Reis, “The macroscopic delamination of thin films from elastic substrates”, *PNAS*, v. 106, p. 10901-10906, 2009. [3] J. Chopin, D. Vella, and A. Boudaoud, “The liquid blister test”, *Proc. Roy. Soc. A*, v. 464, p. 2887-2906, 2008.

# Propagation des ondes dans une structure élastique compactée

Seizilles<sup>1</sup>, Bayart<sup>1</sup>, Adda-Bedia<sup>1</sup>, & Boudaoud<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure – 24 rue Lhomond, 75005 Paris  
[gregoire.seizilles@ens.fr](mailto:gregoire.seizilles@ens.fr)

La physique des objets élastiques compactés a reçu beaucoup d'attention en raison de sa proximité avec les milieux granulaires et les verres. Afin de sonder ces structures compactées, nous étudions expérimentalement l'envoi d'ondes acoustiques à travers une boulette de papier aluminium froissé. Le but est de pouvoir caractériser la structure interne de la boulette en enregistrant la relation de dispersion des ondes à travers la boulette. Pour cela, nous avons d'abord trouvé une méthode de compaction pour créer des échantillons et obtenir des résultats reproductible, puis nous avons mesuré les temps de propagation des ondes entre deux points du milieu. Nous avons mis en évidence une longueur effective de propagation. Étonnamment, cette longueur est inférieure à la distance entre les deux points de mesure. Ce résultat peut être interprété en considérant que la propagation se déroule selon deux modes : un mode rapide correspondant à des ondes de compression-dilatation durant laquelle la propagation est considérée comme immédiate et un mode lent correspondant à des ondes de pure flexion. Nous trouvons une forte dépendance de la longueur effective avec la taille macroscopique de la boulette. Nous présentons un modèle simple qui reproduit ce comportement.

## Références

# Turbulence d’onde sur une plaque élastique mince : analyse du spectre d’énergie spatio-temporel

N. Mordant<sup>1</sup>, P. Cobelli<sup>2</sup>, P. Petitjeans<sup>2</sup>, A. Maurel<sup>3</sup>, & V. Pagneux<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

<sup>2</sup> Laboratoire Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris

<sup>3</sup> Laboratoire Ondes et Acoustique, ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris

<sup>4</sup> Laboratoire d’Acoustique, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans

`nmordant@ens.fr`

La turbulence d’onde est constituée d’un spectre continu d’ondes non linéaires. Une théorie analytique –“turbulence faible” – a été développée dans le cas d’ondes faiblement non linéaires [1] et appliquée à un vaste nombre de système physiques (ondes de gravité, ondes capillaires, acoustique, optique non linéaire, condensats, turbulence superfluide, ondes d’Alfvén...). Elle a été récemment appliquée au cas d’ondes de flexion dans une plaque élastique mince [2]. Elle prédit en particulier le spectre d’énergie des ondes dans le cas d’un système forcé hors d’équilibre : l’énergie est transférée dans l’espace de Fourier via des résonances impliquant 4 ondes formant ainsi un spectre continu de longueurs d’onde. Ce système a été réalisé expérimentalement sur une plaque en acier inoxydable de 2 m par 1 m et d’épaisseur d’un demi millimètre. Il a été effectivement observé un régime de turbulence d’onde [3,4]. Ces mesures ponctuelles de la déformation se sont montrées en désaccord quantitatif avec les prédictions de la théorie aussi bien en ce qui concerne la répartition spectrale de l’énergie que le comportement en fonction de la puissance moyenne injectée. Il a alors été suggéré un certain nombre d’explications potentielles : (i) présence de structures fortement non linéaires (du type pli ou D-cones) (ii) effets de taille finie (iii) dissipation non localisée spectralement à haute fréquence (iv) rôle de la faible déformation statique.

Pour tenter de discriminer ces possibilités, nous avons utilisé la méthode de profilométrie par transformée de Fourier développée par P. Cobelli *et al.* [5]. Cette méthode couplée à une caméra rapide nous permet de mesurer le champ de déformation de façon résolue en temps et en espace sur une surface étendue de l’ordre du mètre carré. Il est alors possible de calculer le spectre spatio-temporel d’énergie de la déformation de la plaque [6] (tandis que les mesures ponctuelles ne fournissent qu’un spectre temporel). On observe alors que, comme attendu pour des ondes, l’énergie est localisée sur une surface dans l’espace à 3 dimensions  $(\mathbf{k}, \omega)$  ce qui tend à éliminer la possibilité de structures fortement non linéaires. La relation de dispersion non linéaire observée est très proche de la relation de dispersion linéaire mais avec un faible écart systématique qui reproduit qualitativement les prédictions de la théorie de la turbulence faible. D’autres prédictions de la théorie peuvent être testées : distribution gaussienne des composantes de Fourier ou élargissement du spectre autour de la relation de dispersion. Les caractéristiques de la turbulence faible semble être observées qualitativement à défaut de l’être quantitativement.

