

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

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

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

² GREMI, Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés, UMR7344, CNRS/Université d'Orléans, Rue Gaston Berger, BP4043, 18028 Bourges Cedex, France

maxime.mikikian@univ-orleans.fr

Résumé. Les oscillations multimodales (Mixed-Mode Oscillations ou MMOs) sont une variété de signaux qui se rencontrent dans de nombreux domaines. Cette alternance d'oscillations de petite et grande amplitude est caractéristique de certaines réactions chimiques oscillantes et de l'activité neuronale. Dans ce travail, nous mettons en évidence que ces oscillations existent également dans un tout autre domaine scientifique : les plasmas poussiéreux. Ce mélange de plasma et de poussières est le siège de nombreuses instabilités et de phénomènes dynamiques complexes dont certains correspondent à des MMOs. Des résultats expérimentaux ainsi qu'une analyse préliminaire de ces comportements sont présentés dans ce papier.

Abstract. Mixed-Mode Oscillations (MMOs) are a characteristic kind of signal occurring in several scientific fields. This alternation of small and large amplitude oscillations is typical of some oscillating chemical reactions and neuronal activity. In this work, it is shown that these oscillations also exist in a completely different field : dusty plasmas. This mixture of plasma and dust particles is characterized by many instabilities and complex dynamical phenomena corresponding to MMOs. In this paper, experimental results and preliminary analyses of these behaviors are presented.

1 Introduction

Les plasmas sont des gaz ionisés, c'est à dire composés d'atomes, de molécules, d'ions et d'électrons. C'est un milieu énergétique avec des propriétés réactives, thermiques et radiatives que l'on rencontre aussi bien à l'état naturel que dans l'industrie. Les plasmas peuvent également contenir des objets solides (poussières) dont la taille peut varier du nanomètre au centimètre. Ces plasmas, que l'on nomme alors plasmas poussiéreux [1,2], sont très répandus en astrophysique [3] (queues de comètes, atmosphères et anneaux planétaires, ...), dans l'industrie [4] (notamment en microélectronique et nanotechnologie) et au bord des plasmas de fusion thermonucléaire [5]. Leurs propriétés ont de fortes similitudes avec les milieux granulaires et les colloïdes.

Dans les expériences de laboratoire, les plasmas poussiéreux sont étudiés en injectant artificiellement des poussières dans le plasma ou en les fabriquant au sein même de celui-ci. Cette dernière méthode utilise soit des gaz réactifs [6] soit le phénomène de pulvérisation des surfaces exposées au plasma [7]. Dans les deux cas, des molécules réactives sont injectées dans la phase gazeuse et donnent lieu à une suite de réactions chimiques et physiques entraînant la croissance d'objets solides [8]. Ces poussières se chargent alors électriquement en capturant une partie des électrons libres du plasma. Cette perte d'électrons et la présence nouvelle de particules massives fortement chargées, déstabilisent le plasma et donnent lieu à de nombreuses instabilités non linéaires.

2 Instabilités dans les plasmas poussiéreux

Lorsque la charge électrique globale portée par le nuage de poussières devient non négligeable devant la densité électronique, l'équilibre du plasma est fortement altéré. En effet, une poussière d'environ $1 \mu\text{m}$

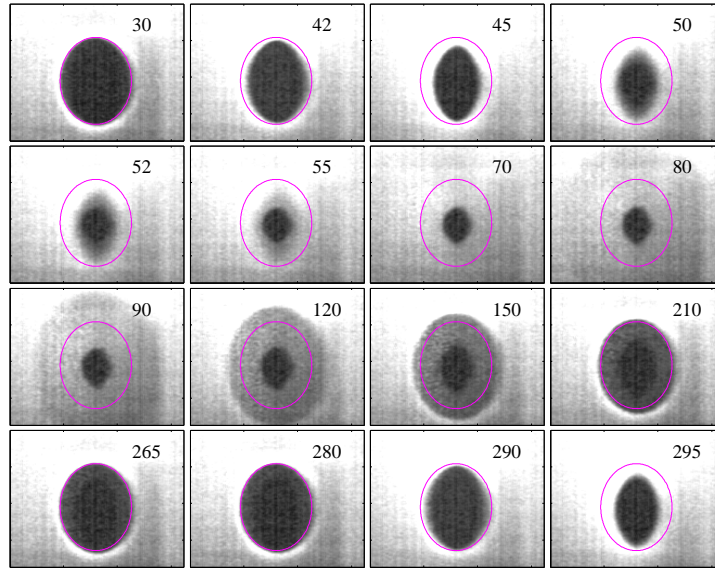


Figure 1. Instabilité heartbeat : le void en position d'équilibre (image 30) se contracte à partir de l'image 42. Il atteint sa taille minimale à l'image 70 et opère alors sa réouverture jusqu'à l'image 280. Le cycle contraction-expansion recommence ensuite de façon cyclique.

