

SCIENCES en FUSION

AVANCÉES SCIENTIFIQUES DES RECHERCHES EN FUSION PAR CONFINEMENT MAGNÉTIQUE #2

Stabilité

Stabilité Magnéto-Hydro-Dynamique

Reconnexion magnétique

Îlots magnétiques

Focus Îlot & Turbulence

SOMMA

EDITORIAL

par Tim Luce



La compréhension de la stabilité magnétohydrodynamique (MHD) et du contrôle des plasmas a été au cœur des recherches sur l'énergie de fusion dès leur genèse. Le point de départ pour déterminer une configuration magnétique a été de comprendre qu'un équilibre MHD devait être obtenu afin de créer et maintenir les conditions nécessaires à la fusion. Fondamentalement, la géométrie doit être torique et le champ magnétique doit former une structure hélicoïdale, avec une composante toroïdale majoritaire, afin de "confiner" le plasma. Au début des années 1950, les physiciens russes Igor Tamm et Andrei Sakharov ont imaginé le tokamak, dans lequel le champ magnétique est produit en partie par un courant qui circule dans le plasma. Depuis cette date, le domaine opérationnel d'un tokamak est conçu de manière prédictive grâce à des équilibres MHD et la théorie la plus simple de stabilité, dite MHD "idéale", qui ne fait intervenir que densité, pression et courant du plasma.

Bien sûr, rien n'est « idéal » dans la vie, et les plasmas n'y font pas exception. Les instabilités "idéales" du tokamak sont ces mêmes ondes omniprésentes dans l'univers décrites par l'astrophysicien suédois Hannes Alfvén. Mais dans les plasmas de fusion, et lorsque les conditions sont défavorables, les ondes d'Alfvén peuvent puiser l'énergie libre du plasma et croître exponentiellement. Heureusement ces circonstances défavorables peuvent être prédites

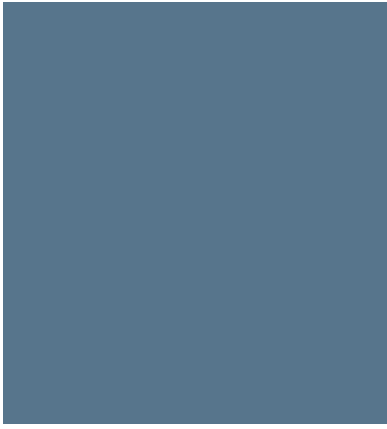
avec précision. Lorsque les effets non-idéaux sont pris en compte, les conditions de stabilité sont modifiées et de nouvelles instabilités peuvent apparaître. Ceci rend plus intéressante la vie du physicien des plasmas, mais plus difficile celle de l'ingénieur de conception d'un réacteur à fusion, tout particulièrement pour le tokamak où pression et courant sont toutes deux sources d'énergie libre.

Si on tient compte de la résistivité dans la description MHD d'un tokamak, une nouvelle classe d'ondes apparaît. Des changements de topologie des surfaces magnétiques sont désormais possibles, avec une nouvelle gamme de modes autorisant une réorganisation de ces surfaces, appelée "reconnexion". Des îlots résonnants apparaissent du fait des conditions de périodicité sur une surface torique. Ces instabilités sont connues depuis le début des années 1960 dans des géométries simplifiées. Cependant la prédiction de leur stabilité linéaire et de leur évolution non linéaire reste un défi. Les effets les plus néfastes sont apparus dès les premières expériences. Ces instabilités peuvent croître ou interagir avec les structures environnantes et éteindre le plasma – c'est une "disruption". Même si ces instabilités saturent à une faible amplitude, elles peuvent affaiblir les propriétés d'isolation thermique du champ magnétique de confinement.

Un autre effet non-idéal important pour la fusion est la présence de particules chargées de grande vitesse. Ces particules "rapides" sont un important produit des réactions de fusion et sont nécessaires

l'énergie de fusion. Grâce à la compréhension des processus fondamentaux de la MHD, de nombreux scénarios ont pu être élaborés et testés qui évitent ces écueils. Toutefois l'expérience passée montre que nous devons être préparés à toute éventualité. Pour cela, nous devons repousser toujours plus loin les limites des simulations numériques et les mesures nécessaires à la validation des modèles. Il nous





L'histoire des

déclenchement de l'instabilité (par exemple en produisant des chaînes d'îlots), soit en forçant la fréquence des relaxations à un rythme élevé qui en réduit l'impact. En approchant du régime de fonctionnement d'un réacteur de fusion, le plasma devient également un milieu en combustion, dans lequel les isotopes de l'hydrogène se transforment en particules d'hélium très chaudes: les particules **alpha**.

Après les degrés de liberté spatiaux dans lesquels se développent les autres instabilités, ce sont les résonances entre ondes et particules dans l'espace des vitesses qui offrent au plasma la possibilité de développer des instabilités (cf. article **#5 "Stabilité des plasmas en combustion"**). Mais c'est

ter des événements exceptionnels, sont alors mises en œuvre, mêlant réseaux de neurones et injection massive de gaz pour dissiper le maximum d'énergie sous forme de rayonnement (cf. article **#7 "Aux frontières du domaine opérationnel"**).

Des diagnostics pour voir l'invisible, des outils théoriques et numériques pour comprendre

Le plasma des tokamaks est un milieu quasiment transparent pour l'œil humain, et il est inutile de songer à y introduire un objet matériel : il serait rapidement fondu, et introduirait tellement d'impuretés rayonnantes que le plasma lui-même en perdrait son énergie. Mais les perturbations magnétiques se traduisent par des fluctuations des surfaces magnétiques qui sont détectables par des bobines situées dans les parois de la machine, et par un large éventail de techniques, parfois très sophistiquées, permettant de reconstruire la structure des instabilités, de caractériser leur impact sur le confinement et d'identifier leurs sources (cf. article **#8 "Détecter l'invisible"**). Cette caractérisation forme la première moitié du puzzle dont le physicien a besoin.