## Références

1. A. C. Newell, S. Nazarenko et L. Biven, “Wave turbulence and intermittency” *Physica D* **152-153**, 520 (2001)
2. G. Düring, C. Josserand et S. Rica, “Weak turbulence for a vibrating plate : can one hear a Kolmogorov spectrum?”, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 025503 (2006)
3. N. Mordant, “Are there waves in elastic wave turbulence?”, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 234505 (2008)
4. A. Boudaoud, O. Cadot, B. Odille et C. Touzé, “Observation of wave turbulence in vibrating plates”, *Phys. Rev. Lett.* **100** 234504 (2008)
5. A. Maurel, P. Cobelli, V. Pagneux et P. Petitjeans, “Experimental and theoretical inspection of the phase-to-height relation in Fourier transform profilometry”, *Applied Optics*, **48**, 380 (2009)
6. P. Cobelli, P. Petitjeans, A. Maurel, V. Pagneux et N. Mordant, “Space-Time Resolved Wave Turbulence in a Vibrating Plate”, *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 204301 (2009)

# Propriétés statistiques d'un fil élastique compacté

Elsa Bayart<sup>1</sup>, Arezki Boudaoud<sup>1</sup> & Mokhtar Adda-Bedia<sup>1</sup>

Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR8550, 24 rue Lhomond 75231 Paris Cedex 05, France

bayart@lps.ens.fr

On trouve dans la nature des objets élastiques confinés dans des espaces trop petits, les obligeant à être pliés. La géométrie de ces structures fait apparaître une grande variété d'échelles de longueur. Les propriétés élastiques d'un tel système sont imposées par les dimensions du contenant et par le fait que l'objet ne peut pas s'interpénétrer.

Afin de modéliser simplement le papier froissé, nous avons élaboré une expérience permettant d'étudier la compaction d'un objet à une dimension dans une géométrie 2D. Un fil élastique est introduit dans une cellule de Hele-Shaw circulaire préalablement remplie d'un fluide dont la densité est plus élevée que celle du fil. La cellule est mise en rotation et le fil est compacté par une force centripète. La configuration initiale du fil et l'accélération du disque rotatif permettent d'atteindre les différentes configurations possibles tandis que la vitesse finale de rotation du disque contrôle l'intensité du confinement.

Nous nous intéressons d'abord à la réversibilité du processus de compaction en augmentant et diminuant successivement la vitesse de rotation du disque. Nous montrons qu'il est possible de définir ainsi la compressibilité d'une configuration. Nous cherchons ensuite à mettre en évidence ce qui gouverne la distribution des singularités (les D-cones et les ridges dans le cas du papier froissé, les points de forte courbure dans notre expérience) dans le système compacté. Pour cela nous utilisons une approche statistique en mesurant les distributions de longueurs, de courbure et d'énergie pour un grand nombre de configurations.

# Thermalisation anormale d'ondes unidimensionnelles

Suret Pierre<sup>1</sup>, Picozzi Antonio<sup>2</sup>, Hans R. Jauslin<sup>2</sup>, & Randoux Stéphane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire PHLAM, bât. P5, Université des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq

<sup>2</sup> Institut Carnot de Bourgogne, UMR 5029 CNRS-Université de Bourgogne, Dijon, France

