

2023

irfm.cea.fr/sciencesenfusion

SCIENCES en FUSION

AVANCÉES SCIENTIFIQUES DES
RECHERCHES EN FUSION PAR
CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

#5

Ondes

Les ondes électromagnétiques : des outils pour les plasmas de fusion ●

Propagation et absorption des ondes ●

Réponse du plasma aux ondes ●

Antenne et couplage des ondes au plasma ●

Tubes électroniques : du poste à galène à la fusion ●

Les micro-ondes pour la mesure ●

Et demain ? Les ondes pour ITER et les centrales fusion ●

SOMMAIRE

EDITORIAL - page 2

Jean Jacquinot

#1 - page 4

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DES OUTILS POUR LES PLASMAS DE FUSION

Julien Hillairet

#2 - page 8

PROPAGATION ET ABSORPTION DES ONDES

Rémi Dumont, Yves Savoye-Peysson, Gerardo Giruzzi

#3 - page 13

RÉPONSE DU PLASMA AUX ONDES

Gerardo Giruzzi, Rémi Dumont, Yves Savoye-Peysson

#4 - page 18

ANTENNE ET COUPLAGE DES ONDES AU PLASMA

Laurent Colas, Stéphane Heuraux, Julien Hillairet

#5 - page 23

TUBES ÉLECTRONIQUES : DU POSTE À GALÈNE À LA FUSION

Lena Delpech, Julien Hillairet, Patrick Mollard, Xavier Regal-Mezin

#6 - Page 28

LES MICRO-ONDES POUR LA MESURE

Roland Sabot, Laure Vermare, Frédéric Clairet, Samuele Mazzi

#7 - page 35

ET DEMAIN ? LES ONDES POUR ITER ET LES CENTRALES FUSION

Jean-Michel Bernard, Nicolas Faure, Julien Hillairet, Vincent Maquet

GLOSSAIRE - page 42

EDITORIAL

par Jean Jacquinot



Jean Jacquinot. Crédit photo : Philippe Gendrih

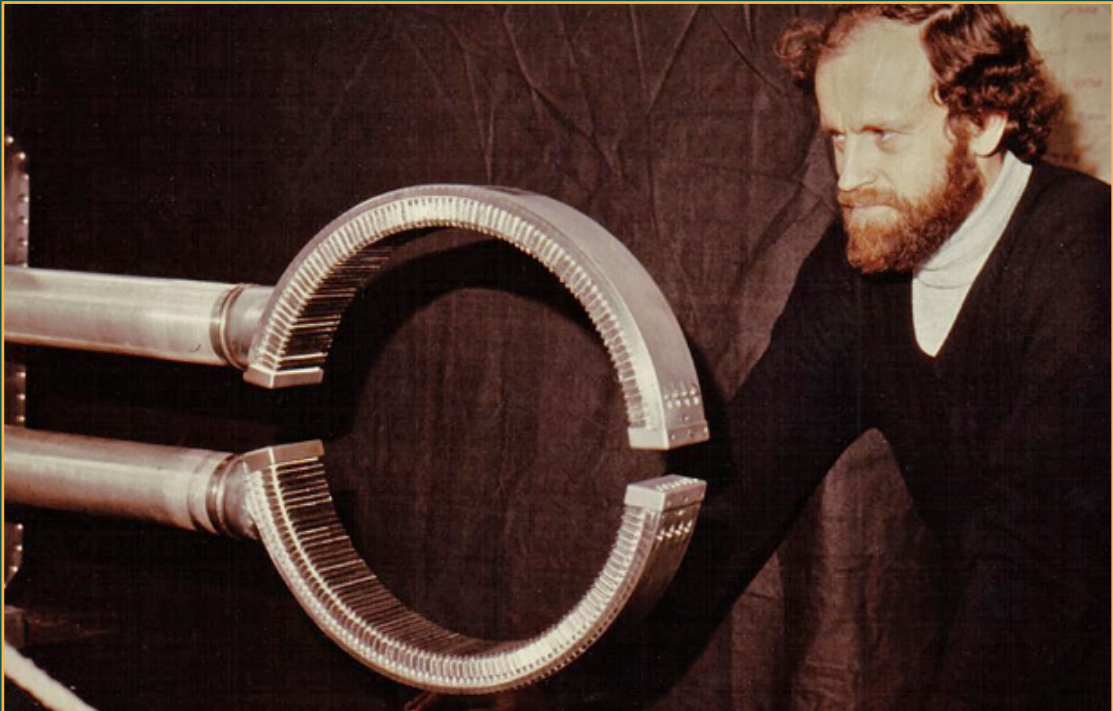
Ondes ! Quelle richesse dans ce simple mot ! Il n'y a pas un seul chapitre de la physique qui n'y fasse appel et elles sont aussi omniprésentes dans notre vie quotidienne. Elles peuvent être acoustiques, gravitationnelles ou encore électromagnétiques. Elles propagent l'information et l'énergie et donnent lieu à une multitude de transformations.

Un évènement exceptionnel dans l'histoire de la physique fut, en 1864, l'unification par Maxwell de l'électricité, du magnétisme et de l'induction par un ensemble de 4 équations. En conséquence, comme il le reconnut rapidement, un spectre gigantesque d'onde, dont la lumière, pouvait se propager par les oscillations simultanées des champs électriques et magnétiques. Cette théorie unifiée allait être la base d'un bond considérable de la science et de ses applications.

Les ondes dans les plasmas obéissent à ces mêmes équations et elles y sont tout aussi omniprésentes. « Sciences en Fusion » a déjà eu l'occasion d'en parler dans ses précédents numéros qui traitent de la turbulence, de la stabilité ou encore des simulations. Contrairement au vide, les plasmas peuvent propager une grande variété d'ondes. De plus, cette variété est multipliée par la présence de champ magnétique qui introduit une anisotropie fondamentale. La biréfringence

est de règle et l'indice de réfraction peut prendre de grandes valeurs. Coupures avec réflexion, résonances avec absorption et conversion de modes sont les phénomènes de base qui peuvent se produire au cours de la propagation des ondes dans les plasmas. Ils sont à l'origine des nombreuses découvertes et applications qui sont décrites dans cet ouvrage par les spécialistes de l'Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique. Ils sont les descendants d'une lignée de physiciens et ingénieurs qui s'est développée dès la création du Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée du CEA (DRFC maintenant IRFM) au départ à Fontenay aux Roses et à Grenoble puis regroupé à Cadarache au début des années 80.

Dès le milieu des années 70, le DRFC réalisant le potentiel des tokamaks, a concentré ses forces sur cette configuration avec en particulier la construction du Tokamak de Fontenay aux Roses (TFR). TFR devint à cette époque la machine de fusion la plus puissante au monde. Mais bientôt s'est posée la question de la manière de chauffer les plasmas au-delà de la température, trop faible, atteinte par le seul chauffage ohmique. Le DRFC s'est alors vu confié par EURATOM le développement de méthodes dites de chauffage « RF » qui, en fait, couvrent un grand spectre de fréquences allant des ondes radios (~50MHz pour les résonances cyclotroniques ioniques) aux ondes millimétriques (~100GHz pour la résonance cyclotronique électronique) en passant par les ondes centimétriques (~2GHz pour la résonance hybride inférieure). Il s'est constitué alors une école sur la physique et l'ingénierie des ondes et des résultats majeurs ont été obtenus tout aussi bien dans le domaine du chauffage par haute puissance RF que



La préhistoire (~ 1977) : la première antenne tout métal utilisée sur TFR, le Tokamak à Fontenay aux Roses, ancêtre de WEST, qui a démontré le chauffage cyclotronique ionique de l'hydrogène minoritaire dans un plasma de deutérium. Ce type d'antenne a atteint 2MW sur TFR

dans le domaine des diagnostics avec des ondes de plus faible puissance. Citons par exemple l'invention des antennes de type « grill multi-jonction » détentrice des records pour la génération de courant par les ondes hybrides ou encore les antennes « tout métal » associées aux scénarios de chauffage cyclotronique d'ion minoritaire qui a permis à TFR d'explorer des domaines inconnus alors avec des puissances atteignant 2MW. Ces découvertes et inventions sont maintenant largement utilisées dans la plupart des expériences de fusion magnétique en particulier au JET où les puissances couplées au plasma ont pu atteindre 20MW. Les inventions sont aussi nombreuses dans le domaines des diagnostics. On citera par exemple l'utilisation des micro-ondes pour déterminer les caractéristiques de la turbulence responsable de la dégradation du confinement dans le plasma.

Quel futur se présente ? Ce numéro de la série de « Sciences en Fusion » y consacre bien évidemment un article. Pour les diagnostics, la voie est toute tracée : ITER prévoit environ cinquante moyens de mesure qui font appel aux ondes sous toutes ses formes. Les laboratoires associés dont l'IRFM sont à pied d'œuvre. En ce qui concerne le chauffage, les tâches incombant aux systèmes

RF ne cessent de croître et de se complexifier. Finies la liberté et l'agilité permises dans les expériences d'un laboratoire classique, il faut maintenant répondre aux contraintes d'installations nucléaires de grande taille qui exigent sûreté et fiabilité. Les antennes et miroirs RF proches du plasma sont soumis à rude épreuve. L'érosion de ces structures sur des temps longs doit être faible pour éviter la pollution du plasma et assurer une longévité suffisante des composants. L'ingénierie RF et la physique de l'interaction avec le plasma de bord doivent être intimement liés. C'est un défi bien relevé par les équipes d'ITER en liaison étroite avec celle du CEA. En outre, les systèmes RF se voient confiés des tâches supplémentaires : conditionnement de la paroi et contrôles de plusieurs instabilités à l'intérieur du plasma. Beaucoup de travail en perspective pour les ingénieurs et les physiciens ! ITER envisage un total de 87MW avec deux systèmes RF différents pour ses expériences à pleine puissance. Avant d'en arriver là, nombreux sont les défis qui devront être surmontés. Je souhaite que ce volume y contribue !

Jean Jacquinet
Physicien, spécialiste des plasmas

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DES OUTILS POUR LES PLASMAS DE FUSION

PAR JULIEN HILLAIRET

Jetez un caillou dans les eaux d'un étang calme, et vous verrez avec satisfaction les petites oscillations qu'il a provoquées progresser jusqu'à disparaître... Les ondes sont des perturbations qui se propagent dans un milieu et l'étude de leurs propriétés peut nous renseigner sur la nature des phénomènes qui les ont engendrées et des milieux qu'elles ont traversés. Elles peuvent également servir de supports pour transmettre l'information : télévision, radio, conversations ou données. Enfin, leur énergie peut être utilisée pour provoquer des actions à distance, comme chauffer une tasse de café dans un four micro-ondes.

#1

#1

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DES OUTILS POUR LES PLASMAS DE FUSION

Les ondes électromagnétiques : une véritable boîte à outils

Les ondes sont utilisées dans tous les domaines des sciences et techniques, et la fusion ne fait pas exception. Elles y sont mêmes reines, car sans elles, pas d'accès au cœur du plasma, pas de décharges de longues durées dans les tokamaks, voire... pas de plasma du tout quand elles servent à le créer. La diversité des ondes qui peuvent animer et se propager dans un plasma confiné par des champs magnétiques, est telle que, des ouvrages entiers y sont dédiés. Ce numéro de **Sciences en Fusion** se concentre donc uniquement sur les principaux usages que l'on fait de certaines **ondes électromagnétiques** dans les plasmas de fusion par confinement magnétique.

Quelles que soient leurs utilisations, tous les systèmes **radiofréquences (RF)** ont en commun d'avoir une ou des sources de puissance, un moyen de transporter cette puissance du lieu de production jusqu'au lieu d'absorption et enfin un mécanisme d'interaction avec le plasma. Les installations de fusion par confinement magnétique, comme les tokamaks ou les stellarators combinent beaucoup de conditions hostiles. Ainsi, ces ondes sont injectées dans le plasma par des antennes situées à quelques centimètres ou à plusieurs décimètres de ce dernier selon le système. Ces antennes

doivent être conçues pour opérer sous vide tout en supportant les divers flux thermiques et de particules en provenance du plasma sur des temps longs. Enfin, les systèmes RF qui injectent des puissances de l'ordre de plusieurs **mégawatts** dans le plasma doivent également être compatibles avec des tensions et des courants de plusieurs dizaines de kilo-volts ou kilo-ampères.

Afin d'atteindre les températures requises pour générer suffisamment de réactions de fusion nucléaire, il est indispensable de chauffer le plasma. Si les cuisines contiennent généralement plusieurs façons de chauffer la nourriture, c'est, entre autre, parce qu'on ne fait pas de gâteaux avec une poêle. Il en est de même pour « cuisiner » un plasma de fusion : selon **la fréquence** et **la polarisation** des ondes que l'on va envoyer dans le plasma, ces dernières vont interagir préférentiellement soit avec les ions ou les électrons qu'il contient.

Mais les ondes ne servent pas qu'à chauffer le plasma dans un tokamak : elles vont également permettre de réaliser des plasmas sur de longues durées en générant du courant dans le plasma de manière non-inductive, c'est-à-dire sans utiliser le **solénoïde central**. Elles sont également utilisées pour le **conditionnement** de la chambre à vide, pour ioniser le gaz et initier ainsi le plasma, ou encore pour contrôler des instabilités qui peuvent s'y développer. Enfin, les ondes électromagnétiques émises naturellement par le plasma ou celles que l'on y a envoyées et qui s'y sont réfléchies, sont utilisées par différents diagnostics sur des gammes de fréquences très diverses pour mesurer la température, la densité et d'autres propriétés du plasma. Des diagnostics exploitant ces ondes seront décrits dans l'article **#6 Les micro-ondes**

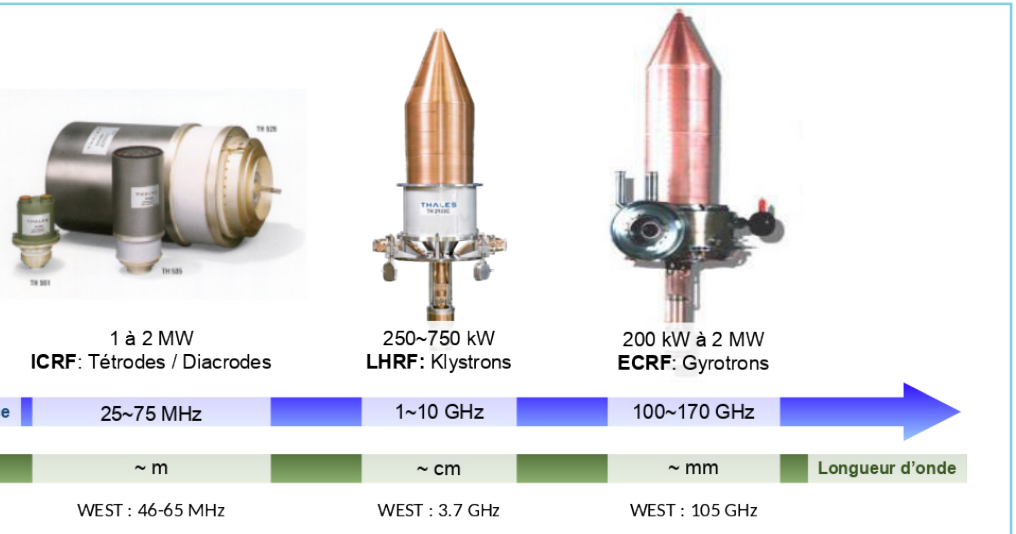
pour la mesure. Si l'injection de particules neutres de haute énergie est très largement utilisée sur les machines actuelles, cette technique de chauffage du plasma n'est pas abordée dans ce numéro.

Des acronymes... plus ou moins pertinents

Dans les plasmas magnétisés, les ions et les électrons se déplacent le long des lignes de champs magnétiques en effectuant un mouvement de giration autour de ces dernières, dit mouvement cyclotron. La fréquence de rotation des particules autour des lignes de champ dépend de leur masse et de leur charge électrique ainsi que de l'amplitude du champ magnétique. Des mécanismes de résonances entre les particules et les ondes électromagnétiques de fréquences et de polarisations particulières, permettent de transférer l'énergie des ondes aux particules et ainsi d'augmenter la température du plasma. Ces mécanismes, comme les **résonances cyclotrons** ou la **résonance Landau**, sont détaillés dans les articles **#2 Propagation et absorption des ondes** et **#3 Réponse du plasma aux ondes**. En modifiant la polarisation et/ou l'angle d'injection des ondes par rapport au champ magnétique, celles-ci vont préférentiellement chauffer (*Resonance Heating* ou RH) ou générer du courant plasma (*Current Drive* ou CD).

Dans la plupart des tokamaks comme dans WEST (tokamak français exploité par le CEA), les ions du plasma peuvent être directement chauffés par des ondes radiofréquence entre 30 et 60 MHz, c'est le domaine des ondes dites cyclotroniques ioniques (ou IC pour *Ion Cyclotron*). L'utilisation de ces ondes pour chauffer le plasma, la méthode ICRH, est aujourd'hui la méthode de chauffage RF dont les puissances couplées au plasma sont les plus importantes, jusqu'à

Figure 1 :
Générateurs de puissance radiofréquence utilisés dans les recherches sur la fusion nucléaire par confinement magnétique.



20 MW sur le tokamak européen JET.

Beaucoup plus haut en fréquence, des ondes de plusieurs dizaines de GHz (105 GHz sur WEST et 170 GHz sur ITER), servent à accélérer directement et de façon très locale les électrons du plasma dans les systèmes RF à la fréquence cyclotronique électronique (ou EC pour *Electron Cyclotron*).

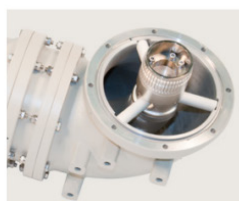
Entre ces deux gammes de fréquences, les systèmes LH (pour *Lower Hybrid*) opèrent à quelques GHz (3.7 GHz sur WEST). Historiquement, le système LH devait permettre de chauffer les ions du plasma en utilisant une résonance particulière de ce dernier, la réso-

nance dite « hybride inférieure ». Toutefois, les performances n'ont pas été au rendez-vous et quelques années plus tard les antennes LH ont été reconfigurées pour accélérer les électrons du plasma en utilisant une autre résonance onde-particule, la résonance Landau (cf. article #2 **Propagation et absorption des ondes**). L'accélération d'électrons permet alors de créer du courant dans le plasma. Ainsi, dans les expériences actuelles, les systèmes LH sont utilisés pour réaliser des décharges longues sur les tokamaks, tout en contribuant à chauffer le plasma lorsque les électrons accélérés redistribuent leur énergie au plasma par collisions. L'acronyme LH

est resté, bien que la méthode soit sans rapport direct avec la résonance du même nom. Parmi tous les systèmes RF, c'est actuellement le système LH qui possède la meilleure efficacité de génération de courant, ce qui en fait l'outil indispensable aux plasmas de longue durée sur les tokamaks supraconducteurs comme WEST ou EAST (Chine).

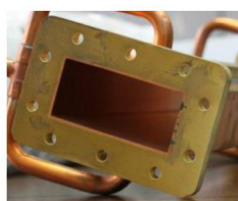
Du producteur aux utilisateurs

Si les systèmes RF partagent la même architecture générale, les fréquences utilisées qui vont de plusieurs mégahertz (MHz) à plusieurs centaines de gigahertz (GHz), font que les **longueurs**



$\varnothing_{ext}=230\text{mm}$, ~2 MW,
3 bars pressurisé N_2

ICRF: lignes coaxiales



72mm x 34mm, ~700kW,
1-2 bar pressurisé N_2

LHRF:
guides rectangulaires



$\varnothing_{ext}=71\text{mm}$, >100kW
sous vide

ECRF: guides circulaires
corrugués

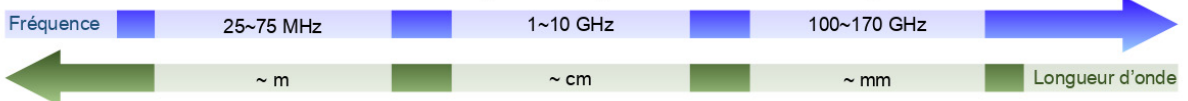


Figure 2 : Lignes de transmission de la puissance RF utilisées en fonction des systèmes.

d'ondes associées sont très différentes : de plusieurs dizaines de mètres à quelques millimètres. Par conséquent, les technologies utilisées pour générer, transporter et transférer la puissance RF jusqu'au plasma vont elles aussi être très diverses (**figures 1 à 3**). Les problématiques complexes et multi-physiques du couplage des ondes au plasma et des différentes technologies de génération de ces ondes seront décrites respectivement dans les articles **#4 Antenne et couplage des ondes au plasma** et **#5 Tubes électroniques : du poste à galène à la fusion**. En attendant, faisons une rapide description des différents systèmes utilisés sur un tokamak.

Dans la gamme de fréquence des ondes IC, les générateurs sont des amplificateurs de puissance RF, appelés tétrodes ou triodes, permettant de passer de quelques milliwatts à plusieurs mégawatts. À ces fréquences, des lignes de transmission coaxiales rigides remplies d'azote ou sous vide, sont utilisées pour transférer la puissance des générateurs jusqu'aux antennes. Ces dernières, situées à quelques centimètres du plasma, sont utilisées pour convertir (ou dans le jargon, « coupler ») les ondes électromagnétiques qui se propagent dans les lignes coaxiales en ondes qui se propagent dans

le plasma magnétisé, jusqu'à ce qu'elles soient absorbées par résonance cyclotron (ionique). Caractéristique facilement identifiable des antennes IC : elles disposent généralement d'un « écran de Faraday » : une grille métallique alignée avec le champ magnétique du plasma et qui permet à la fois de filtrer les polarisations non désirées et de protéger les éléments rayonnant du flux de chaleur du plasma (**cf. figure 3**).

Aux fréquences LH, les amplificateurs RF sont des klystrons et les lignes de transmission sont des guides d'ondes rectangulaires (**figure 3**). Cet arrangement de guides rectangulaires permet d'orienter la puissance couplée dans une direction préférentielle du tore et fait ressembler la face avant de ces antennes à des grilles de barbecue, raison pour laquelle ces antennes sont souvent affublées du surnom de « grill ».

Les générateurs RF des ondes EC sont des sources de puissance appelées gyrotrons. Les lignes de transmission sont des tuyaux circulaires rigides dont les parois disposent de petites corrugations de quelques millimètres de hauteur et largeur, qui servent à réduire les pertes de propagation. À ces fréquences élevées (longueurs d'onde millimétriques), les ondes

électromagnétiques se propagent de façon quasi-optique, un peu comme de gros faisceaux lasers. En utilisant des surfaces métalliques orientables (appelés « miroirs », **cf. figure 3**), il est alors possible de réfléchir la puissance RF. Il est donc également possible de transférer ces ondes en espace libre, par exemple en utilisant de multiples réflexions entre miroirs, comme sur le stellarator W7-X. Enfin, en utilisant des miroirs orientables, les antennes permettent d'injecter ces faisceaux de puissance dans une direction précise du plasma, permettant d'interagir très localement avec le plasma.

Et demain ?

