



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

Dynamique de la turbulence dans le tokamak Tore Supra mesurée par réflectométrie ultra-rapide

Turbulence dynamics measurements by ultra-fast sweeping reflectometry on Tore Supra Tokamak

Grégoire Hornung, Frédéric Clairet, Christine Bottereau, Gloria Falchetto.

CEA, IRFM, F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France, {prénom.nom}@cea.fr

Mots-clefs: plasma magnétisé, tokamak, turbulence, réflectométrie.

Keywords: magnetised plasma, tokamak, turbulence, reflectometry.

Résumé

Les récents développements, réalisés sur les réflectomètres bande V (50-75 GHz) et W (75-110 GHz) de Tore Supra permettent des balayages très rapides (2 μ s) avec des temps morts entre balayages de 1 μ s. De ce fait, en réalisant des balayages successifs, il est possible d'accéder avec une très bonne résolution spatiale (millimétrique) à la dynamique temporelle de la densité du plasma et de ses fluctuations. Les fluctuations de densité au voisinage de la couche de coupure engendrent en effet des fluctuations du signal de l'onde réfléchi. L'analyse statistique du signal permet de déterminer les caractéristiques des fluctuations et ainsi de remonter aux propriétés de la turbulence (temps et longueur de corrélation et vitesse de propagation), dans les différentes régions d'un plasma de tokamak.

Introduction

Une des problématiques majeures dans le domaine des plasmas de fusion est la présence de phénomènes turbulents qui peuvent affecter la performance d'un réacteur. La mesure et la caractérisation de la turbulence plasma dans les machines de fusion, tel le tokamak, sont par conséquent essentielles à la compréhension et au contrôle de ces phénomènes.

La réflectométrie permet, depuis de nombreuses années [1], de mesurer la densité électronique d'un plasma et ses fluctuations. C'est une technique radar qui consiste à sonder le plasma à l'aide d'ondes électromagnétiques. En balayant la fréquence, le plasma est sondé du bord vers le cœur ce qui permet d'étudier la dépendance radiale de la densité électronique et de ses fluctuations [2]. Le balayage en fréquence permet de mesurer avec précision le temps de vol de l'onde sonde, qui est nécessaire à la reconstruction du profil de densité électronique. Le lien entre fréquence sonde et position de coupure se fait par l'intermédiaire du profil de densité, ce qui permet de localiser radialement l'information contenue dans les signaux réfléchis. Les propriétés de la turbulence sont étudiées à partir des fluctuations d'amplitude du signal réfléchi. Le temps caractéristique, la taille et la vitesse de propagation radiale des structures turbulentes sont estimés à partir d'une analyse statistique.

Le papier est structuré comme il suit: d'abord la physique élémentaire de la propagation des ondes électromagnétiques dans un plasma magnétisé nécessaire à la compréhension de la réflectométrie est rappelée. La deuxième section détaille le montage du réflectomètre à balayage de fréquence ultra-rapide installé sur Tore Supra. Les composants du réflectomètre qui permettent d'assurer un balayage très rapide de la fréquence font l'objet d'une attention particulière. Enfin, un exemple des possibilités offertes par la réflectométrie en termes d'étude de la turbulence est présenté.

1. Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma magnétisé

La propagation d'une onde plane monochromatique dans un plasma magnétisé est décrite par sa relation de dispersion [3]. Pour une onde se propageant perpendiculairement au champ magnétique du plasma, la résolution de la relation de dispersion conduit à deux solutions associées à deux modes de polarisation distincts. Une de ces polarisations appelée

mode X, correspond au cas où le champ électrique de l'onde est perpendiculaire au champ magnétique du plasma. L'indice de réfraction en mode X s'écrit :

$$N_X^2 = 1 - \frac{F_{pe}^2}{F^2} \frac{(F^2 - F_{pe}^2)}{(F^2 - F_{ce}^2 - F_{pe}^2)}$$

La dépendance à la densité électronique provient de la fréquence plasma $F_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / m_e \epsilon_0}$ tandis que la dépendance au champ magnétique du plasma est incluse dans la fréquence cyclotronique électronique $F_{ce} = eB / m_e$. L'onde se propage tant que l'indice de réfraction est réel et positif. Lorsque l'indice de réfraction tend vers zéro, l'onde est réfléchiée. Les fréquences vérifiant $N_x=0$ sont appelées fréquences de coupures haute et basse,

$$F_{XH} = \frac{F_{ce} + \sqrt{F_{ce}^2 + 4F_{pe}^2}}{2} \quad \text{et} \quad F_{XB} = \frac{-F_{ce} + \sqrt{F_{ce}^2 + 4F_{pe}^2}}{2}$$

Seule la coupure haute est utilisée par le réflectomètre à balayage installé sur Tore Supra.

