



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Étude de la propagation des ondes dans différents types de plasma via différentes méthodes de simulation avec des illustrations de futures applications potentielles

Studies of wave propagation in various kinds of plasma using adapted simulation methods, with illustrations on possible future applications

*S. Heuraux**, *E. Faudot**, *F. da Silva***, *J. Jacquot****, *S. Hacquin****, *L. Colas****,
*N. Teplova*****, *K. Sysoeva*****, *E. Gusakov*****

*Institut Jean Lamour UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine BP70239 Vandoeuvre F-54506,
(Stephane.Heuraux@univ-lorraine.fr, Eric.faudot@univ-lorraine.fr)

**IST_IPFN, Av Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal, (Filipe da Silva<tanatos@ipfn.ist.utl.pt>)

***CEA_IRFM, Cadarache 13108 Saint Paul Lez Durance, France,
(Jonathan.Jacquot@cea.fr, Sebastien.Hacquin@cea.fr, Laurent.Colas@cea.fr)

****Ioffé Institute, St Petersburg 194021, Russia,
(n.kosolapova@mail.ioffe.ru, Kate Sysoeva <tinlit@yandex.ru>, e.gusakov@mail.ioffe.ru)

Mots-clefs (*en français et en anglais*) : *plasma, ondes, simulation, chauffage, diagnostic*
plasma, wave, simulation, heating, diagnostic

Résumé

Comprendre les mécanismes régissant la propagation des ondes dans les plasmas peut s'avérer complexe, en particulier s'ils sont magnétisés, donc anisotropes et turbulents, donc diffusifs, tout en pouvant être inhomogènes et non-stationnaires. La simulation d'un type de plasma avec ces caractéristiques propres passe d'abord par un choix adapté d'équations "modèle" suivi par celui d'un schéma numérique accompagné de conditions aux limites spécifiques répondant aux contraintes du problème étudié. Nous discuterons de l'impact de ces choix sur la qualité des évaluations numériques en fonction de l'ordre du schéma numérique et du nombre de points par longueur d'onde. Une brève revue des sujets d'intérêt portant sur des conditions de bord type "gaine" et "transparente" en milieu anisotrope et sur la propagation en plasmas turbulents incluant entre autre les développements de diagnostics conclut cet instantané sur les travaux actuels.

1. Introduction

Dans de nombreuses situations, l'accès aux caractéristiques d'un plasma pour en comprendre le comportement et l'évolution voir le contrôler en déposant localement de l'énergie ou de la quantité de mouvement passe par l'utilisation d'ondes du fait soit son éloignement, soit sa température. L'analyse des informations extractibles à partir d'une onde ayant traversé un plasma inclut intrinsèquement le fait que l'historique de cette onde est connu ou suppose d'être capable de le reconstituer pour fournir une interprétation appropriée des données engrangées durant son passage au travers du plasma. Pour faciliter cette interprétation, le rôle de la simulation peut être essentiel à condition de choisir les bons ingrédients à introduire comme paramètres d'entrée et l'équation modèle appropriée. Ceci requiert au préalable la connaissance d'un certain nombre de données portant sur le plasma simulé. Les approximations introduites doivent être estimées et intégrées dans l'évaluation finale du résultat, de sa pertinence et de sa précision, tout comme la prise en compte des imperfections et des limitations des méthodes numériques utilisées y compris celles associées à la description des conditions de bord nécessaires pour reconstituer l'historique du parcours de l'onde. Une difficulté supplémentaire est à surmonter, la discrimination de l'accumulation des informations le long du trajet dans le plasma et de celles liées à la méthode expérimentale mise en oeuvre. Une fois de plus la simulation permet d'étudier de façon synthétique des configurations et des dispositifs séparant cette superposition d'événements en utilisant des effets physiques susceptibles d'isoler chaque événement. Les effets de dispersion sont souvent utilisés pour cela, toutefois cela requiert un diagnostic actif avec une source parfaitement contrôlée ou d'avoir accès aux caractéristiques spectrales de la source à tout instant. Le changement de polarisation de l'onde est un autre support de cette discrimination en particulier