Dans les futures centrales fusion, les contraintes nucléaires ne permettront plus d'intervenir régulièrement sur les antennes comme dans les expériences actuelles. De plus, l'efficacité globale des systèmes RF devra être optimisée, en particulier la production de la puissance et dans une moindre mesure son couplage au plasma. Alors, comment cuisinera-t-on le plasma dans les centrales du futur ? C'est la problématique abordée dans l'article **#7 Et demain ? Les ondes pour ITER et les centrales fusion**. ■

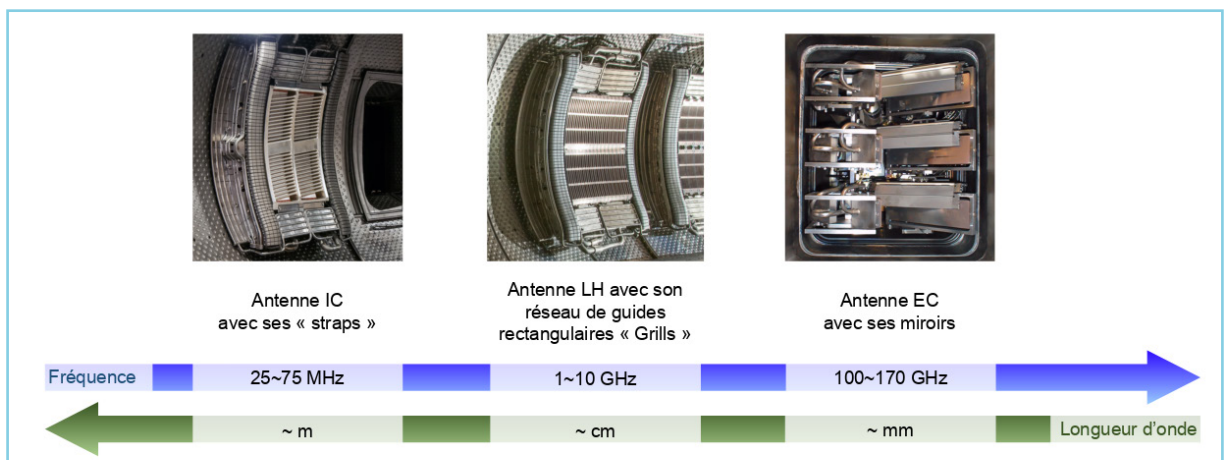


Figure 3 : Antennes RF du tokamak WEST.

PROPAGATION ET ABSORPTION DES ONDES

PAR
RÉMI DUMONT
YVES SAVOYE-PEYSSON
GERARDO GIRUZZI

Les ondes électromagnétiques constituent un outil de choix pour contrôler les propriétés d'un plasma de fusion. Quels que soient les objectifs considérés, la problématique est analogue : exciter une onde radiofréquence (RF) en périphérie du plasma à l'aide d'une antenne de sorte que celle-ci puisse se propager vers une région plus ou moins centrale où les caractéristiques de l'onde sont alors en mesure de modifier les propriétés du plasma : chauffer, générer un courant, stabiliser le plasma, etc.

#2

#2

PROPAGATION ET ABSORPTION DES ONDES

Relation de dispersion : suivez la carte !

Une onde plasma est par définition une perturbation collective à l'équilibre MHD local de celui-ci (cf. **Sciences en Fusion n°2 - Stabilité, article #2**). Sa description relève en général de méthodes mathématiques dites perturbatives, très répandues en physique, qui consistent à appliquer une petite perturbation par rapport à l'équilibre du système. Pour modéliser la propagation et l'absorption d'une onde RF dans le plasma, il est nécessaire de décrire ses propriétés tout au long du chemin qu'elle parcourt, du lieu où elle est générée à l'endroit où elle est absorbée.

La condition de propagation d'une onde est la première étape pour qualifier celle-ci par rapport au but recherché. En effet, si une onde devient évanescence au cours de son parcours, ou si celle-ci rencontre une caustique, c'est-à-dire l'enveloppe des rayons lumineux subissant une réflexion ou une réfraction sur une surface ou une courbe, elle ne pourra atteindre la zone du plasma dont on souhaite modifier les propriétés, et sera donc inintéressante du point de vue opérationnel. La condition de propagation est obtenue à partir de la **relation de dispersion**, en résolvant localement les **équations de Maxwell**. On fait en général l'hypothèse que le plasma est « froid », terme qui peut surprendre

pour un plasma de fusion dont les températures peuvent avoisiner les 100 millions de degrés. En fait, pour une onde, un plasma est « froid » lorsque sa **vitesse de phase** est très grande devant la **vitesse thermique** des particules dans le plasma. Une onde à la fréquence cyclotronique électronique a ainsi une vitesse de phase proche de la vitesse de la lumière, alors que les électrons, particules chargées les plus légères et les plus rapides dans le milieu, ont une vitesse 85% plus faible. La relation de dispersion prend en compte non seulement la **fréquence** de l'onde, mais également sa **polarisation**, ainsi que les propriétés locales du plasma : champ magnétique, densité, et parfois température si des corrections à l'hypothèse plasma froid sont considérées. L'**indice de l'onde**, proportionnel au **vecteur d'onde**, permet de qualifier sa nature propagative ou non. On montre que la présence du champ magnétique de confinement, qui crée une **anisotropie** locale du milieu, induit deux modes de propagation pouvant coexister selon la direction de polarisation de l'onde. La relation de dispersion permet également d'étudier les conversions de modes correspondant à la transformation d'un type d'onde vers un autre qui ne

pourrait pas être excitée par une antenne au bord du plasma. C'est le cas de l'**onde de Bernstein** électronique dans des plasmas magnétisés sur-dense. Sur la **figure 1**, les frontières du domaine de propagation sont indiquées pour l'onde à la fréquence hybride basse dans un plasma du tokamak WEST.

Description de la propagation d'une onde

La résolution des équations de Maxwell en milieu inhomogène (gradient de densité/température) et anisotrope (champ magnétique) pour décrire de manière réaliste la propagation d'une onde dans le plasma est un problème très complexe et c'est un tour de force numérique dans le cas le plus général. Le code AORSA de type « full-wave » pour décrire la propagation et l'absorption des ondes ioniques avec conversion de modes, nécessite ainsi les ressources de calcul parmi les plus puissantes des États-Unis pendant des jours voire des semaines ! Heureusement, il est possible de simplifier le problème pour certaines ondes couramment employées pour les plasmas magnétisés de tokamak, moyennant quelques hypothèses ayant un large domaine de validité. Cela concerne notamment

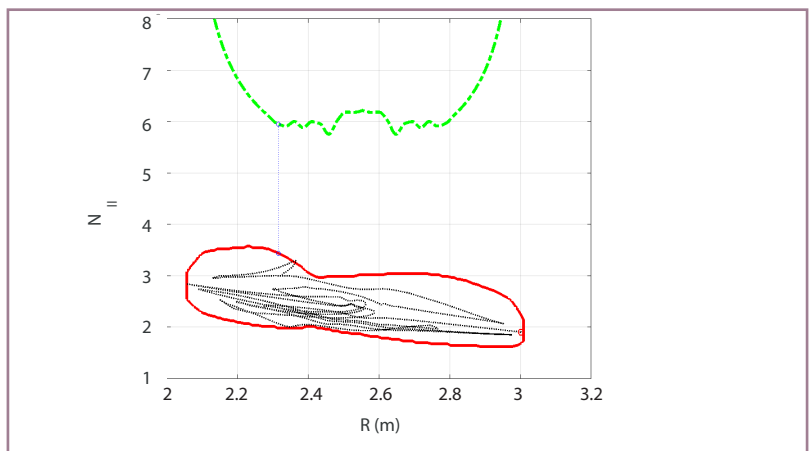


Figure 1 : Domaine de propagation pour l'onde à la fréquence hybride basse sur WEST (ligne rouge), pour la décharge #54952. La valeur initiale de l'indice de réfraction vaut 1.9. En pointillés, le tracé de rayon qui reste bien borné par le domaine de propagation comme prévu par la théorie, et en vert la condition d'absorption résonnante Landau qui ne peut jamais être atteinte par réfraction dans le cas présent.

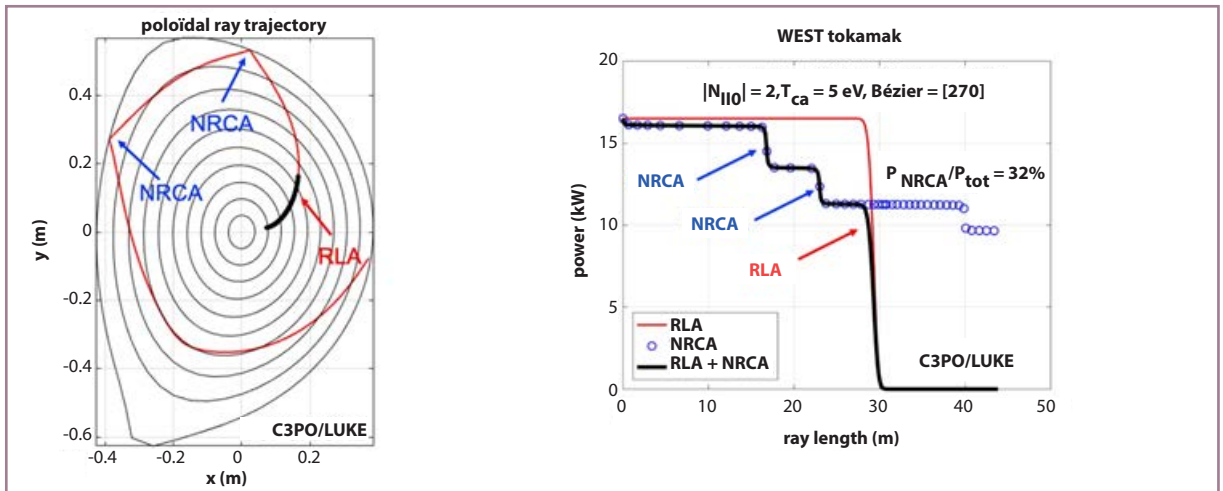


Figure 2 : À gauche, projection poloïdale d'un rayon pour l'onde à la fréquence hybride basse injectée dans un plasma du tokamak WEST.

Le rayon subit deux réflexions spéculaires (coupure) au cours de la propagation avant d'être absorbé à proximité du centre du plasma. À droite, puissance transmise de l'onde vers le plasma au cours de sa propagation. L'onde perd d'abord de sa puissance par absorption collisionnelle non-résonnante (NRCA) avant d'avoir perdu toute la puissance injectée par résonance Landau (RLA). Le rapport PNRCA/PRLA donne la part de la puissance perdue pour la génération de courant par cette onde. La puissance perdue par absorption non-résonnante intervient au bord du plasma, à proximité de la région où l'onde est réfléchie, comme indiqué sur la figure de gauche. Les calculs de propagation sont effectués avec le code C3PO, et d'absorption avec le code LUKE.

les ondes électroniques à la fréquence cyclotronique électronique pour chauffer ou générer du courant très localement dans les régions centrales du plasma, ou à la fréquence hybride basse pour générer du courant hors de l'axe magnétique et changer ainsi le profil de densité de courant. En faisant l'hypothèse que la longueur d'onde reste toujours très petite devant la longueur caractéristique des gradients dans le plasma, l'onde « voit » celui-ci comme étant localement homogène. Si de plus, l'amplitude de l'onde décroît également très lentement à l'échelle de sa fréquence, il est alors possible d'appliquer les techniques usuelles de transformées de Fourier. Les équations de Maxwell peuvent être alors considérablement simplifiées, la problématique revenant à suivre l'évolution de la puissance portée par l'onde, qui est caractérisée par la **vitesse de groupe** (qui n'est pas nécessairement parallèle à la vitesse de phase dans un milieu anisotrope), sans considérer l'évolution de la phase de l'onde. La méthode, dénommée tracé de rayon (ray-tracing), revient alors à déterminer la direction de

propagation telle que la relation de dispersion soit toujours satisfaite le long du chemin de l'onde dans le plasma. À chaque incrément de temps, on suit ainsi non seulement la trajectoire de l'onde dans l'espace, mais également ses propriétés spectrales, indice ou vecteur d'onde, polarisation, etc. Plusieurs techniques numériques sont utilisées pour résoudre ce problème, une des plus courantes étant la méthode dite Runge-Kutta, en l'honneur des mathématiciens qui la développèrent. En négligeant l'absorption le long du chemin parcouru, l'onde se propage ainsi indéfiniment dans le plasma. Pour le cas du tokamak WEST, le tracé de rayon d'une onde à la fréquence hybride basse est montré sur la **figure 2** et celui d'ondes à la fréquence cyclotronique électronique sur la **figure 3**. Avec des méthodes plus sophistiquées, on peut faire du tracé de faisceau (beam-tracing), permettant de décrire la focalisation ou la divergence d'un faisceau d'ondes. Elle est très employée pour connaître avec une grande précision la densité de puissance portée par l'onde cyclotronique électronique et l'extension du

faisceau perpendiculairement à sa propagation. Cette méthode n'est cependant valable que si l'onde ne rencontre aucune coupure (effet miroir) ou caustique avant d'être absorbée, et c'est pour cette raison

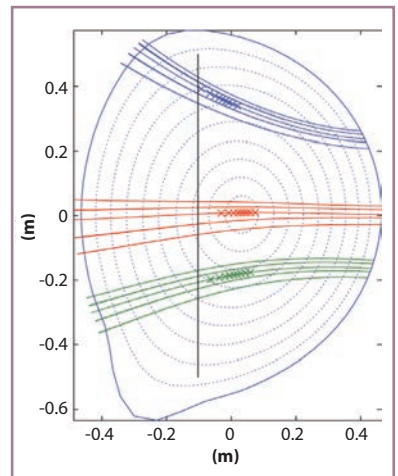


Figure 3 : Projection poloïdale des trajectoires de trois faisceaux d'ondes EC de fréquence 105 GHz dans un plasma de WEST, calculées à l'aide d'un code de tracé de rayons.

Chaque faisceau est discrétisé par un ensemble de rayons. Les croix indiquent la position où les ondes sont absorbées. Le segment vertical indique la position de la résonance cyclotronique électronique. Les faisceaux sont déviés et élargis à cause de la réfraction du plasma.

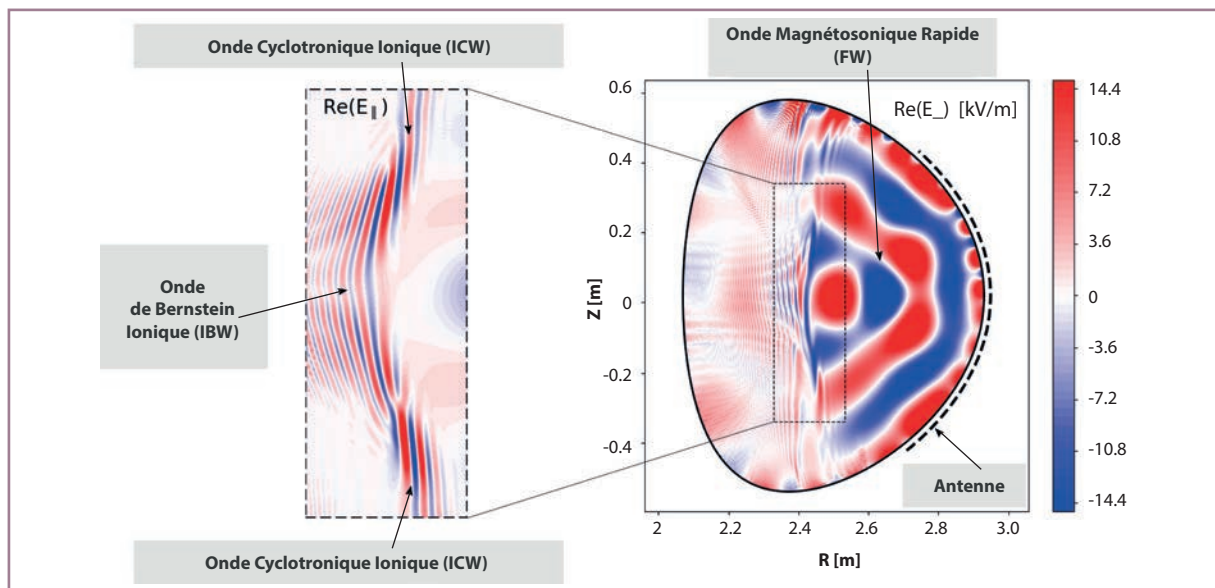


Figure 4 : Simulation d'un scénario ICRF de conversion de mode dans WEST à l'aide du code full-wave EVE.

Dans ce plasma composé d'un mélange d'hydrogène, de deutérium et d'hélium 3, l'antenne (à droite sur la figure) excite une onde (rapide) à 50MHz, qui se convertit en deux ondes de faible longueur d'onde (onde de Bernstein ionique et onde cyclotronique électronique) à proximité d'une ligne verticale passant approximativement par le centre du plasma.

qu'elle n'est, par exemple, pas utilisée pour les ondes à la fréquence hybride basse. Si aucune des hypothèses simplificatrices pour les tracés de rayon ou de faisceau ne peut être employée, la résolution complète des équations de Maxwell (phase et amplitude) est alors nécessaire. Le plasma de tokamak est alors considéré comme une cavité, et les ondes comme des modes propres dont les propriétés sont déterminées par les propriétés du plasma, mais également les conditions aux limites au bord (antenne) et au centre du plasma. Dans ce cas, on ne peut pas séparer propagation et absorption, qui toutes deux doivent être évaluées simultanément. Un exemple est donné dans la **figure 4** pour l'onde à la fréquence cyclotronique ionique dans le tokamak WEST.

Absorption d'une onde

Dans le cas où la propagation de l'onde peut être décrite par un tracé de rayon, on démontre qu'il est possible de découpler propagation et absorption. Il s'agit d'une simplification majeure, puisque sur la base des propriétés de l'onde

le long de son parcours dans le plasma, on peut estimer facilement le transfert irréversible de la puissance portée par l'onde vers le plasma. C'est dans la région du plasma où l'absorption de l'onde est importante voire complète que les propriétés du plasma sont modifiées par celle-ci. Il existe deux mécanismes d'absorption : la dissipation collisionnelle non résonnante, et l'absorption non-collisionnelle résonnante. Dans le premier cas, l'onde est déstructurée par le mouvement Brownien (agitation thermique) du milieu dans lequel elle se propage (effet de température finie), et elle cède alors son énergie dans toutes les directions.

Ce mécanisme conduit en principe à un chauffage du plasma, mais celui-ci est peu efficace en général, car il intervient dans une région où la collisionnalité du plasma est grande, à la périphérie de celui-ci où le milieu est bien plus froid qu'au centre. La puissance restante pour les mécanismes résonnants, les plus intéressants, car agissant sélectivement sur la **distribution en vitesse des particules**, est

alors moindre. Si le plasma est quasi-transparent à l'onde, celle-ci va alors se propager très longtemps avant d'être absorbée, et la dissipation collisionnelle non résonnante sera prépondérante, ce qui est un handicap. En revanche, si le plasma est suffisamment absorbant par effet Landau, c'est ce mécanisme qui prévaut, et l'onde est alors un actuateur efficace pour contrôler les propriétés du plasma. Les conditions de résonance sont au nombre de deux : la résonance cyclotronique, couplant l'onde au mouvement de giration des particules transverses à la direction locale du champ magnétique (ondes cyclotroniques électroniques ou ioniques ou onde à la fréquence hybride basse sur les particules alpha), et la résonance cinétique couplant l'onde au mouvement longitudinal des électrons le long de la ligne de champ, aussi appelé effet Landau (onde à la fréquence hybride basse sur les électrons).

Ces effets, qui sont sensibles à la vitesse et à la direction des électrons ou des ions, ne deviennent significatifs que lorsque la vitesse de phase de l'onde dans la

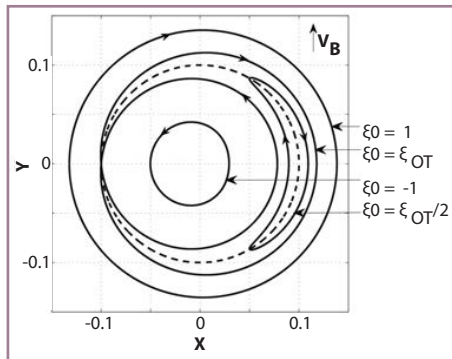


Figure 5 : Trajectoire du centre-guide pour une particule circulante ($\xi_0 = \pm 1$) et une particule faiblement piégée ($\xi_0 = \xi_{OT}$) ou fortement piégée ($\xi_0 = \xi_{OT}/2$).

Ici, le paramètre ξ_0 indique le degré de magnétisation de la particule chargée. Il est maximum pour $\xi_0 = 0$ et minimum pour $\xi_0 = \pm 1$. Dans ce dernier cas, la particule se déplace le long de la ligne de champ magnétique sans que sa vitesse ait une composante perpendiculaire à celle-ci. La transition circulante/piégée intervient pour $\xi_0 = 0T$, et celle-ci dépend de la localisation radiale de la surface de flux magnétique (courbe pointillée) sur laquelle s'enroule la ligne de champ. Ici $x = R - R_p$ et $y = Z - Z_p$, où R est le grand rayon du plasma, R_p sa valeur au centre du plasma, tandis que Z est la position verticale du plasma et Z_p sa valeur au centre du plasma. En négligeant la vitesse de dérive v_B indiquée sur la figure, toutes les orbites sont sur la surface indiquée en pointillée. C'est une approximation classique pour les électrons.

direction considérée devient comparable ou petite par rapport à la vitesse thermique des particules. La dynamique des particules dans un champ magnétique inhomogène joue également un rôle fondamental. Une particule dite « circulante », dont la composante parallèle de la vitesse selon la direction du champ magnétique ne change pas de signe a ainsi un couplage à l'onde distinct de celui d'une particule dite « piégée », qui effectue une orbite dite « banane » dans les directions toroïdale ou poloïdale, avec une composante parallèle de la vitesse changeant alternativement de signe en fonction de sa position poloïdale (figure 5). Ainsi le sens du courant généré par l'onde cyclotronique électronique s'inverse selon que l'onde est absorbée au centre ou au bord du plasma, un effet découvert par le physicien japonais T. Ohkawa [1].

Cette grande complexité des mécanismes d'absorption dans un plasma de tokamak est décrite en résolvant une équation de Fokker-Planck pour les ions ou les électrons, prenant en compte la dynamique des orbites des particules, les possibles effets

relativistes, mais aussi le transfert d'énergie de l'onde vers le plasma, sous la forme d'un mécanisme diffusif ou convectif.

On peut également prendre en compte à ce niveau le type d'impuretés présent dans le plasma, et la physique atomique liée à l'ionisation partielle de certains éléments lourds, comme le tungstène, dont l'utilisation est prévue dans le tokamak ITER. La résolution de l'équation de Fokker-Planck permet de calculer la distribution en vitesse de particules en présence d'une onde RF et de connaître ainsi son impact sur les propriétés du plasma. On peut ainsi évaluer les divers moments de la distribution, notamment ceux accessibles aux instruments de mesure installés sur la machine, comme le rayonnement de freinage, le rayonnement cyclotronique électronique, etc. La comparaison entre la modélisation et le résultat des mesures permet de remonter aux mécanismes en jeu dans le plasma.