Les faibles fréquences sondes sont réfléchies sur des couches plasmas de basse densité et faible champ magnétique (bord du tokamak) tandis que les hautes fréquences sondes sont réfléchies sur des couches de plasmas de forte densité et fort champ magnétique (cœur du tokamak).

2. Le réflectomètre à balayage ultra-rapide de Tore Supra

Le réflectomètre à balayage ultra rapide [4] est installé dans le plan équatorial du tokamak Tore Supra côté faible champ magnétique. Le réflectomètre opère dans les bandes de fréquences V (50-75 GHz) et W (75-110 GHz). Le schéma de principe du réflectomètre est présenté dans la Figure 1. Une source solide VCO [5] est balayée en fréquence (12-20 GHz) pour produire le signal. Une partie du signal source est utilisée pour sonder le plasma, l'autre partie sert de signal de référence. La fréquence des signaux doit être multipliée pour atteindre les fréquences nominales. Ces multiplicateurs assurent une puissance de l'onde émise dans le plasma de l'ordre de 10 mW, ce qui fait de la réflectométrie une méthode de mesure non perturbative. Le mélangeur à bande latérale unique (MBLU) assure la modulation du signal sonde. C'est un élément important du système car il n'impose pas de limite à la vitesse de balayage de la source et permet une détection hétérodyne au niveau du mélangeur qui confère au système un rapport signal/bruit de l'ordre de 40 dB.

Après propagation dans le plasma, le signal associé à l'onde réfléchiée est mélangé avec le signal de référence. Le signal résultant est démodulé, puis un détecteur I/Q enregistre séparément les composantes en phase et en quadrature de phase du signal.

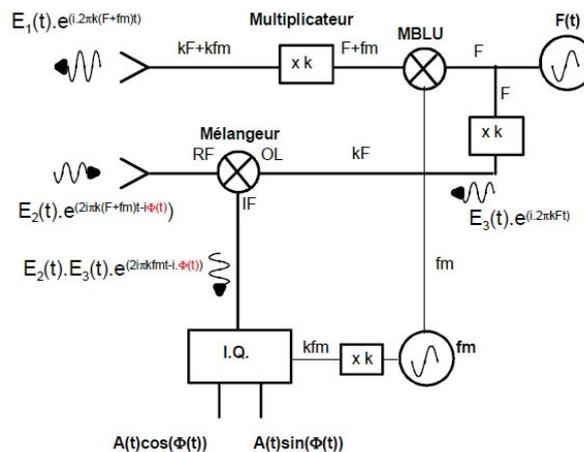


Fig.1 Schéma du réflectomètre DREFRAP

Le signal enregistré par le réflectomètre peut s'écrire comme un signal complexe $S(F, t) = A(F, t)e^{-i\phi(F, t)}$, A et ϕ étant respectivement la phase et l'amplitude du signal réfléchi et qui peuvent ainsi être mesurées séparément. La détermination du temps de vol, qui est lié à la différence de fréquence entre l'onde réfléchiée et l'onde de référence, se fait par traitement FFT du signal complexe. Pour une détermination claire du temps de vol $\tau = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial F}$, le balayage en fréquence doit être suffisamment rapide pour figer la turbulence du plasma [6] afin de mieux suivre son évolution temporelle d'un balayage à l'autre, ainsi que de réduire l'élargissement Doppler qui s'ajoute aux fluctuations du signal réfléchi. Les temps de vol mesurés pour des vitesses de balayage de 200 μ s et 2 μ s sont illustrés sur la Fig. 2.

