

CEA/CADARACHE

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE (DSM)

INSTITUT DE RECHERCHE SUR LA FUSION PAR CONFINEMENT MAGNETIQUE (IRFM)

CEA/Cadarache - 13108 St Paul-lez-Durance Cedex

Visitez notre site Web : <http://www-fusion-magnetique.cea.fr>

PROPOSITION DE THESE 2014

Nom du Responsable de la thèse : Julien HILLAIRET (CEA) Jérôme PUECH (CNES)	e-mail : julien.hillairet@cea.fr jerome.puech@cnes.fr
	téléphone : 04 42 25 39 81 (CEA) 05 61 27 35 10 (CNES)
	secrétariat : 04 42 25 45 55 (CEA)
Équipe de Recherche : CEA Cadarache (DSM/IRFM/SCCP/GCHF) et CNES Toulouse (DCT/RF/HT)	

Sujet de la thèse :

Titre : Caractérisation et modélisation des propriétés d'émission secondaire pour des systèmes RF haute puissance. Applications à la fusion nucléaire contrôlée et au spatial.

Contexte et objectifs :

Pour constituer une filière envisageable pour un réacteur produisant de l'électricité à partir de réactions de fusion nucléaire, un réacteur *tokamak* nécessite une source de courant non inductive pour pouvoir fonctionner de façon continue. Les ondes à haute fréquence (HF), en transférant leur énergie aux électrons circulant dans une direction privilégiée, constituent une source de courant largement étudiée sur les tokamaks depuis plus de 30 ans. Parmi ces ondes HF, les ondes à la fréquence hybride basse sont celles conduisant à la meilleure efficacité, évaluée en ampère de courant généré par watt injecté.

Ces ondes de fréquence comprise entre 1 et 8 GHz sont transportées du générateur à l'antenne rayonnant la puissance dans le plasma par des guides d'ondes. Ces guides sont d'abord sous pression de gaz puis dans le vide du tokamak comme l'antenne. Il faut donc disposer à la frontière une fenêtre qui soit étanche vis-à-vis du gaz mais transparente pour les ondes. Le tokamak ITER en cours de construction à Cadarache envisage de construire un système à la fréquence de 5 GHz pour allonger la durée des décharges de 400 à 3000 secondes. Ce système pourra coupler 20 MW de puissance et la place disponible pour accueillir l'antenne sur le tokamak impose de devoir transmettre 500 kW par fenêtre. Il y a un saut technologique important entre ce qui a été testé sur le tokamak du CEA Tore Supra (300 kW à 3.7 GHz) et ce qui est nécessaire pour ITER (500 kW à 5 GHz).

Les capacités de transmission de puissance des antennes sous vide sont limitées par l'effet « multipactor » qui se produit quand l'énergie cinétique (gagnée dans le champ de l'onde HF) des électrons frappant les surfaces des guides ou de la fenêtre est suffisamment élevée. Un phénomène d'« avalanche électronique » se crée et génère un claquage (arc) dans le gaz résiduel à faible pression, qui peut endommager les structures. Le paramètre critique qui va régler le niveau de champ électrique HF maximal (et donc de puissance HF) est le taux d'émission secondaire. Ce taux dépend du matériau de la cible et de sa topologie (rugosité) ainsi que des gaz adsorbés et des traitements effectués à sa surface. Ce taux est plus élevé pour les céramiques que pour les métaux et il est critique d'évaluer les limites de puissance attendues de ces fenêtres dans les conditions expérimentales réelles (température d'étuvage, présence d'un champ magnétique statique, effet d'un film métallique ultramine ...).

Des 'recettes', résultant de l'expérience ont été utilisées par les industriels sans qu'aucune étude de base n'ait été entreprise, conduisant à des lois empiriques souvent pessimistes. De façon générale, on trouve très peu d'études dans la littérature sur les propriétés d'émission des céramiques et en particulier sur l'oxyde de béryllium et l'effet d'une couche 'anti-multipactor'. Le vieillissement de ce film très mince est aussi très mal connu.

Nature du travail à réaliser par l'étudiant :

Au CNES (Collab.ONERA)

Les mécanismes physiques conduisant aux claquages par avalanche électronique des matériaux isolants (en particulier des céramiques) sont complexes : émission secondaire ainsi que diffusion élastique/inélastique des électrons. L'étudiant mesurera en laboratoire les grandeurs se rattachant à ces mécanismes, en corrélation avec la caractérisation fine des surfaces. Ce travail expérimental sera mené en contrôlant des paramètres physiques pertinents (traitement thermique, couche « anti-multipactor »).