Autres effets

La physique des ondes RF dans les plasmas est d'une grande richesse. Aux mécanismes décrits plus haut,

on peut en adjoindre de nouveaux pour étudier par exemple l'impact de la turbulence du plasma sur la propagation et l'absorption.

Ainsi, la réfraction des ondes cyclotroniques électroniques par une forte zone turbulente en périphérie de celui-ci peut réduire considérablement les performances de l'onde pour contrôler le plasma dans les régions centrales, le dépôt de puissance devenant bien plus large dans la zone concernée.

De même, on montre que les propriétés au bord du plasma entre l'antenne et la séparatrice peuvent changer la dynamique des ondes à la fréquence hybride basse. Enfin, les ondes RF sont en mesure d'induire directement un transport radial dans le plasma. Une approche auto-cohérente est ainsi nécessaire pour décrire cet effet dont les conséquences peuvent être potentiellement importantes. Le champ d'application des ondes est donc considérable. Il requiert une mise en œuvre complexe d'outils numériques interconnectés pour décrire toutes les étapes de la génération de l'onde jusqu'à son absorption, et étudier leurs effets sur le plasma. ■

RÉFÉRENCES

- [1] T. Ohkawa, Steady-state Operation of Tokamaks by RF Heating, *General Atomic technical Report*, GA-A13847, (1976).
- [2] L. D. Landau, *J. Phys. (U.S.S.R.)*, **10** (26), (1946).
- [3] R. J. Dumont, *Nucl. Fusion*, **49** (7), p. 075033, (2009), doi 10.1088/0029-5515/49/7/075033.
- [4] Y. Savoye-Peysson, et al., *Plasma Phys. Control. Fusion*, **58** (4), p. 044008, (2016) doi 10.1088/0741-3335/58/4/044008.

RÉPONSE DU PLASMA AUX ONDES

PAR
GERARDO GIRUZZI
RÉMI DUMONT
YVES SAVOYE-PEYSSON

Dans les machines à fusion par confinement magnétique (tokamaks ou stellarators), les ondes électromagnétiques interagissent avec le plasma en produisant un grand nombre d'effets : chauffage des ions et/ou des électrons, création de populations de particules énergétiques (ions ou électrons), génération de courant électrique, réduction ou suppression d'instabilités magnétohydrodynamiques, génération d'ondes de chaleur en réponse aux modulations de la puissance, voire même, création du plasma lui-même.

#3

#3

RÉPONSE DU PLASMA AUX ONDES

Les ondes dans les plasmas de fusion : des outils à tout faire

Depuis quelques dizaines d'années, avec l'invention du four à micro-ondes, le chauffage par ondes électromagnétiques est devenu un processus familier. À la fin des années 1950, alors que les premiers modèles de four micro-ondes commencent à être commercialisés, les recherches pour la fusion utilisent également les ondes pour chauffer le plasma. Si le chauffage est l'utilisation la plus connue des ondes radiofréquence dans les plasmas de fusion par confinement magnétique, il n'est pas le seul effet produit par l'interaction entre ondes et plasmas plus ou moins ionisés. Au fil des années, d'autres effets ont été découverts et exploités, jusqu'à devenir parfois la base d'utilisations irremplaçables dans les expériences présentes et dans les futurs réacteurs à fusion. À titre

d'exemple, on peut citer le démarrage du plasma, à partir d'un gaz neutre, assisté par micro-ondes, qui sera indispensable dans l'opération d'ITER. Les principaux phénomènes de réponse du plasma à l'absorption d'ondes électromagnétiques interviennent dans pratiquement toutes les phases de l'élaboration du scénario d'un plasma de fusion, avec leurs différentes spécificités, comme il est montré de façon schématique dans la **figure 1**. Ces phénomènes sont décrits brièvement dans cet article.

Chauffage par ondes et scénarios des plasmas de fusion

Les trois types d'ondes généralement utilisés pour le chauffage du plasma (ondes cyclotroniques ioniques - IC, ondes à la fréquence hybride basse - LH et ondes cyclotroniques électroniques - EC, respectivement de longueur d'onde métrique, centimétrique et millimétrique) interagissent avec le plasma par des phénomènes de résonance (article **#2 Propagation et absorption des ondes**). Ces phénomènes de résonance conduisent à une interaction sélective des ondes (d'une certaine **fréquence** et **vecteur d'onde**) avec les particules (ions ou électrons) en mouvement avec une certaine vitesse. Le champ électrique de l'onde peut donc accélérer le mouvement des particules (mouvement parallèle aux lignes de force du champ magnétique

pour l'onde LH ou mouvement de rotation autour de ces lignes pour les ondes EC et IC). Sur plusieurs cycles d'oscillation du champ des ondes, il y a en moyenne un transfert net d'énergie des ondes aux particules résonnantes, énergie qui est ensuite redistribuée entre particules par les collisions. Comme cet échange est sélectif en vitesse, il n'y a pas uniquement augmentation de l'énergie moyenne des particules, mais aussi changement de la distribution statistique de leurs vitesses. En l'absence d'ondes, cette distribution est uniquement déterminée par les collisions entre particules; elle est isotrope par rapport aux deux directions principales de la vitesse (parallèle et perpendiculaire au champ magnétique) et elle a une forme spécifique qu'on appelle **Maxwellienne**, montrée dans un exemple en **figure 2a**. Le chauffage par ondes peut fortement modifier cette distribution, en compétition avec les collisions, qui elles tendent à ramener les particules vers la distribution Maxwellienne. Ces modifications sont très différentes pour les ondes des trois différents domaines de fréquence, comme il est montré en **figure 2b** pour les ondes EC, en **figure 2c** pour les ondes IC et en **figure 2d** pour les ondes LH. Cette propriété du chauffage par ondes, de changer la distribution statistique des particules, est exploitée dans les applications décrites dans les deux paragraphes suivants.

Les populations de particules énergétiques

Un plasma en état de combustion thermonucléaire aura une composante significative d'ions d'hélium, aussi appelés particules alpha, d'énergies très supérieures à l'énergie moyenne des autres ions du plasma. Ces particules sont produites par les réactions de fusion, et, une fois créées, cèdent leur énergie aux électrons et aux ions du plasma par collisions, avant

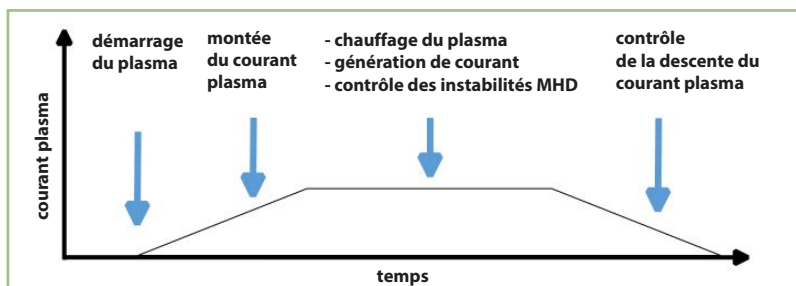
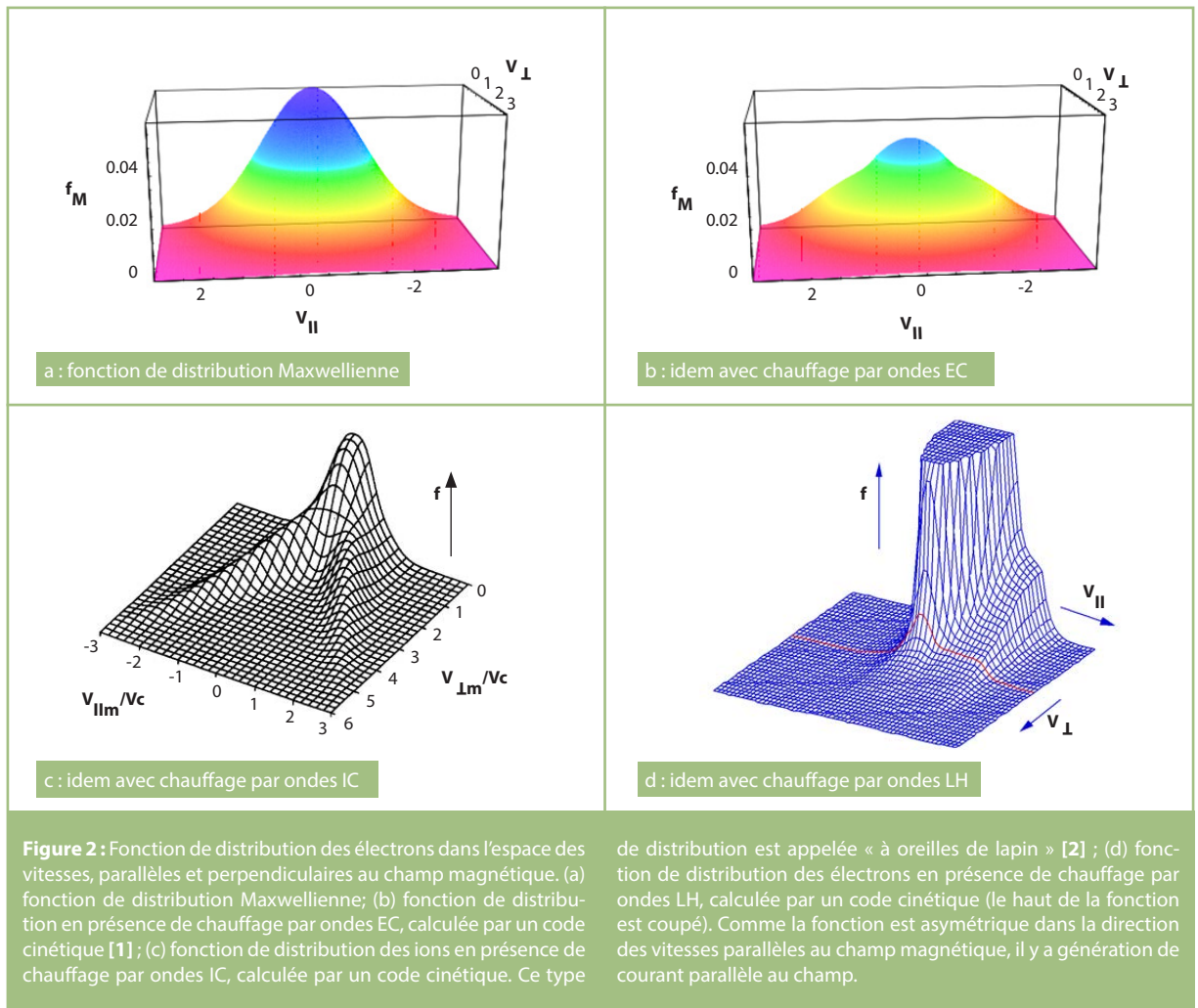


Figure 1 : Schéma d'utilisation des ondes lors de l'évolution du courant plasma dans un tokamak.



d'être définitivement **thermalisées**. Le rôle de ces particules est primordial pour l'auto-chauffage du plasma et donc pour l'entretien du régime de fusion : par exemple, dans ITER, les particules alpha fourniront une puissance de chauffage double par rapport au 40-60 MW de l'ensemble des autres sources de chauffage; dans un réacteur destiné à la production d'énergie électrique, elles seront de loin la source dominante. Il est donc essentiel que ces particules soient bien confinées à l'intérieur de la décharge plasma, afin de pouvoir y relâcher leur énergie. Cependant, on sait qu'une population d'ions énergétiques peut influencer le transport de la chaleur, ou encore générer une grande variété d'instabilités magnétohydrodynamiques

(MHD) (cf. **Sciences en Fusion n°2 - Stabilité, article #2**), qui peuvent conduire à leur sortie prématurée du volume occupé par le plasma (cf. **Sciences en Fusion n°2, article #5 et Sciences en Fusion n°4 - Simulations, article #3**). L'étude expérimentale de la physique de ces distributions d'ions énergétiques et des instabilités associées est donc de la plus grande importance et elle sera au cœur des activités de recherche d'ITER. Dans les machines à fusion actuellement disponibles et qui ne fonctionnent pas avec un mélange Deutérium-Tritium, il n'y a pas de populations de particules alpha; néanmoins, le chauffage IC peut générer des fonctions de distribution ioniques avec des queues énergétiques qui peuvent simuler un grand nombre

des phénomènes attendus avec des populations d'alpha. La fonction de distribution « à oreilles de lapin » montrée en **figure 2c** en est un exemple. Le chauffage par ondes IC est donc un outil essentiel afin de progresser dans la compréhension de cet aspect fondamental de la physique des plasmas de fusion au cours des expériences actuelles.

La génération non-inductive de courant

Lorsque l'interaction résonante onde-électrons a lieu de manière asymétrique par rapport à la vitesse parallèle au champ magnétique, la fonction de distribution des électrons devient elle-même asymétrique, ce qui implique

qu'un courant électrique parallèle est généré. Ceci peut arriver par deux phénomènes différents : 1) l'onde cède directement de la quantité de mouvement parallèle aux électrons; 2) l'onde transmet de l'énergie aux électrons, mais de manière asymétrique, par exemple davantage aux électrons de vitesse parallèle positive que négative. Comme la fréquence de collision est inversement proportionnelle au cube de la vitesse, les électrons de vitesse positive perdront alors leur vitesse moins vite que ceux de vitesse négative et la fonction de distribution deviendra asymétrique. Ceci peut se calculer à l'aide d'un code dit cinétique et un exemple est montré en **figure 2d** pour les ondes LH. Ce mécanisme de génération de courant, qui ne fait pas appel à l'induction électromagnétique, est appelé génération non-inductive de courant et il joue un rôle fondamental pour réaliser

les plus longues décharges dans les tokamaks (plusieurs minutes dans Tore Supra/WEST et EAST), décharges qui ne seraient pas possibles de manière purement inductive (article #1 **Les ondes électromagnétiques : des outils pour les plasmas de fusion**).

Micro-ondes et instabilités MHD : une chirurgie du plasma

Le fonctionnement d'une machine à fusion est constamment sujet à des instabilités MHD diverses et variées (cf. **Sciences en Fusion n°2 - Stabilité**).

Ces instabilités sont très souvent localisées à des surfaces particulières du plasma et leurs sources sont les gradients de pression et de courant à ces endroits. Un chauffage et/ou une génération de courant localisés peuvent modifier ces gradients et donc supprimer ou

contrôler ces instabilités.

Les ondes EC, qui sont millimétriques, ont la propriété de pouvoir donner lieu à une absorption très localisée et elles sont largement utilisées comme une sorte d'instrument chirurgical pour éliminer les instabilités ou en changer les caractéristiques. Un exemple expérimental est montré dans la **figure 3**, où dans le tokamak Tore Supra la localisation de l'absorption de l'onde EC a été variée de façon continue à l'aide du mouvement du miroir par lequel l'onde était injectée.

La période et l'amplitude de l'instabilité en dent de scie (cf. **Sciences en Fusion n°2 - Stabilité, article #4**), ont été fortement réduites lorsque la localisation de l'absorption était optimale.

Génération d'ondes de chaleur : un outil puissant pour l'étude du transport

Lorsqu'une onde électromagnétique de puissance est injectée dans le plasma, elle peut modifier non seulement la température, mais aussi la densité des particules. Si la puissance de l'onde injectée dans le plasma est modulée, des ondes de chaleur et de densité sont générées dans le plasma, à l'instar d'une perturbation périodique de la surface de l'eau d'un lac.

Comme la vitesse de la propagation de ces ondes dépend des propriétés du milieu et notamment des coefficients de transport de la chaleur et de la matière, l'injection modulée d'ondes est souvent utilisée comme un moyen puissant pour l'étude de la physique du transport dans le plasma.

Assistance par ondes au démarrage du plasma

Lorsque des ondes électromagnétiques sont injectées dans un gaz, leur champ électrique peut arracher les électrons de leurs orbitales

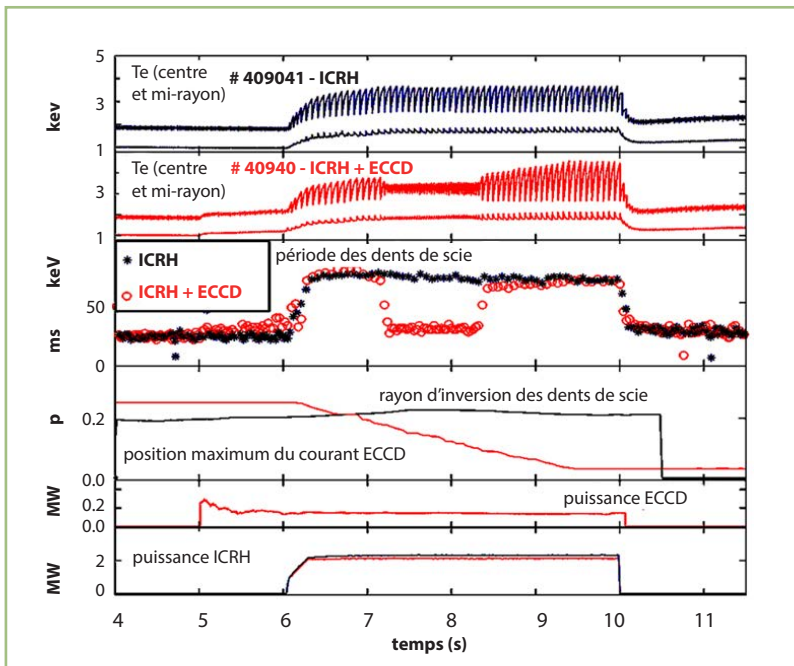


Figure 3 : Effet des ondes EC sur les dents de scie dans le tokamak Tore Supra [3].

La puissance ICRH induit des dents de scie lentes et de très grande amplitude. La puissance ECRH est ensuite injectée dans une configuration adaptée à générer du courant. Elle est absorbée de façon localisée et cette localisation est variée avec continuité par un mouvement du miroir qui injecte les ondes. Lorsque la position de l'absorption est proche du rayon d'inversion des dents de scie (entre 7 et 8 s), l'effet est d'en diminuer l'amplitude et d'en réduire la période.

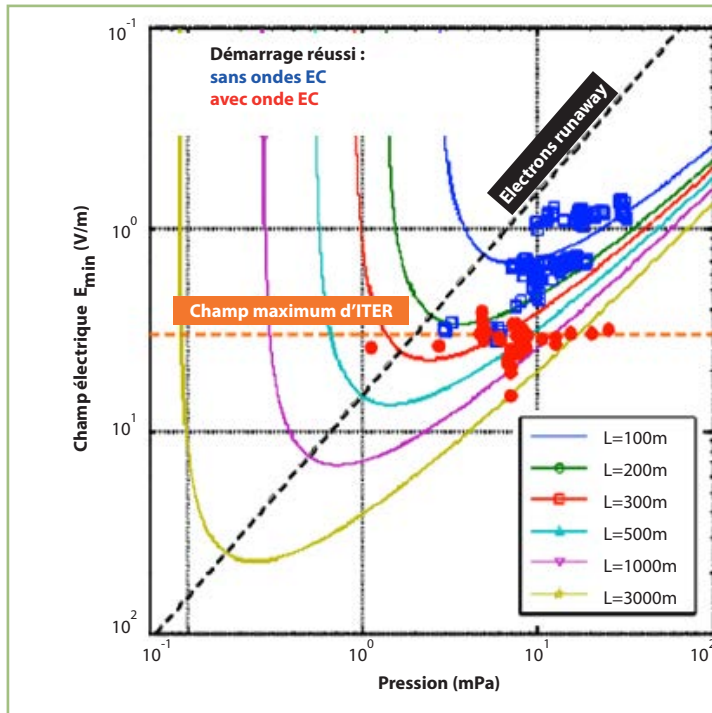


Figure 4 : Champ électrique minimum pour le claquage du gaz.

Champ électrique minimum (E_{\min}) pour obtenir le claquage électrique dans Tore Supra, en fonction de la pression du gaz, avec et sans ondes EC. Les points correspondent aux mesures et les courbes correspondent aux calculs théoriques pour différentes configurations magnétiques caractérisées par la longueur de connexion du champ magnétique toroïdal (L) [4].

et ioniser le plasma. Ce processus est utilisé de façon routinière dans l'industrie ou dans les stellarators. Dans les tokamaks, l'**ionisation** initiale est normalement obtenue par le claquage du gaz produit par le champ électrique induit par le solénoïde central.

Néanmoins, ce champ n'est pas toujours suffisant pour démarrer le plasma et les ondes IC ou EC

peuvent être utilisées pour aider le processus. Par exemple sur ITER, le champ électrique maximum sera de l'ordre de 0.3 V/m, soit quatre fois moins que sur WEST, et l'utilisation de plusieurs mégawatts de puissance EC ou IC sera indispensable pour le démarrage. Cette technique a été validée dans des expériences dédiées sur plusieurs tokamaks. Un exemple est montré dans la **figure 4**, pour le tokamak

Tore Supra, où une puissance EC modeste a été utilisée (<500 kW) : la figure montre que le démarrage est bien plus aisé avec l'assistance des ondes EC.

À noter que ces ondes, ainsi que les ondes IC, peuvent être utilisées aussi pour créer un plasma de nettoyage qui permet de reconditionner la paroi entre deux expériences. ■

RÉFÉRENCES

- [1] V. Krivenski, *et al.*, 29th EPS Conf. on Plasma Physics, ECA, **26B**, O-1.03 (2002).
- [2] C.S. Chang, P. Colestock, *Phys. Fluids B* **2**, 310 (1990).
- [3] M. Lennholm, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 115004 (2009).
- [4] J. Bucalossi, *et al.*, *Nucl. Fusion* **48**, 054005 (2008).

ANTENNE ET COUPLAGE DES ONDES AU PLASMA

PAR
LAURENT COLAS
STEPHANE HEURAUX
JULIEN HILLAIRET

Différentes ondes à différentes fréquences sont utilisées dans un tokamak, comme WEST. Mais avant que ces ondes puissent se propager à l'intérieur du plasma confiné et y être absorbées, il faut d'abord les émettre avec des antennes situées à l'extérieur du plasma pour qu'elles atteignent ensuite, avec une forte amplitude, le plasma situé au centre de la machine. Pour ce passage de la puissance dans le plasma on parle de « couplage » des ondes au plasma.

#4

#4

ANTENNE ET COUPLAGE DES ONDES AU PLASMA

Des antennes... très particulières

La gamme de fréquence utilisée impose des choix technologiques sur la manière de transmettre les ondes avec la meilleure efficacité possible aux antennes (cf. article #1 **Les ondes électromagnétiques : des outils pour les plasmas de fusion**) : des lignes coaxiales rigides (fréquences IC, dizaines de MHz) aux guides circulaires corrugés (fréquences EC, centaine de GHz) en passant par des guides rectangulaires (fréquences « LH », quelques GHz). Le rôle des antennes est de faire la transition entre la puissance générée par les sources RF (cf. article #5 **Tubes électroniques : du poste à galène à la fusion**) et le plasma magnétisé, en « forgeant » les propriétés des ondes afin qu'elles puissent être transférées et ensuite absorbées dans le plasma comme attendu. La conception des antennes va dépendre de la longueur d'onde et donc des gammes de fréquences utilisées. Dans les antennes IC, le conducteur central des lignes coaxiales est connecté à la boîte de l'antenne pour former une (ou plusieurs) nappe(s) émettrice(s), appelés communément « straps » et idéalement perpendiculaires au champ magnétique de confinement. Le courant RF qui circule sur ce strap va exciter un champ RF qui va générer dans le plasma une **onde dite « rapide »** ou

« **magnéto-sonique** » (cf. article #2 **Propagation et absorption des ondes**), dont le champ électrique est principalement aligné avec les straps. Pour les antennes LH, un réseau de guides d'onde rectangulaires phasés entre eux va exciter une **onde dite « lente »**, initialement polarisée dans la direction toroïdale alignée avec le champ magnétique. Aux fréquences EC, des miroirs vont réfléchir la puissance radiofréquence issue des guides d'ondes circulaires sous forme de **faisceaux gaussiens**, avec un profil d'intensité transverse à l'axe de propagation en forme de cloche de quelques centimètres de diamètre.

