



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



Propagation and plasmas: new challenges, new applications

Foreword

The papers presented have been gathered from the 2010 scientific workshop of the URSI-France¹ entitled “Plasmas and Propagation”. Works of the commission G: “Ionospheric Radio and Propagation” and the commission H: “Waves in Plasmas” were presented during this workshop which took place from 16 to 17 March 2010 in the CNAM, Paris.

The themes, “Plasma and Propagation”, are of special importance to the understanding of our local plasma environment and for the resolution of some societal problems, ranging from solar–terrestrial interactions involved in satellite and electronic equipment protection (space weather) to the problems of plasma confinement in magnetic fusion devices (like the future Tokamak ITER) through the coupling atmosphere–ionosphere and the impact of the ionosphere on radio systems, in particular Global Navigation Satellite Systems (GNSS) such as GPS or Galileo.

Among the papers presented, the scientific board committee has selected ten representative contributions, which demonstrate the actual theoretical, numerical and experimental efforts in the study of these complex physical phenomena. They are a good example of synergies, which can exist between different domains of studies having similar physical basic processes. In fact, the differences, that always do exist, allow rewarding comparisons to test the validity of theoretical models.

Thus, the major theme involved during these JS'10 days concerned turbulence. Its importance comes from the mechanisms of mixing and rapid transport of matter and energy induced in the plasma medium. Indeed, in the environments with few or no collisions, as in space plasmas or fusion devices (i.e. Tokamaks), this transport largely dominates the “normal” transport due to collisions. The understanding of turbulent transport in Tokamaks is therefore essential and requires precise comparisons between experimental observations and theoretical predictions. In this area, France, site of the current Tokamak “TORE SUPRA” and of the future Tokamak “ITER” has a well-known international expertise, especially on the study of micro-turbulence measured by Doppler backscattering. The method presented in the paper by Vermare et al.: “*Wavenumber spectrum of micro-turbulence in tokamak plasmas*” provides information on microscopic fluctuations (instabilities) and, more importantly, on the mechanisms involved in energy transfer at different spatial scales. The theoretical approach consists in the derivation of spectral models that include interactions between fluctuations and large-scale flow structures. This technique still requires significant theoretical and numerical developments, but is a very promising tool. On the other hand, the magnetic confinement is also strongly dependent on the dynamic of coherent structures present in the plasma. Then, researchers have to be able to separate these coherent structures from the underlying incoherent noise. Such studies required the development of new technical analysis. An example is presented by Futatani et al.: “*Coherent vorticity extraction in resistive drift-wave turbulence: Comparison of Orthogonal Wavelets versus Proper Orthogonal Decomposition*”. In this article, the authors compare two methods for extracting contributions of the coherent flow from the turbulence, either (i) using a wavelet decomposition (method CVE – Coherent Vorticity Extraction) that separates the coherent contribution with non-Gaussian statistical behavior and a random residual flow, or (ii) using a singular value decomposition (POD method – Proper Orthogonal Decomposition) that can extract the most important energy patterns present in flow.

The work of extracting information is a real challenge in plasma physics and is complicated in space plasmas because of the large distances from the studied regions. In this area, a multi-satellite mission like “CLUSTER-2” which is a constellation of four spacecrafts flying in formation around the Earth allows one to investigate the Earth's magnetic environment and its interaction with the solar wind in three dimensions. Then, it has made possible to shed new light on the heating of the solar wind (plasma emitted by the Sun and travelling through interplanetary space) by turbulence. Indeed, the solar wind is much hotter than expected without any clear explanation for a long time. Only very recently (2009), the mystery has been partly solved, thanks to measures like those described in the article by Sahraoui et al.: “*Observation and theoretical modeling of electron scale solar wind turbulence*”. This paper emphasizes the importance of the sub-proton

¹ URSI-France depending of French Academy of Sciences, is the French committee of International Union of Radio-Science (URSI): <http://ursi-france.institut-telecom.fr/>.