s'il y a traversé d'une zone d'absorption [1], d'un milieu biréfringent [2] ou d'une zone turbulente [3]. La simulation est aussi un outil pour optimiser les paramètres des moyennes statistiques à appliquer pour extraire des paramètres de la turbulence et autres grandeurs macroscopiques et l'erreur commise lors d'une moyenne sur un nombre réduit de mesures [4]. Actuellement toutes les situations ne sont pas descriptibles dans leur intégralité du fait de limitations techniques liées aux ordinateurs et de la priorisation des simulations sur les calculateurs "haute-performance" ou de la non existence de schéma numérique adapté à la situation abordée comme dans le cas de conditions de bord transparentes dans un plasma inhomogène magnétisé lorsque plusieurs modes de propagation sont présents [5].

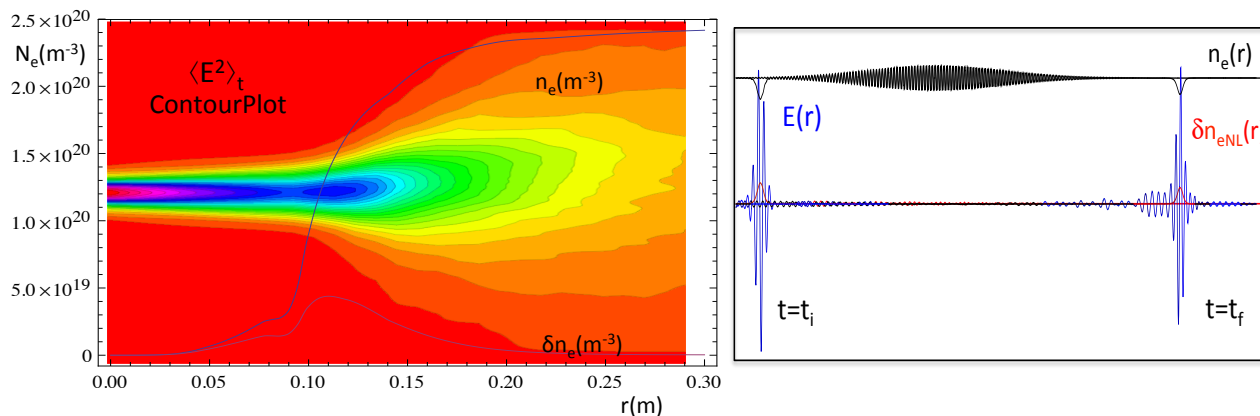


Figure 1: Contours (r,y) de l'intensité du champ électrique montrant l'élargissement d'un faisceau gaussien sous l'action d'une turbulence inhomogène dans un plasma d'ITER, à gauche, et, à droite, deux instantanés du champ électrique de l'onde associée à un soliton (en bleu) avant et après l'interaction avec une perturbation de densité satisfaisant à la relation de Bragg où est aussi tracé la perturbation non-linéaire de densité (en rouge) et le profil de densité (en noir).

Bien que des outils analytiques efficaces existent pour décrire la propagation des ondes dans les plasmas [6] incluant aussi des cas de plasma fortement turbulent [7, 8], les situations expérimentales [3-4,9] sont souvent en dehors du cadre d'applications de ces modèles analytiques et nous imposent de les simuler pour justifier les modèles approchés utilisés pour mieux appréhender les mesures. La constitution d'une fonction de transfert reliant la quantité mesurée au paramètre étudié est aussi une possibilité qu'offre la simulation [4]. L'apparition de logiciel dit "Multi-Physique" tel que COMSOL ou plus spécialisés *ondes* tels que CST ou HFSS rendent plus accessible les simulations par éléments finis toutefois ils restent limiter dans les utilisations possibles, toutefois le système décrit peut inclure des effets non-linéaires [10]. Le couplage avec d'autres codes décrivant de manière plus précise la réponse du plasma se développe, comme par exemples, l'émission et les mécanismes d'absorption incluant les effets cinétiques [11-15] ou les effets pondéromoteurs pour décrire la propagation de solitons [16]; toutefois l'espace physique simulable reste restreint. Pour une efficacité de calcul accrue la décomposition de domaines est devenue nécessaire pour adapter les paramètres numériques aux variations d'échelles du système simulé et fait toujours l'objet de développements mathématiques [17]. Des questions restent ouvertes sur la façon de traiter une résonance et sur la pertinence des résultats de simulations: l'ajout d'un facteur d'amortissement artificiel est-il sans conséquence ? ou a-t-il un impact majeur? Les développements mathématiques récents apportent une solution analytique pour le mode extraordinaire [18] qui pourra fournir des éléments de réponses à ces questions.