Toutes les antennes doivent répondre à un cahier des charges particulièrement sévère. En effet, injecter des puissances RF équivalentes à plusieurs milliers de fois celles d'un four micro-onde domestique, à travers une surface finalement pas beaucoup plus grande que la porte de ce même four, sous vide, sur des temps longs et à proximité du plasma qui rayonne un flux de puissance important, nécessite de développer des systèmes uniques et aux limites des technologies connues.

Même en optimisant les structures, une partie de la puissance RF est toujours perdue sous forme de chaleur lorsqu'elle se propage dans des structures guidées. Par conséquent, l'exploitation de ces systèmes sur des temps longs nécessite forcément de les refroidir. Pour cela, les structures doivent donc contenir des réseaux de circulation d'eau qui évacuent la chaleur, induisant une difficulté de conception supplémentaire. Les antennes LH et IC de WEST sont activement refroidies grâce à des conceptions uniques et pionnières dans ce domaine.

Idéalement, une antenne ne devrait exciter dans le plasma qu'un seul mode de propagation des ondes. Or, en réalité, les

antennes vont générer un continuum d'ondes dont les propriétés vont dépendre du nombre et de la forme des éléments rayonnant la puissance radiofréquence et de la structure d'antenne. Parce qu'il est plus simple de manipuler les **équations de Maxwell** dans le **domaine de Fourier** pour modéliser la propagation des ondes dans le plasma (cf. article #2 **Propagation et absorption des ondes**), les propriétés des antennes sont également définies dans ce domaine. On parle alors de spectre excité par les antennes. L'efficacité de couplage et d'absorption dans le plasma vont dépendre de ce spectre et il est donc nécessaire de le contrôler. Pour les antennes IC ou LH, on va introduire un retard ou une avance de phase de l'onde entre éléments rayonnants, pour modifier ce spectre. Pour les antennes EC, en plus de la position du miroir pour injecter le faisceau à des angles variés dans le plasma, on va également pouvoir modifier la **polarisation** de l'onde grâce à des polariseurs situés en amont dans les lignes de transmission.

Enfin, il existe des limites physiques dures que l'on ne peut pas dépasser, par exemple des valeurs de champs électriques au-delà desquelles la matière peut s'ioniser localement et engendrer des arcs électriques qui peuvent endommager les composants des antennes s'ils ne sont pas détectés et éteints à temps. Pour la gamme de fréquence la plus basse, de l'ordre de la dizaine de MHz, le facteur limitant la puissance injectable au plasma va dépendre des champs électriques entre les conducteurs des éléments de l'antenne. Pour les gammes de fréquences supérieures, de quelques GHz à une centaine de GHz, la densité de puissance maximale rayonnée par une antenne est liée au déclenchement d'avalanches électroniques dans les guides ou devant l'antenne, pouvant également conduire à des

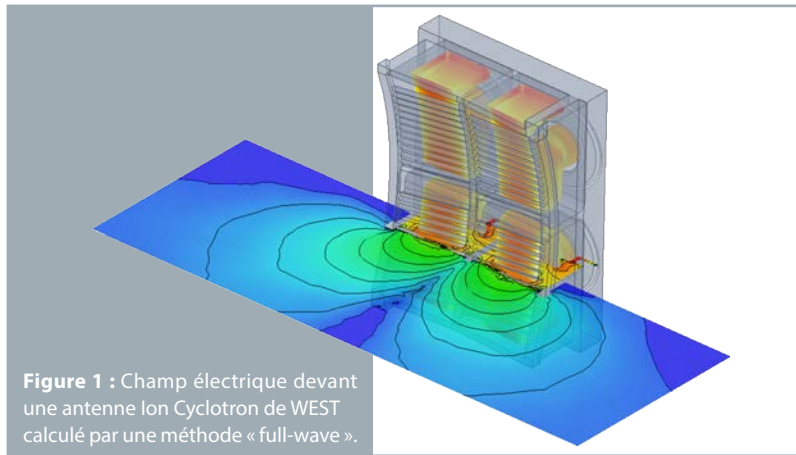


Figure 1 : Champ électrique devant une antenne Ion Cyclotron de WEST calculé par une méthode « full-wave ».

arcs électriques. Selon les conditions, ces phénomènes peuvent être provoqués par des effets de résonances entre la trajectoire des électrons accélérés par le champ électrique RF et la génération de nouveaux électrons par les matériaux (effet Multipactor), par l'effet du champ électrique ou par l'ionisation des molécules localement désorbées par les parois (effet Corona).

Les défis des derniers centimètres

L'extension toroïdale typique d'une antenne IC ou d'un guide d'onde LH est bien en dessous de la longueur d'onde dans le vide à ces fréquences. Une difficulté supplémentaire apparaît alors : une partie significative du spectre des ondes planes excitée par l'antenne ne peut pas se propager dans le vide en direction du plasma. Le problème persiste tant que la densité des électrons au bord du plasma n'est pas suffisante, une densité dite « critique ». Pour limiter cela, les antennes doivent donc être positionnées au plus proche de cette densité critique, pour minimiser la distance entre les éléments rayonnants et la zone du plasma où les ondes vont pouvoir s'y propager. Il s'agit d'une contrainte opérationnelle majeure. L'optimisation de la distance entre une antenne et le plasma résulte souvent d'un

compromis entre la minimisation des interactions entre le plasma et les matériaux de l'antenne (cf. **Sciences en Fusion n°3 - Interfaces**) et la maximisation de la puissance couplée, tout en essayant de minimiser les perturbations liées aux interactions inévitables entre antennes.

Le système EC n'est pas concerné par cette densité critique au bord du plasma car le diamètre du faisceau lancé est de plusieurs longueurs d'ondes dans le vide. À ces hautes fréquences, les ondes suivent un comportement proche des lois de l'optique géométrique et leur propagation dans le plasma va dépendre de leur polarisation. Si le champ électrique est parallèle au champ magnétique, les électrons se déplacent sans ressentir le champ magnétique appliqué, on parle alors du mode de propagation « Ordinaire ». Pour optimiser et contrôler l'absorption et la zone de dépôt de l'énergie, il est nécessaire de maîtriser l'orientation du faisceau dans toutes les directions. Il faut donc un jeu de miroirs qui préserve l'orientation de la polarisation de l'onde injectée. Si pour les antennes EC l'injection de la puissance par des miroirs réfléchissant les faisceaux d'ondes RF est plus simple, les propriétés fluctuantes du plasma peuvent toutefois entraîner des dégradations du faisceau induisant une baisse

d'efficacité de ce type de chauffage (cf. article #2 **Propagation et absorption des ondes**). Pour la gamme de fréquence autour de 100 GHz, les fluctuations du bord du plasma vont induire un élargissement du faisceau injecté et une imprécision sur la zone de dépôt de l'énergie. Une perte de polarisation est aussi possible lors de la traversée d'un plasma fortement fluctuant, pouvant induire une perte d'efficacité de ce type de chauffage, voir des réflexions parasites pouvant détériorer des éléments de la machine ou perturber le fonctionnement de diagnostics.

La modélisation du couplage

Les caractéristiques des ondes injectées par les antennes dans le plasma sont nécessaires pour l'étude de leur propagation et de leur absorption. Elles résultent du couplage entre l'antenne et le plasma, qui dépend de la structure de l'antenne et de la façon dont sont conçus les éléments actifs de l'antenne. Lorsqu'ils sont actifs, les courants RF sur les éléments rayonnants induisent des courants RF sur les autres parties de l'antenne, qui eux-mêmes rétroagissent sur les courants émetteurs. C'est la distribution des courants sur toute la structure d'antenne et son environnement, y compris le plasma, qui va déterminer les propriétés du rayonnement émis dans le plasma.

À l'énumération des mécanismes rétroactifs couplés mis en jeu, la prévision du comportement d'une antenne est un enjeu majeur de sa conception. La physique du couplage des antennes au plasma est aujourd'hui bien maîtrisée. Des modèles idéalisés des antennes et du plasma permettent d'obtenir rapidement des prédictions pertinentes de l'efficacité de couplage. À une condition toutefois : que les caractéristiques du plasma (profil de densité, position par rapport

aux antennes, forme) soient également bien connues, ce qui n'est pas toujours le cas. De nos jours, l'augmentation de la mémoire et de la puissance de calcul des ordinateurs permet de modéliser de manière beaucoup plus réaliste la géométrie des antennes ainsi que celle du plasma, avec des logiciels du commerce. Toutefois, certaines conditions spécifiques du plasma de bord peuvent poser des difficultés de résolution numériques. Toutes ces prédictions permettent d'itérer plus facilement lors de leurs conceptions et d'améliorer les performances de couplage des antennes.

Interactions non-linéaires des ondes avec le plasma de bord

Le plasma face aux antennes une fois connu, et sa réponse aux champs électriques RF une fois linéarisée via un tenseur diélectrique, le couplage d'ondes relève de l'électrodynamique linéaire dans un milieu un peu particulier. L'expérience révèle toutefois que les champs proches émis, parce qu'ils sont intenses, sont susceptibles de modifier l'environnement plasma au voisinage des antennes. Ce changement peut à son tour rétro-agir sur la propagation de l'onde émise. L'interaction onde-plasma devient dès lors non-linéaire : elle requiert d'intégrer, de manière auto-cohérente,

l'électrodynamique à d'autres phénomènes physiques dans le plasma périphérique. On observe une grande variété d'interactions non-linéaires dans les machines de fusion magnétique. Elles ont des conséquences pratiques sur la conception et la mise en œuvre des systèmes de chauffage. C'est pourquoi elles font l'objet de recherches actives, mêlant étroitement théorie, simulation, technologie et expériences, y compris avec des moyens de mesure dédiés.

Par le même mécanisme qui engendre du courant dans le plasma central (cf. article #3 Réponse du plasma aux ondes), le champ électrique de l'onde LH accélère des électrons périphériques parallèlement au champ magnétique de confinement. Ces faisceaux d'électrons énergétiques, de taille centimétrique, sont très efficaces pour ioniser le gaz résiduel. Cela contribue à augmenter la densité plasma devant les grilles LH, facilitant ainsi le couplage de l'onde.

On peut exacerber volontairement ce processus en injectant localement du gaz près des coupleurs [3]. Il convient toutefois de bien doser le débit : par avalanche, on multiplie les électrons rapides et le flux de chaleur qu'ils portent, qui peut atteindre localement plusieurs MW/m² et endommager les objets avec lesquels

ils interagissent (cf. **Sciences en Fusion n°3 - Interfaces**). Le champ électrique généré par les antennes IC ou EC peut également ioniser le gaz près des antennes. Cela peut faciliter l'amorçage de la décharge plasma (cf. article #3 Réponse du plasma aux ondes), effet particulièrement utile dans les machines dont le solénoïde central est supra-conducteur ou sur des stellarators.

Une particule-test, initialement immobile, soumise à un champ RF faible et homogène, oscille en première approximation autour de sa position de repos. En présence de champs électriques intenses et inhomogènes, les effets de l'onde, cumulés sur un grand nombre de périodes RF, poussent la particule hors des zones de champ intense. On modélise cet effet par une force dite « pondéromotrice », dirigée de façon opposée au gradient d'intensité du champ comme le ferait un gradient de pression. En plasma magnétisé, la gyration des particules chargées complexifie ces effets pondéromoteurs. En compétition avec l'ionisation mentionnée précédemment, ils tendent à réduire la densité autour des antennes de chauffage, rendant le couplage d'onde plus difficile lorsqu'on émet plus de puissance [4]. À l'intérieur des structures d'antenne, les effets pondéromoteurs peuvent être bénéfiques en expulsant le plasma, qui pourrait sans cela y créer des arcs.

L'effet pondéromoteur est un cas particulier d'interaction non-linéaire, où l'onde émise se couple à des oscillations naturelles du plasma pour engendrer une onde fille. Ce processus, appelé instabilité « paramétrique », dévie une partie de la puissance émise vers l'onde fille. Il peut également modifier le spectre du champ émis, donc sa propagation et son dépôt dans le plasma central.

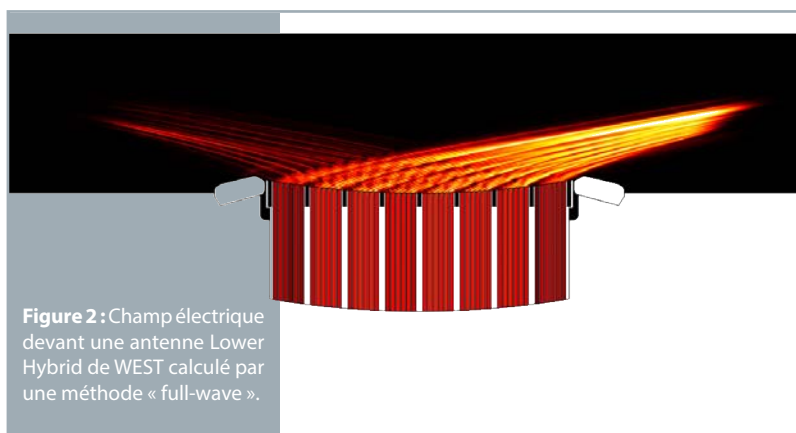


Figure 2 : Champ électrique devant une antenne Lower Hybrid de WEST calculé par une méthode « full-wave ».

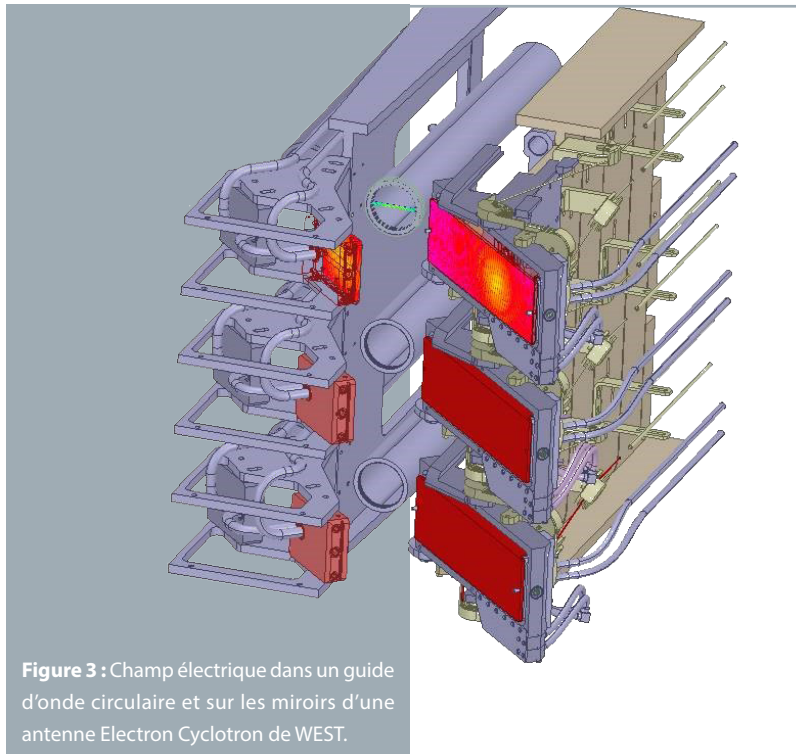


Figure 3 : Champ électrique dans un guide d'onde circulaire et sur les miroirs d'une antenne Electron Cyclotron de WEST.

contrôler, surtout sur des plasmas de longue durée dans des machines à parois métalliques de numéro atomique élevé comme le tungstène. WEST déploie un effort particulier à la maîtrise des échauffements sur ses antennes, par l'analyse en temps réel d'images de thermographie infrarouge (**cf. Sciences en Fusion #3 - Interfaces**). Le contrôle devient plus complexe si on combine plusieurs systèmes de chauffage pour les besoins d'un scénario. Ces interactions diminuent en intensité lorsque le plasma près de l'antenne devient plus ténu. Les réduire demanderait donc d'éloigner les antennes des couches de coupure caractéristiques, ce qui rend plus difficile le couplage d'ondes. Des compromis opérationnels doivent donc être trouvés entre ces contraintes contradictoires. La tâche est d'autant plus facile si les antennes sont intrinsèquement conçues pour émettre efficacement la puissance RF depuis une grande distance, et si elles autorisent des réglages électriques optimaux vis à vis de ces interactions. Ceci sans compromettre les missions premières de l'antenne : lancer un maximum de puissance, avec des caractéristiques d'onde permettant leur bonne absorption au bon endroit dans le plasma central. C'est ce vers quoi tendent les machines futures (**cf article #7 Et demain ? Les ondes pour ITER et les centrales fusion**). ■

Dans les machines actuelles, les antennes de chauffage constituent un obstacle matériel qui intercepte les lignes du champ magnétique de confinement. À cette interface plasma-paroi se forme naturellement une fine couche limite chargée électriquement, la gaine électrostatique, pour équilibrer les flux de particules chargés vers le mur. Les ondes IC font osciller cette zone de séparation de charges. La réponse non-linéaire du plasma, pour maintenir son électro-neutralité, est une auto-polarisation locale du fait de la différence de mobilité des espèces chargées [5].

En général, cela accélère les ions venant frapper le mur. De plus, l'inhomogénéité de l'auto-polarisation engendre des mouvements convectifs du plasma et une circulation de courants électriques. Plusieurs expériences récentes, sur différentes machines, ont montré qu'un réglage optimal des rapports de courant RF (amplitude et phase) entre les straps adjacents de l'antenne ainsi que de la forme de l'antenne elle-même, permettent de réduire cette auto-polarisation.

Bénéfiques ou délétères, ces interactions non-linéaires onde-plasma sont généralement délicates à

RÉFÉRENCES

- [1] J. Hillairet, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **50**, 125010, (2010) doi 10.1088/0029-5515/50/12/125010.
- [2] J. Jacquot, *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **55**, 115004 (2013) doi 10.1088/0741-3335/55/11/115004.
- [3] A. Ekedahl, *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **54**, 074004 (2012) doi 10.1088/0741-3335/54/7/074004.
- [4] M. Preynas, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **53**, 013012 (2013) doi 10.1088/0029-5515/53/1/013012.
- [5] L. Colas, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **62**, 016014 (2022) doi 10.1088/1741-4326/ac35f9.

TUBES ÉLECTRONIQUES : DU POSTE À GALÈNE À LA FUSION

PAR
LENA DELPECH
JULIEN HILLAIRET
PATRICK MOLLARD
XAVIER REGAL-MEZIN

Tout a commencé à la fin du XIX^e siècle lorsque le physicien allemand Heinrich Hertz découvre expérimentalement les ondes électromagnétiques prédites une dizaine d'années plus tôt par James Clerk Maxwell. Heinrich Hertz n'a cependant pas conscience de la portée de sa découverte et des applications qui en découleront... dont la fusion.

#5

#5

TUBES ÉLECTRONIQUES : DU POSTE À GALÈNE À LA FUSION

Les origines : les tubes à vide

Les ondes électromagnétiques peuvent transporter, sans fil et sur de longues distances, de l'énergie générée par un émetteur. Cette énergie peut être captée à distance par un récepteur. Décrites comme cela, leurs applications deviennent évidentes : des signaux seront transmis par des émetteurs et captés par des récepteurs, comme la radio, la télévision terrestre ou par satellite, la téléphonie sans fil, la commande de votre portail électrique et bien d'autres encore. Si tous ces systèmes sont utilisés de nos jours sans que nous y prêtions attention, ils sont le résultat d'une longue série d'évolutions technologiques qui ont permis d'augmenter la puissance des émetteurs radiofréquence et la sensibilité des récepteurs. Tout s'accélère à l'aube du XX^e siècle quand de nombreux inventeurs comme Thomas Edi-

son ou John Ambrose Fleming inventent *les tubes à vide* (ou *tubes électroniques*). Le principe : des électrons, produits par l'**émission thermo-ionique** émis par un filament chauffé par le passage d'un courant (la cathode), vont être attirés par une plaque métallique (l'**anode**) située à l'intérieur d'un tube sous vide. Soumis à un potentiel électrique positif, l'anode attire et accélère les électrons et un courant circule alors de la **cathode** vers l'anode. Les électrons ne peuvent pas passer dans le sens inverse, le courant ne peut donc passer que dans une seule direction : c'est une diode.

En ajoutant une électrode intermédiaire, appelée *grille*, située entre la cathode et l'anode, on obtient le premier composant électronique amplificateur : *la triode*. En modulant la tension appliquée sur la grille par rapport à la cathode à une fréquence **RF**, on crée un courant RF variable entre cathode et anode. En chargeant l'anode par une résistance, on transforme ce courant variable en tension variable : l'amplification du signal RF est réalisée.

Toutefois, les non-linéarités et la forte dépendance du courant d'anode à la tension d'anode donnent aux triodes une tendance naturelle à osciller en raison de la capacité que forme le couple grille-anode. Elle fut rapidement améliorée par l'adjonction d'une autre grille intermédiaire pola-

risée à une tension de l'ordre de quelques pourcents de celui de l'anode, réduisant cette capacité nuisible : c'est la tétrode (**figure 1**).

De la radiodiffusion à la fusion

L'invention des tubes électroniques permit à la fois d'augmenter la puissance des émetteurs à des centaines de kilowatts ainsi que la sensibilité des récepteurs. En parallèle, les progrès réalisés sur les antennes permettent d'allonger les distances de transmission. Plus de puissance, c'est aussi porter son message plus loin. C'est ainsi que la course à la puissance est lancée.

Les tubes à vide vont être utilisés dans tous les systèmes électroniques, avant d'être progressivement remplacés par des composants plus petits et moins chers, les transistors et leurs dérivés. Si les transistors permettent une miniaturisation et une fiabilité bien supérieures aux tubes, ces derniers restent toujours utilisés pour des applications spécifiques comme les amplificateurs audio haut de gamme, et surtout pour les applications de « très » fortes puissances comme pour les fours à micro-ondes, les applications industrielles (cuisson des aliments, microélectronique, etc.), des émetteurs de radiodiffusion et de télévision et... la fusion.