L'autre moitié, ce sont les outils théoriques et les simulations numériques associées, qui per-

de sa thèse, proposa à son docteur Jim W. Dungey de considérer ce mécanisme comme une explication possible des aurores boréales. Dungey est crédité d'avoir formalisé l'idée dans un modèle de l'environnement géomagnétique (magnétosphère) [2]. S'en suivit un premier modèle quantitatif qui permettait d'estimer le taux de reconnexion dans un plasma en écoulement stationnaire [3]. S'en suivirent également les premières études théoriques de stabilité des plasmas de laboratoire avec l'analyse de l'instabilité de cisaillement par Furth, Killeen et Rosenbluth [4]. Ensuite, les études théoriques et expérimentales sur ce sujet se multiplièrent avec comme objectif la compréhension des phénomènes, souvent complexes, que le mécanisme de reconnexion induit dans le plasma. La prédiction quantitative des échelles temporelles et des énergies caractéristiques relâchées pendant le processus de reconnexion est désormais essentielle dans plusieurs domaines d'application.

Ilots magnétiques dans une machine toroïdale

Il faut rappeler que le confinement du plasma dans une machine toroïdale est obtenu par la création d'un champ magnétique caractérisé par une série de surfaces magnétiques emboîtées et centrées autour d'une ligne que l'on appelle axe magné-

tique, sur lesquelles s'enroulent les lignes de champ (cf. article "**Notions utiles**").

Si le plasma était idéal, au sens expliqué auparavant, les possibilités d'évolution de cette configuration seraient limitées par la loi de flux gelé.

Par contre, dans un plasma non idéal, le phénomène de reconnexion permet notamment la création d'une ou plusieurs structures hélicoïdales avec leur propre axe magnétique qui s'enroule autour d'une des surfaces magnétiques de la configuration de départ. En interceptant un plan **poloïdal** quelconque, ces structures secondaires génèrent des îlots comme dans le cas bidimensionnel décrit auparavant.

Ceci est illustré dans la **figure 2**.

Conséquences de la reconnexion

En reliant différentes parties d'un système par des nouvelles lignes de champ, les processus de reconnexion permettent généralement d'augmenter, parfois considérablement, le transport de matière et d'énergie. Dans une machine à confinement magnétique, un îlot constitue une zone de court-circuit pour le transport de la chaleur, ce qui cause une baisse du confinement de l'énergie thermique glo-

bale.

La présence d'un ou de plusieurs îlots peut déstabiliser complètement la décharge provoquant une disruption.

En outre, la réorganisation du champ magnétique, qui est permise par le processus de reconnexion, est accompagnée par une transformation d'énergie magnétique en énergie cinétique parfois considérable. Quand la reconnexion est assez rapide, elle est accompagnée par un champ électrique élevé qui cause l'accélération des particules chargées du plasma, particulièrement les électrons. La reconnexion rapide donne aussi lieu à des fortes concentrations de courant et à des zones de vitesse élevée, qui à leur tour sont à l'origine d'une dynamique complexe ou même turbulente.

La reconnexion dans l'espace.

On sait que les étoiles comme notre Soleil sont constituées de plasma et que l'espace interplanétaire et interstellaire est aussi rempli par du plasma. Il s'agit aussi de milieux magnétisés. On s'attend donc à ce que la reconnexion y joue un rôle important.

Des premières observations pendant les éclipses solaires au XIX^{ème} siècle aux images spectaculaires

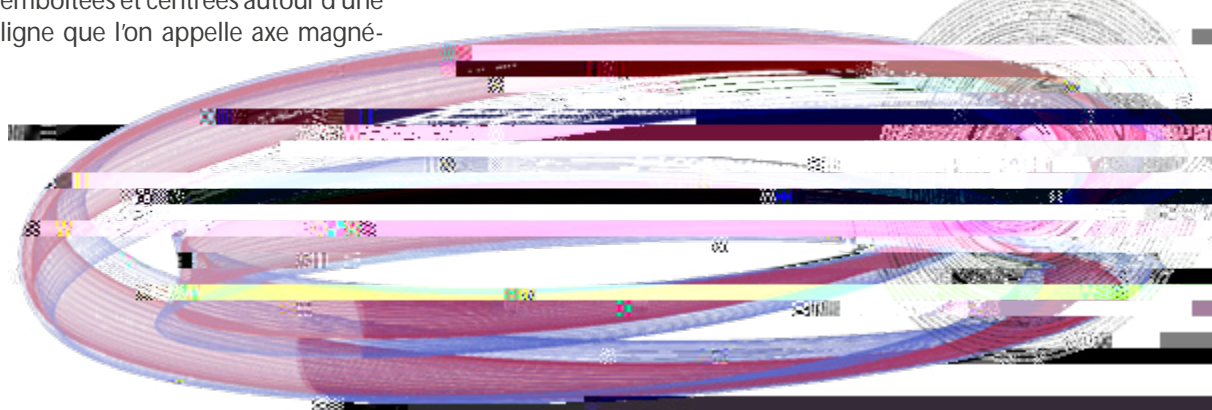


Fig. 2 : Surfaces magnétiques secondaires produites par un processus de reconnexion dans un **tokamak**. Les lignes de champ magnétique interceptent un plan **poloïdal** en formant la structure caractéristique d'un **îlot magnétique**.