peut porter plus de 10^3 électrons à sa surface. Ainsi, dès lors que la densité de poussières devient grande, cette modification du plasma peut donner lieu à des phénomènes instables. Ces instabilités peuvent apparaître durant la formation des poussières [9,10,11], leur forme et leur fréquence évoluent alors suivant les changements de taille et de densité des poussières. Elles peuvent également apparaître une fois le nuage de poussières constitué, alors que la taille et la densité des poussières ne varient plus. Ce dernier type d'instabilité ("heartbeat") [12,13] donne lieu à des oscillations de type MMOs [14,15,16,17] que nous allons présenter dans la section suivante. L'éventail des phénomènes instables étant relativement vaste, d'autres types d'instabilités sont également observés [18].

L'instabilité heartbeat, tient son nom de son mouvement apparent qui rappelle le battement d'un coeur. En effet, lorsque le nuage de poussières est piégé dans le plasma, une zone centrale dépourvue de poussières ("void") continue d'exister [12]. Cette zone est maintenue par l'équilibre entre deux forces, une dirigée vers l'extérieur due aux ions positifs qui chassent les poussières du centre du plasma, et l'autre dirigée vers l'intérieur (due au champ électrique) qui joue le rôle de force de rappel sur les poussières. Cet équilibre précaire peut se rompre spontanément et donner lieu à une oscillation continue de la taille du void. Ce phénomène est mis en évidence par imagerie rapide [13,15]. Pour cela, une nappe laser est utilisée afin d'illuminer le nuage de poussières et une caméra rapide (quelques milliers d'images par seconde) équipée d'un filtre permet de recueillir la lumière diffusée. Des images extraites d'une vidéo sont présentées sur la figure 1. Les zones blanches sont celles contenant les poussières, la zone sombre correspondant au void est clairement visible au centre de l'image 30. Une ellipse délimite la position ouverte du void. La contraction commence sur l'image 42 et se poursuit jusqu'à l'image 70. La réouverture du void démarre ensuite et apparaît plus complexe qu'attendu avec la formation de plusieurs zones de densité de poussières différentes. Le void retrouve sa position d'équilibre à l'image 280 et une nouvelle contraction se déclenche.

Pendant cette instabilité, l'ensemble des paramètres du plasma est modifié. L'instabilité peut ainsi être également caractérisée en analysant, par exemple, les variations du courant de décharge. C'est notamment ce diagnostic qui permet de révéler la présence de MMOs et le caractère non linéaire de l'instabilité heartbeat [14].

