

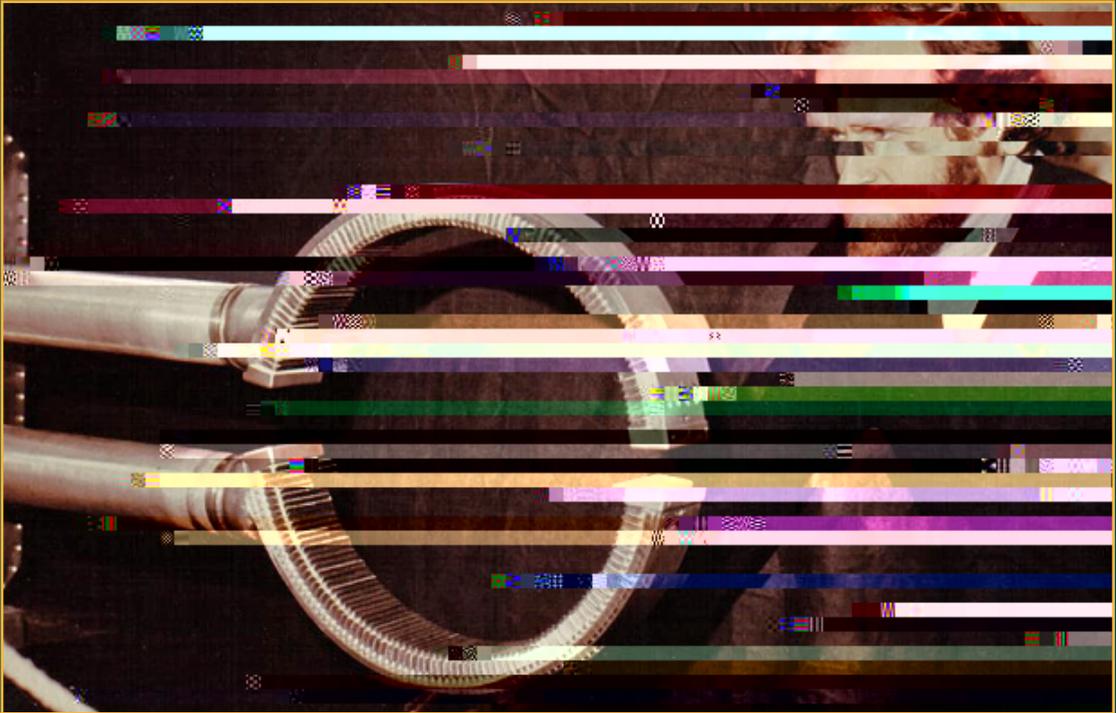




Ondes ! Quelle richesse dans ce simple mot ! Il n'y a pas un seul chapitre de la physique qui n'y fasse appel et elles sont aussi omniprésentes dans notre vie quotidienne. Elles peuvent être acoustiques, gravitationnelles ou encore électromagnétiques. Elles propagent l'information et l'énergie et donnent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