pierre.suret@univ-lille1.fr

La question de la thermalisation d'un système non linéaire Hamiltonien a déjà été largement explorée dans le cadre de la problématique Fermi-Pasta-Ulam et connaît un regain d'intérêt récent dans l'étude des condensats de Bose Einstein *unidimensionnels* [1]. La thermalisation d'un système Hamiltonien d'ondes incohérentes se manifeste par une évolution irréversible de l'onde vers un état d'équilibre 'thermodynamique', le spectre de Rayleigh-Jeans (RJ). Comme le décrit la théorie de turbulence faible[2], cet état se caractérise par un maximum de l'entropie hors-équilibre. Nous étudions théoriquement et expérimentalement la thermalisation d'ondes optiques *unidimensionnelles* se propageant dans une fibre optique. Nous avons identifié un phénomène de thermalisation anormale qui se traduit par une relaxation du système vers une nouvelle famille de distributions d'équilibre qui ne vérifient pas une équipartition d'énergie. Ce phénomène est lié à l'existence d'un invariant *local*  $J_\omega$  dans l'espace des fréquences; soulignons que cette famille de distributions est de nature radicalement différente d'une distribution de Rayleigh-Jeans généralisée qui serait obtenue avec la contrainte d'un invariant *global* supplémentaire.

La propagation de lumière non polarisée dans une fibre optique est décrite par une équation de Schrödinger non linéaire vectorielle (NLSV)

$$iD_1 A_1 = -\alpha_1 \partial_{tt} A_1 + \gamma(|A_1|^2 + \kappa|A_2|^2)A_1; \quad iD_2 A_2 = -\alpha_2 \partial_{tt} A_2 + \gamma(|A_2|^2 + \kappa|A_1|^2)A_2 \quad (1)$$

où  $(A_1, A_2)$  se réfèrent aux états de polarisation orthogonaux,  $D_{1,2} = (\partial_z + u_{1,2}\partial_t)$ . Comme attendu, les simulations numériques de NLSV révèlent une thermalisation des ondes vers la distribution de RJ, i.e., *un spectre lorentzien dont les queues exhibent une équipartition d'énergie*,  $n^{th} \sim \omega^{-2}$ . Il peut cependant arriver que les conditions de résonances de l'interaction à quatre-ondes soient dégénérées, e.g., lorsque  $\alpha_1 = \alpha_2$  (e.g., masses atomiques identiques dans un condensat binaire). Dans ce cas les Eqs.(1) admettent un état d'équilibre *ne satisfaisant pas une équipartition d'énergie*. La théorie cinétique révèle en fait l'existence d'un nouvel invariant local  $J_\omega = n_1(\omega) + n_2(\omega)$  dans l'espace des fréquences,  $n_{1,2}$  étant les spectres des ondes  $A_{1,2}$ . L'effet de thermalisation se trouve ainsi contraint par la conservation de cet invariant, ce qui empêche le système de relaxer vers le spectre de RJ d'entropie maximale. Nous avons montré qu'il existe cependant un théorème H et que le système relaxe vers un état d'équilibre qui prend par exemple la forme suivante quand  $u_1 = u_2$  :

$$n_1^{eq}(\omega) = J_\omega/2 - \left[ \sqrt{1 + \lambda^2 J_\omega^2/4} - 1 \right] / \lambda \quad (2)$$

$n_1^{eq}(\omega)$  dépend de la condition initiale et le spectre de RJ est un cas particulier appartenant à cette nouvelle famille d'équilibre. Ce phénomène de thermalisation anormale apparaît dans d'autres systèmes (NLS scalaire avec dispersion d'ordre 3 par exemple) quand les conditions de résonances sont dégénérées.

Ce phénomène a été mis en évidence expérimentalement en injectant deux ondes incohérentes polarisées circulairement droite et gauche dans une fibre optique quasi-isotrope. Après une propagation dans une longueur typique de 1m pour une puissance crête de 1kW nous observons une évolution des deux spectres vers la nouvelle distribution d'équilibre (2).

## Références

1. E. g., T. Kinoshita, T. Wenger, D.S. Weiss, *A quantum Newton's cradle*, Nature **440**, 900 (2006).
2. V.E. Zakharov, V.S. L'vov, G. Falkovich, *Kolmogorov Spectra of Turbulence I* (Springer, Berlin, 1992).

# Auto-résonance de l'instabilité Raman stimulée due à une non-linéarité d'origine cinétique dans un plasma inhomogène

T. Chapman<sup>1</sup>, S. Hüller<sup>1</sup>, P.E. Masson-Laborde<sup>2</sup>, & W. Rozmus<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de Physique Théorique, CNRS, École Polytechnique, Palaiseau, France

<sup>2</sup> CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

<sup>3</sup> University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada

chapman@cpht.polytechnique.fr

La diffusion Raman stimulée est une instabilité paramétrique de grand intérêt dans le domaine de la physique de l'interaction laser-plasma. Le contrôle et la compréhension de ce processus est en particulier crucial pour garantir un transfert d'énergie efficace du laser vers le plasma, lors de fusion par confinement inertiel.