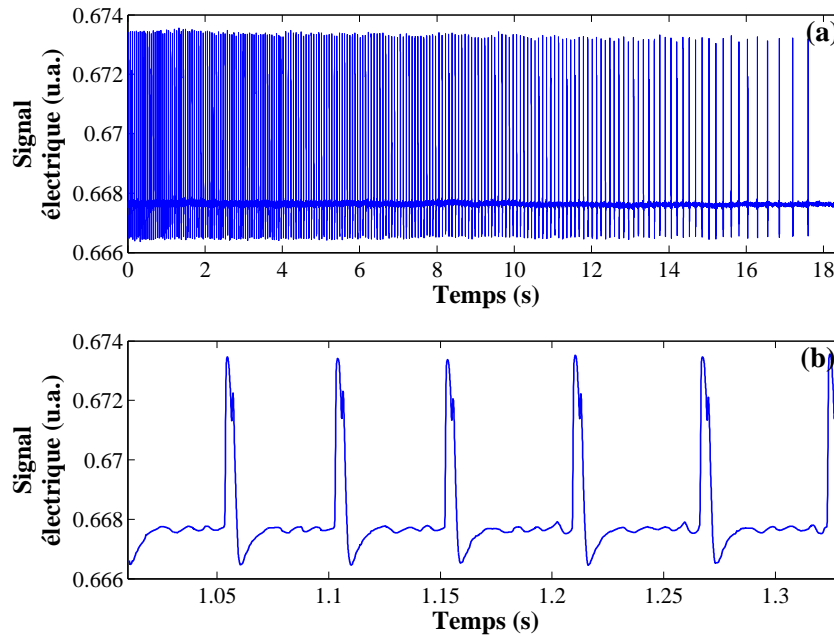


Figure 2. Phase d'arrêt progressif de l'instabilité heartbeat. (a) Les pics de grande amplitude correspondent aux contractions du void. Ils s'écartent progressivement jusqu'à l'arrêt total de l'instabilité vers 18 s. (b) Zoom de (a) mettant en évidence la présence d'oscillations de petite amplitude entre les pics principaux. Ce nombre n d'oscillations varie au cours du temps. Une transition entre un état à $n = 3$ et un état $n = 4$ est présenté.

3 Oscillations multimodales dans les plasmas poussiéreux

Sur la figure 1, l'instabilité heartbeat est pleinement développée. Les phases de contraction et d'expansion du void se succèdent de façon très régulière. Cependant, cette instabilité peut s'arrêter au bout d'un certain temps. Cette phase d'arrêt est particulièrement intéressante car elle est marquée par l'apparition de contractions incomplètes qui deviennent de plus en plus nombreuses jusqu'à l'arrêt de l'instabilité. Ce phénomène est particulièrement visible sur le courant de décharge qui circule dans le plasma. Celui-ci a alors une forme assez particulière qui est présentée sur la figure 2. La figure 2(a) montre clairement la phase d'arrêt qui dure près d'une vingtaine de secondes. Chaque pic de grande amplitude correspond à une contraction du void. Si on observe attentivement la zone entre les pics (figure 2(b)), on s'aperçoit qu'elle comprend des oscillations de petite amplitude, habituellement absentes lorsque l'instabilité est pleinement développée. Cette forme de signal est typique de ce que l'on appelle oscillations multimodales ou Mixed-Mode Oscillations (MMOs) en anglais. Les MMOs consistent en une alternance d'oscillations de petite et grande amplitude, ces dernières étant le plus souvent des phénomènes de relaxation du système. Ce type particulier d'oscillations se rencontre dans certaines réactions chimiques oscillantes [19,20](réaction de Belousov-Zhabotinskii [21,22]) et dans l'activité neuronale [23,24,25] (modèles de Hodgkin-Huxley [25,26] ou FitzHugh-Nagumo [27]). De nombreuses théories des systèmes dynamiques sont utilisées pour étudier ces comportements (canards, bifurcations de Hopf, orbites homoclines, ...). L'observation de telles oscillations dans les plasmas poussiéreux est extrêmement récente et très peu d'études ont été réalisées dans ce domaine sur les MMOs [14].

Les oscillations de petite amplitude sont visibles sur la figure 2(b) où on peut détecter 3 séquences contenant 3 petites oscillations, suivies de 3 autres séquences avec 4 petites oscillations. Chacune de ces petites oscillations correspond à une contraction incomplète du void. Cette figure révèle notamment une transition entre une phase à 3 et une phase à 4 petites oscillations. Sur la figure 2(a), de nombreuses transitions ont lieu entre des phases à n petites oscillations et des phases à $n + 1$ petites oscillations. Par l'intermédiaire de ces transitions, le nombre de petites oscillations augmentent pendant que l'instabilité

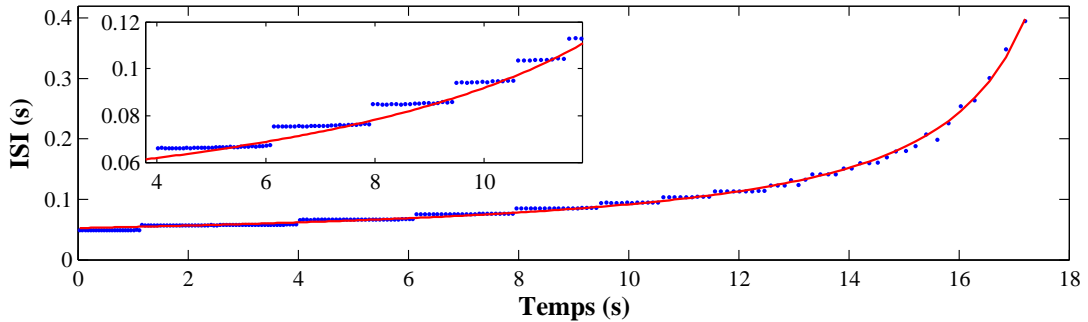


Figure 3. Intervalle de temps entre les pics principaux (InterSpike Interval, ISI) de la figure 2 montrant une structure en marche d’escalier. Ajustement par une courbe du type $a + b/(t_0 - t)$.