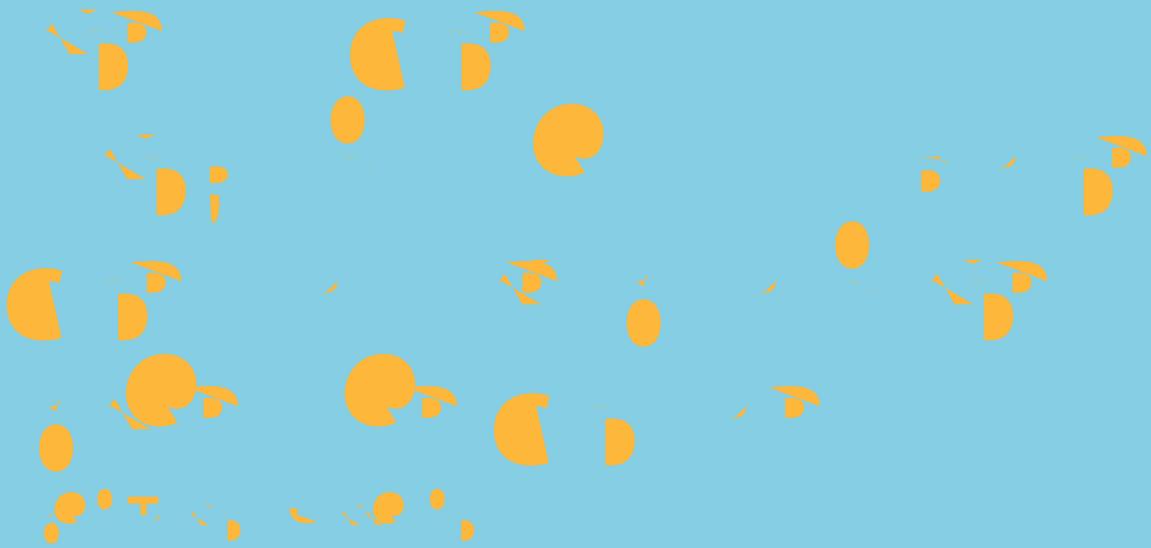
Un évènement exceptionnel dans l'histoire de la physique fut, en 1864, l'unification par Maxwell de l'électricité, du magnétisme et de l'induction par un ensemble de 4 équations. En conséquence, comme il le reconnut rapidement, un spectre gigantesque d'onde, dont la lumière, pouvait se propager par les 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 prMC -25 (.s[(palen)4.3 (ts numér)10.2 (os)35 ()])TJ EMC /P <</Lang (fr-FR)/MCII les plasmast10erRecherche dDC lecordpad a0 (3 <<)-9.17s ond<s51frles plasmasen

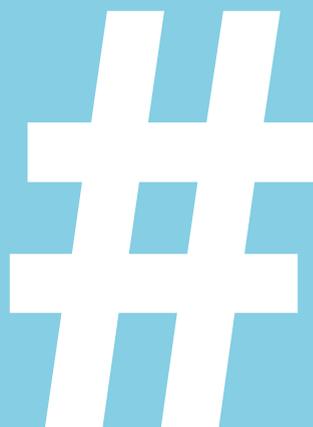


Il s'agit de la première antenne tout métal utilisée sur TFR, le Tokamak à Fontenay aux Roses, ancêtre de WEST, qui a démontré le chauffage cyclotronique ionique de l'hydrogène minoritaire dans un plasma de deutérium. Ce type d'antenne a atteint 2MW sur TFR

dans le domaine des diagnostics avec des ondes de plus faible puissance. Citons par exemple l'in-



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 d5.9 (og)par





Les ondes sont utilisées dans tous

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 # [1]). 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 S R(c)6.clor22

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 ana



Une onde plasma est par définition une perturbation collective à l'équilibre local de celui-ci

. 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.

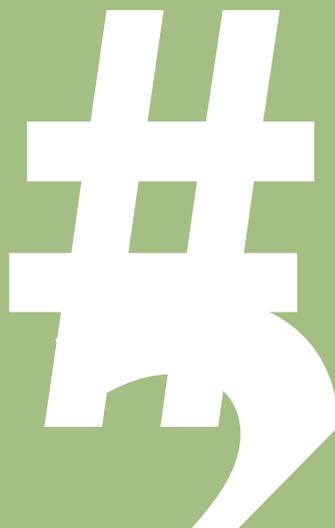
La condition de propagation d'une onde est la première étape pour qualifier celle-ci par rapport au but recherché. En effet, si une onde devient évanescence au cours de son parcours, ou si celle-ci rencontre

-

direction considérée devient comparable ou petite par rapport à la



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.