2. Comment choisir l'équation "modèle" appropriée ainsi que son domaine de calcul ?

Avant tout chose il faut considérer si l'expérience à simuler peut être décrite en 1, 2 ou 3 dimensions spatiales et, si pour des raisons de moyens limités de calcul, être conscient que la réduction de dimensionnalité peut occulter des effets physiques. Par exemple, l'évaluation de l'effet Doppler d'une onde rétrodiffusée par un plasma turbulent en mouvement décrit en 1D rend compte uniquement de la projection des vitesses dans la direction d'observation à condition que les règles de couplage soient satisfaites pour avoir une onde rétrodiffusée. Cela veut dire que le système est réduit à l'interaction d'une onde plane en interaction avec un plasma fluctuant présentant un mouvement radial ou n'ayant que des fluctuations de densité se déplaçant radialement. Le choix du modèle interprétatif est prépondérant, ici les variations temporelles sont interprétées comme de l'effet Doppler mais elle peuvent être vues aussi comme le spectre fréquentiel de la turbulence. Cette illustration montre bien les limites d'une réduction dimensionnelle et de bien définir la pertinence du modèle interprétatif utilisé. Certains effets physiques ou configurations ne sont descriptibles qu'avec la dimension qui convient, comme par exemple l'élargissement par la turbulence du faisceau-sonde doit être en 2D au minimum [19] ou le phénomène des réflexions multiples en 3D pour les réflectomètres d'ITER vu leur conception [20].

Le choix d'une équation "modèle" ou d'un système d'équations différentielles est discuté dans [19] pour les ondes hautes fréquences au sens où les ions peuvent être considérés comme immobiles. Dans cet article est aussi discuté le problème de la source et de la façon de décrire la turbulence qui peut s'avérer extrêmement coûteux en espace mémoire lorsqu'une description spatio-temporelle de la turbulence est simulée. Ceci est particulièrement vrai dans les cas où des moyennes statistiques sont requises pour satisfaire aux hypothèses du modèle théorique. Ce type d'études pousse aux