Au CNES et à l'IRFM

Pour une courbe donnant le taux d'émission secondaire en fonction de l'énergie de l'électron incident, il est possible de calculer le facteur d'amplification de la population d'électrons et donc de prédire la puissance à partir de laquelle le claquage apparaît. Ceci a été fait dans des géométries simples pour des guides métalliques. Nous nous proposons de mener cette étude dans le cas de géométries plus complexes (éléments d'antenne HF, fenêtre HF) en tenant compte du champ magnétique statique qui est présent au voisinage d'un tokamak.

Pour ce faire l'étudiant adaptera des codes de simulation numérique existants pour lesquels les courbes expérimentales, déterminées à partir des expériences conduites, serviront de paramètres d'entrée. Il vérifiera de façon précise l'effet bénéfique d'un part de l'augmentation de la fréquence (3.7 GHz à 5 GHz) et d'autre part de l'étuvage à haute température (~300°C) sur le seuil d'apparition de l'effet multipactor.

Il donnera des recommandations pour les dimensions du disque de céramique BeO de la fenêtre mais aussi des guides d'ondes (circulaires et rectangulaires) se raccordant au disque. Ce travail sera mené de façon concerté avec les études de design HF et mécanique pour intégrer les contraintes de fabrication. L'effet du champ magnétique statique et notamment de sa composante radiale sera aussi documenté.

Pour les applications liées au spatial, il donnera des recommandations quant aux intervalles de dimensions à respecter dans les composants hyperfréquences étudiés. Ce travail sera mené de façon concerté avec les partenaires industriels pour intégrer les contraintes de fabrication.

Domaine de spécialité, compétences : hyperfréquence, physique des matériaux

Description détaillée du sujet de thèse

CEA-CNES

1. Cadre général de la thèse

Le tokamak nécessite une source de courant non inductive pour pouvoir fonctionner de façon continue et donc constituer une filière envisageable pour un réacteur produisant de l'électricité à partir de réactions de fusion nucléaire.

Les ondes à haute fréquence (HF) en transférant leur énergie aux électrons circulant dans une direction privilégiée constituent une source de courant largement étudiée sur les tokamaks depuis plus de 30 ans. Parmi ces ondes HF, les ondes à la fréquence hybride basse sont celles conduisant à la meilleure efficacité, évaluée en ampère de courant généré par watt injecté. Ces ondes de fréquence comprise entre 1 et 8 GHz sont transportées du générateur à l'antenne rayonnant la puissance dans le plasma par des guides d'ondes. Ces guides sont d'abord sous pression de gaz puis dans le vide du tokamak comme l'antenne. Il faut donc disposer à la frontière une fenêtre qui soit étanche vis-à-vis du gaz mais transparente pour les ondes. Cette fenêtre est constituée d'un disque de céramique qui doit être avoir aussi des propriétés thermomécaniques satisfaisantes. En effet, une faible fraction (<1%) de la puissance est néanmoins dissipée dans ce diélectrique qui par conséquent s'échauffe et devient contraint. L'oxyde de béryllium (BeO) présente les qualités requises et a été utilisé avec succès pour transmettre 300kW sur des temps longs à la fréquence de 3,7GHz sur le tokamak Tore Supra de l'IRFM à Cadarache.

Le tokamak ITER en cours de construction envisage de construire un système à la fréquence de 5GHz pour allonger la durée des décharges de 400s à 3000s. Ce système pourra coupler 20MW de puissance et la place disponible pour accueillir l'antenne sur le tokamak impose de pouvoir transmettre 500kW par fenêtre. Il y a donc un saut technologique important entre ce qui a été testé sur Tore Supra (300kW à 3,7GHz) et ce qui est nécessaire pour ITER (500kW à 5GHz).

Il faut noter que la centaine de fenêtres qui seront montées sur une machine nucléaire comme ITER constituent la première barrière vis-à-vis du combustible et tout particulièrement du tritium hautement radioactif. Il faut donc assurer une très grande fiabilité de ce composant : si la sureté sera principalement assurée par le montage de deux fenêtres en série, l'endommagement et donc le remplacement d'une fenêtre sera une opération complexe qui rendra le système indisponible pendant un temps long.

Dans le domaine du spatial, que ce soit pour les applications de diffusion ou pour les applications de type multimedia par satellite, la nécessité d'améliorer les performances de la charge utile du satellite en termes de performances en puissance transmise rayonnée (ou PIRE/MHz) induit une puissance croissante des amplificateurs microondes à bord de type tubes à ondes progressives (TOP) principalement. Ce besoin est accentué par l'accroissement du nombre de porteuses transportant l'information au sein des multiplex fréquentiels.