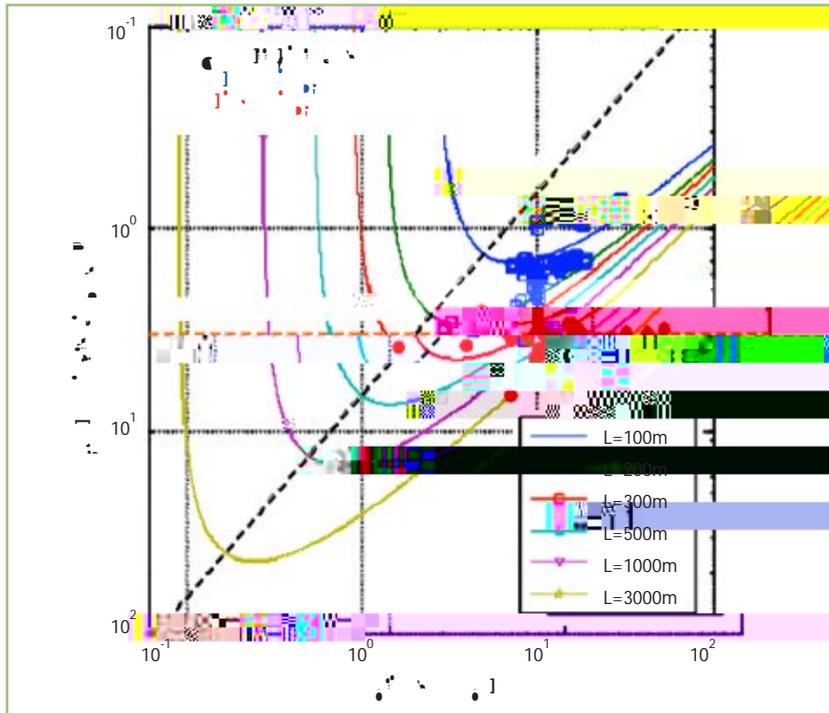


Depuis quelques dizaines d'années, avec l'invention du four à micro-ondes, le chauffage par ondes électromagnétiques est devenu un processus familier. À la fin des années 1950, alors que les premiers modèles de four micro-ondes commencent à être commercialisés, les recherches pour la fusion utilisent également les ondes pour chauffer le plasma. Si le chauffage est l'utilisation la plus connue des ondes radio dans les

d'être définitivement. 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

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  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



Champ électrique minimum pour le claquage du gaz.
 Champ électrique minimum (E_{\min})

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 1.1.1, 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.



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 #

) : des lignes coaxiales rigides (fréquences IC, dizaines de MHz) aux guides circulaires corrugués (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 #

) 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

dans des(s)24t magenl5 (le)1(e)27 ()JTJ EMC /P <</Lang (fr-FR)/MCID 2116 >

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 les conditions de bord peuvent poser des difficultés de résolution numériques.

Dans les machines actuelles, les



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'aug<</Lang (fr-FR)/MCID 2818 >>BDC 0.02819 >>BDC 0 Tc 0 Tw 113.92.30516

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 #1).

Encore aujourd'hui, dans la gamme des mégahertz (MHz), les tétrodes (et leurs variantes les triodes) 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 chauffage par onde 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.



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...



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 , 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  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, qui agit comme une cavité réson-

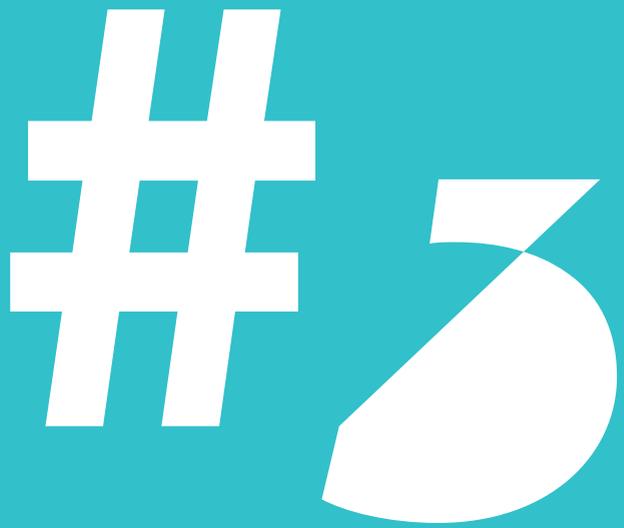
nante à extrémité ouverte, et qui génère alors un faisceau. Ce faisceau est converti par un convertisseur de mode qui transmet la puissance (faisceau gaussien) par réflexion sur des miroirs. Le dernier miroir dirige alors le faisceau au centre d'une fenêC 0 Tet laoe0.5 qui ag31Lang (fr-FRu)8 (. C)15 (sb>BDC (a

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



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.