Le processus de diffusion Raman stimulée peut être décrit par un système de trois équations d'enveloppe aux dérivées partielles, couplées par des termes quadratique en amplitude. Une onde électromagnétique pompe (le champ laser) est diffusée en excitant dans le plasma une perturbation de densité électronique (l'onde plasma), qui émet une deuxième onde électromagnétique (la lumière diffusée). Les fréquences et les vecteurs d'onde de ces trois composantes remplissent des conditions de résonance.

Nous étudions le phénomène d'auto-résonance spatiale qui se produit lorsque un faisceau laser, se propageant dans un plasma avec un gradient de densité linéaire, passe par un point où les trois ondes sont résonantes. Nous considérons un déphasage non-linéaire de l'onde plasma électronique associé à des effets cinétiques faibles (dus à des interactions ondes-particules). Ce déphasage peut désaccorder les trois-ondes et supprimer la résonance, mais on observe que, sous certaines conditions, il compense le déphasage induit par le gradient de densité, et permet ainsi d'obtenir des solutions verrouillées en phase. Ces solutions peuvent conduire à la croissance d'ondes plasmas de grande amplitude.

Le comportement de ces solutions, obtenues en tenant compte d'une non-linéarité cinétique, présente des similitudes et des différences intéressantes avec celles établies par Yaakobi *et al.* [1] en considérant une autre source de non-linéarité. Ces différences sont expliquées en utilisant un modèle analytique réduit. Les prédictions de ce modèle simplifiée sont vérifiées en réalisant des simulations à trois ondes qui incluent des effets d'amortissement non-linéaires et permettent de mieux reproduire les processus physiques ayant lieu lors des expériences réelles.

## Références

1. O. Yaakobi *et al.*, *Spatially autoresonant stimulated Raman scattering in nonuniform plasmas*, Phys. Plasmas **15**, 032105 (2008)

# Mécanismes et mesures du mélange chaotique des fluides visqueux

Emmanuelle Gouillart<sup>1</sup>, Olivier Dauchot<sup>2</sup>, & Jean-Luc Thiffeault<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Unité mixte CNRS/Saint-Gobain "Surface du Verre et Interfaces", 39 quai Lucien Lefranc, 93303 Aubervilliers cedex, France

<sup>2</sup> Service de Physique de l'Etat Condensé, DSM, CEA Saclay, URA2464, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

<sup>3</sup> Department of Mathematics, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, USA

[emmanuelle.gouillart@saint.gobain.com](mailto:emmanuelle.gouillart@saint.gobain.com)

Nous avons étudié le mélange de fluides visqueux dans des écoulements bidimensionnels ouverts et fermés donnant lieu à de l'advection chaotique, c'est-à-dire des trajectoires lagrangiennes complexes [1][2]. Nous avons pour but de décrire la vitesse de l'homogénéisation d'un colorant par le mélange chaotique, mais aussi de proposer des mesures du mélange pertinentes. Pour cela, nous avons réalisé deux types d'expériences de mélange chaotique, les premières dans un domaine fermé où un agitateur se déplace sur une trajectoire en "huit", et des expériences de mélange transitoire dans un canal ouvert où un écoulement global traverse une région de mélange agitée par deux tiges. Des simulations numériques de ces protocoles en écoulement de Stokes nous donnent par ailleurs des informations complémentaires sur les trajectoires lagrangiennes.

Nous avons tout d'abord proposé une caractérisation topologique du mélange reposant sur l'enchevêtrement des trajectoires de points périodiques – les "tiges fantômes" [3]. D'autre part, l'étude expérimentale du champ de concentration d'un colorant nous a permis de comprendre et quantifier l'importance des bords du domaine où se fait le mélange, pour les écoulements fermés comme ouverts : la nature chaotique ou régulière des trajectoires initialisées près des bords détermine en grande partie l'évolution du champ de concentration vers l'homogénéité, et cela même loin des bords [4].

Pour les écoulements en système ouvert, nous avons montré l'apparition d'un motif permanent de colorant à la suite de l'injection d'une impureté [5]. Ce motif est caractéristique de l'écoulement et permet donc de proposer des mesures quantitatives du mélange.

