

## Phénomènes d'auto-organisation dans les plasmas froids

J.P. Boeuf, B. Bernecker, Th. Callegari, S. Blanco, R. Fournier  
Université de Toulouse, CNRS, LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie)  
118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 9, France.

Les plasmas, naturels ou de laboratoire, « chauds » ou « froids » offrent des exemples multiples de phénomènes de structuration cohérente ou d'auto-organisation de la densité de plasma et de l'émission lumineuse. Ces phénomènes font l'objet d'études très poussées dans les plasmas de fusion par exemple, car ils sont associés aux instabilités et à la turbulence, et jouent un rôle essentiel dans le transport du plasma à travers les lignes de champ magnétique. Dans les plasmas froids, des phénomènes d'auto-organisation sont présents dans une large gamme de pression allant d'une fraction de Pa à la pression atmosphérique. Dans des conditions de très basse pression et en présence de champ magnétique, on retrouve des phénomènes de structuration associés au transport anormal à travers le champ magnétique. A haute pression on observe des phénomènes d'auto-organisation de nature très différente et qui ont souvent leur origine dans l'ionisation, très locale en raison de la forte collisionnalité, et fortement couplée au champ électrique local. Les phénomènes thermiques peuvent évidemment contribuer à la formation d'instabilités (mais ne sont pas nécessaires ni toujours présents). Deux exemples classiques sont les figures de Lichtenberg qui forment des arborescences électriques fractales lors d'une décharge électrique sur une surface isolante, et la « boule plasma » bien connue du grand public et dans laquelle des filaments auto-organisés en mouvement apparaissent entre une électrode soumise à une tension basse fréquence et la masse environnante, séparées capacitivement par une enveloppe diélectrique transparente. Les phénomènes d'auto-organisation ne sont pas étudiés, dans les plasmas froids, de façon aussi systématique que dans les plasmas de fusion car les enjeux ne sont évidemment pas les mêmes.

Dans cet exposé nous choisissons l'exemple des décharges à barrière diélectrique (DBD) fonctionnant dans des régimes de décharge luminescente (différent du régime dit de « streamer » dans lequel la multiplication électronique dans l'espace inter-électrode est beaucoup plus grande), avec des tensions sinusoïdales basse fréquence et dans une géométrie d'électrodes planes parallèles recouvertes de couches diélectriques.

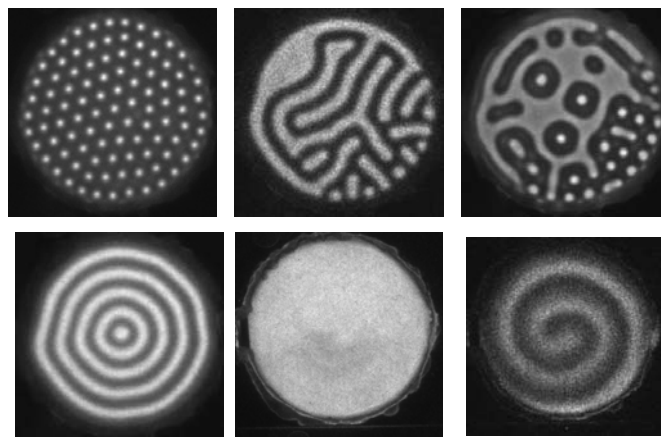


Figure 1 : Exemples de structures organisées observées dans une décharge à barrière diélectrique fonctionnant en régime de décharge luminescente. Les photos sont prises à travers une électrode transparente en ITO ; d'après [2].

L'étude de ces systèmes est intéressante au moins à deux titres : 1) les DBD offrent une variété extrêmement riche de phénomènes de structuration cohérente et de dynamique non-linéaire [1] et sont très faciles à étudier expérimentalement (par rapport à d'autres systèmes physiques ou chimiques présentant des propriétés comparables de structuration) ; 2) les applications industrielles des DBD sont nombreuses mais le régime de plasma homogène serait dans de nombreux cas préférable au régime filamentaire et il est donc important de comprendre les mécanismes qui contrôlent les transitions de phase entre ces régimes.

Dans les conditions de DBD en régime de décharge luminescente les structures auto-organisées que l'on peut observer sont souvent très semblables à celles de systèmes de réaction-diffusion classiques [1, 2] (structures hexagonales, en bande, spirales, cibles etc...). De plus, les DBD sont quelques fois le siège de phénomènes dynamiques complexes: spirales en rotation, filaments isolés en mouvement ("solitons"), collisions entre filaments, génération et annihilation de filaments. Ces phénomènes peuvent être observés à l'aide de caméras rapides, et certains d'entre eux sont assez bien reproduits, au moins qualitativement, par des modèles numériques classiques de décharge collisionnelle couplant équations de transport fluides et équation de Poisson [2]. Cependant, des tentatives de description de ces phénomènes par des modèles de type réaction-diffusion [1] susceptibles de permettre une réelle analyse des paramètres contrôlant l'auto-organisation n'ont pas été vraiment couronnées de succès jusqu'à présent. Cet échec est en partie attribuable à une mauvaise compréhension des mécanismes physiques sous-jacents par les auteurs de ces tentatives, issus du domaine de la dynamique non-linéaire. Une autre raison est la difficulté intrinsèque de simplifier le système d'équations de transport-Poisson dans un modèle classique de décharge luminescente. Cette difficulté est due notamment au fait que l'hypothèse de quasi-neutralité n'est pas applicable ici car les gaines de charge d'espace ionique (qui sont le siège d'une ionisation intense dans ces décharges, ou, tout au moins, contrôlent complètement l'ionisation et la génération du plasma) jouent un rôle essentiel dans les phénomènes d'auto-organisation de filaments. Notons que dans les plasmas magnétisés de bord de Tokamak, les équations de transport électronique et ionique combinées à l'hypothèse de quasi-neutralité conduisent au système classique d'équations de Hasegawa-Wakatani (ou à l'équation de Hasegawa-Mima pour des électrons adiabatiques, [3]), qui présentent des analogies avec les systèmes de réaction-diffusion et permettent de décrire certains aspects de la turbulence plasma (turbulence d'ondes de dérive dissipative) et des phénomènes d'auto-organisation associés.

Dans cette exposé nous montrerons que des expériences et simulations récentes permettent d'arriver à une compréhension très fine des mécanismes conduisant à l'auto-organisation de filaments dans les DBD, compréhension qui devrait aider à jeter les bases d'un modèle de type réaction-diffusion-advection. Ce modèle bien que phénoménologique aurait une base physique beaucoup plus forte que ceux proposés jusqu'à présent. Il devrait également permettre de décrire et d'analyser certains phénomènes dynamiques difficiles à reproduire dans les simulations numériques directes des équations transport-Poisson en raison de la lourdeur des calculs dans des conditions tri-dimensionnelles.

## Références

[1] H.G. Purwins, H.U. Bödeker, Sh. Amiranashvili, "*Dissipative solitons*", *Advances in Physics* Vol. 59, No. 5, 485–701 (2010)

[2] B. Bernecker, "*Formation de structures et phénomènes d'auto-organisation dans les Décharges à Barrière Diélectrique*", thèse de l'Université Paul Sabatier (2010)

[3] S. Benkada, P. Beyer, X. Garbet, « *Transport turbulent et auto-organisation dans les plasmas de tokamak* », *Images de la Physique*, CNRS, 24-30 (2003-2004)