

L'utilisation des ondes pour chauffer, sonder et contrôler un plasma d'un futur réacteur à fusion***On the use of waves to heat, probe and control a plasma foreseeing for a fusion reactor***

Heuroux S.¹, Salazar L.¹, da Silva. F.², Sabot R.³, Santos J.²

¹*Institut Jean Lamour, Université de Lorraine-CNRS, F-54011 Nancy, stephane.heuroux@univ-lorraine.fr*

²*Instituto de Plasmas e Fusao Nuclear, IST, Av. Rovisco Pais, Lisbon, Portugal, tanatos@ipfn.tecnico.ulisboa.pt*

³*CEA, IRFM, F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, roland.sabot@cea.fr*

Mots clés: fusion, diagnostic, chauffage, turbulence *Keywords: fusion, diagnostic, heating, turbulence*

Résumé/Abstract

Dans un plasma de fusion où les conditions sont extrêmes seules les ondes peuvent être utilisées pour chauffer, sonder et contrôler ce milieu capable d'initier des réactions de fusion deutérium-tritium en nombre suffisant pour convertir de la matière en énergies utilisables pour les besoins humains. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de comprendre les mécanismes d'interaction onde-plasma d'abord pour le chauffer est atteindre la température requise pour un réacteur à fusion, pour extraire les caractéristiques de la turbulence pour arriver à la maîtrise le transport d'énergie et de particules et pour maîtriser la propagation des ondes nécessaires au maintien de la stabilité du réacteur à fusion. Il sera abordé les derniers développements de cette thématique avec une focalisation sur le rôle de la turbulence et son impact pour chacune des utilisations des ondes dans les plasmas de fusion. Les derniers développements en termes de simulations 3D et d'outils d'analyse utilisant l'intelligence artificielle seront aussi présentés ainsi que différents points sujet à discussion et ceux encore à traiter.

In a fusion plasma where the conditions are extreme, only the waves can be used to heat, probe and control this medium capable of initiating deuterium-tritium fusion reactions in sufficient numbers to convert matter into usable energy for human needs. . To achieve this objective, it is necessary to understand the mechanisms of wave-plasma interaction first to heat it and reach the temperature required for a fusion reactor, to extract the characteristics of the turbulence to achieve control of the transport of energy and particles and to control the propagation of the waves necessary to maintain the stability of the fusion reactor. The latest developments in this topic will be discussed with a focus on the role of turbulence and its impact for each use of waves in fusion plasmas. The latest developments in terms of 3D simulations and analysis tools using artificial intelligence will also be presented as well as various points subject to discussion and those still to be addressed.