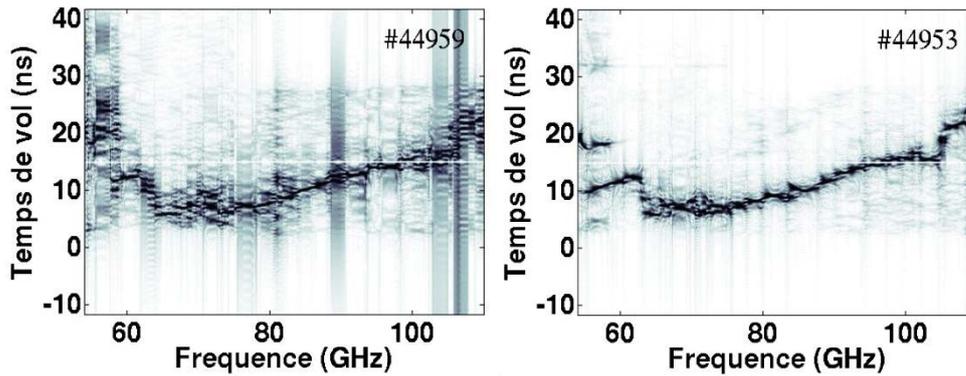


Fig. 2 : Temps de vol estimés par FFT glissante du signal pour des temps de balayages de 200 μs (gauche) et 2 μs (droite). L'élargissement Doppler se réduit avec le temps de balayage.

La vitesse de balayage actuelle est de 2 μs . Entre chaque balayage, un temps mort de 1 μs est nécessaire pour réinitialiser la rampe de fréquence. De ce fait, la réflectométrie ultra-rapide sur Tore Supra permet d'étudier la dynamique des profils et fluctuations de densité électronique avec une résolution de 3 μs .

3. Analyse statistique du signal

Le profil de densité est reconstruit à partir du temps de vol grâce à un algorithme itératif [7,8]. Une fois le profil de densité connu, il est possible d'associer à chaque fréquence sonde une position de coupure et ainsi d'étudier avec une résolution spatiale millimétrique les propriétés des fluctuations de densité le long du rayon.

L'étude des corrélations appliquée aux signaux d'amplitude réfléchis permet de caractériser et quantifier les propriétés spatiales et temporelles des fluctuations de densité sous-jacentes.

La fonction de corrélation croisée $CCF(R, \Delta R, \Delta t)$ évalue la similarité entre deux signaux d'amplitude $A(R, t)$ et $A(R + \Delta R, t + \Delta t)$ provenant de différentes positions radiales et mesurés à des instants différents,

$$CCF(R, \Delta R, \Delta t) = \frac{A(R, t) - \overline{A(R)}}{\sigma_{A(R)}} \frac{A(R + \Delta R, t + \Delta t) - \overline{A(R + \Delta R)}}{\sigma_{A(R + \Delta R)}} .$$

La largeur à mi-hauteur de la CCF pour un décalage radial nul donne le temps de corrélation t_c du signal qui est une mesure du temps caractéristique des fluctuations. Réciproquement, la largeur à mi-hauteur de la CCF pour un décalage temporel nul donne la longueur radiale de corrélation L_r , qui est une mesure de la taille radiale des structures de densité turbulentes sous-jacentes. Si les CCF piquent pour des décalages temporels non nuls, cela témoigne d'une propagation radiale des fluctuations. Il est alors possible d'estimer une vitesse radiale de propagation. La figure 3 représente un exemple de CCF, calculé sur le signal d'amplitude à une position radiale donnée, ainsi que les grandeurs utilisées pour quantifier les propriétés du signal.

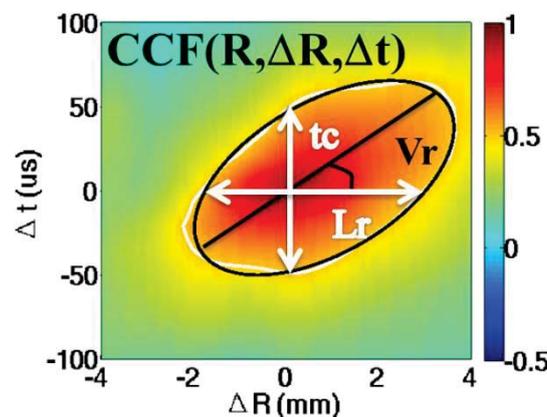


Fig. 3 : Exemple de fonction de corrélation croisée calculée à partir des signaux d'amplitude, à une position radiale donnée. Le temps et la longueur de corrélation sont représentés par des flèches. L'inclinaison de l'ellipse centrale permet d'estimer une vitesse radiale de propagation des fluctuations.

L'analyse statistique ci-dessus est ici appliquée à la décharge plasma #44949 de Tore Supra. L'amplitude du signal réfléchi mesurée est représentée en fonction du temps et du rayon normalisé sur la Figure 4. Le profil radial de la longueur de corrélation évaluée par l'analyse des corrélations croisées est également représenté. Le temps de corrélation du signal évalué par la même technique est aussi reporté. Une transition abrupte des propriétés des fluctuations est clairement visible sur le signal d'amplitude dans la région d'extrême bord du plasma; dans cette région on observe des structures se propageant vers l'extérieur du plasma tandis que dans la région du cœur il n'y a pas de signature évidente témoignant d'une propagation radiale des fluctuations. L'analyse statistique a permis d'identifier et de quantifier l'évolution radiale des caractéristiques de la turbulence plasma.