## Références

1. H. Aref, *J. Fluid Mech.* **143**, 1 (1984).
2. J. M. Ottino, *The Kinematics of Mixing : Stretching, Chaos, and Transport* (Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1989).
3. E. Gouillart, J.-L. Thiffeault and M. D. Finn, *Phys. Rev. E* **73**, 036311 (2006).
4. E. Gouillart, N. Kuncio, O. Dauchot, B. Dubrulle, S. Roux et J.-L. Thiffeault, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 114501 (2007).
5. E. Gouillart, O. Dauchot, J.-L. Thiffeault and S. Roux, *Phys. Fluids* **21**, 023603 (2009).

# Fluctuations hors équilibre d'une interface entre deux fluides visqueux

M. Thiébaud<sup>1</sup> & T. Bickel<sup>1</sup>

CPMOH, Université de Bordeaux et CNRS (UMR 5798), 351 cours de la libération, 33405 Talence cedex  
m.thiebaud@cpmoh.u-bordeaux1.fr

Le but de l'étude est de traiter les propriétés statistiques d'une interface entre deux fluides visqueux sous l'effet du cisaillement dans une géométrie plane. Ce système stationnaire hors équilibre peut améliorer la compréhension de la physique statistique hors équilibre. L'étude des propriétés statistiques est assez simple pour être abordée analytiquement et assez sophistiquée pour présenter les caractéristiques des états stationnaires hors équilibre, comme le montre une expérience effectuée par Derks et ses collaborateurs [1]. Une interface entre deux fluides newtoniens particuliers (diamètre  $\sim 100$  nm) est cisailée et on constate une diminution de sa rugosité.

La première partie du travail consiste à formaliser la suppression des fluctuations d'une interface par les effets visqueux sous cisaillement. On néglige les effets inertiels. Le raisonnement employé est similaire à celui utilisé pour obtenir la relation de dispersion des ondes capillaires : on réalise un développement en  $\sqrt{k_B T / (\sigma l_c^2)}$  où  $k_B$  est la constante de Boltzmann,  $T$  la température,  $\sigma$  la tension de surface et  $l_c$  la longueur capillaire. Le calcul est poussé jusqu'à l'ordre deux, ordre le plus bas où apparaît le couplage entre interface et cisaillement. L'interface, caractérisée par sa hauteur  $h$ , vérifie la relation suivante dans l'espace de Fourier des vecteurs d'ondes  $\mathbf{q}$  :

$$\partial_t h(\mathbf{q}, t) = -\frac{1}{\tau_q} h(\mathbf{q}, t) - i\dot{\gamma}_{eff} \int \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^2} k_x h(\mathbf{k}, t) h(\mathbf{q} - \mathbf{k}, t) + \varphi(\mathbf{q}, t) \quad (1)$$

où  $\tau_q$  est le temps de relaxation à l'équilibre,  $k_x$  la projection du vecteur d'onde  $\mathbf{k}$  selon la direction du cisaillement,  $\dot{\gamma}_{eff}$  un taux de cisaillement effectif (fonction des viscosités des fluides) et  $\varphi$  représente les fluctuations thermiques, égales au bruit blanc gaussien de l'équilibre.

Cette équation appartient à une classe plus générale d'équations non linéaires stochastiques, les équations de Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) [2]. Cette famille d'équations apparaît dans de nombreux problèmes de matière molle mais habituellement à la suite de raisonnements phénoménologiques. Dans le cas présenté ici, l'équation KPZ est dérivée de manière rigoureuse sans autre hypothèse que le régime surarmorti.

Cette classe d'équations ne peut être résolue exactement. La première méthode à envisager est de considérer la non-linéarité comme petite. D'après cette méthode, le paramètre de contrôle de la non-linéarité est  $\alpha = \sqrt{k_B T / (\sigma l_c^2)} \times \dot{\gamma}_{eff} \tau_c$  où  $\tau_c$  est le temps capillaire. La solution présentée dans la suite est donc valable pour  $0 \leq \alpha < 1$ . En revenant dans l'espace réel, on constate bien une diminution de la rugosité selon  $\langle h^2(\mathbf{r}) \rangle(\dot{\gamma}) = \langle h^2(\mathbf{r}) \rangle(0)(1 - K\alpha^2 + o(\alpha^4))$ . Dans cette expression,  $K$  est une constante universelle dans le sens où elle ne dépend ni des propriétés du fluide ni des constantes élastiques de l'interface. Le modèle ci-dessus donne  $K = 0,087$  tandis que la régression des points expérimentaux donne  $K = 0,246$ .