Car du côté du monde de la fusion, on comprend dès les années 60 que les ondes radiofréquences peuvent être des outils pour chauffer les plasmas (cf. articles **#2 Propagation et absorption des ondes** et **#3 Réponse du plasma aux ondes**) [1]. Profitant des progrès réalisés autour des sources de puissance existantes pour la radiodiffusion, les chercheurs développent les antennes adéquates, dont les propriétés dépendent de la gamme de fréquence utilisée (cf. article **#1 Les ondes électroma-**

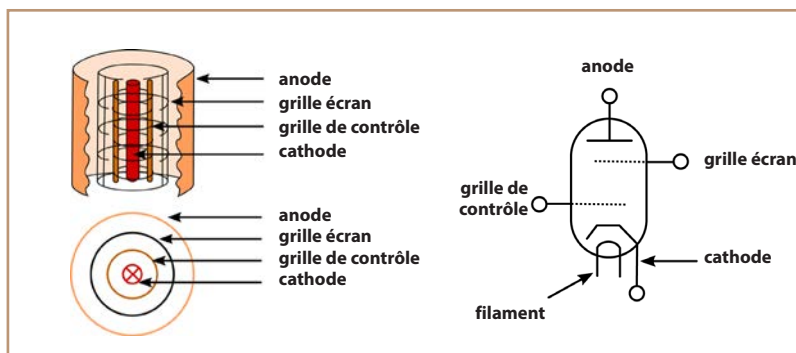


Figure 1 : Schéma de principe d'une tétrode.

gnétiques : des outils pour les plasmas de fusion). La puissance n'est plus uniquement destinée à être captée par des récepteurs distants de dizaines, centaines ou milliers de kilomètres, mais aussi par un plasma distant de quelques centimètres, ce qui induit d'autres défis (cf. article #4 **Antenne et couplage des ondes au plasma**).

Encore aujourd'hui, dans la gamme des mégahertz (MHz), les tétrodes (et leurs variantes les **diacrodes**) sont au cœur des générateurs de puissance RF de tous les systèmes IC du monde, pour le tokamak WEST bien sûr, mais également JET, EAST ou ITER, afin d'utiliser les phénomènes de **résonances cyclotroniques ioniques** dans le plasma. Pour des fréquences supérieures (longueurs d'onde inférieures), les capacités inter-électrodes sont par construction trop élevées pour que le tube fonctionne. Des tubes de conceptions différentes doivent alors être utilisés.

Toujours plus loin, toujours plus haut (en fréquence)

Jusqu'à la première guerre mondiale, l'Angleterre est relativement protégée des envahisseurs du fait de son insularité. La seconde guerre mondiale change la donne car l'île est désormais à la portée des raids des engins volants ennemis. Le ministère de l'air identifie trois problèmes majeurs à résoudre : détecter les attaquants, les localiser pour contre-attaquer et les détruire avant qu'ils atteignent leurs cibles. Une prime de 1000£ (100 000 € d'aujourd'hui) sera offerte à quiconque développera un « rayon de la mort » permettant de répondre au dernier problème. C'est en se penchant sur la question que des spécialistes de radiocommunication vont en réalité résoudre le premier problème : détecter. En écoutant

l'écho issu de la réflexion d'ondes électromagnétiques sur les objets à détecter, on pourrait « radio-détecter » : le **RADAR** est né. Une démonstration réalisée avec les émetteurs de la BBC valide le principe et rapidement des émetteurs et des antennes entre 11 et 30 MHz seront mis en service, avec des précisions sur la localisation de l'ordre de... 160 km (suffisante pour lancer l'alerte). Pour évaluer plus précisément la position de l'ennemi, il était nécessaire d'utiliser des sources de puissances RF pulsées et de plus haute fréquence, qui n'existaient tout simplement pas. C'est grâce à la découverte américaine du magnétron (dont le descendant équipe votre four micro-ondes !) et sa production en millions d'exemplaires que les performances du RADAR anglais augmentent. C'est durant cette période et dans les années qui suivirent qu'est acquis l'essentiel des connaissances théoriques sur la production et la propagation des ondes RF. Et en particulier : le **klystron**.

Le klystron est un type de tube électronique, inventé en 1937 par les ingénieurs électriciens américains Russell et Sigurd VARIAN. Utilisés d'abord comme transmetteur haute fréquence pour permettre aux avions de se poser uniquement grâce aux instruments embarqués, ils servirent principalement après la seconde guerre mondiale comme amplificateurs pour les RADAR et la communication TV. Aujourd'hui, ils restent utilisés pour des applications militaires, industrielles ou scientifiques notamment en fusion [2].

Dans un klystron, un faisceau d'électrons émis par une cathode chauffée par un filament est accéléré par une tension appliquée sur l'anode. Ce faisceau, focalisé grâce à des aimants, interagit ensuite avec des ondes RF lorsqu'il traverse des cavités résonnantes (ou cavi-

tés d'accord), des « boîtes » métalliques situées le long d'un tube (**figure 2**). Le faisceau d'électrons traverse d'abord une cavité d'entrée dans laquelle le signal basse puissance à la fréquence souhaitée est appliqué. Les interactions entre les ondes RF et le faisceau d'électrons amplifient alors le signal RF d'entrée qui est extrait par la cavité de sortie avant le collecteur, là où le faisceau d'électron résiduel vient se dissiper. La puissance RF en sortie passe à travers une ou plusieurs fenêtres, des disques en céramique (Oxyde de Béryllium sur les klystrons utilisés sur WEST) relativement transparents aux ondes RF, qui permettent de faire l'étanchéité entre le vide interne du tube et l'azote sous pression dans les guides d'ondes rectangulaires des lignes de transmission. Le gain des klystrons (Puissance RF de sortie/Puissance RF d'entrée) peut être élevé, typiquement d'un facteur d'un million, avec une bande passante étroite mais le rendement de ces tubes (Puissance RF/Puissance électrique) reste inférieur à 50%. Avec le besoin de tubes électroniques qui sont capables de fournir une puissance RF élevée (de l'ordre de 1 MW soit l'équivalent de 1000 fours à micro-ondes) sur des temps longs (1000 s pour les klystrons de WEST) des progrès constants sont réalisés pour refroidir les tubes et essayer d'augmenter leur rendement.

Sur Tore Supra (puis sur WEST), 16 klystrons à 3.7 GHz (+/- 2.5 MHz) ont alimenté plusieurs générations d'antennes successives. Ces klystrons ont été remplacés de 2009 à 2012 par des modèles plus puissants et surtout capables de tirer en quasi-continu (700kW/1000s). La taille des cavités d'un klystron étant proportionnelle à la longueur d'onde, les dimensions des structures d'interaction diminuent lorsque la fréquence augmente. À 100 GHz, la taille de la cavité est réduite d'un facteur ~100, ce qui

pose des problèmes de dissipation car la densité de puissance est trop forte. Encore une fois, une autre technologie est nécessaire pour augmenter la fréquence...

Vers des fréquences toujours plus élevées : les gyrotrons

Développés à la fin des années 50 simultanément par des scientifiques russes, australiens et américains, les gyrotrons sont une évolution des « masers » (pour *microwave amplification by stimulated emission of radiation*), des dispositifs permettant d'émettre un faisceau cohérent de micro-ondes et qui sont les prédécesseurs des lasers (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Contrairement aux tétrodes et aux klystrons qui sont des amplificateurs, les gyrotrons sont des oscillateurs (des sources). Ils utilisent la **résonance cyclotronique électronique**, c'est-à-dire l'interaction entre des ondes électromagnétiques et des électrons dans un

champ magnétique.

Sur le même principe qu'un klystron, le gyrotron (**figure 3**) émet un faisceau d'électrons grâce à une cathode rendue émissive par un filament chauffé. Ce faisceau est accéléré par une anode à haute tension. Le faisceau d'électrons traverse ensuite une grande cavité radiofréquence tubulaire, en présence d'un fort champ magnétique axial créé par un aimant supraconducteur. Le champ magnétique amène les électrons à se déplacer de manière hélicoïdale en cercles serrés autour des lignes de champ magnétique lorsqu'ils se déplacent dans le sens de la longueur à travers le tube. À l'endroit du tube où le champ magnétique atteint son maximum (dans la cavité du gyrotron), les électrons émettent des ondes électromagnétiques, parallèles à l'axe du tube, à leur fréquence de résonance cyclotronique. Le rayonnement millimétrique forme des ondes stationnaires dans le tube,

nante à extrémité ouverte, et qui génère alors un faisceau. Ce faisceau est converti par un convertisseur de mode qui transmet la puissance (faisceau gaussien) par réflexion sur des miroirs. Le dernier miroir dirige alors le faisceau au centre d'une fenêtre appelée fenêtre de sortie qui permet de transmettre la puissance vers une boîte à miroirs d'adaptation et ensuite vers une ligne de transmission qui transmettra la puissance jusqu'à la chambre à vide de la machine. À ces fréquences élevées (> 50 GHz), et compte tenu des puissances mise en jeu pour les gyrotrons pour les machines de fusion, la fenêtre de sortie du gyrotron est faite en diamant de synthèse, car il possède une très grande conductivité thermique tout en étant transparent aux ondes RF. Comme pour les klystrons, l'énergie cinétique résiduelle du faisceau d'électrons est absorbé par un collecteur situé à l'extrémité du tube.

Les recherches et développements sur les gyrotrons sont historiquement associées aux recherches sur la fusion, qui nécessitent des sources de très forte puissance (mégawatts) à plusieurs dizaines jusqu'à la centaine de GHz, pour utiliser la résonance cyclotronique dans les plasmas magnétisés (articles **#2 Propagation et absorption des ondes** et **#3 Réponse du plasma aux ondes**). Les laboratoires de recherche s'emploient à améliorer le rendement des gyrotrons. En 2023, des gyrotrons fonctionnent en continu avec des puissances de 1 MW pour des fréquences de 170 GHz, pour ITER (cf. article **#7 Et demain ? Les ondes pour ITER et les centrales fusion**).

Limites actuelles... et futures

Les générateurs de puissance RF utilisant des tétrodes ont le principal avantage d'être des systèmes

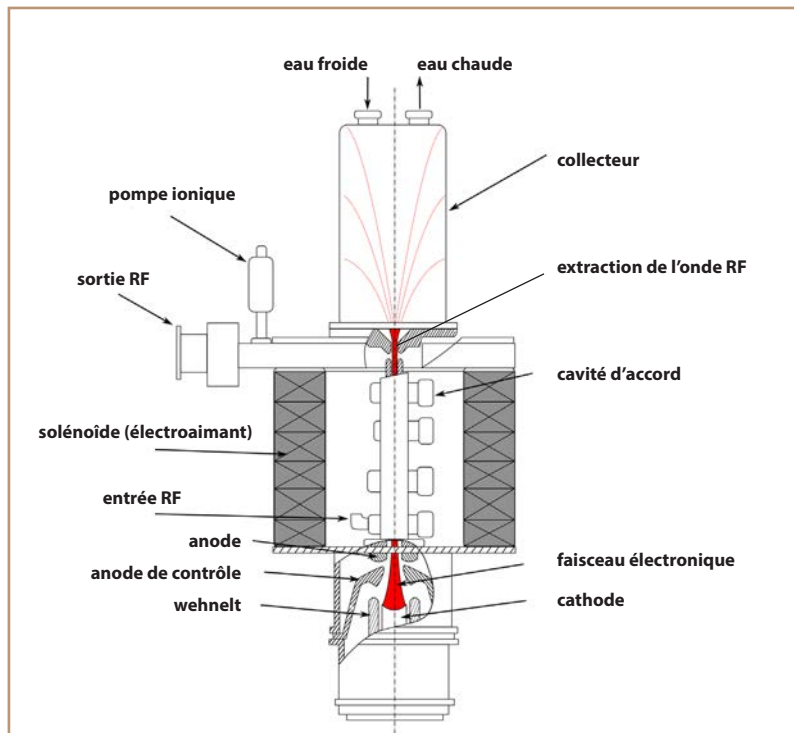


Figure 2 : Schéma de principe d'un klystron.

matures, en raison de leur longue histoire et de leur développement en tant qu'émetteurs de radiodiffusion. Capables aujourd'hui de fonctionner dans l'ordre de 2 MW en régime permanent, ils ont un rendement énergétique de l'ordre de 70%, relativement élevé en comparaison avec d'autres types de tubes à ces niveaux de puissance.

Cependant, l'utilisation de fréquences RF inférieures (ex : IC ou LH) pose des difficultés en terme de couplage de la puissance au plasma (cf. article #4 **Antenne et couplage des ondes au plasma**). Dans l'optique d'une centrale de fusion, la tendance est donc à l'utilisation de très hautes fréquences pour des systèmes EC et donc de gyrotrons. En 2023, de nombreux laboratoires en Europe, en Chine, en Corée et sur ITER font le pari d'utiliser les gyrotrons comme source de chauffage principal du plasma. Le défi pour les industriels est d'accompagner cette demande et de passer de la fabrication et du tests de deux gyrotrons par an à plus d'une dizaine. Les laboratoires quant à eux doivent former une génération d'ingénieurs et de techniciens pour pouvoir démarrer et faire fonctionner ces systèmes complexes. Des développements autour des composants des lignes de transmission sont également nécessaires et les industriels devront rendre ces composants plus accessibles.

Enfin, l'approche consistant à réaliser des machines utilisant des champs magnétiques plus élevés

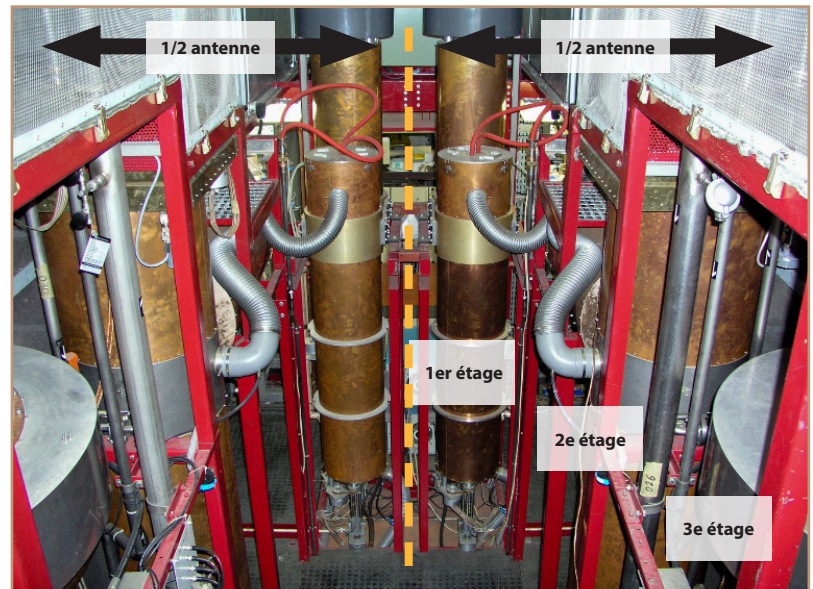
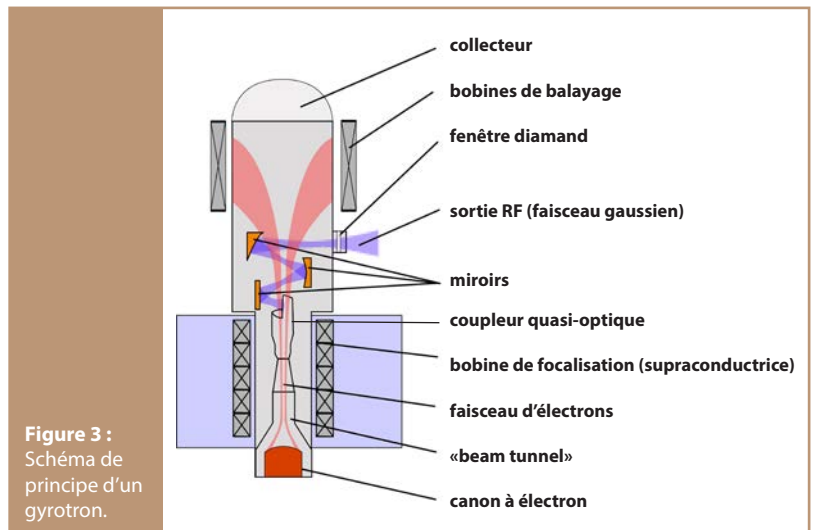


Figure 4 : Aperçu des générateurs (tétrodes) alimentant une antenne ICRH de WEST.

grâce à des aimants supraconducteurs dits à haute-température, nécessite d'augmenter la fréquence RF d'autant. Si des sources d'un mégawatt à 170 GHz sont aujourd'hui disponibles, ce n'est

pas le cas pour des fréquences de l'ordre de plusieurs centaines de gigahertz. Des développements importants seront donc nécessaires pour pouvoir utiliser le chauffage EC sur ces machines. ■

RÉFÉRENCES

[1] **T. H. STIX**, *Waves in plasmas*. Springer Science & Business Media, ISBN 0883188597,9780883188590, (1992).

[2] **T. LEMOINE**, *Tubes électroniques hyperfréquences - technologies, tubes à grille et klystrons*. Techniques de l'ingénieur, E1620v1 (2008).

LES MICRO-ONDES POUR LA MESURE

PAR
ROLAND SABOT
LAURE VERMARE
FRÉDÉRIC CLAIRET
SAMUELE MAZZI

Pour contrôler et caractériser un plasma de fusion magnétique, il faut mesurer de nombreux paramètres. Impossible pourtant de plonger un instrument de mesure dans le cœur du plasma, la chaleur le détruirait instantanément. Pour sonder le plasma, on utilise donc des ondes électromagnétiques.

#6

#6

LES MICRO-ONDES POUR LA MESURE

Des ondes radiofréquences pour mesurer au cœur du plasma

La mesure peut être « passive » en mesurant l'émission directe du plasma ou « active » en émettant une onde électromagnétique vers le plasma et en mesurant les propriétés de l'onde après son voyage dans celui-ci. Presque tout le spectre électromagnétique est exploité, depuis les ondes radio jusqu'au rayons X et gamma en passant par les lumières infrarouge et visible pour caractériser le plasma et remonter par exemple à sa température, sa densité, ou estimer le niveau de turbulence. Dans la gamme des ondes radiofréquences ou micro-ondes, plusieurs instruments de mesures sont installés sur les tokamaks. Ils utilisent les mêmes fréquences caractéristiques que les systèmes de chauffages présentés dans les articles précédents : **fréquences cyclotroniques** ou **fréquence plasma**, mais les phénomènes physiques sont différents. Les technologies utilisées sont aussi différentes car les puissances en jeu sont beaucoup plus faibles : de l'ordre de quelques dizaines de milliwatts pour les sources tandis que pour les signaux à détecter l'unité est le microwatt.

Radiométrie de l'émission cyclotronique électro- nique

Comme nous l'avons vu dans les articles précédents (cf. articles **#2 Propagation et absorption des ondes** et **#3 Réponse du plasma aux ondes**), les ondes jouent un rôle fondamental dans les plasmas magnétiquement confinés : elles sont émises, absorbées et sont les

médiateurs de plusieurs mécanismes physiques différents. Et si nous pouvions utiliser les ondes émises pour inspecter et analyser ce plasma complexe et impénétrable par des instruments de mesure ?

Dans les plasmas magnétisés, les électrons libres suivent les lignes du champ magnétique avec une trajectoire hélicoïdale, appelée

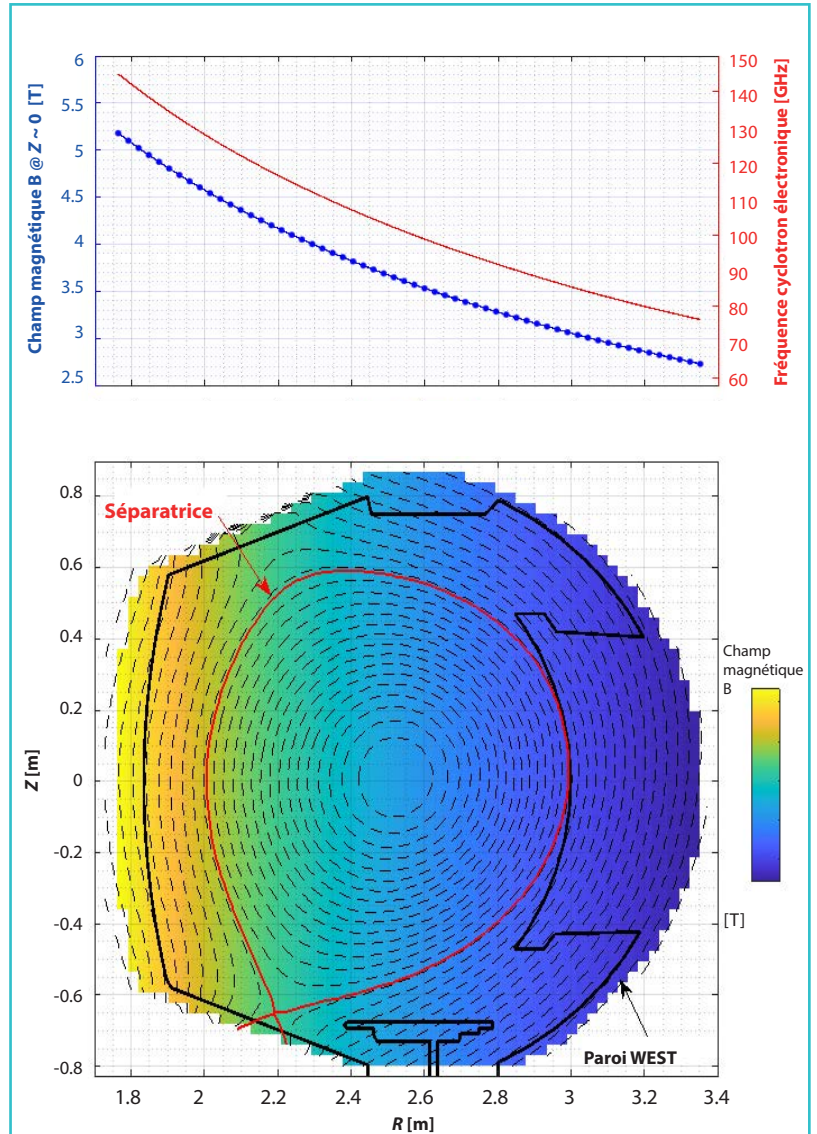


Figure 1 : Panneau supérieur : amplitude du champ magnétique à $Z \sim 0$ (en bleu) et fréquence de l'émission cyclotronique des électrons (en rouge) pour un choc représentatif de WEST le long du rayon R du tokamak.

Panneau inférieur : amplitude du champ magnétique pour une section poloidale du tokamak WEST avec les surfaces de flux magnétiques mises en évidence par les lignes pointillées, la frontière du plasma par la ligne rouge et la première paroi du WEST par la ligne noire.

mouvement cyclotronique. La fréquence caractéristique avec laquelle ils tournent autour de la ligne de champ, appelée fréquence cyclotronique, ne dépend que de la charge et de la masse des particules et de l'intensité du champ magnétique. Alors qu'elles tournent à de très grandes vitesses (jusqu'à des vitesses relativistes !), elles perdent leur énergie en émettant un rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est émis sous forme de micro-ondes à haute fréquence (dans la gamme des GHz).

En mesurant la fréquence de l'onde émise par les électrons, nous pouvons ainsi déduire l'intensité du champ magnétique à l'endroit de l'émission. Or dans un tokamak, l'intensité du champ magnétique diminue avec le grand rayon R , en première approximation en $1/R$ (cf. figure 1). On peut donc ainsi accéder à la localisation spatiale de l'émission.