De ce fait, tous les équipements hyperfréquences en aval des amplificateurs microondes au sein des charges utiles doivent pouvoir être opérationnels pendant toute la durée de vie du satellite sans risques vis-à-vis des phénomènes de décharges sous vide. Ces effets peuvent endommager les composants par l'érosion surfacique créée et surtout engendrer des dégazages locaux à l'origine de claquage plus « virulents » voire même destructeurs.

Parmi les composants pour lesquels ces risques doivent être évalués, on peut citer les isolateurs forte puissance. Or, la tenue en puissance de ces derniers est liée à la montée en puissance à saturation des TOP de dernière génération. Afin de garantir un niveau de marges suffisant mais raisonnable sans prendre de risques, il est nécessaire de réaliser des prédictions précises de telles structures dès la phase de développement. Cependant, peu d'analyses de « l'effet Multipactor » en présence d'un champ magnétique continu existent. Une étude détaillée, basée entre autres sur des simulations utilisant des données réalistes de la caractéristique en émission secondaire des matériaux tels que les ferrites (peu connues) permettrait de sécuriser la conception de tels équipement.

2. Objectifs du projet

La capacité de transmission de puissance HF des fenêtres comme des composants en guides d'ondes est limitée. Sous certaines conditions, quand la puissance excède cette capacité, le phénomène d'avalanche électronique se produit du fait de l'émission électronique secondaire du matériau du composant hyperfréquence. Une des conséquences induite peut être une érosion du matériau et ensuite un claquage se produisant dans le gaz résiduel à très basse pression. Si le régime d'arc est atteint il y a risque d'endommagement voir de perte d'étanchéité. Le mécanisme conduisant à l'avalanche dans un guide où règne un champ électrique RF intense est connu, c'est l'effet 'multipactor'. Un électron par impact sur une surface produit plus d'un électron si la valeur de son énergie cinétique est comprise dans un intervalle propre à chaque matériau. Il y a alors possibilité d'avalanche électronique conduisant en moins d'1 milliseconde au claquage.

Le paramètre critique qui va régler le niveau de champ électrique HF maximal (et donc de puissance HF) est le taux d'émission secondaire. Ce taux dépend du matériau de la cible et des gaz adsorbés à sa surface. Il dépend aussi de la topologie microscopique de la surface (rugosité). Les traitements de la surface (étuvage, nettoyage par décharge lumineuse...) modifient ce taux. Les céramiques utilisées pour les fenêtres, à la différence des métaux, ont malheureusement un taux très élevé et il est nécessaire de déposer une très fine couche métallique (environ 3 nanomètres d'épaisseur) pour le réduire. Cette 'recette' résultant de l'expérience a été utilisée par les industriels sans qu'aucune étude de base n'ait été entreprise.

Que ce soit dans le cas du circuit HF au sein du tokamak ou au sein des composants hyperfréquences spatiaux tels que les isolateurs, un champ magnétique continu est présent et vient se superposer au signal haute-fréquence. L'influence de ce champ sur les niveaux des seuils de prédiction est peu connue.

De façon générale, on trouve très peu d'études dans la littérature sur l'influence de la température et du champ magnétique ainsi que sur les propriétés d'émission des ferrites et des céramiques et en particulier sur l'oxyde de béryllium et l'effet d'une couche 'anti-multipactor'. Le vieillissement de ce film très mince est aussi très mal connu.

3. Programme de travail

3.1 Caractérisation des matériaux

Les mécanismes physiques conduisant aux claquages par avalanche électronique des matériaux isolants (en particulier des céramiques), des ferrites sont complexes : émission secondaire ainsi que diffusion élastique/inélastique des électrons. Il est envisagé de mesurer en laboratoire les grandeurs se rattachant à ces mécanismes en corrélation avec la caractérisation fine des surfaces. La mesure du rendement d'électrons secondaires pourra s'effectuer à l'aide du dispositif de mesure disponible dans le laboratoire et d'un spectromètre électronique lorsque la connaissance de la distribution énergétique des électrons émis par le matériau est souhaitée. Des mesures à basse énergie (<10eV), pour lesquelles la sensibilité à la structure électronique du matériau en fait un signal informatif important, pourront être envisagées. L'étudiant pourra participer au montage des systèmes de mesures sur la station et à leur qualification.

Ce travail expérimental pourra être mené en contrôlant des paramètres physiques pertinents (traitement thermique, épaisseur de la couche « anti-multipactor » par amincissement ionique).