”perd de l’énergie” puis s’arrête. Pendant les tous derniers instants de l’instabilité, des transitions $n \rightarrow n+p$ avec $2 \leq p \leq 5$ sont même observées. Ceci se traduit sur la figure 1(a) par l’augmentation progressive de l’écartement entre les pics principaux. Si l’on trace ainsi l’intervalle entre les pics principaux (InterSpike Interval, ISI) en fonction du temps, on obtient une croissance qui peut être ajustée par une fonction du type $a + b/(t_0 - t)$ où t_0 est notamment le temps correspondant à la limite asymptotique ~ 19 s [26,28]. Le fait que l’ISI tende vers l’infini de la sorte est souvent considéré comme étant caractéristique d’une bifurcation homocline [26,29].

La structure en marche d’escalier est due aux transitions d’un état à n petites oscillations à un état à $n + 1$ petites oscillations. Dans certaines expériences, une analyse fine de l’ISI révèle que la transition d’un état à l’autre peut se faire par l’apparition progressive de séquences à $n + 1$ petites oscillations au milieu de séquences à n petites oscillations [14,17]. Les états $n + 1$ se produisent alors de plus en plus souvent jusqu’à leur établissement définitif. Cette évolution s’apparente à une structure de type escalier du diable (devil’s staircase) qui se rencontre parfois dans les situations de MMOs, notamment en chimie [19,20,22,30].

Les pics principaux ont une forme assez particulière comme le montre la figure 4(a). On remarque tout d’abord une montée assez rapide du signal suivie par un court plateau puis par une décroissance plus lente. Un pic additionnel est souvent présent (ici à 1.156 s) puis l’amplitude du signal diminue de façon plus ”douce” que la montée, le signal chutant jusqu’à une valeur inférieure à celle qui précède le pic. Concernant l’amplitude globale des oscillations, deux phénomènes intéressants apparaissent durant une transition entre deux états. Le premier est que la nouvelle petite oscillation qui apparaît a une amplitude plus grande que les précédentes. C’est particulièrement visible sur la figure 4(b) à 1.2 s. Cette petite oscillation, qui remplace un pic principal, garde une partie des propriétés d’un pic. Cet effet perdure durant 2 – 3 séquences, puis la nouvelle petite oscillation retrouve une amplitude comparable aux autres. La seconde observation (difficile à percevoir sur la figure 2) est que l’amplitude des pics principaux est légèrement plus grande après une transition. L’amplitude des pics diminuant alors progressivement jusqu’à la transition suivante.

4 Conclusion

Dans cet article nous avons mis en évidence la présence d’oscillations multimodales dans les plasmas poussiéreux. Ce travail permet d’envisager une étude de ces phénomènes dynamiques en utilisant les analyses des MMOs rencontrées dans des domaines extrêmement différents (chimie, activité neuronale). De plus, la complexité et la richesse des phénomènes non linéaires observés (par exemple les escaliers du diable), font des plasmas poussiéreux de nouveaux champs d’application des théories des systèmes dynamiques.

Remerciements. Nous tenons à remercier N. Berglund pour d’intéressants échanges. Les auteurs remercient pour leur support S. Dozias et B. Dumax (électronique) et J. Mathias (optique). Le réacteur