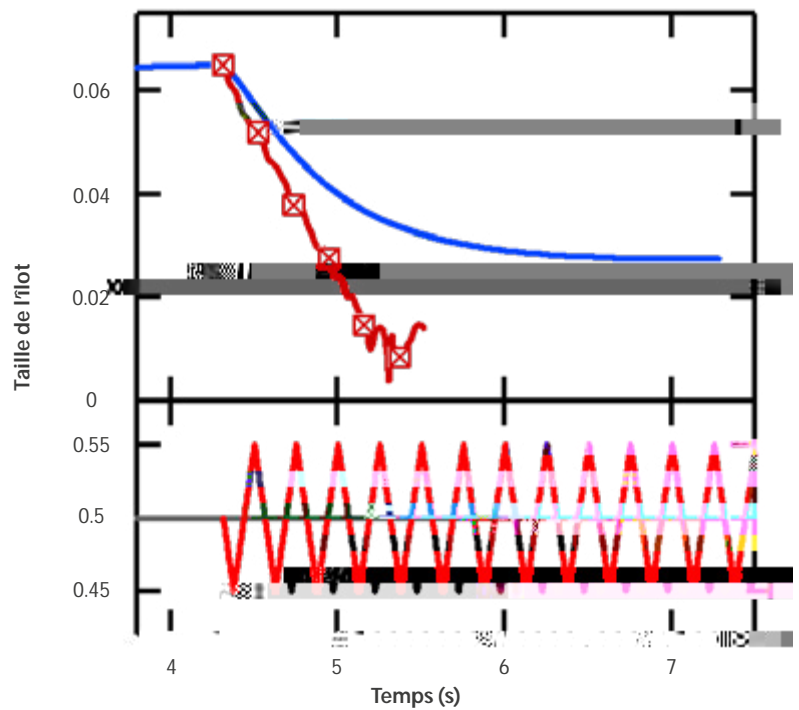
Fig. 1 : Température électronique mesurée en fonction du temps le long d'une ligne traversant le plasma (ligne rouge sur la figure de

courant plasma comme la source principale qui tend à favoriser l'îlot, tandis que la structure torique du **tokamak** tend à le stabiliser lorsque la pression cinétique devient importante. Dans un réacteur de fusion, la stabilisation l'emporte et les îlots ne devraient pas se développer... sauf qu'il existe un mécanisme intrinsèque au tokamak, assez puissant pour donner naissance à une branche métastable (voir définition de **stabilité** dans le glossaire) : une graine d'îlot pourra ainsi se transformer, si elle est suffisamment grande, en un îlot de taille respectable (plusieurs dizaines de centimètres sur ITER par exemple).

Ce mécanisme repose sur le fait qu'un îlot est analogue à un filament de courant, circulant en sens opposé au courant d'équilibre du plasma. Or il existe dans les

fusion, comme nous l'avons évoqué, la reconnexion magnétique est fortement liée aux questions de turbulence : la quasi disparition de la turbulence au sein de l'îlot inue sur son impact global, sa saturation et sa sensibilité aux sources de chauffage, et la turbulence sème par ailleurs des îlots pouvant servir de germes (cf. article #3 Focus "Îlot & turbulence"). Les nombreuses graines d'îlots de tailles variées qui ne sont pas amplifiées par le courant de bootstrap et baignent dans le milieu turbulent impactent en retour le transport, notamment le transport électronique. Ce sont les disparités d'échelles spatiales et temporelles qui rendent complexe l'étude de ces phénomènes, que

Fig. 2 : Simulation de contrôle d'un îlot magnétique par une source de courant avec le code XTOR [2] : la taille de l'îlot (en haut, en fraction du rayon du plasma) est réduite de moitié lorsqu'on lui applique une source de courant α (en bleu). Mais elle peut être réduite sous le seuil de détection lorsque le courant appliqué pour le contrôle est modulé au point O, tout en balayant radialement autour de sa position (en rouge). En bas, la position de la source de courant RF lors du balayage (l'îlot est à $r_{RF}=0.5$) [3].



RÉFÉRENCES

[1] S. Günter *et al.*

ÎLOT & TURBULENCE

par Magali Muraglia

Un problème multi-échelles

L'interaction d'**îlots magnétiques** avec la turbulence existante dans un **plasma** de **tokamak** est une question importante. En effet, un îlot magnétique, dont la taille est de l'ordre de quelques centimètres avec une fréquence de quelques kHz, baigne dans un plasma turbulent dont les structures caractéristiques ont une taille allant de fractions de millimètre à quelques centimètres avec une fréquence de quelques centaines de kHz.

L'interaction entre un îlot magnétique et la turbulence est donc un problème multi-échelles qui peut être étudié grâce à des modèles prenant en compte l'écoulement dynamique d'un plasma magnétisé (c'est la **magnétohydrodynamique**).

Historiquement, dû au coût numérique important d'un tel problème, les deux phénomènes ont été étudiés séparément. De plus, dans un tokamak, les fluctuations liées à la turbulence sont plus importantes que les fluctuations du

champ magnétique.

Cet argument scientifique a longtemps validé l'approche indépendante des deux phénomènes. Cependant, ces dernières années, de nombreuses expériences, appuyées par des simulations numériques, ont montré que la présence d'un îlot magnétique pouvait affecter le transport de chaleur et de particules [1] et [2], et qu'inversement, la turbulence pouvait contribuer à la création et à la dynamique d'un îlot [4].

L'îlot magnétique, un

«

sentent des gradient plus forts à l'extérieur. La turbulence est alors affectée en conséquence : elle devient plus calme au cœur de l'îlot, tandis qu'à l'extérieur elle se renforce, ainsi que le montre la simulation numérique de la **figure 1**. Or le transport des particules et de la chaleur résulte de deux mécanismes : la diffusion parallèle le long des lignes de champ magnétique et le transport perpendiculaire généré par la turbulence. La hausse du niveau de turbulence qui se trouve concentrée au niveau des points X (en haut et en bas de la figure) va donc se traduire par un transport de chaleur et de particules augmenté. L'îlot magnétique agit alors comme un « court-circuit » très efficace augmentant le transport de particules et de chaleur provenant du cœur de la machine vers son bord. Bien entendu, plus l'îlot est large radialement, plus la perte de confinement induite par le transport turbulent à l'extérieur de l'îlot est importante.