La loi de Rayleigh-Jeans énonce que l'intensité du rayonnement d'un corps noir en équilibre thermodynamique est proportionnelle à la température de la distribution maxwellienne des électrons dans le corps noir. Bien que les plasmas de tokamak soient généralement des systèmes hors équilibre, la distribution des électrons peut être considérée en première approximation comme maxwellienne et appliquer la loi de Rayleigh-Jeans pour déduire la température électronique locale [1].

Des radiomètres pour mesurer la température des plasmas

Par conséquent, si nous pouvons mesurer avec suffisamment de précision l'intensité du rayonnement émis par les électrons dans nos plasmas de fusion, nous pourrions déterminer la température des électrons à différentes positions radiales (déterminées par

la fréquence de mesure comme expliqué ci-dessus). Cela nous permettra également de déterminer le profil de température le long de la ligne de visée du radiomètre, et donc de mieux comprendre la dynamique et l'évolution du plasma confiné. Dans le tokamak WEST, un radiomètre est installé et mesure l'intensité du rayonnement du plasma à ces hautes fréquences [2]. Une antenne spécifique peut collecter le rayonnement provenant du plasma avec une haute résolution spatiale et temporelle. Le temps d'acquisition est de 1 kHz, ce qui signifie que nous pouvons obtenir un profil de température des électrons toutes les millisecondes. Le signal recueilli est ensuite traité par une chaîne complexe de composants dans le radiomètre, ainsi que par des algorithmes pour la détermination de la température. Les principales étapes peuvent être résumées comme suit :

I) Afin d'utiliser des composants plus simples et moins coûteux, les signaux sont décalés de la fréquence d'émission cyclotron électronique typique de WEST (~100 GHz) vers les fréquences dites intermédiaires (~10 GHz) au moyen de filtres passe-haut et de mélangeurs avec des oscillateurs locaux. L'oscillateur local produit une fréquence fixe et connue, qui peut être combinée dans le mélangeur avec le signal mesuré pour ne conserver que la différence entre les signaux et réduire ainsi la gamme des fréquences traitées (radiomètre dit hétérodyne).

II) Après avoir été amplifié pour augmenter le rapport signal/bruit, le signal est divisé en 32 canaux régulièrement espacés de 1 GHz. Au cours de cette étape, l'intensité de chaque canal spécifique est ainsi isolée des autres et peut être traitée individuellement. Comme indiqué précédemment, la division du signal en canaux de fréquence

singuliers est fondamentale pour résoudre radialement le profil de température des électrons en attribuant une fréquence cyclotron électronique à une intensité de champ magnétique.

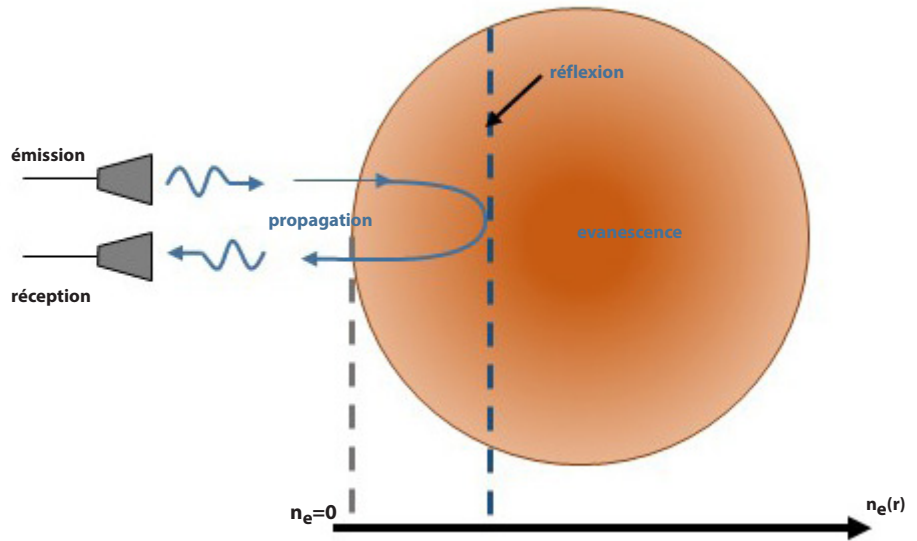
Les signaux, cependant, sont d'abord exprimés comme une tension en Volts. Il faut donc ensuite convertir ces signaux en température, généralement de l'ordre du kiloelectron-volt (keV). Un algorithme rapide - mais complet - a donc été développé pour transformer la tension du signal en températures. Essentiellement, nous pouvons associer l'intensité du signal à une température en étalonnant le radiomètre. Dans WEST, une technique d'étalonnage absolu est couramment employée, et elle utilise des micro-ondes précisément connues émises par une source d'un corps noir à la température de 600 °C.

Avec ce radiomètre hétérodyne, il a été possible de mesurer la température électronique du plasma en collectant et en traitant la gamme des GHz de la fréquence des micro-ondes associée au mouvement cyclotron électronique depuis plus de deux décennies sur Tore Supra puis sur WEST.

Un autre radiomètre est en opération sur WEST depuis 2023 pour mesurer les fluctuations de température dans une coupe verticale du plasma. Équivalent à 24 radiomètres superposés verticalement, ce diagnostic fournit une image de 196 pixels (8 rayons et 24 positions verticales) des fluctuations de température, mais ne fournit pas de mesure absolue de la température car il ne peut pas être étalonné. Il est dédié à l'étude des instabilités magnétohydrodynamique et de la turbulence [3].

Le radiomètre est un outil puissant qui est utilisé dans de nombreux autres domaines : par exemple, des radiomètres sont installés

Figure 3 : Propagation d'un faisceau micro-onde jusqu'à la couche de coupure.



sur des satellites pour la caractérisation des étoiles naissantes et des trous noirs massifs, ainsi que pour les mesures du rayonnement de fond cosmique ; de même, la présence et la distribution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, cruciales pour les prévisions météorologiques, sont mesurées à l'aide de radiomètres à micro-ondes.

Des difficultés silencieuses à surmonter

Malgré l'apparente simplicité de l'histoire qui vient d'être racontée, de nombreuses difficultés et questions sont cachées dans ces mesures de micro-ondes à haute fréquence. Même en mettant de côté les problèmes techniques liés à la précision et à la fiabilité de l'électronique à des fréquences aussi élevées, il reste le problème que les plasmas ne se comportent pas toujours comme des corps noirs. En effet, lorsque le plasma ne peut pas absorber la totalité des ondes émises, comme le fait un corps noir, ses radiations électromagnétiques peuvent se propager jusqu'à la paroi. Cela

se produit généralement dans la région du bord du plasma, où la densité est faible, et peut polluer les mesures d'émission cyclotron électronique. Par conséquent, dans la partie extérieure du plasma, les mesures de température par radiométrie ne sont pas toujours fiables et d'autres techniques de mesure sont utilisées pour obtenir un profil de température complet. De plus, des effets relativistes dus aux électrons accélérés par les systèmes de chauffage (comme le système LH) peuvent également polluer les mesures.

Mesure de la densité du plasma par réflectométrie micro-ondes

Lors de sa propagation dans un plasma, une onde électromagnétique va déplacer les électrons qui le constituent (les protons, beaucoup plus lourds, restent relativement immobiles). Cela crée ce que l'on appelle un **courant de conduction** auquel s'oppose un **courant de polarisation** constitué des charges environnantes. Lorsque ces deux courants sont

équivalents, l'onde ne peut plus se propager, elle n'a plus qu'à faire demi-tour par principe de conservation de l'énergie (l'onde n'est pas absorbée par le plasma). Il faut alors augmenter la fréquence de l'onde (l'énergie des photons) pour aller sonder des densités plus élevées, c'est à dire vers le centre du plasma.

Ainsi, dans un plasma non magnétisé, une onde électromagnétique ne peut se propager que si sa fréquence est supérieure à la fréquence plasma, qui est proportionnelle à la racine carrée de la densité d'électrons. Dans les plasmas de fusion, la densité électronique augmente en allant vers le centre du plasma. Une onde émise vers le plasma va ainsi pouvoir se propager dans la partie externe du plasma, jusqu'à ce qu'elle atteigne une couche où la fréquence de l'onde est égale à la fréquence plasma locale : l'onde est alors réfléchi (figure 3). La mesure de l'écho avec un réflectomètre, un instrument basé sur le principe du radar, permet de remonter à la position de la couche de réflexion, tandis que sa densité

est déterminée par la fréquence de l'onde. En augmentant la fréquence de l'onde, la couche de réflexion se déplace vers l'intérieur du plasma où la densité est plus élevée.

Dans un plasma magnétisé, la propagation des ondes électromagnétiques est modifiée. Lorsque le champ électrique de l'onde est parallèle au champ magnétique du tokamak (mode Ordinaire ou « O »), la fréquence de coupure est la fréquence plasma, comme dans un plasma non-magnétisé. Par contre, lorsque le champ électrique de l'onde est perpendiculaire au champ magnétique (mode extraordinaire ou « X »), la fréquence de coupure dépend à la fois de la densité et du champ magnétique. Cela permet la mesure des densités depuis le bord jusqu'au centre du plasma. C'est la polarisation utilisée pour la plupart des réflectomètres de WEST.

Les réflectomètres mesurant le profil de densité de WEST

La particularité de ces réflectomètres est qu'ils doivent balayer une très large bande de fréquence (de 25 jusqu'à 50 GHz) afin de sonder le plasma depuis le bord jusqu'au centre. Les premiers réflectomètres ont été développés dans les années 1980 sur les tokamaks français TFR et Pétula (Grenoble). Les mesures étaient toutefois très perturbées par la turbulence du plasma, car le temps de balayage était alors de l'ordre de la milliseconde, un temps bien plus grand que le temps caractéristique de la turbulence du plasma ($<10 \mu\text{s}$). En changeant de technologie, des tubes à vide (cf. article #5 Tubes électroniques : du poste à galène à la fusion) aux composants électroniques hyperfréquences, on a gagné en fiabilité et surtout réduit très

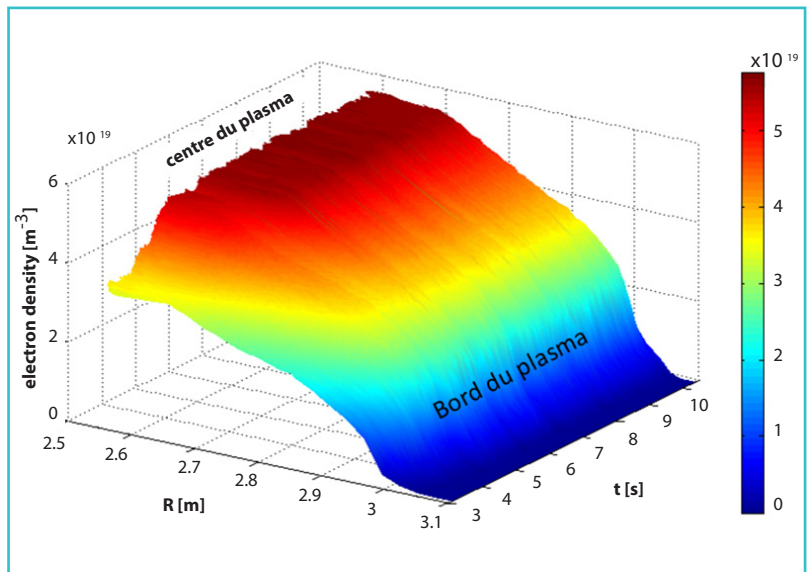


Figure 5 : Évolution temporelle du profil radial de densité mesuré par réflectométrie.

fortement le temps de balayage. L'originalité des réflectomètres de WEST est de faire une mesure complète du profil de densité en quelques microsecondes [4]. Ce temps ultra-court présente deux avantages: une réduction du bruit, à l'image d'une photo avec un très court temps de pose, car la turbulence est figée pendant la mesure, et une très bonne résolution temporelle qui permet l'étude des phénomènes rapides (turbulence, instabilités, etc.).

Trois réflectomètres de profils sont installés sur WEST : un

réflectomètre 50-110 GHz pour mesurer le profil au bord du plasma, un réflectomètre 105-155 GHz pour sonder le cœur du plasma et un réflectomètre pouvant être installé sur une antenne de chauffage (LH ou FCI) pour mesurer la densité juste devant l'antenne. Ils sont conçus à partir des éléments suivants : une source basse fréquence, un Modulateur à Bande Latérale Unique (MBLU) pour décaler la fréquence sonde, des multiplicateurs de fréquence et une détection hétérodyne. En combinant ces réflectomètres, on

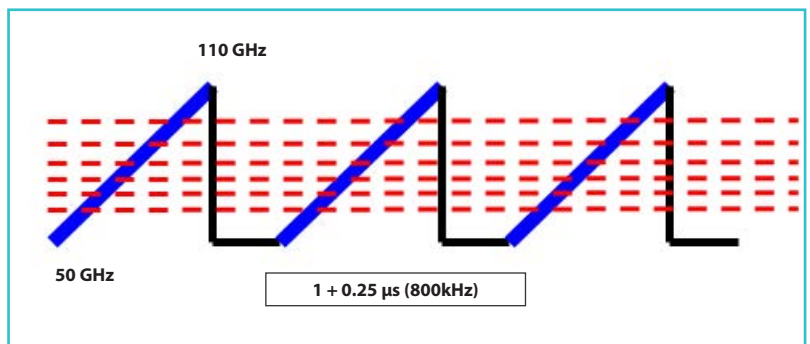


Figure 6 : Balayage en fréquence en $1 \mu\text{s}$ (traits bleus) qui permet le calcul d'un profil radial de densité avec un temps mort de $0.25 \mu\text{s}$ entre balayages (traits horizontaux noirs) qui confère une cadence de 800 kHz. Les traits pointillés rouges correspondent à l'analyse à fréquences fixes, donc à rayons plasma fixes, et qui permet le calcul des fluctuations avec une résolution radiale de l'ordre du millimètre. Profils de densité et de fluctuations sont ainsi calculés simultanément.

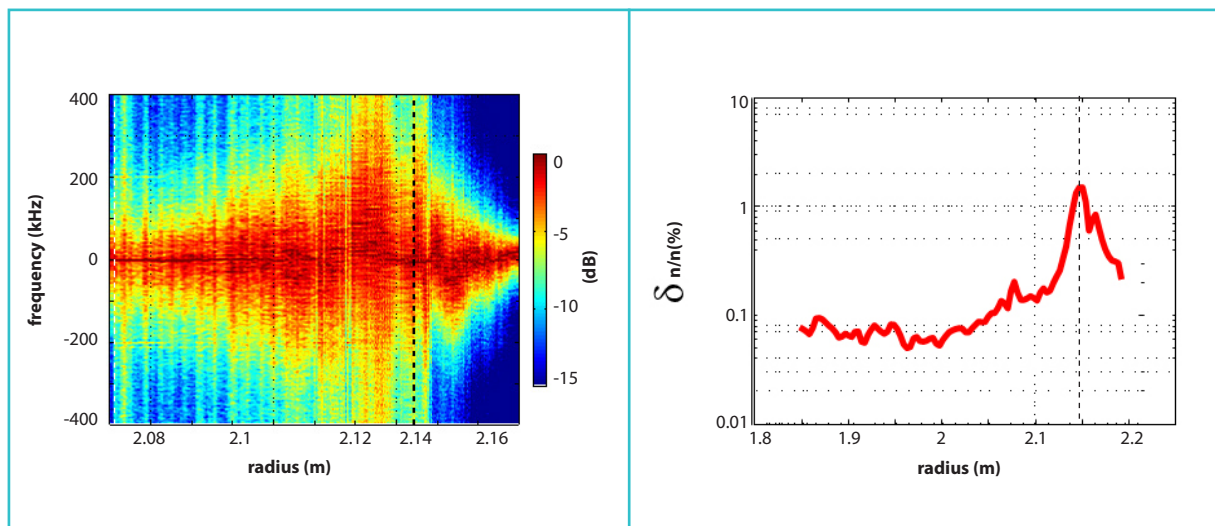


Figure 7 : A gauche, évolution radiale du spectre en fréquence des fluctuations de densité. Le trait pointillé correspond à la séparatrice. A droite, profil radial des fluctuations de densité. Mesures réalisées sur ASDEX-Upgrade

reconstruit le profil complet de densité depuis le bord jusqu'au centre (cf. figure 5).

Étude des perturbations de densité

La turbulence... vaste sujet d'étude et d'intérêt (cf. **Sciences en Fusion n°1 - Turbulence**). La turbulence peut être un bienfait lorsqu'elle qu'elle permet la dilution de phénomènes violents comme les ELMs, ces relaxations périodiques d'énergie au bord du plasma qui peuvent endommager sérieusement les parois d'un tokamak, mais elle peut aussi gravement altérer l'efficacité du confinement en augmentant substantiellement le transport de l'énergie et des particules hors du plasma. Bref, il y a de la bonne et de la mauvaise turbulence, souvent les deux à la fois. La turbulence se caractérise par son intensité (ou amplitude), sa taille (ou vecteur d'onde), sa dynamique (ou spectre en fréquence). Toutes ces grandeurs varient avec l'évolution des conditions plasma (densité, température, gradient locaux, puissance additionnelle etc.). On aimerait pouvoir les mesurer et nous allons voir qu'un

réflectomètre est un instrument de choix.

Au cours de sa propagation dans un milieu quelconque, comme par exemple un plasma, une onde électromagnétique peut être perturbée par des fluctuations de ce milieu. La mesure des fluctuations du plasma est réalisée par l'analyse des fluctuations de l'onde (sa phase et son amplitude) dans lesquelles elle s'y propage. Sur WEST nous possédons plusieurs réflectomètres (fréquence fixe, Doppler et balayage de fréquence) qui peuvent mesurer ces fluctuations. En particulier nous avons mis au point un réflectomètre ultra-rapide [4] capable de balayer en fréquence en 1 μ s (actuellement le plus rapide sur le marché) avec un temps mort entre balayages de 0.25 μ s soit une cadence de 800 kHz (figure 5).

On peut donc réaliser une mesure des spectres en fréquences des fluctuations entre + et - 400 kHz (le signe de ces fréquences correspond au décalage Doppler qui nous indique la direction du déplacement radial de la fluctuation) (figure 7 à gauche). C'est à partir de ces spectres que l'on

reconstruit le profil radial des fluctuations de densité (figure 7 à droite).

Accès aux écoulements du plasma

Souvent appelée « réflectométrie Doppler », la rétrodiffusion Doppler sonde le plasma avec une incidence oblique. Contrairement à la réflectométrie « classique », l'antenne de réception, située à la même localisation que celle d'émission, ne reçoit pas le signal réfléchi mais uniquement l'onde rétrodiffusée par le plasma. Cette technique permet une mesure directe de la transformée de Fourier spatiale des fluctuations de densité au vecteur d'onde sélectionné par la condition de rétro-diffusion, sélectionnant ainsi les fluctuations de densité par leurs échelles spatiales. Il est alors possible d'accéder à la répartition d'énergie de la turbulence en fonction des échelles spatiales [5]. Parallèlement, ce système donne, par effet Doppler, accès à la vitesse de des fluctuations de densité du plasma dans le référentiel du laboratoire souvent approximé comme la vitesse du plasma [6]. Sur le tokamak WEST, le système de

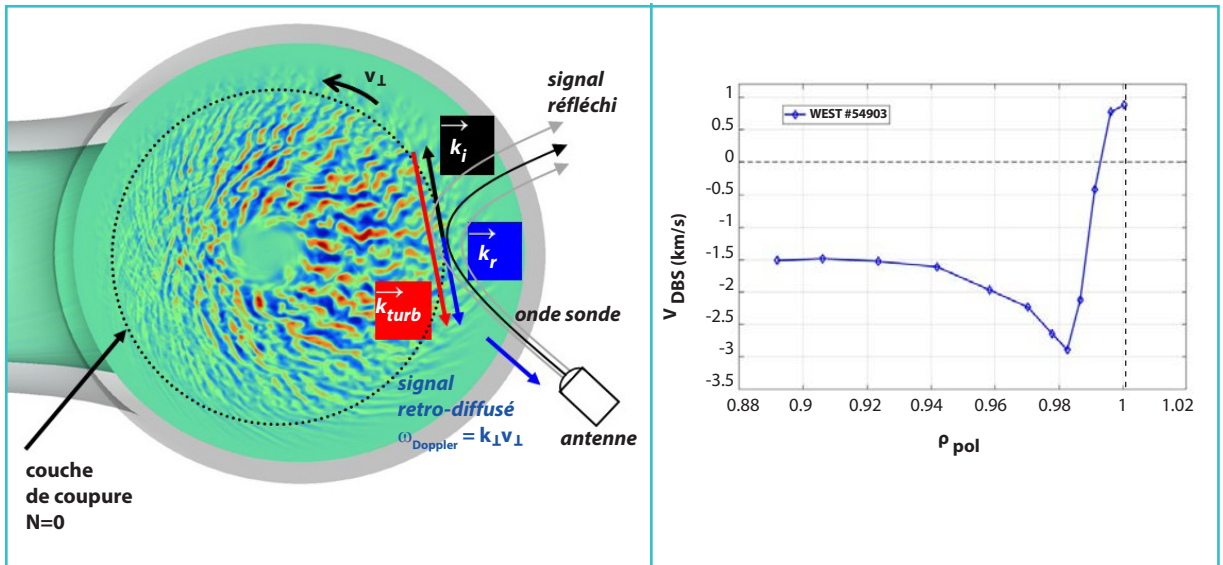


Figure 8 : A gauche, illustration du principe de la retro-diffusion Doppler d’une mesure en mode O dans une carte de turbulence issue d’une simulation numérique avec le code GYSELA (cf *Science en Fusion* n°4 - Simulations). A droite, exemple de profil radial de la vitesse mesuré par DBS dans un plasma de WEST.

rétro-diffusion Doppler développé [7] et exploité par le Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), est composé de deux canaux, une bande V en polarisation Ordinaire (mode-O) et une bande

W en polarisation extraordinaire (mode-X). Ces canaux permettant d’accéder respectivement au bord et à l’extrême bord du plasma sont largement exploités pour l’étude des écoulements du plasma et de

la dynamique de la turbulence dans le cadre de comparaisons avec la théorie et les simulations numériques (figure 8). ■

RÉFÉRENCES

- [1] G. Bekefi, *Radiation Processes in Plasmas*, J. Wiley and Sons, New York, 1966.
- [2] J.-L. Segui, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 123501 (2005) doi 10.1063/1.2140225.
- [3] R. Sabot, *et al.*, *Comptes Rendus Physique*, **17**, 1018-1026 (2016) doi 10.1016/j.crhy.2016.07.02.
- [4] F. Clairet, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 113506 (2017) doi 10.1063/1.4991789.
- [5] L. Vermare, *et al.*, *Comptes Rendus Physique*, **12** (2), 115-122 (2011) doi 10.1016/j.crhy.2010.11.003.
- [6] L. Vermare, *et al.*, *Phys. Plasmas*, **18** (1), 012306 (2011) doi 10.1063/1.3536648.
- [7] P. Hennequin, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **46** (9), S771 (2006) doi 10.1088/0029-5515/46/9/S12.