La variation radiale de la longueur de corrélation L_r , calculée par la méthode ci-dessus, confirme la transition observée: la taille des structures décroît sensiblement de centimétrique à millimétrique du centre vers le bord du plasma; cette tendance s'inverse subitement autour de $r/a \sim 1.1$, où la taille des structures augmente brutalement.

Dans la région du cœur, le temps de corrélation des fluctuations est inférieur à $6 \mu\text{s}$ tandis qu'il augmente également brutalement autour de $r/a \sim 1.1$, pour atteindre des valeurs de l'ordre de $100 \mu\text{s}$.

L'évaluation des vitesses de propagation montre que pour $r/a > 1.1$, les fluctuations se propagent radialement vers l'extérieur. La vitesse de propagation radiale est estimée à environ 200 m s^{-1} .

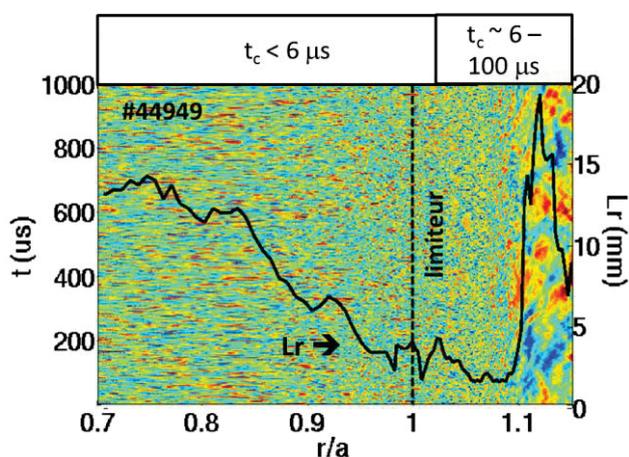


Fig. 3 : Amplitude réfléchie en fonction du rayon normalisé et du temps pour la décharge Tore Supra #44949. Le rayon normalisé est défini comme $r/a = (R - R_0)/a$, avec R_0 et a le grand et petit rayons du tokamak. Le profil radial de la longueur de corrélation évaluée par analyse des corrélations croisées est superposé. Le temps caractéristique des fluctuations évalué par la même technique est aussi reporté.

4. Conclusion

La réflectométrie à balayage est une technique qui permet d'étudier la densité électronique des plasmas de tokamak avec une très bonne résolution spatiale. Dans le réflectomètre installé sur Tore Supra, l'utilisation conjointe d'une source solide et d'un mélangeur équilibré a permis de réduire le temps de balayage à $2 \mu\text{s}$, plus $1 \mu\text{s}$ de temps mort entre les rampes, tout en garantissant la stabilité des rampes de fréquences. Le plasma est alors localement figé pendant la durée du balayage, ce qui permet une détermination précise du temps de vol, qui est nécessaire à la reconstruction du profil de densité. En réalisant des balayages en fréquence successifs, l'évolution temporelle des fluctuations de densité peut être suivie avec une résolution de $3 \mu\text{s}$. Une analyse statistique basée sur les corrélations croisées du signal a permis de mieux caractériser et quantifier la forte dépendance radiale des propriétés des fluctuations. Des fluctuations haute fréquence sont observées au centre du tokamak tandis que des structures cohérentes se propageant radialement vers l'extérieur sont détectées dans l'extrême bord.

Références bibliographiques

1. F. Simonet, Rev. Sci. Instrum. 56, 664 (1985).
2. G.D Conway, Nucl. Fusion 46 (2006) S665–S669V.
3. L. Ginzburg, (1970). The propagation of electromagnetic waves in plasmas.
4. F. Clairet, et al, Rev. Sci. Instrum. 81, 10D903 (2010).
5. J.C. Giacalone et al, International Journal of Microwave and Wireless Technologies 06 505 (2009).
6. Ph. Moreau et al, Rev. Sci. Instrum., 71, (2000)
7. H. Bottollier-Curtet, G. Icchtchenko. Rev. Sci. Instrum. 58 ,539 (1987).
8. R. Sabot, et al J Infrared Millim. W. 25, 229 (2004)