Fig. 1 : Amplitude des fluctuations turbulentes, en présence d'un îlot, issue de simulations numériques présentées dans [3]. Le transport parallèle aux lignes de champ magnétique correspond à la direction verticale, tandis que le transport perpendiculaire s'effectue de gauche à droite.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Bañón Navarro *et al.*, "Effect of magnetic islands on profiles, flows, turbulence and transport in nonlinear gyrokinetic simulations", *Contrib. Plasma Phys.*, **59**, 034004 (2017)
- [2] L. Bardóczi *et al.*, "Impact of neoclassical tearing mode-turbulence multi-scale interaction in global confinement degradation and magnetic island stability", *Plasma Phys. Contr. Fusion*, **24**, 122503 (2017)
- [3] P. Hill *et al.*, "The effect of magnetic islands on Ion Temperature Gra-

Les dents-de-scie sont un phénomène se produisant dans tous les tokamaks, découvert en 1974 par VonGoeler [1]. Le phénomène est caractérisé par une relaxation périodique rapide des profils de pression et de température du cœur du plasma. En fonction de la taille de la machine et du régime de fonctionnement, la période peut aller d'une dizaine de millisecondes à plus d'une seconde. En contraste, la phase de relaxation proprement dite, appelée "crash", est extrêmement courte, de l'ordre de 100 microsecondes. Le crash de la dent-de-scie homogénéise les profils dans le cœur du plasma, par l'intermédiaire de la

.L954 681craTc 0 Tw 8.w 0 -1.2100 176.1621 T7644 681crontpw 03. En f# "RandL
057597cr]TJ]TJofut omenprternses)0 (sue)12 (, appel)10 dier)-24 r
oetrm-4 (Tc 0 Tw 0 0 10 176.16487.65772405cr)Tj0.01 T Tw 04.2 0 0 10 35.544347w 0066393cr

tel îlot métastable est grand [2]. Ces îlots peuvent également être à l'origine des **disruptions**. Or sur **ITER** les disruptions doivent être impérativement évitées, compte tenu de l'importante énergie magnétique libérée lors de ces dernières (cf. article #7 "Aux frontières du domaine opérationnel").

E ets sur le plasma : bright side

Mais les dents-de-scie ont également un e et bénéfique. Lors de la relaxation, le mélange des pro ls de cœur implique que les impuretés éventuellement présentes près de l'axe magnétique sont également redistribuées. Typiquement, ces impuretés sont

J0.23led21. Pet5d iculi1.3 (et52 deue les 0 ie))Tuts] (lim8(c)d6 (A)1c)d6ie1J0.23t0 (edis06 Tm[(sen)4 1J0.235d350

STABILITÉ DES PLASMAS EN COMBUSTION

par David Zarzoso & Rémi Dumont

Les particules rapides sont omniprésentes dans les plasmas de fusion et doivent être soigneusement contrôlées afin de chauffer le plasma thermique et auto-entretenir les réactions de fusion. Mais, du fait de leur énergie, ces particules peuvent exciter des modes électromagnétiques potentiellement défavorables à leur confinement. Prédire et contrôler cet effet est un défi majeur des recherches actuelles en fusion...

Particules rapides dans les plasmas de fusion

Dans les **tokamaks** actuels comme dans les futurs réacteurs à fusion, les réactions nucléaires ont lieu entre deux isotopes d'hydrogène, typiquement un noyau de deutérium et un noyau de tritium. Cette réaction, la seule envisagée actuellement à des fins de production d'énergie, produit une particule **alpha** et un neutron. Le neutron,

peuvent être excités par des particules rapides. Ici, nous nous contenterons d'en donner l'image essentielle au travers des modes les plus emblématiques dans les plasmas de fusion, du fait de leur importance pour le confinement : les modes d'Alfvén. Le physicien suédois Hannes Alfvén a publié en 1942 l'article fondateur de la théorie magnétohydrodynamique moderne [1]. Il a prédit l'existence d'ondes électromagnétiques sous la forme de perturbations perpendiculaires au champ magnétique d'équilibre, se propageant parallèlement aux lignes du champ à une vitesse que l'on a baptisée la vitesse d'Alfvén, qui dépend de l'amplitude du champ magnétique. Lorsque le champ magnétique est inhomogène, la fréquence caractéristique de ces ondes varie dans l'espace d'une manière continue. Ceci conduit à un spectre continu de modes d'Alfvén.

Ce spectre est caractérisé par l'amortissement de tous ces modes. Le phénomène responsable de ceci est le mélange de phases. Pour comprendre ceci, prenons un point de l'espace, caractérisé donc par une fréquence bien définie. Mais comme le spectre est un continuum, cette fréquence coexiste avec d'autres fréquences très proches. Dans une région de l'espace, nous avons ainsi un grand nombre d'ondes oscillant à des fréquences proches mais toutes différentes. Si l'on veut mesurer le signal résultant moyenné dans le temps, nous obtiendrons un signal nul. C'est pourquoi on fait référence à ce phénomène comme l'amortissement dû au continuum. Mais si les modes d'Alfvén sont amortis en présence d'un champ magnétique inhomogène, l'intuition veut que nous ne les observions pas dans un tokamak. En réalité, un tokamak est un système avec une géométrie bien plus complexe qu'un simple cylindre : c'est la géométrie to-

roïdale. Ceci, lié à d'autres effets comme la non-circularité de la section **poloïdale**, introduit des couplages entre les différents modes d'Alfvén qui font que des ouvertures apparaissent dans le continuum. Ce phénomène s'apparente à l'existence de bandes d'énergie interdite dans un cristal. Un mode peut donc exister dans ces ouvertures sans être amorti. C'est ce que l'on appelle un mode propre d'Alfvén. Des particules rapides dont la vitesse est proche de la vitesse de phase de ces modes propres peuvent résonner et transmettre leur énergie au champ électromagnétique. Ceci conduit aux modes propres d'Alfvén excités par des particules rapides. Par la suite, nous nous concentrerons sur le mode d'Alfvén induit par la toroïdité (Toroidicity-induced Alfvén Eigenmode, soit TAE en anglais).