Plusieurs pistes sont à exploiter pour expliquer le décalage entre le modèle hydrodynamique et les résultats expérimentaux. En particulier, la séparation des différentes échelles de longueur n'est pas clairement respectée dans l'expérience. Nous n'avons considéré pour l'instant que les effets visqueux, il reste au moins à considérer les effets inertiels et les effets de parois.

## Références

1. D. DERKS, Suppression of Thermally Excited Capillary Waves by Shear Flow, *PRL*, **97**, 038301 (2006).
2. M. KARDAR, Dynamic Scaling of Growing Interfaces, *PRL*, **56**, 889-892 (1986).

# Événements extrêmes dans les systèmes optiques temporels et spatiaux

A. Mussot, A. Kudlinski, M. Kolobov, E. Louvergneaux, V. Odent, M. Douay, and M. Taki

`eric.louvergneaux@univ-lille1.fr`

**Résumé.** Nous étudions théoriquement et expérimentalement les événements rares et intenses générés dans les supercontinuum et les structures transverses optiques.

**Abstract.** We theoretically and numerically study optical rare and strong events generated in fiber supercontinua and optical feedback system patterns.

Les vagues scélérates sont une des manifestations fascinante de la nature. Ces vagues dévastatrices apparaissent à partir de nulle part, ont une durée de vie très courte et sont extrêmement rares. Ces dernières font partie d'une classe d'événements plus large qu'on nomme les événements extrêmes. Aujourd'hui, il est possible de reproduire de telles ondes solitaires dans des systèmes fibrés [1] avec des caractéristiques similaires à celles rencontrées dans les océans. Ainsi, il est possible d'étudier les ondes scélérates dans des systèmes optiques. Il a d'ailleurs été montré que ces événements extrêmes pouvaient aussi être observés dans des systèmes spatialement étendus [2]. L'analyse présentée ici concerne l'étude des ondes géantes qui apparaissent dans les systèmes non-linéaires optiques aussi bien temporels que spatiaux.

Dans ce contexte, nous identifions le mécanisme à l'origine de l'émission des pulses solitaires extrêmes (ondes scélérates optiques) émis dans le supercontinuum d'une fibre photonique pompée par une onde continue [3]. Nous démontrons numériquement que ces événements rares et intenses qui apparaissent et disparaissent à partir de nulle part résultent de collisions de solitons. Nous montrons aussi que leur origine est directement liée à la présence d'instabilités convectives dans le système [4]. Cette nature convective est induite par les termes du troisième ordre de dispersion et d'émission Raman stimulée qui brisent la symétrie de réflexion dans l'équation de Schrödinger.

De telles ondes optiques géantes sont aussi mises en évidence dans un système transverse composé d'une lame mince de milieu Kerr soumise à une contre réaction optique. Dans ce système nous montrons numériquement et expérimentalement que la fonction de densité de probabilité est caractéristique d'impulsions spatiales extrêmes.

## Références

1. D. R. SOLLI, C. ROPERS, P. KOONATH, AND B. JALALI, Optical rogue waves, *Nature*, **450**, 1054 (2007).
2. A. MONTINA, U. BORTOLOZZO, S. RESIDORI, AND F. T. ARECCHI, Non-Gaussian Statistics and Extreme-Waves in a Nonlinear Optical Cavity, *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 173901(2009).
3. A. MUSSOT, A. KUDLINSKI, M. KOLOBOV, E. LOUVERGNEAUX, M. DOUAY, AND M. TAKI, *Opt. Express*, **17** 17010 (2009).
4. M. TAKI, A. MUSSOT, A. KUDLINSKI, E. LOUVERGNEAUX, M. KOLOBOV AND M. DOUAY, *Phys. Lett A*, **374**, 691 (2010).