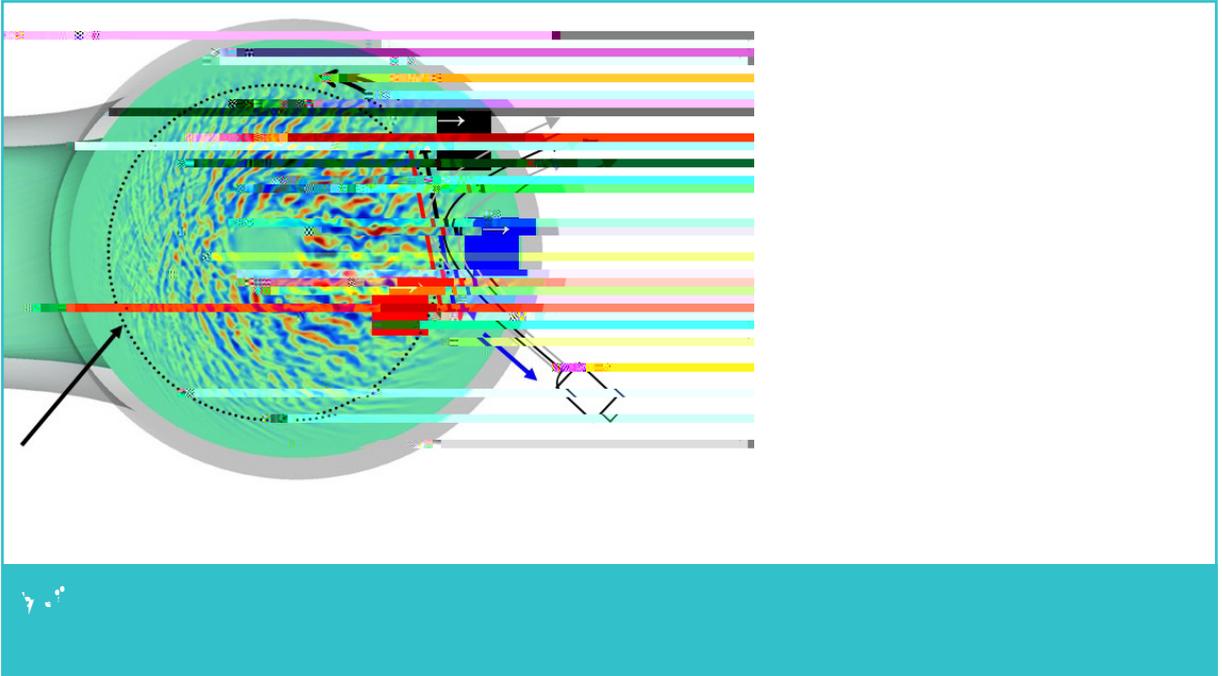
La mesure peut être « passive » en mesurant l'émission directe du

reconstruit le profil complet de densité depuis le bord jusqu'au centre



La turbulence... vaste sujet d'étude et d'intérêt

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



Radiation Processes in Plasmas, J. Wiley and Sons, New York, 1966.

, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 123501 (2005) doi 10.1063/1.2140225.