1 Contexte de l'utilisation des ondes dans les plasmas de fusion

Les plasmas de fusion sont dits chauds pour signifier que la vitesse des particules chargées peut atteindre les vitesses caractéristiques des ondes et conduire à des échanges d'énergie onde-particules et vice versa. Donc pour bien décrire la propagation des ondes dans les plasmas de fusion, il est nécessaire de connaître précisément la fonction de distribution de vitesse des particules mise en mouvement par la présence d'une onde pour calculer précisément où et comment est absorbée l'onde [1]. Toutefois cela requiert un code dit pleine qui intègre tous les phénomènes liés à la propagation d'une onde, interférences, diffusion, diffraction, piégeage, conversion de modes tout en ayant les conditions de bord adaptées, de type classique, miroir parfait, bord transparent ou plus sophistiqué qui prend en compte les effets de gaine associés à la présence du plasma à la paroi où la différence de mobilité entre les ions et les électrons jouent un rôle essentiel en écrantant la composante du champ électrique normale à la paroi [2]. Il n'existe qu'un nombre très réduit de code fournissant une solution tridimensionnelle pour une onde de polarisation quelconque dans un plasma magnétisé inhomogène dépendant du temps vu les ressources informatiques nécessaires pour ne décrire qu'une fraction partielle du volume d'étude, en gros sur HPC cela représente un cube de 0.6x0.6x0.6 m³ de plasma pour une fréquence de sondage de 60 GHz et une discrétisation à 20 points par longueur d'onde dans le vide correspondant sensiblement à 2 TBytes de données. L'avantage d'avoir de telle simulation permet d'estimer correctement les amplitudes des ondes à l'endroit voulu à condition que soit utilisé la géométrie exacte des objets dans la zone de calcul [3]. Ceux à l'extérieur du volume de calcul ne seront pas pris en compte. L'inclusion d'une géométrie exacte et complexe intègre automatique les diagrammes de rayonnement effectifs qui peuvent s'écarter de beaucoup de ceux utilisés usuellement comme les faisceaux Gaussien ou autres. De plus dans les plasmas de fusion, il est possible de rencontrer des gradients d'indice très raides, ceci engendre la présence de modes de surface. De même que l'emboîtement de plasmas dans une enceinte à vide va générer des modes coaxiaux ainsi que des modes globaux. La zoologie des modes présents dans un plasma de fusion est très riche avec propriétés très variées. Il est aussi à noter que le changement de polarisation peut introduire des effets indésirables malgré que ces ondes soient loin de leur lieu d'émission comme c'est le cas pour le chauffage au voisinage de la fréquence cyclotron ionique avec la génération d'impuretés tout comme bien

d'autres qui sont décrits dans des fascicules dédiés à la fusion [[Science en Fusion 5](#)]. D'autres points seront laissés de côté comme l'entraînement de courant par onde hybride-basse suit à sa mise à l'écart par ITER. Seuls les chauffages cyclotron voit encore des développements comme les scénarios minoritaires à trois espèces sont encore en cours [4] de même que les antennes à géométrie complexe utilisées dans les stellarators [5] ou pour limiter les effets de redressement associés aux ondes radiofréquences modifiant le plasma en face des antennes tout comme et autres effets sur les chauffages [6]. Les changements de diagrammes de rayonnement par la turbulence de bord seront abordés lors de la description du tomographe micro-onde envisagé pour contrôler la phase de croissance du plasma. Maintenant abordons les sujets d'actualité comme le développement d'outils d'analyse des données basés sur les outils de l'intelligence artificielle.

2 L'apport de l'Intelligence Artificielle aux diagnostics dans les plasmas de fusion

Pour rappel de la notion de diagnostic vrai est associé à une relation linéaire entre la mesure et la grandeur à quantifier, dans la plupart des cas un modèle interprétatif est utilisé pour accéder au paramètre à mesurer. Il faut toujours être conscient qu'un tel modèle a son propre domaine d'application lié aux hypothèses et au formalisme utilisé pour l'établir. Pour illustrer ce propos le sondage par micro-onde d'un plasma turbulent ayant pour but de caractériser les fluctuations de densité du plasma sert d'exemple: un formalisme basé uniquement sur les effets de réfraction ne donne accès qu'aux perturbations de grandes longueurs et ignore les effets de diffusion, pour aller au-delà, l'approximation de Born est mise en œuvre et permet d'introduire la contribution de diffusion d'ondes par les fluctuations de densité[7], toutefois cette modélisation ignore les phénomènes de résonance présents lorsqu'une onde se propage dans un plasma turbulent], il est étonnant de constater que ces résonances sont nécessaires pour satisfaire à la conservation du flux électromagnétique[8]. Cette modélisation devient insuffisante lorsque l'amplitude de la turbulence dépasse un certain seuil où les effets non-linéaires entraînent une réduction du volume sondé [9]. En général l'introduction de modèle plus sophistiqué requiert la connaissance de paramètres nécessaires comme la longueur de corrélation transverse à la direction de propagation si l'on souhaite inclure l'élargissement du faisceau sonde par la turbulence [10]. Si la connaissance de l'amplitude de l'onde détectée correspond à la grandeur cible alors une modélisation 3D incluant toutes les polarisations est souvent nécessaire en particulier si l'environnement du diagnostic se trouve dans une géométrie complexe comme celle existant dans les configurations de réflectomètres de position de DEMO[Ricardo]. Cette connaissance est nécessaire pour s'assurer en continu que le positionnement du plasma d'un réacteur à fusion restera à distance de la paroi. L'introduction de nouveaux types de diagnostic comme la réflectométrie d'intensité [12] a été possible par l'utilisation des modèles interprétatifs basé sur l'intelligence artificielle (IA) [13]. Les avantages et les limites de l'IA pour les traitements des signaux seront données pour la réflectométrie [14] comme illustration qui vont être maintenant développés.

