

Effet d'un écran électrostatique sur les propriétés radiatives de l'antenne ICRH du Tokamak ITER

Ing. J. L'HOEST
Dr A.M. MESSIAEN
Ir P. DUMORTIER
Ing. M. VERVIER
Dr A.S. CARNOY
GRAMME – Liège

Dans les réacteurs à fusion thermonucléaire, la température atteint plusieurs dizaines de millions de degrés. Un des mécanismes de chauffage du plasma confiné dans le réacteur est semblable à celui du four à micro-onde. Les antennes sont habituellement équipées d'un écran de Faraday qui polarise les ondes émises. Cet accessoire provoque cependant une modification des propriétés de l'antenne qu'il serait bon de pouvoir quantifier.

Mots-clefs : Fusion, Antenne, ITER, Plasma, Transmission, Réflexion, Onde Electromagnétique, Ecran, Faraday, Electrostatique.

In thermonuclear fusion reactors, the temperature can reach several ten million degrees at a time. The mechanism of heating of the plasma confined in the reactor is similar to the microwave system. The antennas are usually equipped with a screen of Faraday which polarizes the emitted waves. However, this accessory causes a modification of the properties of the antenna which should have to be quantified.

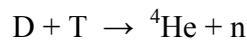
Keywords: Fusion, Antenna, ITER, Plasma, Transmission, Electromagnetic wave, Reflexion, Electrostatic, Faraday, Screen.

1. Introduction

Différentes méthodes sont à notre disposition pour "produire" de l'énergie et ainsi satisfaire aux besoins en énergie sans cesse croissants de notre société. Strictement parlant, l'énergie n'est pas vraiment "produite", mais plutôt transformée d'une forme d'énergie en une autre. Ainsi, l'énergie mécanique du vent, par exemple, est transformée en énergie électrique via des éoliennes. La production d'énergie est basée sur l'exploitation des trois grands réservoirs d'énergie disponibles, à savoir:

1. l'énergie provenant du soleil (qui peut être captée soit directement, soit par l'intermédiaire du vent, des rivières, ou encore – en stipulant que ce réservoir a été créé dans un passé lointain par la photosynthèse - des combustibles fossiles);
2. l'énergie du système terre-lune (marées et énergie géothermique);
3. l'énergie des noyaux atomiques (fusion de noyaux d'atomes légers ou fission de noyaux d'atomes lourds).

La technique utilisée dans les réacteurs à fusion thermonucléaire exploite cette dernière. En rassemblant les nucléons de deux petits noyaux en un seul noyau plus important, on peut libérer une importante quantité d'énergie (sous forme d'énergie cinétique des produits de fusion) qu'on pourra ensuite récupérer selon le procédé chaudière, turbine, alternateur classique. Dans le projet ITER, on réalise la fusion du Deutérium (^2H) et du Tritium (^3H) :



L'énergie libérée (17,6 MeV) se retrouve dans l'énergie cinétique du neutron (14,1 MeV), et du noyau ${}^4\text{He}$ (3,5 MeV).

Pour vaincre les forces qui tendent naturellement à repousser les atomes, plus précisément les noyaux des atomes, il faut leur fournir une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. La température à atteindre, que l'on détermine à partir des forces de répulsion coulombienne, est de l'ordre de 100 millions de degrés, température à laquelle la matière se trouve dans un état de plasma. Le

plasma est une sorte de gaz dans lequel les noyaux se sont détachés de leurs électrons, il est donc constitué de particules chargées positivement et négativement mais de l'extérieur il est électriquement neutre.

Aucun matériau ne résistant à des températures si élevées, le plasma ne peut être simplement conservé dans un réacteur. Diverses méthodes existent pour résoudre ce problème, la plus prometteuse étant le confinement magnétique (fig.1). Ce procédé utilise de puissants champs magnétiques pour maintenir le plasma dans un réacteur toroïdal. Un premier champ magnétique est produit par des bobines placées tout autour du tore et un deuxième champ est produit à partir d'un courant circulant dans le plasma.