turbulence to cascade and dissipate energy at the electron scale. The solar wind can be treated as a fluid-flowing large scale eddies that will break into smaller structures (cascade). This behavior can explain the measured temperatures that were not comprehensible with previous satellite missions. Another major problem in space physics is the phenomenon of sudden magnetic energy conversion into other forms (heating and/or acceleration). This phenomenon, known as magnetic reconnection, occurs in almost all magnetized plasmas, and thus, almost everywhere in the universe. Magnetic reconnection is mostly at the origin of the most violent phenomena in our solar system, such as solar flares and coronal mass ejections, whose understanding is essential to the space weather. Extensively studied using fluid and MHD simulations, it is only recently (2010) that kinetic simulations, including the ion dynamic, have been performed, as described in: “*Ion acceleration in antiparallel collisionless magnetic reconnection. Kinetic and fluid aspects*” by Aunai et al. This work highlights, in particular, the importance of pressure force in the acceleration process whose origin can be associated with the spatial divergence of the reconnection area. Such force is responsible for the particles mixing in phase space and so, of the fine-structure observed.

Finally, we see that turbulence can be “helpful” in the case of the solar wind to dissipate the energy injected by the sun or otherwise “harmful” causing plasma deconfining in magnetic fusion devices. In both cases, the turbulence appears as an universal mechanism, which is present in all magnetized plasmas. It is therefore an important topic of research which can be also found in more theoretical papers such as “*Third order Elsässer moments in axisymmetric MHD turbulence*” by Sébastien Galtier which examines the phenomenon of energy cascade in an incompressible MHD flow in presence of a large uniform magnetic field.

The ionospheric aspects of the conference covered several topics, such as the analysis of measurements performed on board the DEMETER satellite, the effect of lightning on ionosphere, the perturbations produced on radio navigation systems by ionospheric scintillations and the magnetic measurements in low noise environment.

With respect to lightning, work is underway at ITU-R according to item 1.16 of the WRC-2012² agenda; it considers the needs of passive systems for lightning detection in the meteorological aids Service including the possibility of an allocation of a 3 to 5 kHz band in the frequency range below 20 kHz in accordance with Resolution 671 (WRC-07). Reports and a recommendation are underway.

The DEMETER measurements emphasize the role of human and seismic activities on VLF and ELF waves recorded on board the satellite. Measurements performed over the epicenter of forthcoming earthquakes are studied with the idea of identifying and to characterizing possible anomalies that could be considered as earthquake precursors. This is discussed in the paper by Onishi et al.: “*The DEMETER mission, recent investigations on ionospheric effects associated with man-made activities and seismic phenomena*”.

The effects of lightning on the ionosphere have been largely studied since the discovering of the Transient Luminous Effects (TLE) and gamma ray bursts. These phenomena are considered in the paper by Farges and Blanc: “*Lightning and TLE electric fields and their impact on the ionosphere*”. It is shown that few very strong storm discharges transmit large enough energy in the HF band to behave like an ionospheric sounder, which can be used to get an order of magnitude of the F region critical frequency.

Ionospheric scintillations are due to a plasma instability occurring after sunset, mainly in the equatorial zone. The scintillations are at the origin of malfunctioning of radio navigation systems like the GPS. The paper by Béniguel: “*Modeling global ionosphere and inhomogeneities*” presents a model to study the time evolution of ionospheric irregularities and a second paper: “*Ionosphere scintillation effects on navigation systems*” by Béniguel et al., is concerned with the relationships between scintillations and malfunctioning of the navigation receivers, in particular with the phase-lock loops which can become unlocked during such events.

High sensitivity magnetic measurements are only possible in a very low noise environment. This is the case of the underground laboratory of Rustrel-Pays d'Apt which is operating an SQUID magnetometer, allowing the detection of several geophysical phenomena, for instance: the mesopause resonance excited by the seismic P waves, the response of the ionosphere to the S and T normal modes of the Earth, the polar magnetic storms and the TLE. These observations are reported in the paper by Waysand et al.: “*Earth–ionosphere coupling, magnetic storms, precursors and TLE: results and prospects of the SQUID system in the low-noise underground laboratory of Rustrel-Pays d'Apt*”. Since the noise level in the Rustrel-Pays d'Apt laboratory is very low, there is probably a number of other phenomena to elucidate.

All these papers are therefore examples of some recent progress made in plasma physics. Far from closing the topics presented here, these articles are only the beginnings of fundamental studies, which have to be continued in the future. They will be one of the key to provide relevant answers to the fundamental and technological problems that our society faces.

The Scientific Committee also selected three articles dealing with engineering matters for publication in REE (Revue de l'Electricité et de l'Electronique), March 2011. The guest editors thank the authors of the papers for their work showing the diversity and the complexity of the topic. We also thank URSI-France, in particular the President Joe Wiart and the General Secretary Joël Hamelin for their cooperation and a pleasant working atmosphere.