Avant d'en arriver à l'utilisation des outils de l'IA, un travail de thèse avait comme objectif d'exploiter tous les signaux fournis par la réflectométrie à fréquence fixe pour en extraire des comportements génériques de la turbulence dans les plasmas de Tore Supra. Pour pratiquer cette analyse systématique, l'analyse des spectres a été effectué en approchant en combinant linéairement des fonctions génériques pour décrire les différentes composantes du spectre en fréquence [15]. Toutefois cette méthodologie a une applicabilité limitée par l'introduction de seuil et de l'absence de dynamique, c'est-à-dire ne fournit aucune information précise sur les échanges d'énergie sur des échelles de temps court. Pour pallier à ces manques et définitions à priori de seuils, une méthode basée sur la décomposition automatisée de la série temporelle en différentes composantes avec la possibilité de suivre l'évolution des échanges d'énergie entre composantes [14]. Pour assurer une variabilité des échelles temporelles, la transformée en ondelettes continues a été choisie. De plus, la méthode de décomposition a été testé pour vérifier la conservation des propriétés physiques et statistiques de chaque composante en utilisant des données en provenance de différentes machines. Il est remarquable de constater que la cohérence d'une composante peut être extraite avec cette méthode seulement à partir d'une série temporelle alors qu'elle a été mesurée en utilisant deux signaux provenant d'un réflectomètre de corrélation [14]. Ces vérifications étant convaincantes, il a été mise en évidence la nature intermittente des modes quasi-cohérents. D'où l'idée de suivre la dynamique des composantes d'un signal et de s'en servir pour les discriminer à l'aide d'outils de l'IA qui ont été aussi utilisés pour la sélections des signaux, le seuillage ainsi que d'autres outils. Le choix de ces outils est décrit dans la thèse de L. Salazar[16]. Ceci a permis d'aboutir au schéma décrit figure 1 qui résume les différentes étapes de la décomposition d'une série temporelle. Des outils supplémentaires ont été développés pour suivre les échanges d'énergie (transfert d'entropie) ce qui a permis d'identifier des canaux d'échange d'énergie entre composantes comme composante basse fréquence vers mode quasi-cohérent et mode quasi-cohérent vers la composante large bande associé à la micro-turbulence [16]. Sachant que chaque composante extraite a vu ses propriétés physiques et statistiques préservées, il est envisageable de voir si la composante large bande contient plusieurs sources et s'il y a des transferts entre échelles de temps au sein de cette composante comme il est possible d'attendre dans le cas de couplage entre les instabilités de gradient de température ionique et les instabilités d'électrons piégés ce qui va requérir le développement de nouveaux outils. Il est à noter que la méthode de décomposition est applicable à toutes les séries temporelles à condition que les modes-composantes soient dynamiquement séparables ou ayant des bandes en fréquence identifiables dans l'espace des échelles de temps de la transformée en ondelettes continues.