# Dégonflement de surfaces élastiques sphériques

Catherine Quilliet, François Quémeneur, Philippe Marmottant, & Brigitte Pépin-Donat

<sup>1</sup> Lab. Spectrométrie Physique, Univ. J. Fourier Grenoble I & CNRS

<sup>2</sup> DSM/INAC/SPrAM/LEMOH, CEA Grenoble

Catherine.Quilliet@ujf-grenoble.fr

La déformation de coques sphériques par dégonflement est un problème suffisamment complexe pour qu'il n'ait existé, jusqu'à récemment, que peu de résultats pour les grandes déformations. Je vais présenter une étude numérique de surfaces sphériques avec élasticité de courbure et élasticité de déformation dans le plan, auxquelles on impose une diminution de leur volume. Cette étude permet de retrouver les lois d'échelle issues des travaux de Landau sur les petites déformations de coques sphériques minces d'un matériau isotrope (flambage avec apparition d'une dépression de taille caractéristique  $\sqrt{dR}$ , où  $d$  est l'épaisseur et  $R$  le rayon de la coque, pour une surpression extérieure  $P_c \propto Y_{3D} \left(\frac{d}{R}\right)^2$ , où  $Y_{3D}$  est le module d'Young du matériau). Pour les grandes déformations, deux types de conformations sont numériquement obtenus : pavage métastable de dépressions sur toute la surface sphérique, ou croissance d'une dépression unique avec développement de plis radiaux dans la concavité. Ces deux types de déformations ont été observés dans différents systèmes expérimentaux à des échelles variées (du micron au millimètre). Dans les deux cas, on peut via des calculs simples relier la taille typique des déformations aux paramètres élastiques et géométriques des surfaces 2D modèles, et par conséquent à ceux des objets 3D qu'elles modélisent.

Les surfaces modélisant les coques minces de matériau isotrope ne couvrent pas tout le spectre de paramètres élastiques 2D envisageables (en particulier, pour le coefficient de Poisson :  $\nu_{2D} < \frac{1}{2}$ ). Je présenterai donc également la première étude systématique effectuée sur des surfaces dites "peu compressibles" dont le coefficient de Poisson est compris entre  $\frac{1}{2}$  et 1. Le cas limite  $\nu_{2D} = 1$  a été, lui, intensivement étudié pour la compréhension des formes prises par les vésicules de membranes de phospholipides en phase fluide, système physico-chimique modèle fructueux des globules rouges. L'étude des surfaces peu compressibles présentée dans cette communication a d'une part généré des formes inédites, se présentant dans la même succession lorsque les trois principaux paramètres du problème sont variés : taille de la sphère, coefficient de Poisson et rapport entre le module d'Young 2D de la surface et sa constante de courbure. D'autre part, elle a permis de mettre en évidence l'apparition d'une seconde longueur caractéristique (la première étant la généralisation de  $\sqrt{dR}$ , propre aux coques minces de matériau isotrope, à l'ensemble des surfaces étudiées) pour les surfaces peu compressibles, dont la dépendance en le coefficient de Poisson a pu être établie.

Les surfaces peu compressibles peuvent modéliser des coques de matériau non isotrope, et je montrerai comment la comparaison entre formes numériques et formes expérimentalement observées sur des vésicules phospholipidiques en phase "gel" (solide 2D) dégonflées a permis de cerner les paramètres élastiques de la membrane "solide".

## Références

# Trafic de gouttes à une jonction

D. A. Sessoms<sup>1</sup>, L. Courbin<sup>1</sup>, P. Panizza<sup>1</sup>, & A. Amon<sup>1</sup>

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

`axelle.amon@univ-rennes1.fr`

De nombreux domaines mettent en jeu la circulation d'éléments discrets dans des réseaux : la circulation sanguine, les écoulements de dispersions de gouttes (industrie du pétrole et microfluidique), et la modélisation de la circulation routière. Comprendre ces écoulements sur l'ensemble d'un réseau nécessite tout d'abord une description du mode de répartition des éléments à une jonction. Dans le cas d'écoulements dilués de gouttes en microfluidique, la règle de répartition est particulièrement simple : entre plusieurs canaux accessibles, une goutte choisira celui qui possède la plus faible résistance hydrodynamique. En tant que système modèle, l'étude de la répartition de gouttes arrivant à l'entrée d'une boucle asymétrique a suscité de nombreux travaux, essentiellement expérimentaux et numériques. Parmi les enjeux de ces études, il y a notamment la compréhension de la répartition des cellules du sang dans la circulation sanguine [1], mais aussi la maîtrise du flux de gouttes dans des réseaux microfluidiques en vue d'applications technologiques.