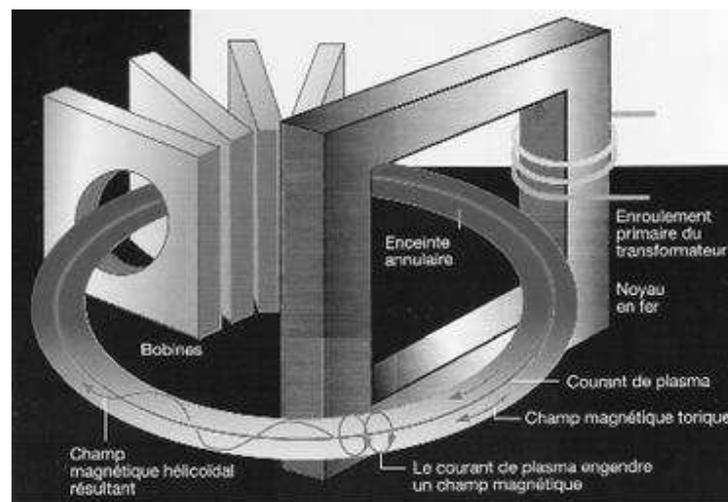


Figure 1 : Confinement magnétique dans un tokamak

L'association de ces deux champs permet de maintenir le plasma à l'écart des parois. En effet, une particule se trouvant dans un champ magnétique subit une force qui engendre un mouvement de trajectoire circulaire ; en d'autres termes, les particules vont se mettre à tourner autour des lignes de champ magnétique. La vitesse de rotation dépend de la masse de la particule, ainsi que de sa charge et de l'intensité du champ.

On se sert de ce mouvement cyclique pour chauffer le plasma. En effet, en envoyant des ondes électromagnétiques de fréquence égale à la fréquence de rotation des particules, on provoque un phénomène de résonance qui va accélérer la particule. Celle-ci redistribuera ensuite son énergie par collisions en chaîne avec les électrons du milieu.

2. Présentation du projet

2.1. L'antenne d'ITER

Ces ondes électromagnétiques dont nous venons de parler, sont produites par des antennes, assez semblables aux antennes que nous côtoyons tous les jours. Elles sont constituées d'une ligne de transmission, qui sert de lien entre le générateur et leur partie émettrice qu'on appelle « strap » (bande).

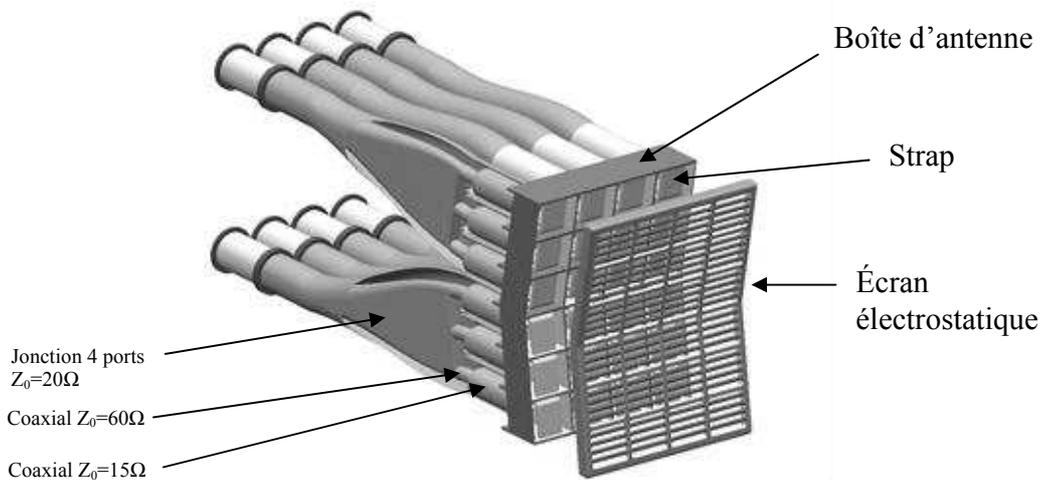


Figure 2 : Schéma de l'antenne ICRH d'ITER

Nous voyons sur la figure 2 que la partie rayonnante de l'antenne est composée

de 24 straps. En général, les antennes ne comportent que un ou deux straps mais sur ITER, la puissance rayonnée sera très importante (de l'ordre de 20 MW), la partie rayonnante a donc été divisée pour diminuer la tension aux bornes de chaque strap. Les straps sont regroupés en triplet, ce qui facilite leur alimentation, en effet nous avons 8 lignes au lieu de 24. Ces 8 triplets sont alimentés par un seul générateur auquel ils sont reliés par un système en T conjugué.