limites des possibilités actuelles de la simulation malgré une réduction aux limites du raisonnable du domaine de simulation. Cette réduction géométrique du domaine de calcul peut conduire à une troncature du faisceau donc à amoindrir les effets de diffusions multiples d'où une altération des résultats escomptés difficilement évaluable car dépendant des phénomènes physiques étudiés. Lorsque des phénomènes basses-fréquences sont mis en jeu, la détermination de la réponse ionique du plasma face à une excitation peut s'avérer délicate à traiter dans le cas des plasmas magnétisés en présence d'objet au voisinage de la source. Soit il existe un modèle décrivant la condition de bord dite de type "gaine" [21], soit il est nécessaire de coupler les équations de Maxwell à un code évaluant les densités de courant et la séparation de charges induites dans le plasma en présence d'ondes qui peut être soit un code particulière [11] ou un code cinétique décrivant la perturbation de la fonction de distribution ionique [22]. Le couplage avec un code évaluant la réponse du plasma, avec approximation à une sollicitation électromagnétique ou non, permet de décrire la propagation des ondes solitaires qui nécessite la prise en compte des effets pondéromoteurs. Souvent ces effets non-linéaires sont réduits à potentiel scalaire qui ne rend pas compte de la polarisation de l'onde excitatrice ni correctement de la magnétisation induite. Toutefois les modèles approchés servent à l'identification de phénomènes intéressants comme le ralentissement des solitons par les effets de diffusion d'ondes dans les plasmas turbulents. Il faut également être conscient que ces modèles réduits utilisent des approximations dont les conséquences ne sont pas toujours maîtrisées, comme par exemple l'utilisation au pas de temps précédent du champ électrique ce qui introduit un déphasage dans la réponse non-linéaire du plasma. Ceci n'est pas forcément conforme à la réponse donnée par un système d'équations de Zakharov habituellement associé à la description des solitons où la propagation de la réponse non-linéaire est prise en compte au travers d'une équation de propagation d'un mode basse-fréquence du plasma couplé aux ondes électromagnétiques via un terme source [23]. Les changements de polarisation correspondent aussi à un échange d'énergie entre modes où, soit la conversion de mode [24], ou le couplage entre modes via la turbulence [4], ou par excitation non-linéaire de densité de courant [25], peut être à l'origine d'un changement de polarisation. La résolution numérique d'un tel système d'équations différentielles n'est rendue possible que si des termes de couplage sont évalués dans le bon ordre afin qu'après quelques itérations le système converge, ce qui n'est pas toujours le cas. Des situations simples restent ouvertes comme l'évolution de la polarisation d'un plan d'onde traversant un cisaillement de champ magnétique. Ce point particulier pourrait concerner la détection d'îlot magnétique ou de zone de reconnexion magnétique. La traversée d'un plasma ayant un mouvement relativiste du fait de sa biréfringence [26] est aussi une possibilité pour induire un changement d'état de polarisation. Les simulations associées à ces phénomènes ne semblent pas encore en mesure d'être abordées et devraient être pour ouvrir des perspectives à de nouveaux diagnostics.

3. Quelle méthode numérique (ordre et schéma) choisir pour une équation modèle donnée?

L'approche numérique d'un problème s'effectue généralement par imitation ou par utilisation d'outil disponible dans l'environnement proche. Ces outils sont si possible adaptés à la résolution numérique du phénomène à simuler sans vraiment remettre en cause le choix du schéma numérique ou de la méthode utilisée. Cette situation est naturelle vu la complexité croissante des systèmes simulés. Toutefois il est utile de rappeler quelques points importants intervenant lors de la discrétisation d'une équation modèle. Les équations modèles décrivant les phénomènes dans le domaine fréquentiel excluent tout évolution temporelle donc correspondent à un système indépendant c'est-à-dire ne faisant intervenir aucun paramètre directement dépendant d'une situation antérieure. Les méthodes les plus appropriées sont les méthodes implicites qui sont généralement associées à une inversion de matrice creuse. La méthode des éléments finis du fait de leur adaptabilité aux géométries complexes a pris le pas sur les méthodes de différences finies. Toutefois, lorsque les milieux simulés deviennent très fortement anisotrope la méthode des éléments finis peut être inefficace et peut exhiber un bruit numérique élevé. Les progrès actuels sur ce sujet sont importants et sont souvent rapidement intégrés dans les logiciels commerciaux. Pour ces méthodes se pose le problème des conditions aux limites standards tant qu'elles sont régulières (lentement variables) le résultat est généralement fiable. Toutefois dès que les échelles de variations spatiales aux frontières du domaine de calcul sont de l'ordre de la longueur d'onde ou plus petite, les conditions de bord induisent des perturbations ne correspondant plus au phénomène simulé. Ces situations ne sont pas toutes descriptibles numériquement comme par exemple le cas des cônes de résonances du mode hybride-bas qui devraient traverser les bord du domaine de calcul. Ce dernier cas présente une grande variation d'échelle spatiale et une forte anisotropie où la décomposition de domaine s'avère efficace pour adapter la résolution et le maillage. Il en va de même pour les systèmes d'équations couplés ou d'ordre supérieure ou égal à 4 décrivant la conversion de modes impliquée dans les processus de chauffage [22,24,27]. Pour les schémas implicites l'augmentation de l'ordre du schéma ou des fonctions de base permet de réduire le nombre de points ou d'éléments fini pour une même précision. Le prix à payer est une augmentation de l'espace mémoire due à l'accroissement du nombre de coefficients et de la complexité de la matrice à inverser ce qui réduit d'autant plus l'efficacité des méthodes d'inversion. Un ordre optimal et un schéma compact sont donc à trouver pour une résolution fixée et pour une quantité de mémoire donnée [28].