La dynamique de répartition des gouttes arrivant successivement à l'entrée d'une boucle asymétrique est complexe : une succession de régimes périodiques et apériodiques ont été observés avec des motifs de répartition des gouttes difficilement prédictibles [2]. A notre connaissance, une description théorique complète de la sélection de ces régimes et de leur caractérisation n'a jamais été publiée. L'origine de la complexité dans ce système vient du fait que les variables dépendent de toutes les gouttes présentes à cet instant dans la boucle [3] : le problème rentre donc dans la classe des systèmes à retard. D'autre part, en tant que système discret dont la dynamique est gouvernée par l'itération d'une règle simple, il se rattache aussi aux automates cellulaires.

Le travail que nous présentons est expérimental, numérique et théorique [4]. Nous nous basons sur un modèle conduisant à une dynamique discrète d'une variable binaire (choix du bras par la goutte à la jonction). L'étude numérique de ce modèle nous permet de caractériser par des quantités invariantes les régimes observables à paramètres fixés. Ce modèle nous permet de trouver les règles gouvernant la sélection de ces quantités invariantes et les valeurs de ces dernières. Les prédictions théoriques donnent une description complète des résultats numériques. Enfin, la pertinence de ce modèle est confirmée par une étude expérimentale. La limite dans laquelle nous nous plaçons dans le modèle est cohérente avec l'expérience et permet la description des caractéristiques des régimes observés. En particulier, l'observation expérimentale de régimes dynamiques constitués d'une succession de régimes périodiques est reproduite numériquement par la prise en compte de bruit (fluctuation de la distance entre gouttes ou de la perte de charge associée à chaque goutte). Cette dynamique correspond à la multistabilité de différents régimes possédant les mêmes invariants.

## Références

1. R. T. CARR AND M. LACOIN, Nonlinear Dynamics of Microvascular Blood Flow, *Annals of Biomedical Engineering*, **28**, 641-652 (2000).
2. M. J. FUERSTMAN, P. GARSTECKI AND G. M. WHITESIDES, Coding/Decoding and Reversibility of Droplet Trains in Microfluidic Networks, *Science*, **315**, 828-832 (2007).
3. M. BELLOUL, W. ENGL, A. COLIN, P. PANIZZA AND A. AJDARI, Competition between Local Collisions and Collective Hydrodynamic Feedback Controls Traffic Flows in Microfluidic Networks, *Physical Review Letters*, **102**, 194502 (2009).
4. D. A. SESSOMS, A. AMON, L. COURBIN AND P. PANIZZA, Complex dynamics of droplet traffic in microfluidic networks : periodicity, multistability and selection rules, *soumis à Physical Review Letters*.

# Structures stationnaires de réaction-diffusion : derniers développements et comment les construire expérimentalement

Patrick de Kepper

Centre de Recherche Paul Pascal, Bordeaux

En 1952 le mathématicien Britannique Alan Turing prévoyait théoriquement le développement spontané de structures périodiques stationnaires du champ de concentration dans un mélange réactionnel initialement homogène sous le seul effet du couplage entre processus cinétique non-linéaire et transport diffusif des espèces en solution. La première mise en évidence d'une telle structure n'a eu lieu qu'en 1990, au cours de nos travaux avec la réaction d'oxydo-réduction chlorite-iodure-acide malonique (CIMA). Cette réaction bien comprise et maîtrisée par de nombreux groupes est devenue la référence dans le domaine. Peu de temps après cette première découverte une autre réaction, la réaction à auto-catalyse acide ferrocyanure-iodate-sulfite (FIS), a aussi donné naissance à des structures stationnaires mais à travers l'interaction répulsive de fronts d'activité chimique, un autre mécanisme que celui proposé par Turing. Les processus physico-chimiques qui ont rendu cela possible dans cette réaction sont restés longtemps mystérieux et les observations non reproductibles.

Jusqu'à ce que nous développions une méthode semi-empirique pour produire des structures stationnaires dans des réactions différentes, en 2009, aucun nouveau système chimique en simple solution n'en avait produit. Cette méthode s'appuie sur le phénomène de bistabilité spatiale obtenus dans des réacteurs spatiaux ouverts alimentés par une face (OSFR), la maîtrise de processus chimiques rétroactifs qui se traduisent au niveau des diagrammes d'état de la dynamique du système par une « topologie croisée » et la réduction sélective de la diffusion d'une des variables chimiques contrôlant le processus auto activateur. La méthode, mise au point pour réinterpréter et reproduire les observations anciennes de la réaction FIS, nous a conduit à découvrir un deuxième exemple de réaction développant une structure stationnaire « à la Turing », 20 ans après la première. Nous discutons ces différentes étapes au cours de cet exposé.