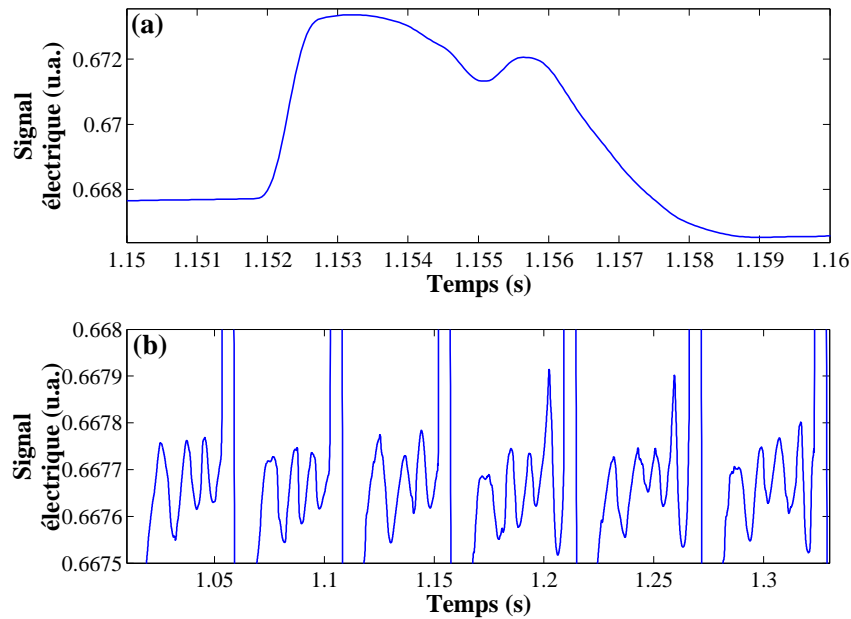


Figure 4. (a) Zoom sur un des pics principaux de la figure 2. (b) Zoom sur les oscillations de petite amplitude lors d'une transition de 3 à 4 oscillations. L'amplitude plus grande de la nouvelle petite oscillation est clairement visible. Son amplitude décroît alors progressivement jusqu'à retrouver une amplitude comparable aux autres petites oscillations.

PKE-Nevedov a été mis à disposition par le Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics, Allemagne, grâce au financement de la DLR/BMBF avec la bourse No. 50WM9852. Ce travail a bénéficié du soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet INDIGO (ANR-11-JS09-010-01).

Références

1. P. K. SHUKLA & B. ELIASSON, Colloquium : Fundamentals of dust-plasma interactions, *Review of Modern Physics*, **81**, 25 (2009)
2. M. MIKIKIAN, L. COUËDEL, M. CAVARROC, Y. TESSIER & L. BOUFENDI, Dusty Plasmas : Synthesis, Structure and Dynamics of a Dust Cloud in a Plasma, *European Journal of Applied Physics*, **49**, 13106 (2010)
3. C. K. GOERTZ, Dusty plasmas in the solar system, *Reviews in Geophysics*, **27**, 271 (1989)
4. G. S. SELWYN, J. SINGH & R. S. BENNETT, In situ laser diagnostic studies of plasma-generated particulate contamination, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, **7**, 2758 (1989)
5. S. I. KRASHENINNIKOV, R. D. SMIRNOV & D. L. RUDAKOV, Dust in magnetic fusion devices, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **53**, 083001 (2011)
6. J. BERNDT, E. KOVAČEVIĆ, I. STEFANOVIĆ, O. STEPANOVIC, S. H. HONG, L. BOUFENDI & J. WINTER, Some Aspects of Reactive Complex Plasmas, *Contributions to Plasma Physics*, **49**, 107 (2009)
7. G. M. JELLUM & D. B. GRAVES, Particulates in aluminum sputtering discharges, *Journal of Applied Physics*, **67**, 6490 (1990)
8. M. MIKIKIAN, M. CAVARROC, L. COUËDEL, Y. TESSIER & L. BOUFENDI, Dust particles in low-pressure plasmas : Formation and induced phenomena, *Pure and Applied Chemistry*, **82**, 1273 (2010)
9. D. SAMSONOV & J. GOREE, Instabilities in a dusty plasma with ion drag and ionization, *Physical Review E*, **59**, 1047 (1999)
10. M. CAVARROC, M. C. JOUANNY, K. RADOUANE, M. MIKIKIAN & L. BOUFENDI, Self-excited instability occurring during the nanoparticle formation in an Ar-SiH₄ low pressure radio frequency plasma, *Journal of Applied Physics*, **99**, 064301 (2006)