Pour les équations modèles décrivant l'évolution spatio-temporelle, les méthodes implicites ont une utilité restreinte par les limites des ressources informatiques sont rapidement atteintes, alors que les méthodes explicites, moins gourmandes en mémoire, redeviennent intéressantes malgré la présence de conditions de stabilité. Le positionnement de la source peut aider pour minimiser les erreurs numériques et la procédure numérique pour décrire la source d'onde dans un système multidimensionnel n'est pas à négliger pour s'approcher au mieux de la réalité que l'on souhaite simuler. C'est là une des contraintes majeures de ces méthodes car la réduction du pas de temps entraîne généralement une dispersion numérique. La meilleure chose à faire est d'utiliser des schémas conservatifs, pouvant être dispersifs, pour éviter l'écueil

de la dissipation numérique qui peut toutefois avoir l'avantage de stabiliser un schéma alors qu'un schéma conservatif va se révéler marginalement stable. Ceci est un enjeu réel pour la description du mode X [6] ou pour un code multi-modes 3D. Vu le volume des objets à simuler, comme dans ITER ou les zones ionosphériques sondées, et les fréquences à utiliser ces aspects deviennent primordiaux pour avoir une simulation présentant un intérêt. Pour avoir accès aux réponses du plasma face aux sollicitations électromagnétiques incluant les effets non-linéaires y compris relativistes, il faut coupler les équations de Maxwell à un code particulaire ce qui a été fait pour l'interaction laser-plasma [12], le chauffage cyclotron ionique [11], la description du fonctionnement d'un gyrotron [15] ou l'interaction d'un aéronef avec un plasma [29]. Toutefois ces simulations requièrent l'accès aux plus performants des ordinateurs.

Le choix de l'ordre pour les schémas explicite reste limité du fait que l'accroissement de l'ordre induit des conditions plus sévères pour satisfaire aux conditions de stabilité. Ce faisant il devient de plus en plus difficile de limiter les effets de dispersion numérique malgré une amélioration liée à l'accroissement de l'ordre du schéma [30]. Le gain essentiel de monter en ordre est de réduire le nombre de points par longueur d'onde, et donc de réduire le temps de calcul. Cependant des recherches sont à effectuer pour trouver des schémas conservatifs et stables sur les temps nécessaires à la simulation du phénomène étudié. L'utilisation de schémas explicites en temps et implicite en espace permet d'accéder de façon plus efficace à l'évolution temporelle de système multidimensionnel comme c'est le cas pour étudier les effets des ondes radiofréquences devant les antennes de chauffage pour des ondes au voisinage de la fréquence cyclotron ionique [31].