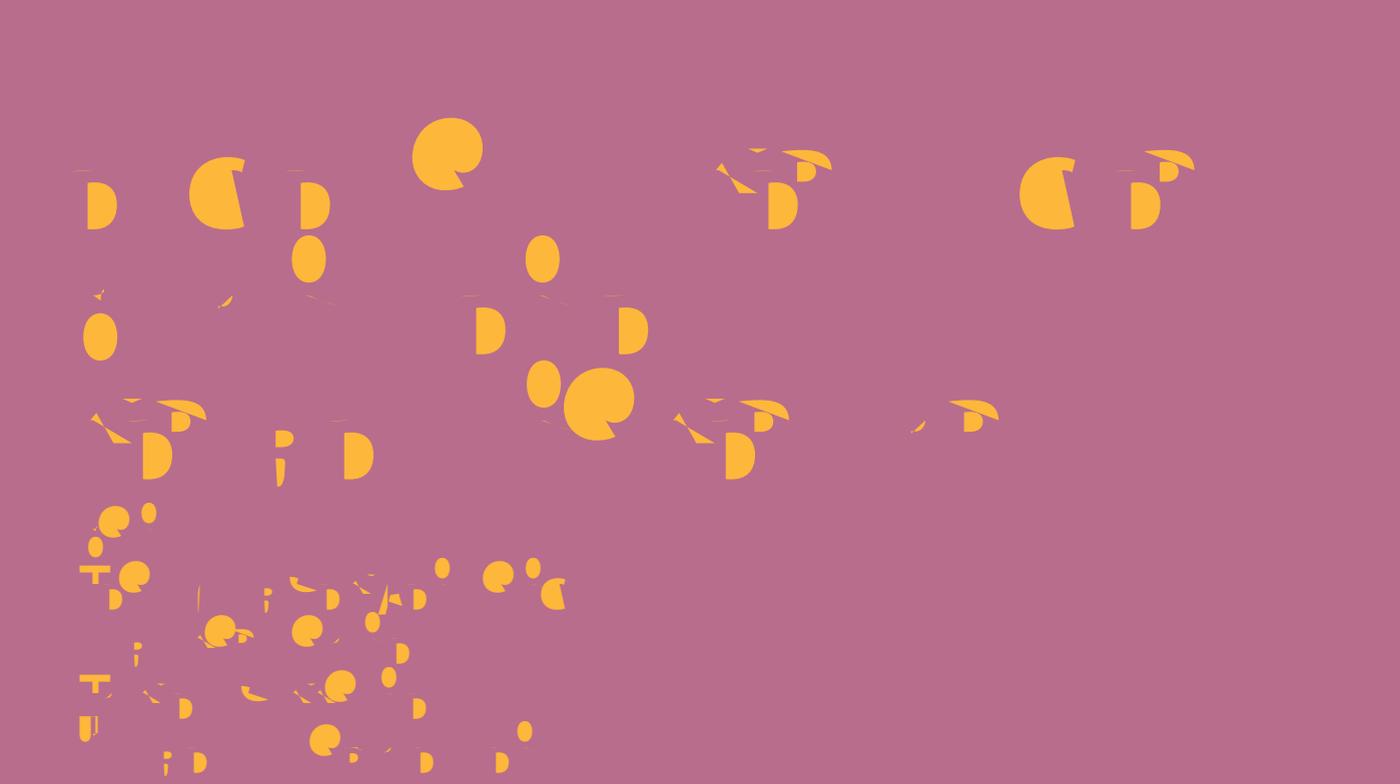
, *Comptes Rendus Physique*, **17**, 1018-1026 (2016) doi 10.1016/j.crhy.2016.07.02.

, *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 113506 (2017) doi 10.1063/1.4991789.

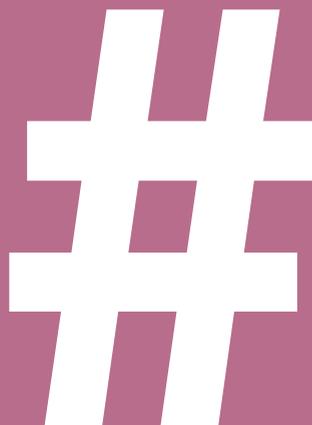
, *Comptes Rendus Physique*, **12**(2), 115-122 (2011) doi 10.1016/j.crhy.2010.11.003.

, *Phys. Plasmas*, **18**(1), 012306 (2011) doi 10.1063/1.3536648.

, *Nucl. Fusion*, **46**(9), S771 (2006) doi 10.1088/0029-5515/46/9/S12.