ET DEMAIN ? LES ONDES POUR ITER ET LES CENTRALES FUSION

PAR
JEAN-MICHEL BERNARD
NICOLAS FAURE
JULIEN HILLAIRET
VINCENT MAQUET (ERM)

L'histoire des recherches sur la fusion magnétique contient beaucoup d'idées et systèmes RF qui ont été souvent testés, et parfois restés dans les placards pour diverses raisons. Au fil des années, une sélection s'est naturellement faite, en fonction des performances obtenues, mais également des faisabilités techniques du moment. Les connaissances accumulées grâce aux expériences passées, aux progrès des modélisations ainsi qu'à l'arrivée de nouvelles méthodes de réalisation (comme la fabrication additive), permettent de revisiter des concepts parfois laissés de côté ou d'en imaginer de nouveaux qui n'étaient pas réalisables.

#7

#

ET DEMAIN ? LES ONDES POUR ITER ET LES CENTRALES FUSION

ITER : un changement d'échelle

En fusion, l'innovation est généralement antagoniste avec l'augmentation de la taille des machines, car réaliser un prototype coûte évidemment plus cher s'il est plus grand, s'il doit être plus puissant, activement refroidi, etc. Le plan de recherche d'ITER ayant nécessairement évolué au fil des ans grâce aux nouvelles connaissances acquises par l'ensemble des expériences de fusion magnétique, les exigences associées aux systèmes de chauffage et de génération de courant ont également changées. Ainsi, le système LH d'ITER, initialement prévu pour la seconde phase de la machine [1], a finalement été

supprimé en 2018, les simulations montrant que les scénarios continus (ou « steady-state ») pourraient être soutenus uniquement à partir d'une combinaison d'injection de particules neutres et d'ECRH [2]. En 2023, un nouveau mix des chauffages est proposé avec la révision de la feuille de route d'ITER. Ainsi, la puissance ECRH passera de 20 à 67 MW (soit de 24 à 80 gyrotrons) tandis qu'une antenne ICRH sur les deux initialement prévues disparaîtra, remplacée par une antenne ECRH.

Le système ICRH d'ITER, opérant de 40 à 55 MHz, exploitera une antenne conçue pour coupler au plasma une puissance de 10 MW (et jusqu'à 20 MW en cas d'amélioration des générateurs) et en quasi-continu (3600s). Cette antenne est alimentée par 8 lignes de transmission, longues d'environ 100 m, connectées à 4 sources, chacune constituée de 2 diacrodes (une évolution des tétrodes, (cf. article #5 Tubes électroniques : du poste à galène à la fusion)). En plus d'être conçu pour le chauffage du plasma, le système ICRH d'ITER permettra également de conditionner les parois de la machine en injectant de la puissance RF pour produire des plasmas de nettoyage

(wall conditioning). L'antenne ICRH d'ITER (figure 1), est organisée en 8 modules (2 rangées de 4 modules) possédant chacun 3 éléments rayonnants (straps), et utilise un système d'adaptation extérieur à l'antenne.

Le système de chauffage par résonance cyclotronique électronique d'ITER est alimenté par des gyrotrons de 1 MW à 170 GHz. La puissance RF est transmise aux antennes grâce à des guides d'ondes circulaires corrugués. Constitués de miroirs mobiles, la puissance est délivrée au plasma depuis quatre antennes situées en haut de la machine (figure 2) (pour la stabilisation du plasma) et deux antennes dans le plan équatorial (pour le chauffage).

Génération de courant : vers un tokamak utilisable en continu ?

Pour maintenir des plasmas sur de longues durées, les tokamaks doivent obligatoirement utiliser des moyens de génération de courant plasma dits non-inductifs, c'est-à-dire sans employer l'effet inductif en faisant varier le flux magnétique dans le solénoïde central. En régime continu, une proportion importante du courant plasma est auto-générée par le plasma lui-même, c'est l'effet de « bootstrap ». La proportion restante doit être générée par un système externe. Le système LH possède la meilleure efficacité de génération de courant pour les tokamaks actuels. Toutefois, lorsque la densité et la température du plasma augmentent pour atteindre les valeurs attendues dans une centrale de fusion ($2-3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ et quelques keV dans la région du piédestal), l'onde est absorbée à la périphérie du plasma [1]. Ainsi, selon les scénarios dits continus envisagés pour ITER, un système LH situé classiquement du côté faible champ de la machine ne permettrait que de

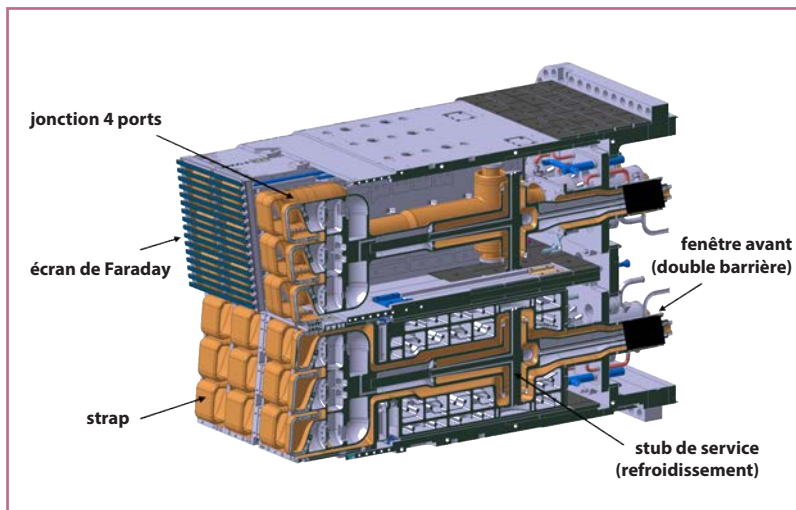


Figure 1 : Antenne ICRH d'ITER © ITER Organization.

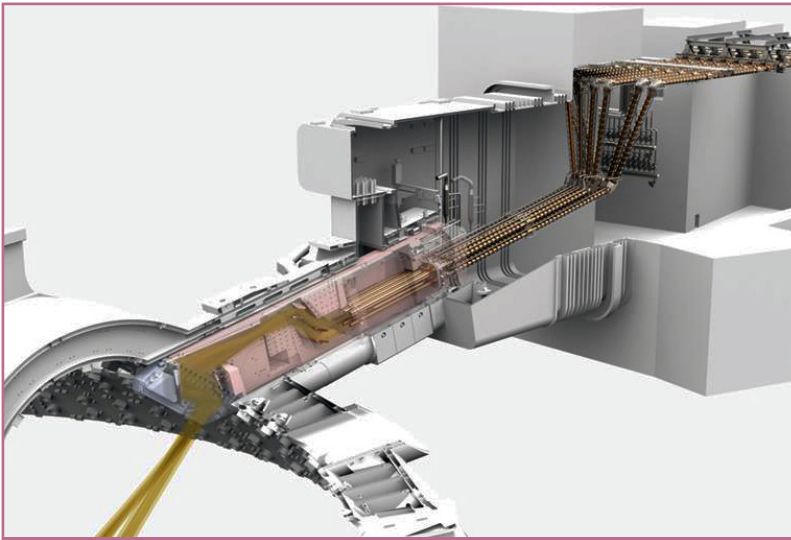


Figure 2 : Illustration d'une antenne ECRH (upper port) d'ITER et de ses lignes de transmission. © F4E.

générer un courant plasma relativement modeste et nettement en dehors de l'axe magnétique.

Toutefois, la situation pourrait être différente si l'antenne était placée du côté fort champ, c'est-à-dire sur la face intérieure du tokamak [3]. Les ondes LH injectées par ce côté le seraient dans une région où le

champ magnétique est plus élevé, ce qui favorise la propagation de l'onde vers les régions centrales du plasma, entraînant une efficacité de génération de courant accrue et un profil de courant déposé plus proche de l'axe magnétique (figure 3). De plus, le plasma de bord dans cette région est moins turbulent et les flux de chaleur et

de particules y sont moins importants. Le couplage de l'antenne au plasma y serait donc amélioré et l'effet nuisible des fluctuations de densité sur la propagation des ondes LH serait diminué. Évidemment, rien n'est gratuit : la principale difficulté consiste à intégrer des antennes dans cette partie de la machine, ainsi que de faire passer les lignes de transmission jusqu'à elles. C'est la fabrication additive qui rend la réalisation de structures complexes (antennes et guides d'ondes) désormais possible. C'est pourquoi le tokamak DIII-D (États-Unis) va tester en 2024 une antenne LH à 4.6 GHz adossée à la colonne centrale et alimentée par des guides d'ondes passant sous le divertor (figure 4) [5].

Hélicon, Whistler, ondes lentes ou rapides...

Les ondes RF permettent de générer du courant plasma notamment grâce au mécanisme d'absorption Landau (cf. articles #2 Propagation et absorption des ondes et #3 Réponse du plasma aux ondes). L'efficacité de ce mécanisme dépend du type (ou « mode ») d'onde plasma utilisé, de la fréquence, ainsi que des propriétés du plasma (densité, champ magnétique, température). Toutes ces contraintes imposent directement les choix réalisés pour la conception des antennes. Les systèmes dits « Lower Hybrid » utilisent par exemple l'absorption Landau d'ondes dites « lentes » dans des gammes de fréquence autour du gigahertz (cf. articles #1 Les ondes électromagnétiques : des outils pour les plasmas de fusion, #2 Propagation et absorption des ondes et #3 Réponse du plasma aux ondes). Les contraintes de propagation des ondes induites par les propriétés du plasma de bord imposent d'exciter ces ondes par des champs électriques principalement parallèles au champ magnétique devant l'antenne,

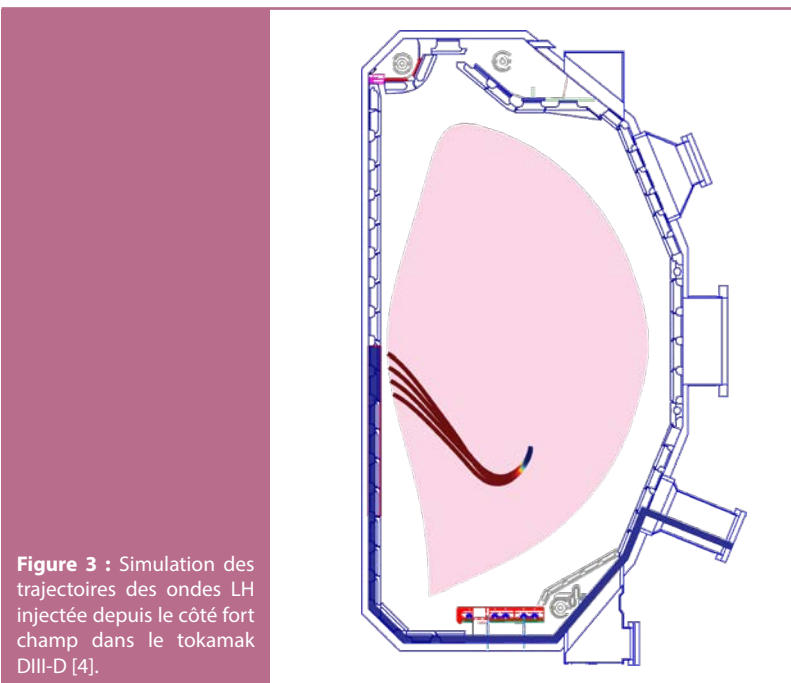


Figure 3 : Simulation des trajectoires des ondes LH injectée depuis le côté fort champ dans le tokamak DIII-D [4].

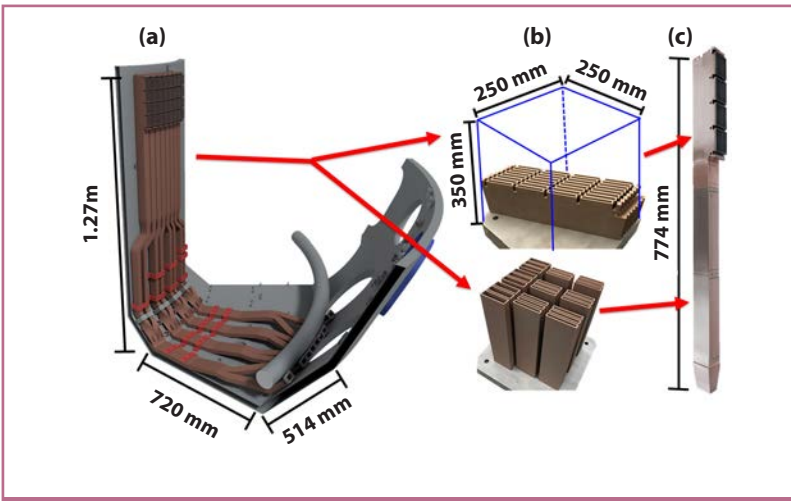


Figure 4 : Système LHCD coté fort champ pour DIII-D réalisé par fabrication additive en alliage de cuivre [5].

en pratique grâce à des guides d'ondes rectangulaires (article #4 **Antenne et couplage des ondes au plasma**). On l'a vu dans la précédente section, cette technique, employée pour les machines actuelles, devient limitée pour des plasmas de centrale de fusion pour lesquels la densité sera plus importante, car il y a alors un conflit entre l'efficacité d'absorption et l'accessibilité de l'onde jusqu'aux régions désirées.

Toutefois, il est envisageable d'utiliser l'autre mode de propagation, les ondes dites « rapides », qui elles ne souffrent pas d'une limite en densité au centre du plasma. Ces ondes peuvent donc se propager jusqu'à la région centrale du plasma. Les ondes lentes ou rapides ne se propagent pas dans le plasma tant qu'une densité minimale n'est pas atteinte (densité de coupure ou densité critique). Or, cette densité minimale est 10 à 100 fois plus grande pour l'onde rapide par rapport à l'onde lente. En pratique donc, à fréquence égale, il n'est pas possible d'utiliser le même type d'antenne car la puissance ne pourrait pas être couplée aux ondes rapides. Toutefois, en réduisant la fréquence, on peut retrouver

des conditions de couplage acceptables. Ainsi, il est envisageable d'utiliser les ondes rapides pour générer du courant dans des plasmas de centrales fusion, dans la gamme de fréquence de plusieurs centaines de mégahertz. Ce type d'ondes est également connu dans le milieu des sources plasmas sous le nom d'ondes « hélicon », ou encore « whistler » (siffleur) dans le contexte de physique de la magnétosphère [6]. Des antennes « hélicon » opérant à 476 MHz ont récemment été installées sur les

tokamaks DIII-D [7] (figure 5) et KSTAR [8] et sont en cours de test.

Des antennes ICRH pour la centrale de fusion

Les systèmes ICRH, contrairement aux systèmes ECRH, ne souffrent pas de fréquences de coupure à haute densité et constituent donc une méthode idéale pour chauffer le cœur des plasmas des futures centrales fusion. De plus, les sources de puissance ont une efficacité énergétique élevée (cf. article #5 **Tubes électroniques : du poste à galène à la fusion**) et la plupart des éléments externes à la machine utilisent des composants robustes issus des développements réalisés pour les émetteurs radios. Des sources de puissance existent également à plus haute fréquence, ce qui rend ce système compatible avec des machines à fort champ magnétique. Toutefois, son inconvénient principal est la difficulté de coupler une grande quantité de puissance au plasma sans générer des tensions élevées, produisant des arcs susceptibles d'endommager les antennes ou des impuretés métalliques qui polluent le plasma. De plus, les machines du futur vont tendre vers des concepts de taille proche voire plus faible qu'ITER, tout en nécessitant une

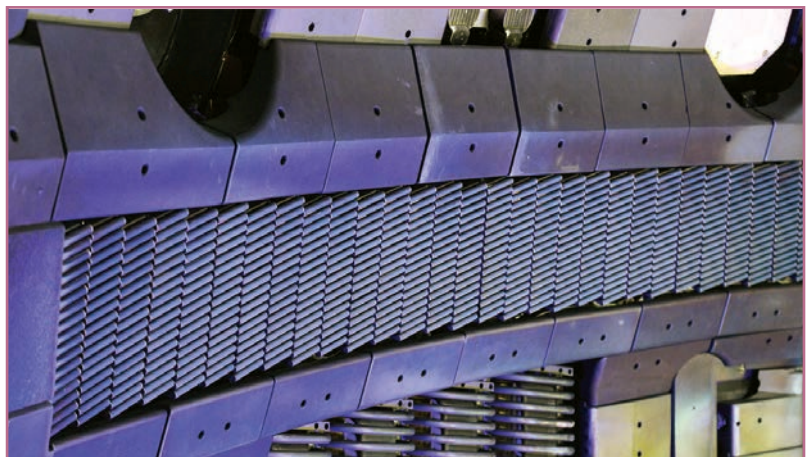


Figure 5 : Photographie de l'antenne « hélicon » installée dans le tokamak DIII-D © General Atomic.



Figure 6 : Maquette forte puissance d'une antenne TWA pour l'ICRH, testée avec succès jusqu'à 2 MW sous vide à l'IRFM.

Pour résoudre ces deux défis en même temps, un système remarquablement différent des conceptions d'antennes ICRH traditionnelles pourrait être envisagé. Il serait constitué de sections d'éléments rayonnants situés les uns à côté des autres, aussi appelé *Travelling Wave Arrays* (TWA). Ces antennes TWA seraient encastrées dans les modules de couverture répartis autour du plasma : on passe d'un concept en volume à une topologie en surface. Cette disposition d'antennes réduirait la densité de puissance pour une même puissance couplée au plasma, et donc les champs électriques nécessaires. Le risque d'arc électrique est réduit et la fiabilité des antennes est augmentée. L'antenne est mécaniquement plus simple que les antennes classiques (donc moins chère) et ne nécessite aucun élément ajustable à proximité du plasma (moins de maintenance). D'après les outils de modélisation qui sont aujourd'hui

puissance RF plus élevée, et donc des contraintes d'espace importantes. L'extrapolation des antennes ICRH actuelles ou celles d'ITER à de plus fortes densités de puissance semble être aujourd'hui aux limites du savoir-faire. Enfin, les technologies actuelles d'antennes

nécessitent des réglages et des optimisations pour offrir toutes les capacités des sources RF haute puissance. Ainsi, couplage et fiabilité sont les deux principaux enjeux de l'ICRH pour les futurs centrales fusion, qui nécessitent une forte disponibilité.

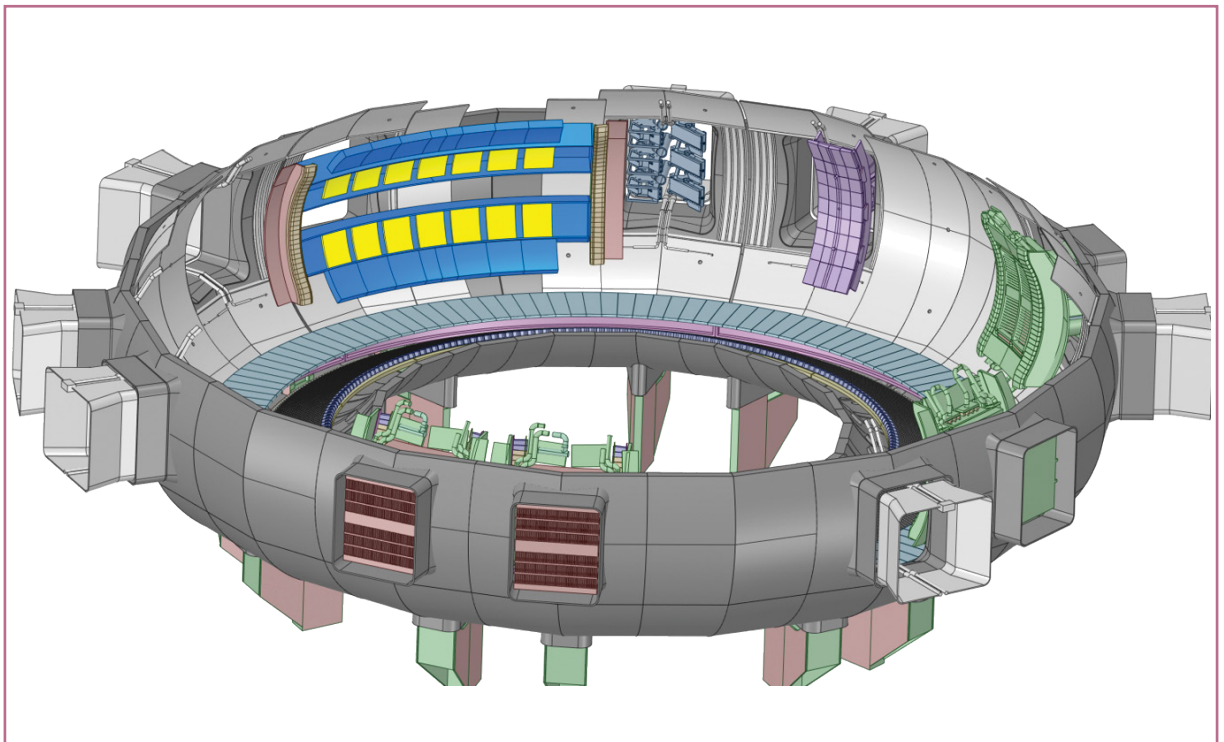


Figure 7 : Illustration d'une antenne TWA pour l'ICRH dans WEST.

éprouvés, ce type d'antenne présente de nombreux avantages en termes de couplage et de fiabilité en raison de sa densité de puissance réduite, de sa résilience intrinsèque aux variations du plasma, de son spectre (cf. articles **#2 Propagation et absorption des ondes** et **#3 Réponse du plasma aux ondes**) et de sa simplicité opérationnelle inhérente. Enfin, parce que son volume est moins important qu'une antenne classique, son impact sur la production de tritium par les couvertures tritigènes est minime.

Une maquette d'une antenne TWA a été testée avec succès au CEA/IRFM à haute puissance RF sur un banc d'essai spécifique sous vide (**figure 6**) [9]. L'antenne a été testée jusqu'à 2 MW pendant

3 secondes, correspondant à la puissance maximale disponible du générateur utilisé. Jusqu'à présent, ce concept n'a jamais été testé sur des tokamaks de taille moyenne, principalement parce que son extension toroïdale est plus grande que les antennes classiques. Sur les machines actuelles où ce type d'antenne n'a pas été prévu lors de leurs conceptions, l'espace nécessaire n'est pas suffisant entre l'enceinte à vide et le plasma pour installer une antenne. À la différence des autres machines, WEST offre suffisamment d'espace pour intégrer une antenne TWA devant le plasma (**figure 7**).