² World Radiocommunication Conference 2012 (Geneva, Switzerland, 23 January–17 February 2012).

Avant-propos

Les articles présentés ont pour origine les Journées scientifiques d'URSI-France³ qui avaient, en 2010, pour titre « Plasmas et Propagation » et réunissaient des travaux des commissions G : « Radioélectricité ionosphérique et propagation » et H : « Ondes dans les Plasmas ». Ces Journées se sont tenues les 16 et 17 mars 2010 au CNAM Paris.

Le thème « Plasmas et Propagation » recouvre des problématiques importantes pour la compréhension de notre environnement proche et la résolution de certains problèmes de nos sociétés, allant de l'interaction Soleil-Terre pour la protection des satellites et des appareils électroniques (météorologie de l'espace), aux problèmes de confinement dans les machines de fusion magnétique (le futur Tokamak ITER) en passant par le couplage atmosphère-ionosphère et l'impact de l'ionosphère sur les systèmes radio, en particulier les dispositifs de navigation par satellites tels que GPS ou Galileo.

Parmi les communications présentées, le comité scientifique a sélectionné dix articles représentatifs des efforts à la fois théoriques, numériques et expérimentaux déployés actuellement pour analyser ces phénomènes physiques complexes. Ils sont un bon exemple des synergies possibles entre des domaines physiques, au premier abord, distincts mais dont les processus physiques de base sont fortement semblables. Les différences, qui existent malgré tout, sont un facteur de comparaison enrichissant pour les différents acteurs et permettent de tester les limites de validité des différents modèles théoriques.

Ainsi un thème majeur abordé durant ces journées scientifiques a concerné la turbulence. Son importance provient des mécanismes rapides de mélange et de transports de matière et d'énergie qu'elle induit. Dans les milieux peu ou pas collisionnels que sont les plasmas spatiaux et de fusion magnétique (présents dans les machines à confinement magnétique appelées Tokamak), ces transports « anormaux » sont même très largement dominants sur les transports « normaux » dus aux collisions. La compréhension du transport turbulent dans les tokamaks est donc primordiale et exige des comparaisons précises entre les observations et les prédictions théoriques. Dans ce domaine, la France, site du futur Tokamak international « ITER » et de l'actuel Tokamak « Tore Supra » possède une expertise reconnue, en particulier sur l'étude de la micro-turbulence mesurée par rétro-diffusion Doppler. Cette méthode présentée dans l'article de Vermare et al. : « *Spectre en nombre d'onde de la micro-turbulence dans les plasmas de tokamak* » repose sur l'étude de la répartition de l'énergie sur différentes échelles spatiales. L'étude du spectre en nombre d'onde apporte des informations sur ce type de fluctuations microscopiques (instabilités) et donc sur les mécanismes de transfert d'énergie entre échelles spatiales. L'approche théorique consiste en la dérivation de modèles spectraux qui incluent les interactions entre les fluctuations d'une part, et des structures d'écoulement à grandes échelles, d'autre part. Cette technique nécessite encore des développements importants à la fois théoriques et numériques mais est très prometteuse pour l'avenir de notre compréhension de la turbulence. De la même façon, le confinement magnétique est aussi tributaire de la dynamique de structures cohérentes présentes au sein du plasma et qu'il faut pouvoir séparer du bruit incohérent sous-jacent. Ce type de mesure a nécessité le développement de nouvelles techniques d'analyse dont un exemple est présenté dans « *Filtrage en ondelettes orthogonales pour l'étude de la turbulence dans les plasmas : comparaison entre la méthode CVE et la méthode POD* » de Futatani et al. Cet article compare deux méthodes distinctes permettant d'extraire les contributions cohérentes dans les écoulements tourbillonnaires turbulents, soit (i) à l'aide d'une décomposition en ondelette (méthode CVE – *Coherent Vorticity Extraction*) qui permet de séparer la contribution cohérente ayant un comportement statistique non Gaussien et un écoulement résiduel aléatoire, soit (ii) à l'aide d'une décomposition en valeurs singulières (méthode POD – *Proper Orthogonal Decomposition*) qui permet d'extraire les modes d'énergie les plus importants présents au sein de l'écoulement.