4. Conclusions et Perspectives

Les simulations liées à la propagation d'ondes électromagnétiques dans les plasmas devraient apporter de nombreuses contributions dans le domaine des diagnostics, que cela soit pour la mise au point des modèles interprétatifs par un calcul amélioré des fonctions de transfert, soit pour la conception de nouveaux diagnostics par l'intégration des changements de polarisation ou dépolarisation, soit aussi pour une amélioration des propriétés de rayonnement des antennes immergées dans les plasmas avec la prise en compte de condition de bord particulière, ou enfin sur l'étude du rôle perturbateur des ondes électromagnétiques sur les diagnostics existants comme les sondes de Langmuir, les analyseurs de potentiel retardé ou autres sondes électrostatiques. La mise en place de diagnostics synthétiques dans les codes de simulation d'objets complexes [32] va prendre une place de plus en plus importante et les procédures mise en place dans ces codes doivent être testées et leur domaine d'utilisation déterminé avec précision. Les phénomènes non-linéaires susceptibles d'influencer voire de modifier fortement l'interprétation des mesures doivent être étudiés ce qui dans le cas des plasmas fortement turbulents peut s'avérer complexe. Nous rentrons dans une ère où les procédures de moyennes pour extraire les données souhaitées vont intervenir de façon de plus en plus fréquente et où le calcul des fonctions de transfert s'effectuera numériquement à l'aide de modèles non-linéaires prenant en compte la géométrie du système pour intégrer aussi les phénomènes de multi-réflexion et les possibilités de conversion de modes et d'amortissement qui interviennent pour les configurations particulières. La simulation de la propagation d'ondes en milieu cisailé fluctuant, en particulier le changement de polarisation et de phase, sera une voie donnant accès à des modèles interprétatifs inaccessibles jusqu'à présent. Il faudra aussi considérer simultanément les variations d'amplitude et de phase pour interpréter les phénomènes observés avec des ondes, et de savoir, si en présence d'ondes dont la densité de puissance est susceptible de modifier les propriétés du plasma au voisinage du diagnostic utilisé ou de modifier les conditions de propagation, des effets non-linéaires sont à prendre en compte ou pas.

Références bibliographiques

- [1] L Zeng, W A Peebles, E J Doyle, T L Rhodes and G Wang "Relativistic effects on reconstruction of density profiles via reflectometry in ITER and potential for electron temperature measurements" *Plasma Phys. Control. Fusion* 49 (2007) 1277–1287.
- [2] I. H. Hutchinson "Principles of Plasma Diagnostics" 2nd ed CAMBRIDGE univ. press (2002) p136 .
- [3] L.Colas, X.L. Zou, M. Paume, J-M. Chareau et al, "Internal magnetic fluctuations and electron heat transport in the Tore Supra tokamak: observation by cross-polarisation scattering", *Nuc. Fusion*, 38 (1998), 903-918.
- [4] T. Gerbaud, F. Clairet, R. Sabot, S. Heuraux, L. Vermare "Comparison of density fluctuation measurements between O-mode and X-mode reflectometry on Tore Supra *Rev. Sci. Instrum.* 77 (2006) 10E928.
- [5] J. Jacquot, L. Colas, S. Heuraux, M. Goniche, et al, "A versatile perfect matched layer for wave propagation in cold magnetized plasmas applied to Tore Supra ICRH antenna coupling modeling" submitted to *Plas. Phys Cont. Fusion*.
- [6] D.G. Swanson "Plasma waves" 2nd ed IOP (2003) Ch2.
- [7] A V Surkov "Nonlinear regime of Doppler reflectometry in cylindrical plasmas" *Plasma Phys. Control. Fusion* 48 (2006) 901–909
- [8] E.Z. Gusakov S. Heuraux S., A. Yu. Popov, "Nonlinear regime of Bragg backscattering leading to probing wave trapping and time delay jumps in fast frequency sweep reflectometry", *Plasma Phys. Cont. Fusion*. 51, 2009, 065018.
- [9] C.S. Huang, D. André, G.J. Sofko, "High-latitude ionospheric perturbations and gravity waves 2. Numerical simulations, *J. Geophys. Res.*, 103 (1998) 2143.
- [10] O. Meneghini, S. Shiraiwa, C. Lau, I. Faust " Modeling Non-linear Plasma-wave Interaction at the Edge of a Tokamak Plasma" http://www.comsol.fr/cd/direct/conf/2012/papers/10637/12579_meneghini_paper.pdf
- [11]T. G. Jenkins, T. M. Austin, D. N. Smithe, J. Loverich, A. H. Hakim "Time-domain simulation of nonlinear radiofrequency phenomena" *Phys. Plasmas* 20 (2013) 012116