Mécanismes non linéaires : du silence des modes au transport chaotique

Une fois les modes propres d'Alfvén excités, on pourrait croire que leur énergie augmente indéfiniment. Mais la nature est non linéaire et, par conséquent, toute instabilité

très faibles quantités de ces particules. La présence de ces instabilités constitue même l'une des seules signatures directes des électrons liés aux alphas dans une décharge D-T actuelle, ce qui élargit l'intérêt de ce type d'expérience au-delà de 10^{-10} s.]TJ0.051 Tw5fgea 051 Tw5fces i0 Tc 0 Tw 8.4

classes de codes permettent de faire ces simulations avec des géométries et scénarios réalistes dans le but d'une prédiction de la physique d'ITER, en décrivant les particules alpha avec une approche cinétique. En d'autres termes, leur dynamique est décrite à la fois dans l'espace réel et dans l'espace des vitesses, ce qui est essentiel pour prendre en compte la résonance entre les particules alpha et les modes d'Alfvén. Les particules thermiques, quant à elles, peuvent être décrites soit par une approche

hybride soit, de la même manière que les particules alpha, en utilisant un formalisme cinétique. Le premier type de codes appartient à la classe dite hybride, du fait de la combinaison hybride-cinétique, alors que le deuxième type appartient à la classe complètement cinétique. Les codes hybrides représentent de nos jours un excellent compromis pour étudier la dynamique des particules alpha dans des scénarios réalistes sur des temps longs. La [figure 3](#) illustre un exemple de simulation de modes

TAE dans ITER avec le code hybride MEGA [4]. La [figure de gauche](#) montre la phase d'excitation linéaire alors que la [figure de droite](#) montre la phase non linéaire de saturation du mode. •

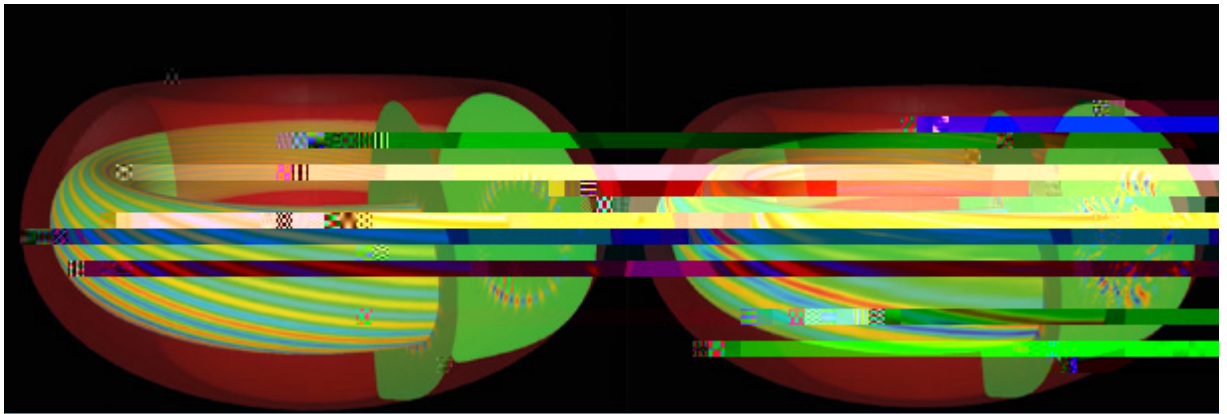


Fig. 3 : potentiel magnétique obtenu avec le code hybride MEGA modélisant l'excitation (gauche) et saturation (droite) d'un mode TAE excité par des particules Alpha dans un scénario d'ITER.

RÉFÉRENCES

- [1] H. Alfvén, "Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves," *Arkiv für Fysik*, **150**, 3805, p. 405-406. (1942).
- [2] R.J. Dumont *et al.*, "Scenario development for the observation of alpha-driven instabilities in JET DT plasmas", *Fusion*, **58**, 082005 (2018)
- [3] M. Lesur, "The Berk-Breizman model as a paradigm for energetic particle-driven Alfvén eigenmode" PhD Thesis, Ecole Polytechnique X (2010).
- [4] Y. Todo and A. Bierwage, "Large-scale simulation of energetic particle driven magnetohydrodynamic Instabilities in ITER plasmas", *Fusion*, **9**, 3403068 (2014)

Challenge : maximiser le confinement et contrôler les instabilités de bord du plasma



AUX FRONTIÈRES DU DOMAINE OPÉRATIONNEL

Le domaine opérationnel

Pour réaliser la fusion dans un tokamak, on vise à maximiser la pression du **plasma** et le **temps de confinement de l'énergie** de façon à satisfaire le **critère de Lawson**. Pour ce faire, il est tentant de chauffer plus fortement le plasma ou bien d'augmenter le courant qu'il porte (pour accroître le champ magnétique de confinement). Cependant, comme on l'a vu dans l'article #1 "**Stabilité magnéto-hydro-dynamique**", les gradients de pression et de densi-

ment du courant. Le plasma étant devenu froid et donc très résistif (car, à l'inverse des solides comme le cuivre, le plasma est d'autant plus mauvais conducteur électrique qu'il est froid), le courant qui y circulait ne peut plus être maintenu et se dissipe par effet Joule en une fraction de seconde. Ceci génère des forces électromagnétiques qui s'exercent sur les structures du tokamak et les éléments intérieurs à l'enceinte. C'est également durant cette phase que des faisceaux d'électrons ultra-relativistes peuvent être créés à cause du fort champ électrique induit par la décroissance du courant plasma [3]. Ces faisceaux peuvent conduire à des endommagements localisés et profonds des éléments internes de la chambre à vide.