Ce travail d'extraction de l'information est un véritable défi en physique des plasmas et est encore compliqué dans le cas des plasmas spatiaux du fait de l'éloignement important des régions étudiées. Dans ce domaine, la mission multi-satellitaire « CLUSTER » formée d'une flottille de 4 satellites a permis d'apporter un éclairage nouveau sur le chauffage du vent solaire (plasma émis par le Soleil et qui se propage dans l'espace interplanétaire) via la turbulence. En effet, le vent solaire est beaucoup plus chaud que ce que l'on pourrait attendre normalement, et ce, sans qu'aucune explication précise ne soit apportée. Ce n'est que très récemment (2009) que le mystère a pu être en partie levé grâce à des mesures de CLUSTER comme celles décrites dans l'article de Sahraoui et al. : « *Observations et modélisation théorique de la turbulence à l'échelle électronique dans le vent solaire* ». Il a pu être montré que c'était la turbulence qui était la source de ce chauffage. En effet, le vent solaire peut être assimilé à un fluide en écoulement rapide, siège de tourbillons à grande échelle qui vont se casser en de plus petites structures produisant ce que l'on nomme une cascade en énergie vers les petites échelles. Ces mesures ont mis en évidence que ce transfert d'énergie se faisait jusqu'aux échelles les plus petites (les échelles électroniques) et permettaient d'expliquer les températures observées du vent solaire. Ces mesures n'étaient pas possibles avec les missions satellitaires précédentes.

Un autre problème d'importance en physique spatiale est le phénomène de conversion brutale d'énergie magnétique en d'autres formes d'énergie (accélération et chauffage). Ce phénomène, connu sous le nom de reconnexion magnétique, intervient dans quasiment tous les plasmas magnétisés, et donc est présent dans la quasi-totalité de l'Univers. La reconnexion magnétique est notamment à l'origine de phénomènes parmi les plus violents de notre système solaire, tels que les éruptions solaires et les éjections de masses coronales dont la compréhension est indispensable au domaine de la météorologie de l'espace. Longtemps étudié à l'aide de simulation fluide et MHD, ce n'est que très récemment que des modélisations cinétiques incluant la dynamique des ions ont été faites comme celles décrites dans « *Accélération des ions dans la reconnexion ma-*

³ URSI-France, placé sous l'égide de l'Académie des sciences, est la section française de l'Union Radio-Scientifique Internationale (URSI) : <http://ursi-france.institut-telecom.fr/>.

gnétique antiparallèle, aspects cinétiques et fluides » de Aunai et al. Ce travail a en particulier permis de mettre en évidence l'importance de la force de pression dans les processus d'accélération dont l'origine peut être associée à la divergence spatiale de la zone de reconnexion, responsable d'un mélange dans l'espace des phases et donc *in-fine* du profil de pression observé.

Finalement, on voit que la turbulence, qu'elle soit « bénéfique » dans le cas du vent solaire pour dissiper l'énergie injectée par le Soleil ou au contraire « néfaste » dans le cas de la fusion magnétique en aidant au déconfinement du plasma, est un mécanisme universel présent dans tous plasmas magnétisés. Elle constitue donc un axe important de recherche que l'on retrouve aussi dans des articles plus théoriques tel que celui de Sébastien Galtier intitulé « *Moments d'Alsässer du troisième ordre en turbulence MHD axisymétrique* » qui étudie le phénomène de cascade en énergie dans le cas d'un écoulement MHD incompressible en présence d'un champ magnétique uniforme important.

La propagation et les phénomènes ionosphériques sont traités, quant à eux, au travers d'articles qui couvrent des thèmes divers tels que les mesures faites à bord du satellite DEMETER, les effets des éclairs d'orages, les scintillations ionosphériques et les mesures magnétiques dans des environnements peu bruités.

A propos des éclairs d'orages, notons les travaux en cours à l'UIT-R (Point 1.16 de l'Ordre du Jour de la prochaine Conférence mondiale des radiocommunications (CMR-2012)), devant aboutir à l'attribution au Service des auxiliaires de la météorologie dans la bande des fréquences en dessous de 20 kHz, d'une bande de l'ordre de 3 à 5 kHz pour les systèmes de détection de la foudre sur une couverture mondiale (Résolution 671 de la CMR-07). Plusieurs rapports et une Recommandation sont prêts pour la CMR-2012.