2.2. L'écran électrostatique

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'influence de l'écran électrostatique (qu'on appelle aussi écran de Faraday) sur les propriétés radiatives de l'antenne.

Outre la protection physique des straps vis-à-vis du plasma et des ELM's (Edge Localized Mode : variation de densité dans le plasma pouvant provoquer des projections de particules de plasma vers l'antenne), l'écran permet de polariser les ondes émises par les antennes. On voit sur la figure 3 un strap dans sa boîte d'antenne : la boîte d'antenne est reliée à la masse et le strap est connecté au coaxial par son côté supérieur.

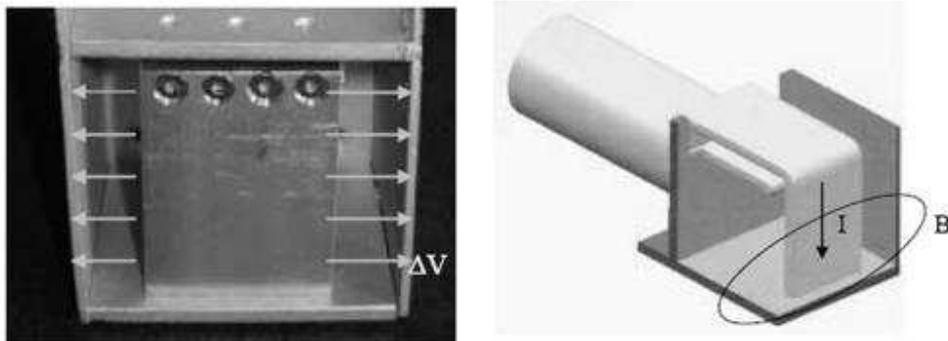


Figure 3 : Photo d'un strap (à gauche) et circulation du courant dans un strap (à droite)

Le courant circule verticalement dans le strap et les lignes du champ magnétique résultant se trouvent dans le plan horizontal (fig.3). Ce champ

magnétique oscillant produit un champ électrique oscillant donné par l'équation de Maxwell :

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

C'est ainsi que l'onde électromagnétique se propage vers le plasma.

Mais du fait de cette configuration, il apparaît un champ électrique non désiré dû à la différence de potentiel entre le strap et les parois verticales des boîtes d'antenne (ΔV , fig.3). Ce champ électrique entraîne de la dissipation d'énergie dans le bord du plasma. Or la région que l'on cherche à chauffer est le centre, là où se produisent les réactions de fusion. Le bord est une région relativement froide où la densité du plasma est faible. Toute énergie dissipée dans cette région est donc perdue. Une des fonctions de l'écran de Faraday est donc d'empêcher la propagation de ce champ électrique : des barreaux de conductivité élevée vont le court-circuiter.

Cependant l'utilisation de l'écran électrostatique pour polariser les ondes électromagnétiques est contestée. En effet, il est possible que le plasma de bord remplisse cette fonction naturellement et dans ce cas, non seulement l'écran n'a plus son utilité mais en plus sa présence pourrait poser certains problèmes :

- Modifier le couplage de l'antenne au plasma
- Modifier l'impédance mutuelle entre les straps.

En effet, la présence de l'écran dans la trajectoire des ondes électromagnétiques peut provoquer des pertes car pour passer entre les barreaux, l'onde doit se contracter. Des courants induits sont alors générés dans les barreaux de l'écran, courants qui provoquent des pertes par effet joule. Sans compter que la position de l'écran, face au plasma, est très délicate. Dans le modèle réel, il faudra prévoir un système de refroidissement avec des barreaux creux permettant le passage d'un réfrigérant.

L'objectif de ce travail est de vérifier les hypothèses énoncées ci dessus. Il nous faudra donc commencer par concevoir et fabriquer un écran électrostatique adapté à l'antenne et ensuite mesurer les caractéristiques radiatives de l'antenne avec et sans l'écran de manière à mettre en évidence son éventuelle influence sur les paramètres cités plus haut.