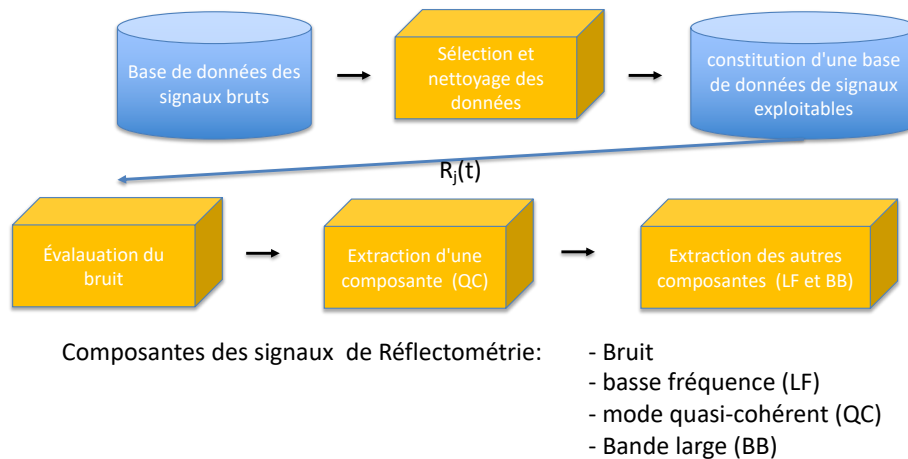


Figure 1: Déroulé des processus mis en œuvre lors de la décomposition d'une série temporelle.

3 Contrôle en temps réel des plasmas de fusion et nouveaux concepts de diagnostics

Le contrôle du positionnement d'un plasma utilisant les ondes a été démontré avec l'interférométrie depuis longtemps, avec la réflectométrie récemment et va être mis en place sur WEST [17]. Un projet "Enabling Research" d'EUROfusion utilisant un ensemble de réflectomètres pour maintenir le plasma de DEMO est en cours d'étude [18]. Une étude complémentaire utilisant ce système porte sur le contrôle de la forme du plasma dans la phase de démarrage de DEMO qui utilise les outils de l'IA pour accéder au contrôle en temps réel. Les réseaux neuronaux sont présents à plusieurs étapes : reconstruction de profil de densité, reconnaissance de formes puis reconstruction de contours iso-densité. Il est même envisagé d'utiliser un réseau de neurones pour différencier les différents régimes du tomographe micro-ondes que peut constituer le PPR (Plasma Positioning Reflectometer) qui sont les modes : interférométrie, réfractométrie, réfractométrie d'intensité et réflectométrie. Au préalable il a été nécessaire de constituer une base d'entraînement de ces réseaux de neurones. Vu la taille des plasmas de DEMO

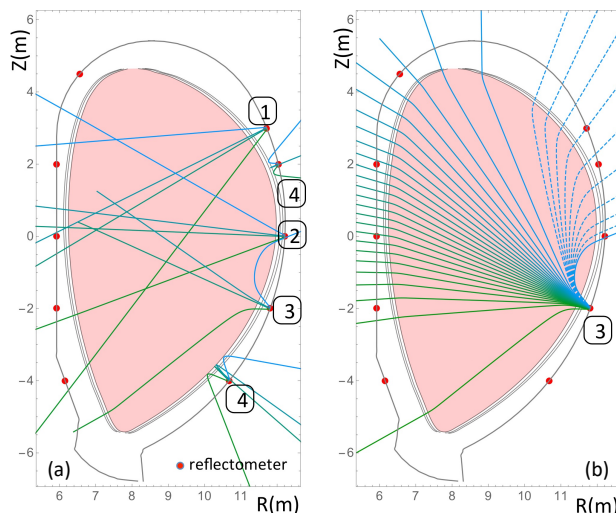


Figure 2 : (a) Visualisation des 4 régimes correspondant à 4 fréquences différentes pour DEMO, pour la plus haute régime 1 interférométrie, 2 réfractométrie, 3 réfractométrie d'intensité et 4 la plus basse réflectométrie (b) tracé de rayon à une seule fréquence avec raffinement $\times 10$ pointillé.