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.



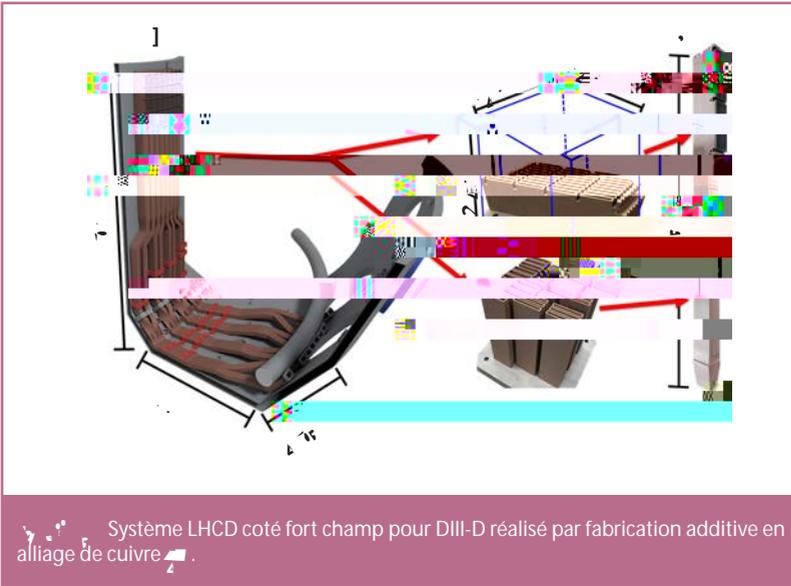
supprimé en 2018, les simulations montrant que les scénarios continus (ou « steady-state ») pourraient être soutenus uniquement à partir d'une combinaison d'injection de particules neutres et d'ECRH . En 2023, un nouveau mix des chauffages est proposé avec la révision de la feuille de route d'ITER. Ainsi, 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 #              ). En plus d'être conçu pour le chauffage du plasma, le système ICRH d'ITER permettra également de condi-



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 , a finalement été

générer un courant plasma relativement modeste et nettement en



en pratique grâce à des guides d'ondes rectangulaires (article # 1. 1). 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 . Des antennes « hélicon » opérant à 476 MHz ont récemment été installées sur les

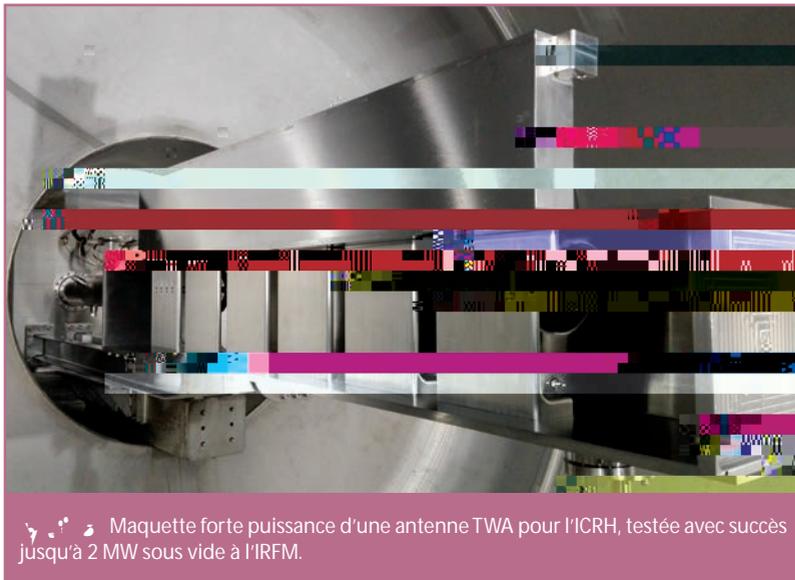
tokamaks DIII-D et KSTAR et sont en cours de test.

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 #

) 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



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



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 encastées 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 futures centrales fusion, qui nécessitent une forte disponibilité.