- [12] M. Drouin, L. Gremillet, J.-C. Adam, A. Héron "Particle-in-cell modeling of relativistic laser-plasma interaction with the adjustable-damping, direct implicit method" *J. Comp. Phys.* 229 (2010) 4781.
- [13] G.C. Murphy, M.E. Dieckmann, L. Drury "Kinetic particle-in-cell simulations of asymmetric quasi-parallel mildly relativistic plasma collisions: Field and electron dynamics" *International Journal of Modern Physics D* 19 (2010) 707
- [14] R. S. Yaduvanshi, H. Parthasarathy "EM Wave Transport 2D and 3D Investigations" *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 1 (2010) 114.
- [15] A. Stock, J. Neudorfer, M. Riedlinger, G. Pirrung, G. Gassner, R. Schneider, S. Roller, C.-D. Munz, "Three-dimensional numerical simulation of a 30 GHz gyrotron resonator with an explicit high-order discontinuous galerkin based particle-in-cell method," *IEEE Transaction on Plasma Science*, 40 (2012) 1860.
- [16] V. Saxena, I. Kourakis, G. Sanchez-Arriaga "Interaction of spatially overlapping standing electromagnetic solitons in plasmas" *PHYSICS LETTERS A* 377 (2013) 473.
- [17] Y. Peysson, J.R. Roche, P. Bertrand, S. Labrunie "Mixed augmented variational formulation (MAVF) for lower hybrid full-wave calculations" *AIP Conference Proceedings* 1187 (2009) 633.
- [18] B. Despres, L.-M. Imbert-Gerard, Ricardo Weder "Hybrid resonance of Maxwell's equations in slab geometry" private communication.
- [19] S. Heuraux, F. da Silva "Simulations on wave propagation in fluctuating fusion plasmas for reflectometry applications and new developments" *Aims Journal Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S DCDS-S* 5 (2012) 307.
- [20] T. Estrada, K. Nagasaki et al, "Microwave reflectometry Diagnostics: Present day systems and challenges for future devices" *Plas. Fus. Res.* 7 (2012) 2502055.
- [21] H. Kohno, J.R. Myra, D.A. D'Ippolito, " Numerical analysis of radio-frequency sheath-plasma interactions in the ion cyclotron range of frequencies" *Phys of Plasmas* 19 (2012) 012508.
- [22] R. Dumont "Variational approach to radiofrequency waves in magnetic fusion devices" *Nucl.Fusion* 49 (2009) 075033
- [23] S. Heuraux, G. Leclert and Y. Hadjoudj "*Low-frequency responses of a plasma to a large amplitude high-frequency wave polarized on the extraordinary mode*" *Journal de Physique III* 4 (1994) 839.
- [24] M.A. Irzak, A; Yu Popov "2D Modeling of the O-X conversion in toroidal plasmas " *Plas Phys Cont. Fus.* 50 (2008) 025003.
- [25] H. Usui, H. Matsumoto, R. Gendrin "Numerical simulations of a three-wave coupling occurring in the ionospheric plasma" *Nonlinear Processes in Geophysics* 9 (2002) 1.
- [26] S. Fumeron, P. Vaveliuk, E. Faudot et al "Kinematic negative birefringence in fast moving dielectrics" *J. Opt. Soc. Am. B* 28 (2011) 765.
- [27] X. Lu, J. Johnson, X. Wang "Three-Dimensional Mode Conversion Associated with Kinetic Alfvén Waves" http://absimage.aps.org/image/DPP12/MWS_DPP12-2012-000114.pdf
- [28] C. Agut , J. Diaz "New high order schemes based on the modified equation technique for solving the wave equation" *Inria report n°7331* (2010).
- [29] Y. Miyake, H. Usui "New electromagnetic particule simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interaction" *Phys. of Plasmas* 16 (2009) 062904.
- [30] G.C. Cohen "Higher-order Numerical methods for transient wave equations" ed Springer (2002).
- [31] A. Ngadjeu, E. Faudot, L. Colas, S. Heuraux, J. Gunn, M. Kubič "Generation of DC currents by ICRF near fields in the Scrape-off Layer" *Journal of Nuclear Materials* 415 (2011) S1009.
- [32] S. Hacquin *et al* "Development of an European 3D full-wave reflectometer simulation code" *Proceedings of this conference*.