Il est clair qu'une disruption est un événement à prévoir et à éviter, et ceci est d'autant plus vrai que le tokamak est gros, notamment pour des raisons de rapport volume sur surface. Si les disruptions sont monnaie courante dans les tokamaks de taille moyenne et ne posent pas de problèmes particuliers, elles doivent donc être traitées avec plus de soin dans des machines plus grosses comme JET

et font l'objet de la plus grande attention dans ITER.

Naviguer dans le domaine opérationnel

Comme le montre la figure 4, la disruption est d'autant moins probable que l'on travaille loin des limites. Cependant, pour des raisons de performance, on cherche au contraire à s'en approcher, à l'image d'un pilote de course qui prend ses virages le plus vite possible. Un point délicat est que la position précise des

de l'airbag : l'impact est inévitable, on cherche donc à minimiser les conséquences. L'amortissement des disruptions fait l'objet de recherches intenses. La majorité des systèmes actuels reposent sur une injection massive de matière (gaz ou glaçons), qui peut avoir trois

effets bénéfiques : premièrement, dissiper l'énergie thermique du plasma par rayonnement, ce qui réduit considérablement les flux de chaleur ; deuxièmement, accélérer l'étalement du courant afin de minimiser les forces sur les structures ; et troisièmement, augmen-

ter la densité du plasma pour empêcher la formation d'un faisceau d'électrons ultra-relativistes. •

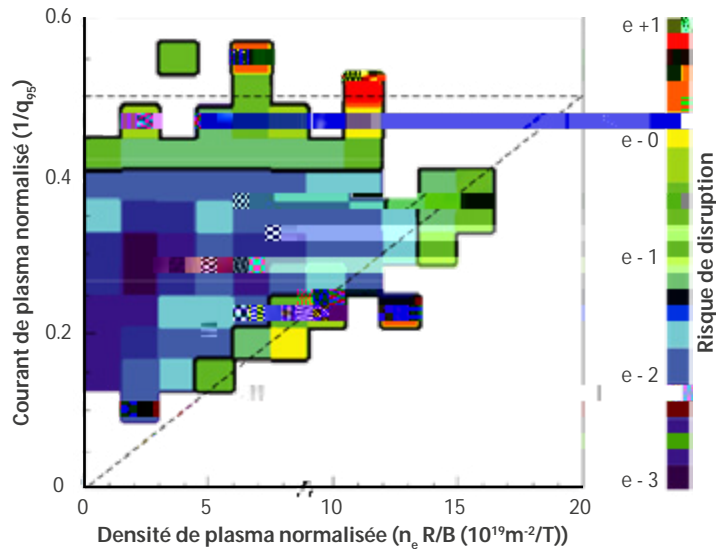


Fig. 4 : Risque de disruption en fonction de la densité et du courant plasma sur le tokamak JET : plus on s'approche des lignes pointillées, plus le risque de disruption est grand.

RÉFÉRENCES

- [1] T.C. Hender *et al.*, "Progress in ITER Physics Basis. Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions", *Fusion Technol.*, **47**, S128 (2007)
- [2] E. Nardon *et al.*, "Progress in understanding disruptions triggered by massive gas injection via 3D non-linear MHD modelling with JOEUK", *Conf. Proc. Fusion Technol.*, **59**, 014006 (2016)
- [3] C. Reux *et al.*, "Runaway electron beam generation and mitigation during disruptions at JET-ILW", *Fusion Technol.*, **55**, 093013 (2015)

DÉTECTER L'INVISIBLE

par Roland Sabot, Philippe Moreau & Didier Vézinet

Les instabilités MHD sont parfois la source d'une baisse des performances des plasmas de fusion. Elles se caractérisent par des modifications locales des grandeurs du plasma (courant, champ magnétique, température, densité, rayonnement...). Comprendre leur apparition, leur évolution et leur structure spatiale demande le développement d'instruments dédiés.

DÉTECTER L'INVISIBLE

Des diagnostics pour observer les instabilités

La maîtrise et le contrôle des instabilités **MHD** passe par le développement d'outils numériques complexes pour simuler et comprendre leur comportement (voir chapitres précédents). Des outils de mesure précis et sensibles sont aussi nécessaires pour détecter ces instabilités et caractériser leurs propriétés, et ainsi comparer les observations aux prédictions théoriques.

Impossible pourtant de songer à plonger un instrument de mesure dans le **plasma** pour détecter une instabilité MHD, il serait instantanément détruit par la température extrême au cœur du plasma. On développe donc des instruments sensibles aux ondes et champs électromagnétiques [1]. Plus récemment des techniques d'imagerie sont mises en œuvre. Dans cet article sont décrits les principaux instruments de mesure utilisés sur le tokamak **WEST** pour observer les instabilités MHD. Ces instruments complètent le panel de mesure nécessaires à l'étude des instabilités MHD. En effet, le calcul du taux de croissance d'une instabilité ou la reconstruction d'un équilibre magnétique nécessitent de connaître avec précision de nombreux paramètres comme les profils de courant, de température, de densité etc.

Le plasma et les fluctuations magnétiques

Au sein d'un plasma, des perturbations magnétiques sont provoquées par la présence d'îlots magnétiques dont l'échelle caractéristique est de l'ordre du centimètre pour une fréquence de quelques kilo **Hertz** et par la turbulence dont l'échelle est de l'ordre du millimètre pour une fréquence de quelques centaines de kilo Hertz. Ces perturbations sont localisées sur les surfaces magnétiques particulières où les lignes de champ se rebouclent sur elles-mêmes après un nombre entier m de grands tours du tore tout en ayant accompli dans le même temps un nombre entier n de rotation dans le plan vertical, le **facteur de sécurité** est alors un nombre rationnel (m/n). Ces perturbations possèdent une structure tridimensionnelle caractéristique de la surface rationnelle sur laquelle elles se développent. Chaque perturbation est alors caractérisée par sa fréquence, sa structure tridimensionnelle (dans les directions **poloïdale** et toroïdale) et par son amplitude.