3. Le projet

3.1. Réalisation de l'écran

La réalisation d'une maquette de l'antenne à l'échelle 1/5^{ième} fit l'objet d'un travail de fin d'études en 2004 (fig.5) ; la première partie du projet a donc été consacrée à la conception et à la fabrication d'un écran électrostatique adapté à la maquette de l'antenne. Les plans de l'écran ont été réalisés sur le logiciel Solidworks, logiciel de conception graphique en trois dimensions (fig.4). Les différentes pièces ont été découpées à l'aide d'une machine à électroérosion pour être ensuite assemblées par soudage à l'étain et à l'argent (fig.6).

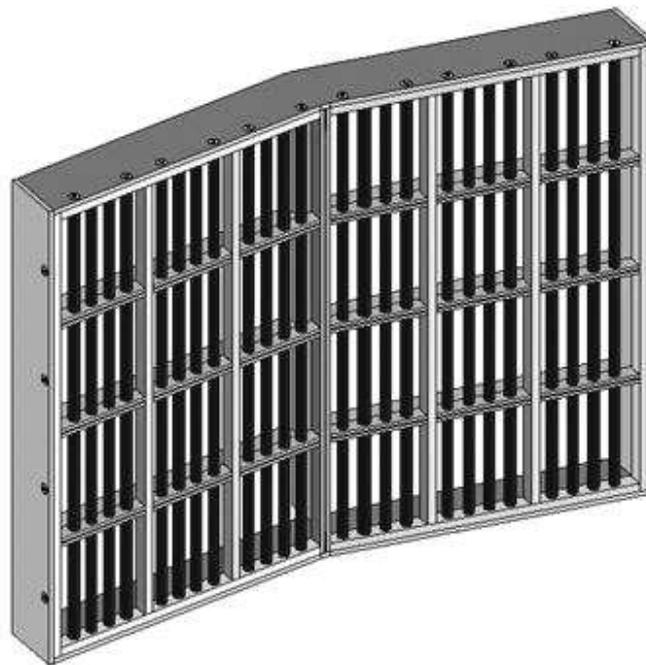


Figure 4 : Dessin de l'écran sur solidworks

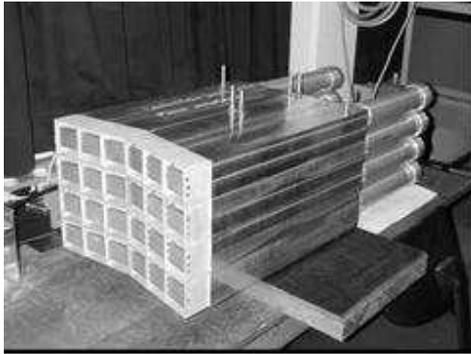


Figure 5 : L'antenne réalisée en 2004 *Figure 6 : L'écran placé sur l'antenne*

Le mécanisme de propagation des ondes dans l'eau est assez proche de celui du plasma, on simule la présence de ce dernier par un réservoir rempli d'eau placé devant l'antenne. L'eau a été choisie pour sa constante diélectrique élevée.

3.2. Mesures et interprétations

Une fois l'écran prêt, deux séries de mesures ont été réalisées, une avec l'écran et l'autre sans. Nous avons utilisé un analyseur de réseau pour mesurer le coefficient de réflexion de chaque triplet de straps ainsi que les influences mutuelles entre les triplets. A partir de ces mesures, et en utilisant la théorie des lignes de transmission, qui découle directement de l'équation des télégraphistes, il est possible de déterminer le coefficient de réflexion au niveau du générateur, l'impédance de chaque strap vue par le générateur ainsi que beaucoup d'autres paramètres. Les triplets sont numérotés de 1 à 8. La figure 7 montre l'évolution de l'impédance (Ω) des triplets 3, 4, 5 et 6 en fonction de la distance (mm) du réservoir d'eau par rapport à l'antenne. Z_{33} par exemple est l'impédance du triplet 3 et Z_{34} est l'impédance mutuelle entre le triplet 3 et le triplet 4.