11. M. MIKIKIAN, M. CAVARROC, L. COUËDEL & L. BOUFENDI, Low frequency instabilities during dust particle growth in a radio-frequency plasma, *Physics of Plasmas*, **13**, 092103 (2006)
12. J. GOREE, G. E. MORFILL, V. N. TSYTOVICH & S. V. VLADIMIROV, Theory of dust voids in plasmas, *Physical Review E*, **59**, 7055 (1999)
13. M. MIKIKIAN, L. COUËDEL, M. CAVARROC, Y. TESSIER & L. BOUFENDI, Self-excited void instability in dusty plasmas : plasma and dust cloud dynamics during the heartbeat instability, *New Journal of Physics*, **9**, 268 (2007)
14. M. MIKIKIAN, M. CAVARROC, L. COUËDEL, Y. TESSIER & L. BOUFENDI, Mixed-Mode Oscillations in Complex Plasma Instabilities, *Physical Review Letters*, **100**, 225005 (2008)
15. M. MIKIKIAN, L. COUËDEL, M. CAVARROC, Y. TESSIER & L. BOUFENDI, Threshold phenomena in a throbbing complex plasma, *Physical Review Letters*, **105**, 075002 (2010)
16. M. MIKIKIAN, M. CAVARROC, L. COUËDEL, Y. TESSIER & L. BOUFENDI, Self-excited instabilities in plasmas containing dust particles (dusty or complex plasmas), in *Chaos, Complexity and Transport : Theory and Applications*, Proceedings of the CCT'07, (eds. C. Chandre, X. Leoncini & G. Zaslavsky), World Scientific Publishing, Singapore (2008)
17. M. MIKIKIAN, H. TAWIDIAN, T. LECAS & O. VALLÉE, Occurrence of mixed-mode oscillations in a dusty plasma, à paraître dans *Chaos, Complexity and Transport*, Proceedings of the CCT'11, World Scientific Publishing, Singapore (2012)
18. H. TAWIDIAN, M. MIKIKIAN, L. COUËDEL & T. LECAS, Plasma inhomogeneities near the electrodes of a capacitively-coupled radio-frequency discharge containing dust particles, *European Journal of Applied Physics*, **56**, 24018 (2011)
19. F. N. ALBAHADILY, J. RINGLAND & M. SCHELL, Mixed-mode oscillations in an electrochemical system. I. A Farey sequence which does not occur on a torus, *Journal of Chemical Physics*, **90**, 813 (1989)
20. V. PETROV, S. K. SCOTT & K. SHOWALTER, Mixed-Mode Oscillations in Chemical Systems, *Journal of Chemical Physics*, **97**, 6191 (1992)
21. J. L. HUDSON, M. HART & D. MARINKO, An experimental study of multiple peak periodic and nonperiodic oscillations in the Belousov-Zhabotinskii reaction, *Journal of Chemical Physics*, **71**, 1601 (1979)
22. J. MASELKO & H. L. SWINNEY, Complex periodic oscillations and Farey arithmetic in the Belousov-Zhabotinskii reaction, *Journal of Chemical Physics*, **85**, 6430 (1986)
23. H. G. ROTSTEIN, T. OPPERMAN, J. A. WHITE & N. KOPELL, The dynamic structure underlying subthreshold oscillations and the onset of spikes in medial entorhinal cortex stellate cells, *Journal of Computational Neuroscience*, **21**, 271 (2006)
24. G. MEDVEDEV & Y. YOO, Multimodal oscillations in systems with strong contraction, *Physica D*, **228**, 87 (2007)
25. J. RUBIN & M. WECHSELBERGER, Giant squid-hidden canard : the 3D geometry of the Hodgkin-Huxley model, *Biological Cybernetics*, **97**, 5 (2007)
26. J. GUCKENHEIMER, R. HARRIS-WARRICK, J. PECK & A. WILLMS, Bifurcation, bursting and spike frequency adaptation, *Journal of Computational Neuroscience*, **4**, 257 (1997)
27. N. BERGLUND & D. LANDON, Mixed-mode oscillations and interspike interval statistics in the stochastic FitzHugh-Nagumo model, arXiv :1105.1278v2 (2011)
28. J. GUCKENHEIMER & A. WILLMS, Asymptotic analysis of subcritical Hopf-homoclinic bifurcation, *Physica D*, **139**, 195 (2000)
29. U. FEUDEL, A. NEIMAN, X. PEI, W. WOJTENEK, H. BRAUN, M. HUBER & F. MOSS, Homoclinic bifurcation in a Hodgkin-Huxley model of thermally sensitive neurons, *Chaos*, **10**, 231 (2000)
30. K.-R. KIM, K. J. SHIN & D. J. LEE, Complex oscillations in a simple model for the Briggs-Rauscher reaction, *Journal of Chemical Physics*, **121**, 2664 (2004)