L'enjeu consiste à déterminer à partir de mesures de fluctuations magnétiques faites sur la périphérie du plasma l'ensemble des

caractéristiques des perturbations. Pour cela, il faut avant tout posséder un capteur magnétique suffisamment robuste pour être placé aussi proche du plasma que possible et permettant de mesurer des signaux dans une large gamme de fréquence (quelques centaines de Hz à quelques centaines de kHz). Dans cet exercice, les sondes de Mirnov sont les capteurs les plus répandus. Il s'agit d'un fil conducteur enroulé sur un mandrin à la façon d'une bobine de 1 à 2 cm de diamètre. Leur conception, notamment la dimension du capteur, est un compromis permettant de maximiser sa sensibilité et sa fréquence de coupure. L'environnement des capteurs doit aussi être pris en compte. En particulier, il est important d'éviter de protéger le capteur par des matériaux dans lesquels des boucles de courant pourraient se former et ainsi écranter le champ magnétique. Chaque capteur pris individuellement ne donne qu'une vision **3 Tw 1**

tographe sportif qui sélectionne un temps de pose très court). Cela permet aussi de caractériser les fluctuations de densité du plasma, qu'elles soient dues à des instabilités MHD ou à la turbulence.

Construire des cartes de densité

Pour reconstruire des cartes de densité, on utilise l'astuce du scanner médical. Mais au lieu de faire tourner le détecteur autour du patient pour reconstruire une image en coupe du corps humain, on utilise la rotation des perturbations de densité dans le plasma [4]. Cette astuce peut être appliquée car la durée d'une mesure d'un pro.de e ded351,

magnétique [5] [6] qui affecte le volume central du plasma où les réactions de fusion se produisent.

Construire des cartes du rayonnement X-mou

Ce rayonnement X-mou, pour lequel le plasma est transparent, peut être mesuré par des diodes placées autour du plasma. Le signal obtenu est proportionnel à l'intensité X-mou intégrée sur le champ de vision de la diode qui est restreint à un cône de faible ouverture (de quelques degrés sur WEST).

En plaçant soigneusement de diodes dans une section poloidale, on peut retrouver, à l'aide de techniques de tomographie (comme en imagerie médicale), une carte 2D de l'intensité X-mou émise par le plasma. En combinant ces mesures d'intensité X-mou avec celles de densité et de température, il est possible d'identifier la contribution des impuretés.

Des diagnostics indispensables

Ces instruments dédiés complètent le panel d'instruments de mesure nécessaires à l'étude des instabilités MHD. La reconstruction d'un équilibre magnétique,

RÉFÉRENCES

- [1] I.H. Hutchinson, "Principles of plasma diagnostics", Cambridge University Press, 2nd edition, 2002
- [2] E. J. Strait, "Magnetic diagnostic system of the DIII-D tokamak", *Journal of Nuclear Energy*, **77**, série DIII-D tok

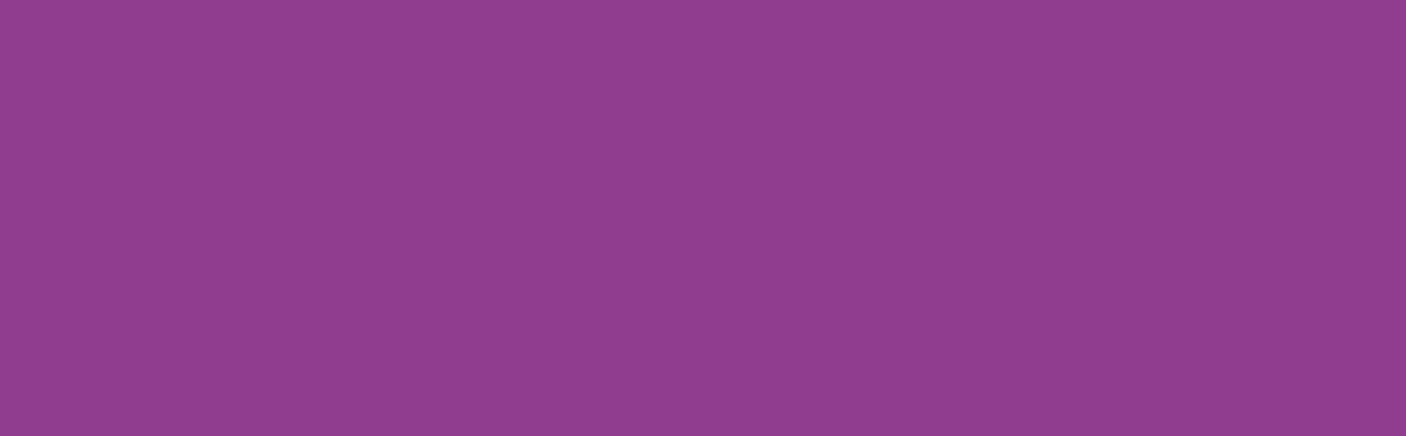




Fig. 3 : Intérieur du tokamak WEST (CEA-IRFM - France)



Fig. 4 : Intérieur du stellarator W7-X (IPP Garching - Allemagne)



ITPA (International Tokamak Physics Activities) : coordination internationale des recherches sur la fusion, patronnée par l'organisation ITER (<https://www.iter.org/fr/org/team/fst/itpa>).