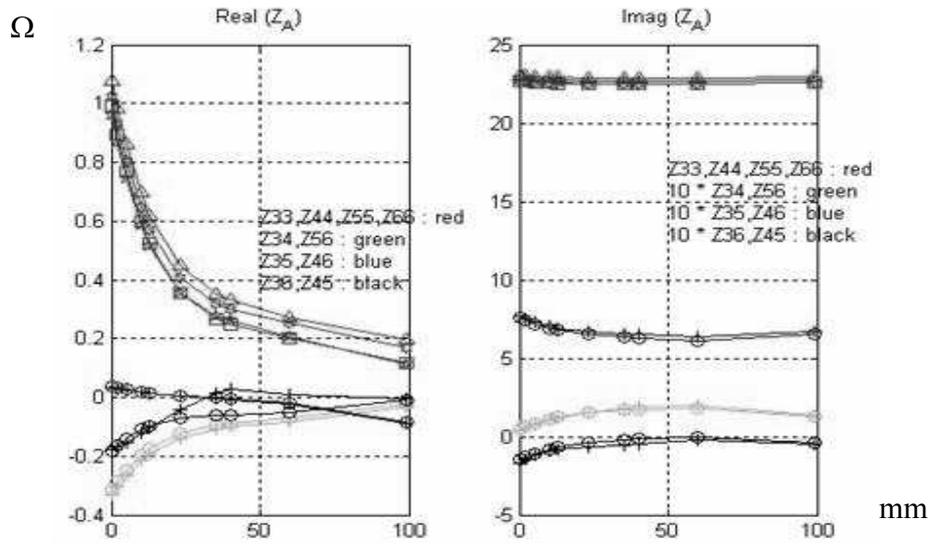


Figure 7: Impédance des straps, sans écran

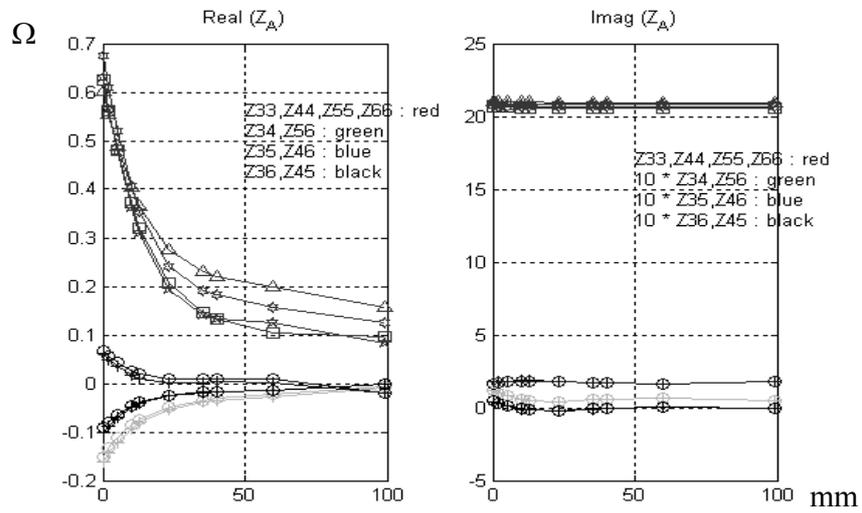


Figure 8 : Impédance des straps, avec écran

Nous pouvons tirer au moins 2 informations importantes de ces graphes :

Augmentation de la tension

En comparant les figures 7 et 8, on voit que la partie réelle de l'impédance des straps diminue d'environ 40 % et que la partie imaginaire diminue quant à elle de 10% lorsqu'on place l'écran sur l'antenne. Montrons la conséquence de ce résultat expérimental. L'admittance s'exprime par

$$Y_A = \frac{1}{Z_A} = \frac{R_A - i X_A}{R_A^2 + X_A^2}$$

La partie réelle étant de l'ordre de 20 fois plus petite que la partie imaginaire, on peut la négliger au second degré, on a alors

$$Y_A = \frac{R_A - i X_A}{X_A^2} = \frac{R_A}{\omega^2 L_A^2} - \frac{i}{\omega L_A} = G - i B$$

Or la puissance s'écrit

$$P = \frac{G |V_A|^2}{2}$$

Ce qui veut donc dire que si l'on veut conserver la puissance rayonnée par le strap, avec R_A diminuant de 40 % et X_A diminuant de 10 %, et donc G diminuant d'environ 25 %, il faudra augmenter V_A de plus ou moins 15 %.

Cette augmentation de tension ne pose évidemment aucun problème pour la maquette car nous travaillons avec une puissance de 1 W et les tensions sont donc très faibles.