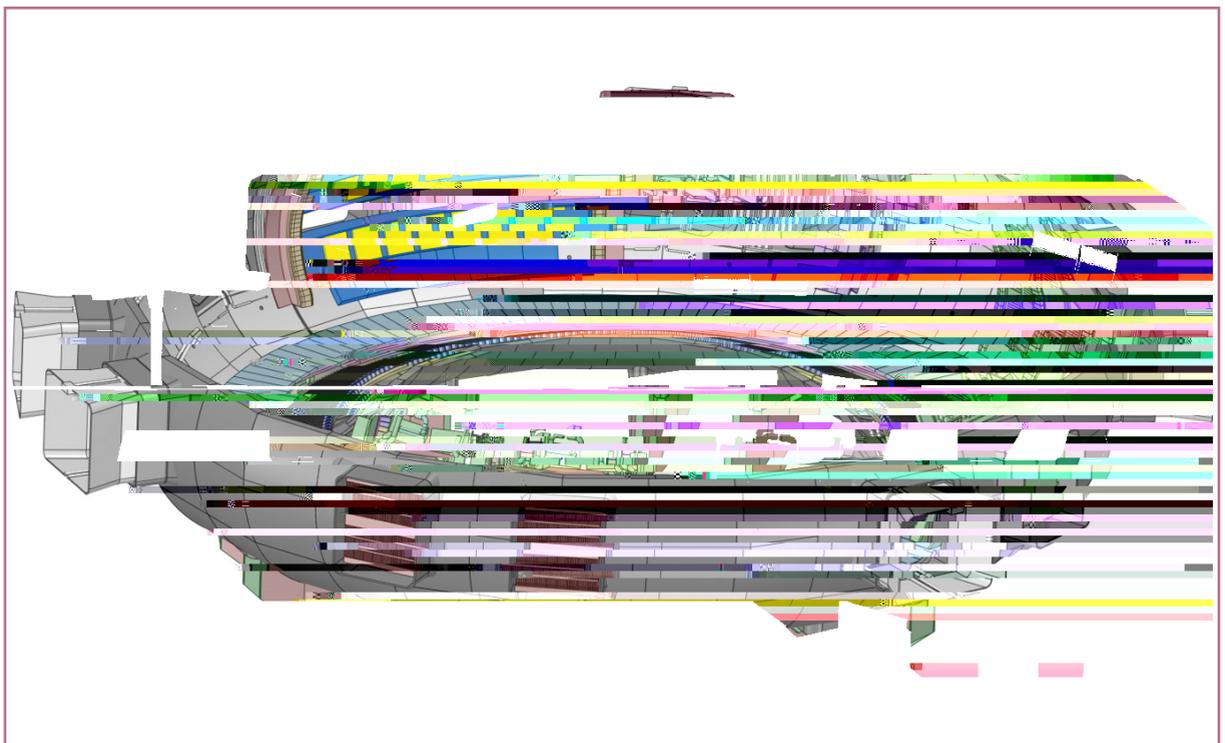


Illustration d'une antenne TWA pour l'ICRH dans WEST.





#



CEA / I FM
F-13108 AIN - A. L-LE -D. ANCE
F ANCE

#

CEA / I FM
F-13108 AIN - A. L-LE -D. ANCE
F ANCE

#



CEA / I FM
F-13108 AIN - A. L-LE -D. ANCE
F ANCE

5



CEA / I FM
F-13108 AIN - A. L-LE -D. ANCE
F ANCE

5

IN I E DE LO AINE
IN I. JEAN LAMO.
F-54011 NANC

4



CEA / I FM
F-13108 AIN - A. L-LE -D. ANCE
F ANCE

4



CEA / I FM
F-13108 AIN - A. L-LE -D. ANCE
F ANCE

● ● ● ● ● 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.

● ●

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

 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 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.





- # Xavier Garbet & Peter Beyer
- # Yanick Sarazin & Yann Camenen
- # Laure Vermare & Nicolas Fedorczak
- # Guillaume Latu & Virginie Grandgirard

3 ! 1 #