Linéaire / non linéaire : dans un processus linéaire, la réponse d'un système est proportionnelle à l'action qui lui est appliquée. Pour une instabilité, la phase linéaire correspond au début de l'instabilité, lorsqu'elle ne produit qu'une oscillation autour de l'équilibre. Durant la phase non linéaire, l'instabilité atteint un niveau de saturation tandis que l'équilibre est lui-même affecté et évolue vers un nouvel état.

MHD : acronyme de Magnéto-Hydro-Dynamique, domaine de recherche consacré à l'évolution des fluides conducteurs plongés dans un champ magnétique. Le plasma peut, dans certaines limites, être considéré comme un fluide conducteur d'électricité. Lorsque des particules très énergétiques entrent en jeu, la description MHD n'est plus adaptée et elles doivent être traitées séparément (voir article MHD cinétique)

Ohm (loi d') : relation entre la densité de courant et le champ électrique dans un milieu conducteur. On parle de loi d'Ohm idéale quand le plasma peut être considérée comme un conducteur parfait. Dans ce régime le plasma est dit "idéal".

Plasma : gaz chaud ionisé. Les ions et les électrons qui constituent les atomes ne sont alors plus liés à cause de leur très grande température (de l'ordre de 100 millions de degrés dans un plasma de fusion).

Poincaré (coupe de) : méthode de représentation des lignes de champ magnétique d'un plasma de tokamak, du nom du mathématicien qui en a introduit le concept. Elle consiste à suivre des lignes de champ le long de plusieurs tours toroïdaux et à marquer leurs intersections avec un plan donné (typiquement un plan poloidal). Le suivi d'un grand nombre de lignes de champ permet de caractériser la topologie du champ

CONTRIBUTEURS



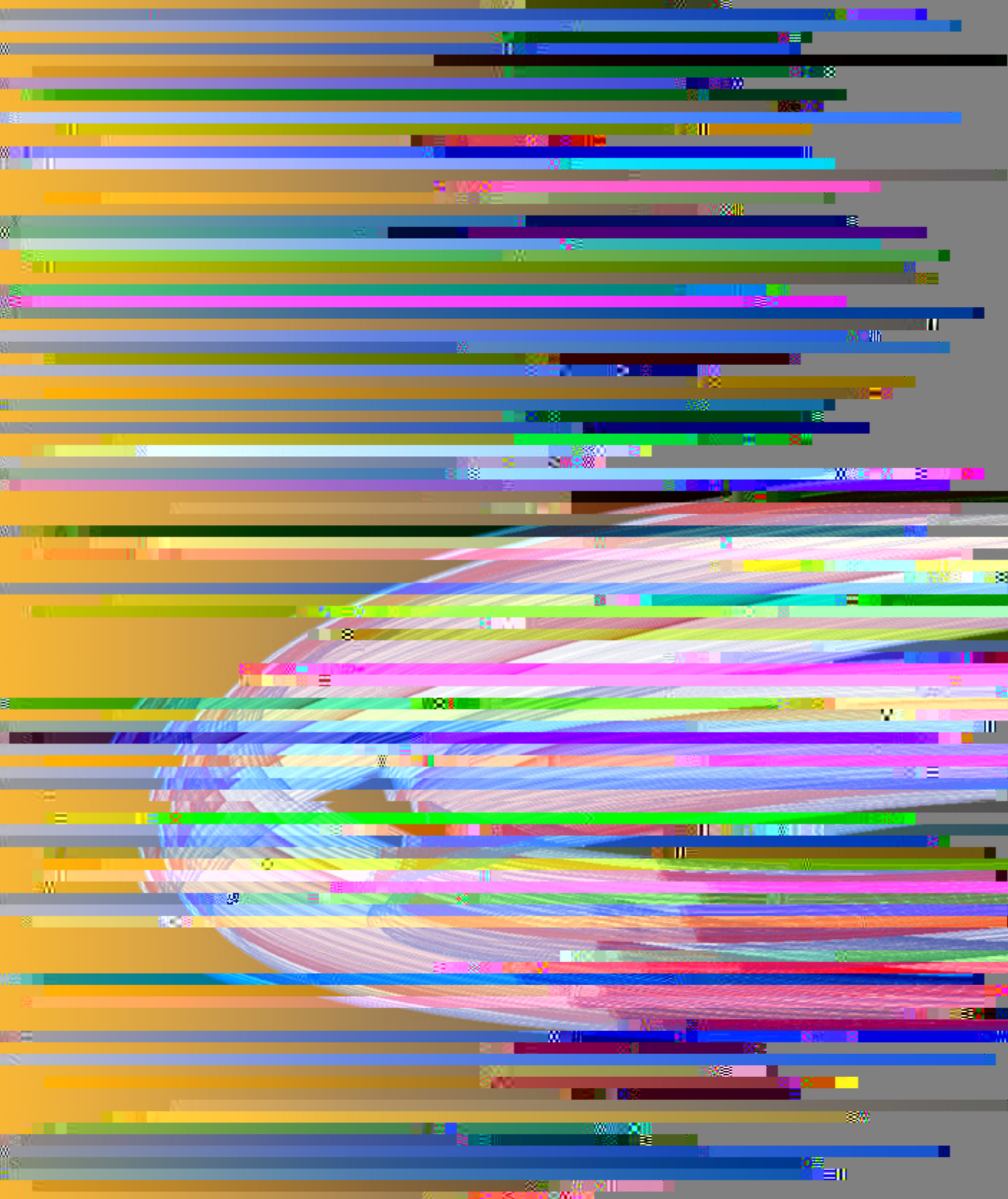
Marina Bécoulet
CEA, IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, F

SCIENCES EN FUSION #1

Image de couverture :

Structure tri-dimensionnelle des surfaces magnétiques d'un plasma de tokamak en présence d'un îlot magnétique, superpo-





irfm.cea.fr



www.fr-fcm.fr