Mais dans le modèle réel, la puissance rayonnée est de 20 MW, et à ce niveau, une augmentation de la tension nécessite un surdimensionnement des coaxiaux qui transmettent le signal et de l'antenne elle-même, où les risques de claquage sont très élevés. Ce résultat peut être confirmé en observant le profil des tensions le long de l'antenne avec et sans écran (fig. 9).

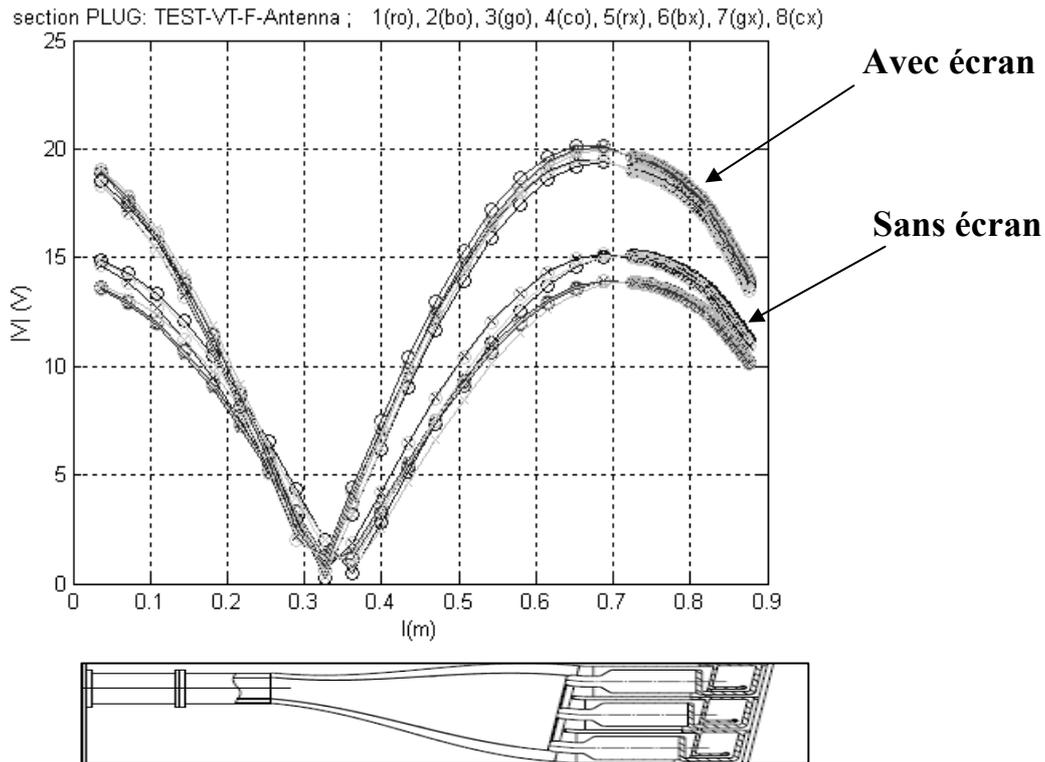


Figure 9 : Profil des tensions le long de l'antenne

On voit que pour une même puissance rayonnée, la tension aux bornes des straps avec l'écran est d'environ 13 Volts tandis que sans écran elle est d'environ 11 Volts, ce qui représente une augmentation de plus ou moins 20%.

Diminution des impédances mutuelles

Les impédances mutuelles diminuent de manière significative. La partie réelle est plus faible avec écran d'environ 50 % et la partie imaginaire de 75 % pour deux triplets toroïdaux (3-4 ou 4-5) et de 0 à 50 % pour deux triplets poloïdaux (3-5 ou 4-6).

Cette diminution est très positive dans le cas où les triplets sont alimentés par des générateurs séparés. En effet, les impédances mutuelles entre les straps

entraînent des échanges de puissance plus ou moins importants selon la valeur de l'impédance. Prenons deux straps alimentés par des générateurs différents. Le strap 1 reçoit une certaine quantité de puissance du générateur 1, à cause de l'impédance mutuelle entre les deux straps, une partie de cette puissance est fournie au strap 2 (fig.10).