d'une hauteur de ~ 12 m et d'une largeur de ~ 4 m, il n'est pas envisageable d'utiliser les codes "full-wave" pour simuler l'ensemble des configurations. Seul le tracé des rayons permet d'effectuer cette tâche, mais contrairement au code "full-wave" où les champs calculés intègrent les propriétés des composants mur, antennes, guide d'onde, il faut décrire proprement chaque élément constitutif des réflectomètres aussi bien en émission qu'en réception. Par exemple, la géométrie des cornets émetteur ne permet pas d'utiliser les expressions standards et un calcul préalable est nécessaire pour le déterminer. Si ce travail n'est pas accompli une comparaison de résultats exclut de trouver un accord entre une approche full-wave et tracé des rayons. Ensuite il faut établir un modèle permettant d'évaluer précisément l'amplitude du mode fondamental atteignant le détecteur. Cette étape est multiple d'abord la structure du champ électrique doit être construite à l'entrée de l'antenne de réception puis projeter sur le mode fondamental du guide d'onde. Une fois l'amplitude obtenue, il est nécessaire de calculer le gain de l'antenne à l'aide de la conservation du flux électromagnétique en prenant en compte les variations de la vitesse de groupe et d'introduire la variation de phase entre la bouche d'antenne réceptrice et le détecteur, et ceci pour chaque fréquence de sondage. Une fois ce travail effectué, il est possible de constituer les cas servant à l'apprentissage des réseaux de neurones sachant que lorsqu'un réflectomètre est actif il va fournir amplitude, phase et temps de vol pour les N réflectomètres du PPR pour chaque fréquence. Pour chaque fréquence N^2 triplets sont obtenus à multiplier par M le nombre de fréquences utilisées. Ainsi vont être constitué trois images de $M \times N^2$ utilisés pour la reconstruction des contours de densité à l'intérieur de la première paroi à l'aide d'outils de l'IA tel que le "machine learning". Pour gagner du temps, un prétraitement sera effectué pour identifier les différents régimes afin d'appliquer une procédure adaptée à chaque régime. La méthodologie est proche de celle utilisé pour la réfractométrie d'intensité développée sur ASDEX Upgrade [12]. La faisabilité d'un tel tomographe micro-onde étant montré, il reste la dernière phase à valider le contrôle temps réel qui requiert une la synchronisation de tous les réflectomètres et des actuateurs agissant sur la position du plasma.

4 Conclusion

Pour comprendre les progrès effectués portant sur l'utilisation de ondes comme outils de contrôle et de façonnage des plasmas, il faut prendre en compte le développement des outils de simulation et de traitement des données en particulier ceux liés au GPU qui fournissent les nombreux cas nécessaires à l'apprentissage supervisé des réseaux de neurones avant d'aller vers un apprentissage profond basé sur l'accumulation des résultats. L'introduction des réseaux neuronaux contribue aussi à l'émergence de nouveau diagnostic [14] récemment installé sur le tokamak ASDEX Upgrade, et d'autres en cours de développement comme le tomographe micro-onde décrit rapidement ici. L'introduction des réseaux de neurones comme super filtres dans les systèmes de contrôle ou dans les systèmes d'analyse de données permet d'accéder à des systèmes de plus en plus performants et conduire à développements de nouveaux diagnostics qui ne sont plus basés sur des modèles interprétatifs mais sur un ensemble de résultats de simulation comme cela s'est déjà fait pour la reconstruction de profil de densité en réflectométrie allant même jusqu'à la reconstruction de profil creux [19] où toute zone ne se voit pas sonder directement par réflexion.