Un test comparatif entre une antenne ICRH classique et une section d'antenne TWA peut ainsi être prévu sur WEST. Ce test fournira

une démonstration de principe de la validité du concept TWA pour les centrales de fusion, confirmant en particulier son efficacité de couplage et sa facilité d'exploitation ainsi que son système d'alimentation en puissance RF à haut rendement. L'intégrabilité d'une TWA dans un concept de centrale de fusion, incluant la faisabilité de sa maintenance, restera à évaluer en parallèle. ■

RÉFÉRENCES

- [1] **G. T. Hoang, et al.**, *Nucl. Fusion*, **49** (7), p. 075001, (2009), doi 10.1088/0029-5515/49/7/075001.
- [2] **ITER Organization**, ITER-Research-Plan within the Staged Approach, ITR-18-003, (2018). https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/ITER%20Technical%20Reports/Attachments/9/ITER-Research-Plan_final_ITR_FINAL-Cover_High-Res.pdf
- [3] **P. T. Bonoli, et al.**, *Nucl. Fusion*, **58** (12), p. 126032, (2018), doi 10.1088/1741-4326/aae7e9.
- [4] **G. M. Wallace**, High Field Side Lower Hybrid Current Drive Launcher Design for DIII-D (2017).
- [5] **A. H. Seltzman, J. T. Ridzon, and S. J. Wukitch**, *IEEE Trans Plasma Scie*, **50** (11), p. 4060–4068, (2022), doi 10.1109/TPS.2022.3176247.
- [6] **R. I. Pinsker**, *Phys. Plasmas*, **22** (9), p. 090901, (2015), doi 10.1063/1.4930135.
- [7] **B. V. Compennolle, et al.**, *Nucl. Fusion*, **61** (11), p. 116034, (2021), doi 10.1088/1741-4326/ac25c0.
- [8] **H. H. Wi, S. J. Wang, J. Kim, and J. G. Kwak**, *Fusion Eng. Des.*, **195**, p. 113983, (2023), doi 10.1016/j.fusengdes.2023.113983.
- [9] **R. Ragona, et al.**, *Nucl. Fusion*, **62** (2), p. 026046, (2022), doi 10.1088/1741-4326/ac4467.

LES CONTRIBUTEURS

#1 #5
#4 #7



Julien Hillairet
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#5



Xavier Regal-Mezin
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#2
#3



Yves Savoye-Peysson
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#6



Roland Sabot
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#2
#3



Gerardo Giruzzi
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#6



Laure Vermare
CNRS
LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES PLASMAS
91128 PALAISEAU - FRANCE

#2
#3



Rémi Dumont
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#6



Frédéric Clairet
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#4



Laurent Colas
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#6



Samuele Mazzi
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#4



Stephane Heuraux
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
INSTITUT JEAN LAMOUR
F-54011 NANCY

#7



Jean-Michel Bernard
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#5



Lena Delpech
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#7



Nicolas Faure
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#5



Patrick Mollard
CEA / IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE
FRANCE

#7



Vincent Maquet
LABORATORY FOR PLASMA PHYSICS
LPP-ERM/KMS
1000 BRUSSELS, BELGIUM

GLOSSAIRE

Anisotropie : un plasma magnétisé est dit anisotrope car ses propriétés dépendent de la direction dans laquelle on les mesure, en particulier par rapport au champ magnétique utilisé pour le confiner.

Anode : conventionnellement, électrode d'où entre le courant (d'où sortent les électrons).

Cathode : conventionnellement, électrode d'où sort le courant (d'où entrent les électrons).

Conditionnement : la phase de conditionnement dans un tokamak consiste à améliorer les conditions de vide et à réduire la quantité d'impuretés (O, H₂O, etc.) à la surface de la paroi de la chambre à vide. Plusieurs techniques existent pour cela : augmenter la température (étuvage), réalisation par des électrodes ou par ondes RF des plasmas de nettoyage («*glows discharges*» ou «*wall conditioning*») ou consistant à couvrir l'ensemble des composants face à au plasma d'une fine couche de Bore (boronisation).

Courant de conduction : courant associé au mouvement net des porteurs de charge libres, à savoir les électrons et les ions. Le courant de conduction est directement lié à la vitesse thermique des particules chargées dans le plasma.

Courant de polarisation : courant associé aux variations du champ électrique dans le plasma, généralement en réponse à des fluctuations rapides ou à des ondes électromagnétiques. En pratique, il n'y a pas de séparation claire entre courant de conduction et courant de polarisation dans un plasma, car toutes les charges sont libres et contribuent à sa polarisation.

Diacrode : évolution de la tétrode qui permet de mieux répartir les pertes RF sur les grilles et donc de gagner en puissance RF utile.

Domaine de Fourier : domaine abstrait issu d'une transformée de Fourier. L'amplitude et la phase d'une quantité physique réelle sont décrites dans cet espace comme une addition de fonctions sinusoïdales complexes à différentes fréquences.

Emission thermo-ionique : flux d'électrons provenant d'un métal provoqué par les vibrations des atomes dues à l'énergie thermique lorsque ceux-ci parviennent à surmonter les forces électrostatiques.

Equations de Maxwell : lois fondamentales décrivant le comportement des champs électromagnétiques dans le vide et dans la matière.

Equation de Fokker-Planck : équation aux dérivées partielles décrivant des processus statistiques. Une forme simplifiée de cette équation a permis d'étudier le mouvement brownien.

Faisceaux gaussiens : faisceau dont l'évolution du profil transversal d'amplitude en fonction de la propagation spatiale est proportionnel à une fonction

gaussienne (courbe « en cloche »).

Fonction de distribution des vitesses ou distribution en vitesse des particules : pour un ensemble de particules dans un milieu (par exemple, les molécules d'un gaz ou les électrons d'un plasma), la fonction de distribution des vitesses est une fonction qui décrit comment une population de particules est répartie en termes de vitesses individuelles (fraction de particules qui ont une vitesse donnée).

Fréquence : nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de temps. Dans le système international d'unités, la fréquence s'exprime en hertz (Hz).

Fréquence cyclotronique : fréquence du mouvement cyclotronique dans le plan perpendiculaire à la ligne de champ magnétique. En particulier, la fréquence cyclotronique ne dépend pas directement de la vitesse de la particule, au moins pour les vitesses non relativistes.

Fréquence plasma : (ou fréquence de Langmuir) fréquence caractéristique des ondes de plasma, c'est-à-dire des oscillations des charges électriques présentes dans le plasma. Pour qu'une onde électromagnétique puisse pénétrer dans le plasma, sa fréquence doit être supérieure à la fréquence plasma (le plasma se comporte comme un filtre passe haut).

Indice de l'onde : l'indice (optique) de l'onde, souvent appelé indice de réfraction, est une propriété physique qui caractérise le comportement d'une onde électromagnétique lorsqu'elle se propage à travers un milieu.

Ionisation : action qui consiste à ajouter ou enlever des charges à un atome ou une molécule électriquement neutre, qui devient ainsi un ion (chargé positivement ou négativement).

Klystron : amplificateur de puissance RF de forte puissance inventé en 1937 par les frères Russell et Sigurd Varian. Le nom provient du grec kluzein (« battre de ses flots, baigner de ses vagues ») et du suffixe -tron (le lieu où), soit « les vagues s'échouant sur le rivage ».

Longueur d'onde : la longueur d'onde est définie comme la distance séparant deux maxima consécutifs de l'amplitude d'une onde. Dans le Système international d'unités, la longueur d'onde s'exprime en mètre (m).

Maxwellienne (ou fonction de Maxwell-Boltzmann) : c'est la fonction de distribution qui caractérise l'équilibre thermodynamique d'un ensemble de particules. Elle a une forme proportionnelle à $\exp(-v/v_{th})^2$, où v_{th} s'appelle vitesse thermique, étant liée à la température du milieu.

Mégawatt (MW) : 1 MW = 1 000 000 W, soit environ la puissance de 1 000 fours à micro-ondes domestiques.

MHD : dynamique des fluides, couplée à l'électromagnétisme. Ce domaine décrit les comportements collectifs du plasma, comme les ondes.

Moments de la distribution : à partir de l'équation de Fokker-Planck, on obtient la distribution ou répartition en vitesse des particules (électrons et ions) dans le plasma. La valeur moyenne de la vitesse, est un des moments de cette distribution.

Mouvement cyclotronique : mouvement caractéristique des particules chargées immergées dans un champ magnétique, lesquelles, en raison de la force de Lorentz, décrivent une trajectoire circulaire dans le plan perpendiculaire à la ligne de champ magnétique.

Onde de Bernstein Ionique : onde de pression généralement obtenue via la conversion de mode de l'onde magnétosonique rapide (cf. ci-dessous) excitée par les antennes ICRH. Sa faible longueur d'onde implique qu'elle est absorbée par amortissement Landau sur les électrons du plasma, qu'elle contribue ainsi à chauffer de manière localisée.

Onde magnétosonique rapide : onde de compression à basse fréquence. Dans une machine de fusion, elle est excitée par les antennes ICRH. Sa grande longueur de décroissance dans le vide (~10cm) fait qu'elle peut traverser la zone d'évanescence qu'elle rencontre au bord du plasma et se propager vers le cœur. Elle est alors absorbée en majorité par les ions du plasma (via les résonances cyclotroniques ioniques), et dans une moindre mesure par les électrons (par amortissement Landau)

Onde lente : dans le domaine de fréquence ICRH, l'onde lente est excitée par les antennes de manière parasite. Elle a une longueur d'onde millimétrique, et est évanescence. Elle ne peut donc être utilisée pour chauffer le cœur du plasma puisqu'elle reste confinée à sa région la plus externe. Elle joue néanmoins un rôle important dans le problème du couplage de la puissance, et aussi dans le développement des gaines qui peuvent avoir un impact négatif sur les performances de chauffage par ondes. Dans le domaine de fréquence LH, à l'inverse, l'onde lente est propagative et peut être absorbée par les électrons pour générer de manière efficace un courant non inductif (LHCD).

Ondes électromagnétiques : les ondes électromagnétiques sont des oscillations synchronisées de champs électriques et magnétiques. Dans le vide (ou dans l'air), les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière. Elles sont caractérisées par les quantités suivantes : Période : le temps qui passe entre deux maxima de l'oscillation. Fréquence : l'inverse de la période (elle se mesure en Hz (s⁻¹). Longueur d'onde : la distance entre deux maxima de l'oscillation.

Vecteur d'onde : 2π divisé par la longueur d'onde (il se mesure en m⁻¹). Vitesse de phase : produit de la longueur d'onde et fréquence (elle se mesure en

m/s). Indice de réfraction : rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de phase (c'est une quantité sans dimension).

Polarisation : propriété qu'ont les ondes électromagnétiques ou les ondes plasmas de présenter une répartition privilégiée de l'orientation des vibrations qui les composent.

RADAR : acronyme inventé par l'armée américaine dans les années 40 pour Radio Assisted Direction And Ranging.

(RF) pour Radio-fréquence : souvent abrégé en RF, les radio-fréquences désignent les ondes électromagnétiques dont la fréquence est située entre 3 kHz et 300 GHz.

Relation de dispersion : relation entre la pulsation ω et le vecteur d'onde k d'une onde.

Résonance cyclotron : la résonance cyclotron se produit lorsque la fréquence d'une onde est très proche de la fréquence cyclotronique d'une particule chargée (électron ou ion) dans un champ magnétique.

Résonance Landau : la résonance Landau se produit lorsque la vitesse de phase d'une onde est très proche de la vitesse d'une particule dans un plasma.

Solénoïde central : bobines situées au centre d'un tokamak qui permet d'induire le courant plasma. Fonctionnement sur le principe de l'induction magnétique, il peut être comparé au primaire d'un transformateur électrique dont le secondaire serait le plasma. Suivant les lois de l'électromagnétisme, il n'est pas possible d'induire un courant continu dans le plasma éternellement. C'est la raison pour laquelle on parle de décharges plasmas dans les tokamaks. Pour réaliser des plasma continus, il est nécessaire de produire le courant plasma par un autre moyen.

Thermalisation : c'est le processus d'évolution d'une fonction de distribution quelconque vers la distribution Maxwellienne.

Vitesse de groupe : vitesse à laquelle l'enveloppe d'une onde se propage.

Vitesse de phase : vitesse à laquelle la phase d'une onde se propage.

Vitesse thermique : mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules dans le plasma. Elle peut être calculée en utilisant la distribution de Maxwell-Boltzmann (cf. Maxwellienne). La vitesse thermique est proportionnelle à la racine carrée de la température et inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse de la particule. Ainsi, à des températures plus élevées, la vitesse thermique des particules dans le plasma sera également plus élevée.

SCIENCES EN FUSION

Numéros précédents

2018 - Sciences en Fusion #1



- #1 - INITIATION À LA TURBULENCE DANS LES PLASMAS MAGNÉTISÉS
Xavier Garbet & Peter Beyer
- #2 - MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DU TRANSPORT TURBULENT
Yanick Sarazin & Yann Camenen
- #3 - CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE D'UNE TURBULENCE PLASMA
Laure Vermare & Nicolas Fedorczak
- #4 - LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE POUR MODÉLISER LA TURBULENCE
Guillaume Latu & Virginie Grandgirard
- #5 - TURBULENCE D'INTERFACE : QUAND LE SOLEIL RENCONTRE LA BOÎTE
Patrick Tamaïn & Eric Serre
- #6 - QUAND LA TURBULENCE S'AUTO-ORGANISE
Guilhem Dif-Pradalier & Philippe Ghendrih
- #7 - UNE PHYSIQUE PLURIDISCIPLINAIRE
Yanick Sarazin & Philippe Ghendrih

NOTIONS UTILES #1
FUSION, PLASMAS ET TOKAMAKS
Yanick Sarazin

NOTIONS UTILES #2
INSTABILITÉS ET TURBULENCE DANS LES PLASMAS DE TOKAMAKS
Yanick Sarazin & Xavier Garbet

2019 - Sciences en Fusion #2



- #1 - STABILITÉ MAGNÉTO-HYDRO-DYNAMIQUE
Patrick Maget & Timothée Nicolas
- #2 - RECONNEXION MAGNÉTIQUE
Maurizio Ottaviani & Daniele Del Santo
- #3 - ÎLOTS MAGNÉTIQUES
Olivier Agullo & Patrick Maget
- #3 Focus ÎLOT & TURBULENCE
Magali Muraglia
- #4 - DENTS-DE-SCIE AU COEUR DU PLASMA
Timothée Nicolas
- #5 - STABILITÉ DES PLASMAS EN COMBUSTION
David Zarzoso & Rémi Dumont
- #6 - RELAXATIONS AU BORD DU PLASMA
Marina Bécoulet & Guido Huijsmans
- #7 - AUX FRONTIÈRES DU DOMAINE OPÉRATIONNEL
Eric Nardon & Cédric Reux
- #8 - DÉTECTER L'INVISIBLE
Roland Sabot, Philippe Moreau & Didier Vézinet

NOTIONS UTILES
CONFINER UN PLASMA PAR UN CHAMP MAGNÉTIQUE
Patrick Maget

2020 - Sciences en Fusion #3



- #1 - L'INTERFACE PLASMA-PAROÏ
Hugo Bufferand & Régis Bisson
- #2 - COMMENT METTRE LE SOLEIL EN BOÎTE ?
Philippe Ghendrih
- #3 - PHYSIQUE DES FLUX DE MATIÈRE
Bernard Pegourié & Régis Bisson
- #4 - POUSSIÈRES DANS UN TOKAMAK
Cécile Arnas
- #5 - MESURER L'INTERACTION PLASMA-PAROÏ
Yann Corre, Nicolas Fedorczak, Rémy Guirlet & Jamie Gunn
- #6 - MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE, CÔTÉ PLASMA
Eric Serre
- #7 - MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE, CÔTÉ PAROÏ
Etienne Hodille

NOTIONS UTILES #1
TOPOLOGIE DE L'INTERACTION PLASMA-PAROÏ
Bernard Pegourié

NOTIONS UTILES #2
PHYSIQUE DE LA GAÏNE
Philippe Ghendrih

2022 - Sciences en Fusion #4



- #1 - SIMULATION D'UN SYSTÈME COMPLEXE
Eric Serre & Philippe Ghendrih
- #2 - THÉORIE & SIMULATION
Maxime Lesur & Xavier Garbet
- #3 - INSTABILITÉS MACROSCOPIQUES EN PRÉSENCE DE PARTICULES ÉNERGÉTIQUES
Hinrich Lütjens & Rémi Dumont
- #4 - ATTEINDRE L'EXASCALE
Yanick Sarazin & Virginie Grandgirard
- #5 - L'ENJEU DES MAILLAGES
Hervé Guillard, Guido Huijsmans & Boniface Nkonga
- #6 - CHAÎNE DE MODÈLES POUR L'INTERACTION PLASMA-PAROÏ
Guido Ciraolo & Yannick Marandet
- #7 - DIAGNOSTICS SYNTHÉTIQUES
Didier Vézinet & Guilhem Dif-Pradalier & Anna Medvedeva
- #8 - MODÉLISATION DES SCÉNARIOS PLASMA
Clarisse Bourdelle & Gerardo Giruzzi
- #9 - EN GUISE DE CONCLUSION
Eric Serre & Philippe Ghendrih

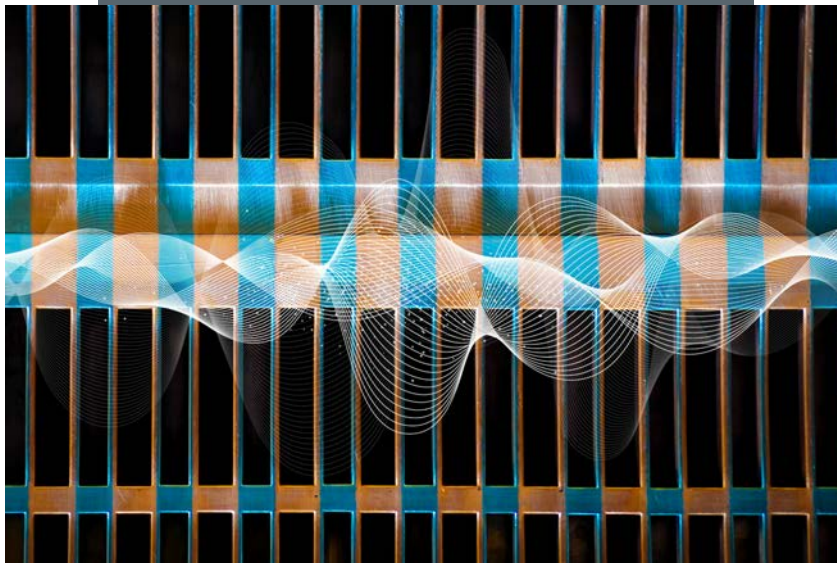


Image de couverture :

Zoom d'une antenne Lower Hybrid avec ajout d'ondes :

Une antenne Lower Hybrid est constituée d'un réseau de guides d'ondes rectangulaires (cf. chap. 1), qui servent à transférer la puissance RF en provenance des klystrons (chap.5) au plasma. L'antenne LH2, une antenne dite « Passive-Active Multijonction », a une particularité : un guide sur deux est « bouché ». Derrière ces guides particuliers appelés « court-circuit », des canaux de refroidissement creusés dans la matière permettent de refroidir très efficacement cette antenne. Cette alternative améliore également les performances de couplage de ce type d'antenne (chap.4). L'antenne est réalisée dans une alternance de plaques en inox et en cuivre soudées par explosion, dont les couleurs distinctes sont bien visibles grâce à l'éclairage de la photo.



Crédits :

photo : IRFM/CEA

ondes : Waves designed by Freepik



RETROUVEZ LA VERSION AUGMENTÉE SUR LE SITE
irfm.cea.fr/sciencesenfusion

Éditeur : Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique
CEA-Cadarache, bâtiment 513 - 13108 S' Paul lez Durance Cedex - FR

Directeur de la publication : Jérôme Bucalossi

Coordinateur scientifique : Julien Hillairet

Comité éditorial : Ludovic Allegretti, Jérôme Bucalossi, Michel Chatelier, Xavier Garbet, Sylvie Gibert, Gerardo Giruzzi, André Grosman, Frédéric Imbeaux, Philippe Magaud, Yannick Marandet

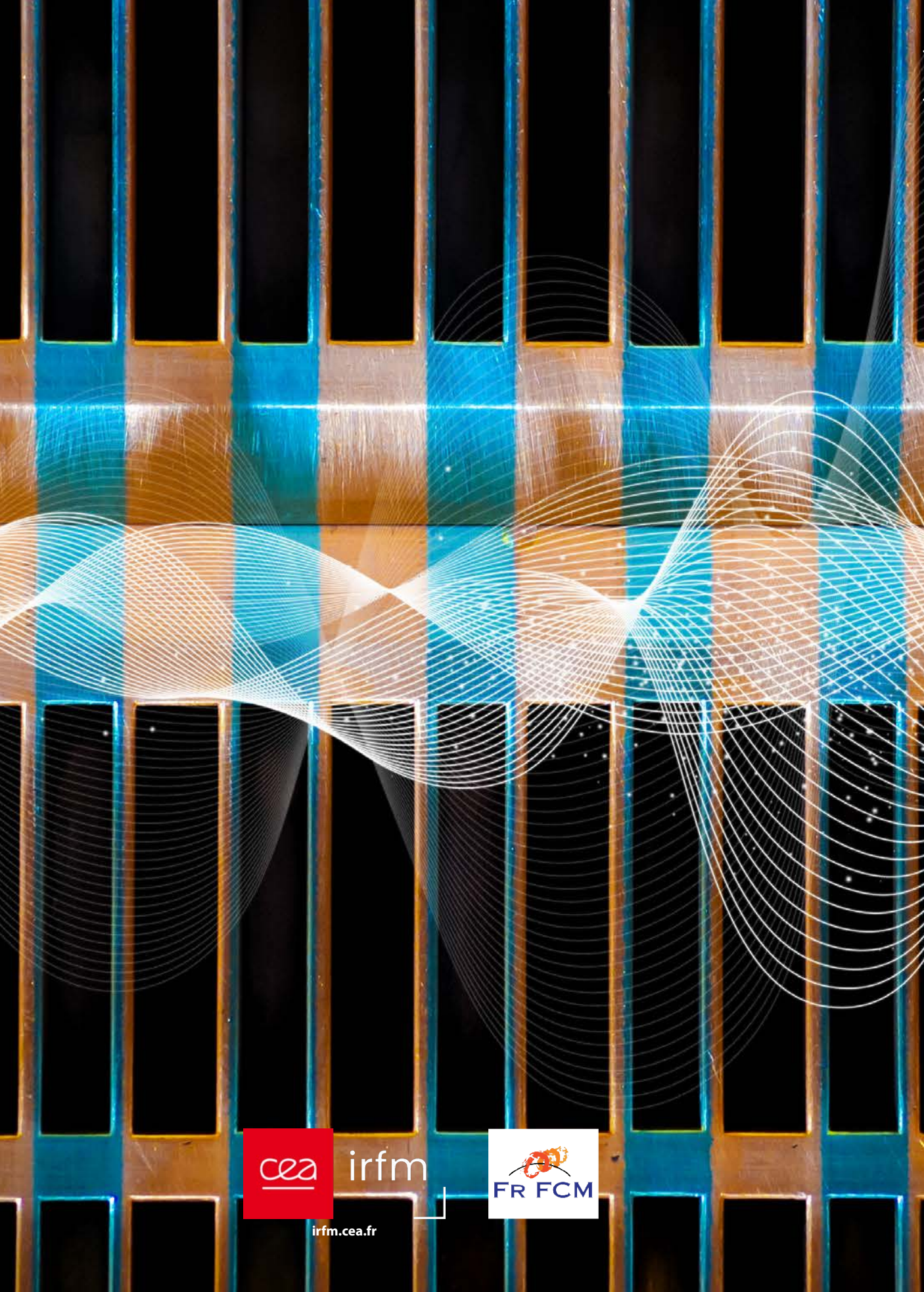
Diffusion : Véronique Poli - Abonnement gratuit sur simple demande à sciencesenfusion@cea.fr

Réalisation : Virginie Broutin

ISSN : 1776-9671

Impression : -





irfm

irfm.cea.fr