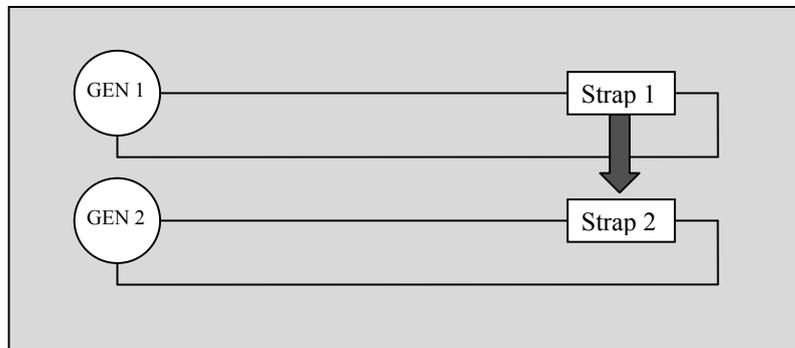


Figure 10 : Impédance mutuelle

La tension générée au niveau du strap 2 va revenir vers le GEN2 qui lui-même génère une tension pour alimenter le strap 2. Les deux ondes vont alors se superposer et créer un régime d'onde stationnaire. Lorsque les deux ondes sont en phase, elles s'additionnent et le niveau de tension aux bornes du générateur augmente fortement. Cette augmentation risque de déclencher les dispositifs de sécurité du générateur, qui couperaient immédiatement tout le système.

Mais dans notre cas, tous les straps sont alimentés par le même générateur, nous n'avons donc aucun bénéfice de ce point de vue. Toutefois l'utilisation d'un seul générateur pour fournir une puissance de 20 MW pose certains problèmes de sécurité. Cet avantage procuré par l'écran pourrait donc tout de même s'avérer utile.

4. Conclusion

L'objectif de ce projet était d'observer l'influence de l'écran sur les propriétés radiatives de l'antenne. Suite aux observations que nous avons développées tout au long de cet article, nous pouvons répondre aux questions posées lors de la présentation du projet.

Le couplage de l'antenne au plasma est modifié. En effet, nous avons pu remarquer que l'impédance des straps diminuait fortement en présence de l'écran (de l'ordre de 40 % pour la partie réelle et de 10 % pour la partie imaginaire). Cette modification du couplage est très néfaste, car comme nous avons pu le voir en observant le profil des tensions, leur amplitude est augmentée de 20 % en moyenne.

En ce qui concerne les impédances mutuelles, nous avons vu qu'elles étaient également fortement diminuées, ce qui présente un avantage lorsqu'on utilise plusieurs générateurs pour alimenter les straps, mais qui n'est pas utile pour le schéma d'adaptation passive que nous avons utilisé.

Ces effets dont nous venons de parler sont indépendants de la fonction propre de l'écran qui est de court-circuiter un champ électrique parasite et de protéger l'antenne contre les claquages possibles induits par les ELM's.

Nous avons montré que l'écran est porteur d'avantages et d'inconvénients, mais le bilan final est plutôt négatif. Ce résultat ne peut cependant mettre en cause à lui seul l'utilisation de l'écran de Faraday mais il apporte des données expérimentales qui pourraient être déterminantes pour la suite du débat.

5. Références bibliographiques

CHUSSEAU Laurent, *Cours d'hyperfréquence*, www.opto.univmontp2.fr

DUMORTIER P., MESSIAEN A., BRONS S., DURODIE F., *Antenna and Systeme Design (External Matching)*, ICRH, Rapport final du 15 juin 2003.

DUMORTIER P., MESSIAEN A., KOCH R., LAMALLE P., VERVIER M., *Use of dielectric or electrolyte to simulate the plasma loading of ICRH antennas*, Rapport 123 du 15 mai 2004.

KOCH R., *Fourth Carolus Magnus Summer school on plasma physics* ; 2000, 145-169

ONGENA J., VAN OOST G., MERTENS P., *La fusion thermonucléaire, une chance pour l'humanité*, Trilatéral Euregio Cluster ; 2001.

VANDER VORST A., *Transmission, propagation et rayonnement*, De Boeck Université, Bruxelles ; 1995.

La fusion thermonucléaire contrôlée, Brochure de la commission européenne, 1998

Plasma, le quatrième état de la matière, Brochure General atomics, 1994