Les mesures faites à bord de DEMETER focalisent plus particulièrement sur l'influence des activités humaines et de l'activité sismique sur les ondes (VLF et ELF) mesurées par les instruments à bord du satellite. Des mesures, effectuées au-dessus de futurs épicentres de séismes, sont étudiées pour tenter de caractériser des anomalies qui pourraient annoncer un séisme. Les résultats sont présentés et discutés dans l'article de Onishi et al. : « *La mission DEMETER, investigations récentes sur les répercussions ionosphériques associés aux activités humaines et aux phénomènes sismiques* ».

Les effets des éclairs d'orages sur l'atmosphère et l'ionosphère font l'objet d'un grand nombre d'études depuis la découverte des TLE (Événements Lumineux Transitoires) et les sursauts de rayonnement Gamma. Ces thèmes sont traités dans : « *Champs électriques induits par les éclairs et les événements lumineux transitoires et leur effet sur l'ionosphère* » de Farges et Blanc. Il y est montré que certains éclairs émettent suffisamment d'énergie électromagnétique dans la bande HF pour se comporter comme un sondeur ionosphérique. Bien qu'il s'agisse là plus d'une curiosité que d'un véritable intérêt scientifique, ces sondeurs naturels permettent d'estimer la fréquence critique de la région F.

Les scintillations ionosphériques sont dues à une instabilité du plasma se produisant après le coucher du soleil dans les régions équatoriales. Ces scintillations sont un problème pour le bon fonctionnement des systèmes de radio navigation comme le GPS et Galileo. Un premier article de Béniguel : « *Modélisation globale de l'ionosphère et des inhomogénéités* » présente un modèle incluant la résolution des équations du plasma pour étudier l'évolution des irrégularités et un second article : « *Effets des scintillations ionosphériques sur les systèmes de navigation* » de Béniguel et al., concerne plus particulièrement les relations entre les scintillations et les perturbations des systèmes de navigation. Les boucles de phase des récepteurs sont particulièrement sensibles aux scintillations et lorsqu'elles décrochent sur une liaison donnée cette liaison perturbée ne peut plus être utilisée pour le positionnement.

Les mesures magnétiques à haute sensibilité nécessitent des environnements peu bruités. C'est le cas du laboratoire souterrain de Rustrel-Pays d'Apt qui est équipé d'un magnétomètre SQUID (Superconducting QUantum Interference Device with shielding qualified for ionosphere detection) qui permet par exemple de mettre en évidence des phénomènes physiques comme la résonance de la mésopause excitée par les ondes P des séismes, la réponse de l'ionosphère aux modes normaux S et T de la Terre, les orages magnétiques aux pôles et les TLE. Ces observations sont reportées dans l'article de Waysand et al. : « *Couplages Terre-ionosphère, orages magnétiques, précurseurs et TLE : bilan et perspectives des observations du système SQUID au laboratoire souterrain bas bruit de Rustrel* ». Puisque le niveau de bruit dans ce laboratoire est exceptionnellement bas, il y a probablement bien d'autres effets qu'il reste à élucider.

L'ensemble de ces articles fait donc le point sur certaines avancées obtenues récemment en physique des plasmas au sens large. Loin de clore le sujet, ces articles ne sont que les prémisses d'études qui devront, dans un avenir plus ou moins lointain, nous apporter des réponses pertinentes sur les problèmes fondamentaux et technologiques que notre société se pose.

Trois autres articles dont les sujets sont orientés ingénierie systèmes ont été choisis par le Comité scientifique pour publication dans la Revue REE (Revue de l'Electricité et de l'Electronique), numéro de mars 2011. Les éditeurs invités des CRAS remercient les auteurs pour leurs travaux montrant la diversité et la complexité des sujets traités. Nous remercions aussi URSI-France, en particulier son Président Joe Wiart et son secrétaire général Joël Hamelin pour leur coopération et une atmosphère de travail agréable.

Alain Bourdillon

Laboratoire IETR, Université de Rennes 1, Campus Beaulieu, 263 avenue du Général Leclerc, 35042 Rennes cedex, France

E-mail address: alain.bourdillon@univ-rennes1.fr

Philippe Savoini

Laboratoire de physique des plasmas, École polytechnique, route de Saclay, 91128 Palaiseau cedex, France

E-mail address: philippe.savoini@upmc.fr