Références bibliographiques

- [1] J. Hillairet "Review on recent progress in ion cyclotron range of frequency systems, experiments and modelling for magnetic confinement fusion" [Rev. Mod. Plasma Phys. 7, 16 \(2023\)](#).
- [2] S. Shiraiwa *et al* "Magnetic potential based formulation for linear and non-linear 3D RF sheath simulation" [Nucl. Fusion 63, 026024 \(2023\)](#).
- [3] F. da Silva *et al* "An overview of the evolution of the modeling of reflectometry diagnostics in fusion plasmas using finite-difference time-domain codes" Fusion Engineering and Design submitted.
- [4] Y. Kasakov *et al* " Physics and applications of three-ion ICRF scenarios for fusion research" [Phys. Plasmas 28, 020501 \(2021\)](#).
- [5] J. Ongena *et al* "Physics design, construction and commissioning of the ICRH system for the stellarator Wendelstein 7-X" [Fusion Engineering and Design 192, 113627 \(2023\)](#).
- [6] C. Tsironis *et al* "Modelling effects of edge density fluctuations on electron-cyclotron current drive used for neoclassical tearing mode stabilization" [J. Plasma Phys. 87, 905870103 \(2021\)](#).
- [7] L. Vermare, S. Heuraux, F. Clairet, G. Leclert, F. da Silva "Density fluctuations measurements using X-mode fast sweep reflectometry on Tore Supra" Nuclear Fusion **46**, S743 (2006).
- [8] E.V. Sysoeva, E.Z. Gusakov, S. Heuraux "Transition into diffusive regime of propagation of probing electromagnetic waves in a turbulent inhomogeneous plasma and limitations for microwave reflectometry in reactor scale devices" Plas. Phys. Cont. Fusion **55**, 115001 (2013)
- [9] E.Z. Gusakov, S. Heuraux, A. Yu. Popov "Nonlinear regime of Bragg backscattering leading to probing wave trapping and time delay jumps in fast frequency sweep reflectometry" Plas. Phys. Cont. Fusion **51** 065018 (2009).
- [10] P. Tretinnikov, E. Gusakov, S. Heuraux "On the influence of plasma turbulence on Collective Thomson Scattering measurements" Plasma Phys. Cont. Fusion (accepted refusé pour des raisons politiques Phys. Plasmas **30**, 032502 (2023)
- [11] B. Gonçalves, P. Varela, A. Silva, F. Silva, ..., S. Heuraux, ..., O. D'Arcangelo "Advances, challenges, and future perspectives of microwave reflectometry for plasma position and shape control on future nuclear fusion devices" Sensors **23**, 3926 (2023)
- [12] M. Usoltseva *et al* "Experimental validation of the intensity refractometry principle for density measurements at the edge of a tokamak" [Fus. Eng. Des 179, 113783 \(2023\)](#).
- [13] A. Mesbah, D. B. Graves "Machine learning for modeling, diagnostics, and control of non-equilibrium plasmas" [J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 30LT02 \(2019\)](#).
- [14] L. Salazar *et al* "Extraction of quasi-coherent modes based on reflectometry data" [Plasma Phys. Control. Fusion 64, 104007\(2022\)](#).
- [15] Y. Sun, R. Sabot, G. Homung, S. Heuraux, S. Hacquin, G. Verdoelaege "Systematic parametrization of reflectometry fluctuation frequency spectra for turbulence property studies in tokamak plasma" Rev. Sci. Instrum. **89**, 073504 (2018) & Y. Sun, R. Sabot, S. Heuraux, G. Verdoelaege, S. Hacquin, G. Homung "On trends of the turbulence properties emerging from systematic studies of Tore Supra reflectometry database" Phys Plasmas **26**, 032307 (2019).
- [16] L. Salazar " Data-driven approach to tackle turbulence in high temperature plasma" thèse de l' Université de Lorraine 2023.
- [17] M. Carrard, R. Sabot *et al* " Real time reflectometry for tokamak plasma " this conference
- [18] E. Ricardo *et al* "Simulation and data analysis techniques to design optimized PPR systems on plasma fusion devices" [Comp. Phys. Comm. 294, 108945 \(2024\)](#).
- [19] R. B. Morales, S. Hacquin, S. Heuraux, R. Sabot "New density profile reconstruction methods for X-mode reflectometry" Rev. Sci. Instrum **88**, 043503 (2017).