3.2 Etudes analytiques basées sur des considérations théoriques et sur les simulations

Pour une courbe donnant le taux d'émission secondaire Y en fonction de l'énergie de l'électron incident E , il est possible de calculer le facteur d'amplification de la population d'électrons et donc de prédire la puissance à partir de laquelle le claquage apparaît. Ceci a été fait dans des géométries simples pour des guides métalliques. Nous nous proposons de mener cette étude dans le cas de la géométrie plus complexe d'une fenêtre HF et d'un isolateur hyperfréquence en tenant compte du champ magnétique statique qui est présent. Pour ce faire il adaptera des codes de simulation numérique existants pour

lesquels les courbes expérimentales $Y(E)$, déterminées à partir des expériences conduites au laboratoire de caractérisation en émission secondaire, serviront de paramètres d'entrée. Il vérifiera de façon précise l'effet bénéfique d'un part de l'augmentation de la fréquence (3,7 GHz à 5 GHz) et d'autre part de l'étuvage à haute température ($\sim 300^\circ\text{C}$) sur le seuil d'apparition de l'effet multipactor.

Pour les applications liées au tokamak, il donnera des recommandations pour les dimensions du disque de céramique BeO de la fenêtre mais aussi des guides d'ondes (circulaires puis rectangulaires) se raccordant au disque. Pour les applications liées au spatial, il donnera des recommandations quant aux intervalles de dimensions à respecter dans les composants hyperfréquences étudiés. Ce travail sera mené de façon concertée avec les partenaires industriels pour intégrer les contraintes de fabrication. L'effet du champ magnétique statique et notamment de sa composante radiale (de l'ordre de 0,1T sur ITER) sera aussi documenté.

4. Caractère novateur du projet, retombées, prolongement

Ce travail de thèse permettra pour la première fois d'apporter une base explicative aux résultats expérimentaux de test en puissance d'une fenêtre hyperfréquence et de donner des recommandations aussi bien pour la fabrication (géométrie de la fenêtre, épaisseur minimale de la couche 'anti-multipactor') que pour la procédure de conditionnement de la fenêtre (température minimale d'étuvage...). Cette thèse contribuera à renforcer les chances de succès de ce composant critique pour le système de chauffage hybride sur ITER. Pour le CEA/IRFM, c'est aussi un moyen de renforcer les compétences de ces différents acteurs et de les placer au plus haut niveau quand ITER Organization lancera le projet de système à la fréquence de 5GHz.

Ce travail de thèse permettra de mieux prédire les seuils d'effet Multipactor dans les composants hyperfréquences à ferrite, du fait :

- d'une meilleure connaissance des propriétés d'émission secondaire des matériaux tels que les ferrites,
- d'une évaluation plus fine de l'influence du champ magnétique statique sur l'avalanche électronique.

Le fait de disposer d'analyses plus solides permettra de mettre en place des marges plus réalistes sans pour autant augmenter les risques vis-à-vis de l'effet Multipactor.

L'utilisation de l'oxyde de béryllium comme matériau de fenêtre HF s'en trouvera aussi renforcée pour d'autres applications (accélérateurs de particules notamment).

Références

1. J.E. Yater, A. Shih, R. Abrams, Applied Surface Science Cold emission characterization using secondary electron emission spectroscopy **146** (1999). 341–346
2. L.Marfisi, M.Goniche, C.Hamlyn-Harris, J.Hillairet, et al, Thermal and Mechanical Analysis of ITER-Relevant LHCD Antenna Elements, Fusion Engineering and Design **86** (2011) 810–814.
3. J.Hillairet, J.Achard, C.Brun, M.Goniche, T.Hoang, R.Magne, L.Marfisi, S.Rasio, Radio frequency power in plasmas, RF Modeling of the ITER-Relevant Lower Hybrid Antenna, Fusion Engineering and Design **86** (2011) 823–826
4. M.Goniche, J.Mailloux, A.Ekedahl, L.Delpech, P.Jacquet, J.Hillairet, K.Kirov, M.-L.Mayoral, J.Ongena, V.Petržílka and JET EFDA contributors, Operational issues at high LH power density in JET: waveguide conditioning and arc detection, Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012)
5. V. E. Semenov, E. Rakova, R. Udiljak, D. Anderson, M. Lisak, and J. Puech, "Conformal mapping analysis of multipactor breakdown in waveguide irises", Physics of Plasmas, 2008

6. I. Kossyi, G. Lukyanchikov, V. Semenov, E. Rakova, D. Anderson, M. Lisak, and J. Puech, "Experiments on polyphase (nonresonant) multipactor in a rectangular wave guide" MULCOPIIM Workshop, 24-26 September 2008, Valencia, Spain

7. V. Semenov, M. Buyanova, V. Nechaev (Institute of Applied Physics, Russie), D. Anderson, M. Lisak (Chalmers University, Suède), J. Puech, L. Lapierre (CNES)
«Electron multipacting on RF windows in the absence of static electric and magnetic fields»
MULCOPIIM 2005 – 5th International ESA Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware, Noordwijk, The Netherlands, 12-14 September 2005