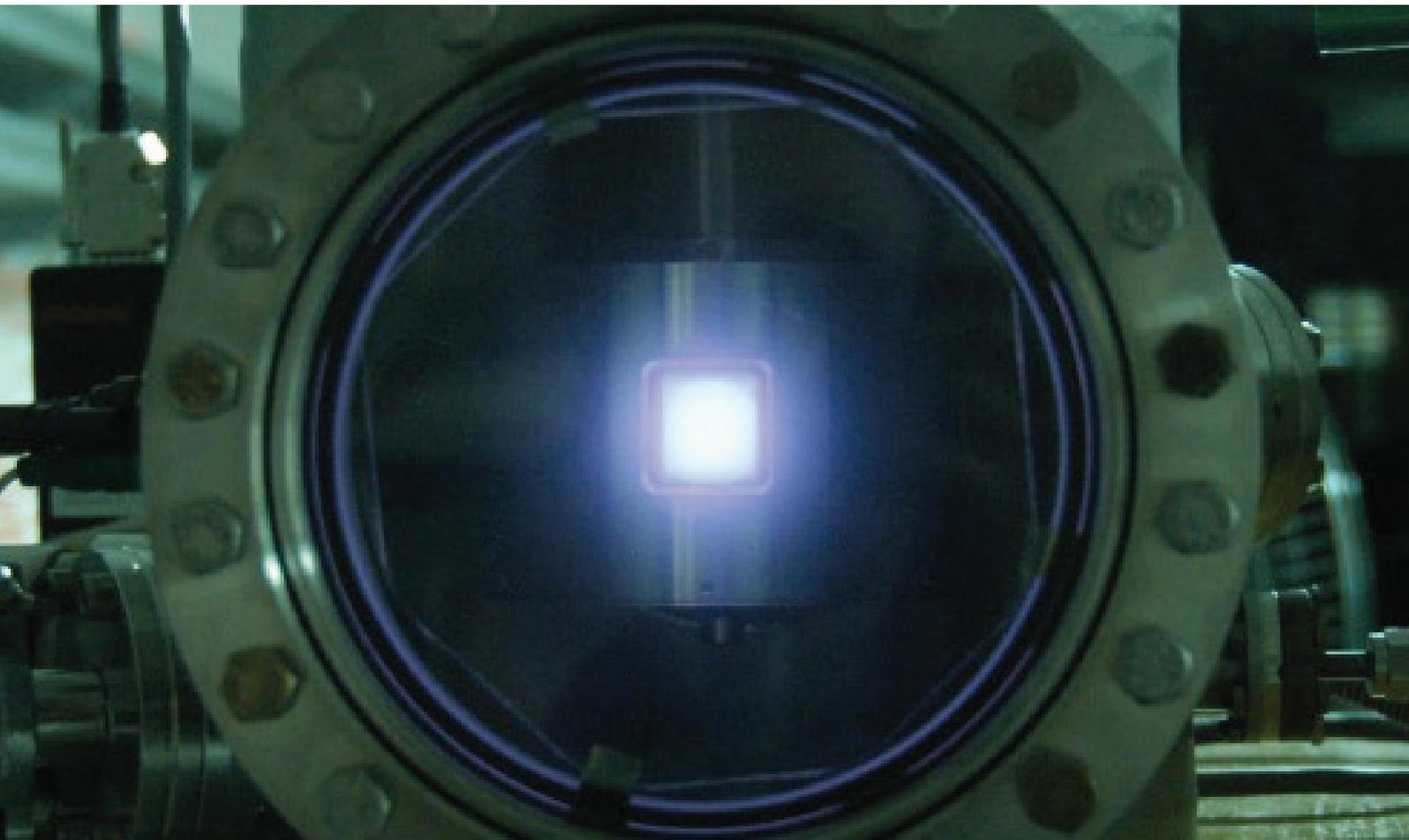


Rapport de synthèse 2013

# Programme de recherche Fusion thermonucléaire contrôlée



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE  
Office fédéral de l'énergie OFEN

**Page de couverture :**

**Plasma d'argon pour nettoyer un dépôt sur un miroir par bombardement ionique.**

**Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire contrôlée**

Rapport de synthèse 2013

**Mandant :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

**Chef de programme (auteurs):**

Dr. Laurent Villard (CRPP), Dr. Laurent Marot (Université de Bâle)

**Chef de domaine de l'OFEN :**

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

<http://crppwww.epfl.ch>

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

## Introduction

Depuis de nombreuses années, la Suisse a été associée aux recherches sur la fusion. En effet, en 1958, la 2ème Conférence internationale sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique s'est tenue à Genève et a donné lieu à la déclassification des recherches en fusion. Trois ans après, en 1961, avec la création du Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) [1], la Suisse s'est jointe au club des nations pionnières dans ce domaine. Dès 1979, un accord de coopération passé avec EURATOM l'associe pleinement au Programme européen de recherches en fusion. La Suisse y apporte des compétences spécifiques et cet accord lui permet de les valoriser au niveau international.

Les avantages et défis de la fusion sont remarquables. Cette technolo-

gie devrait permettre de produire une énorme quantité d'énergie presque sans émission de CO<sub>2</sub>. Le combustible est disponible en grande quantité et bien réparti sur terre. Un réacteur de fusion est intrinsèquement sûr et sa puissance peut être transformée en chaleur, électricité ou utilisée pour la production d'hydrogène. Une centaine d'années après son déclassement, le matériel activé par la réaction devrait pouvoir être entièrement recyclé, et déclaré non-radioactif. Tous ces avantages doivent être mis en regard d'une difficulté majeure: la fusion nucléaire nécessite des conditions extrêmes pour sa mise en service. Le défi est autant physique que technologique. Le Programme européen de recherches en fusion s'est concentré dès son début sur le développement de l'électricité.

Depuis près de 40 ans, cette stratégie a été suivie avec ténacité par EURATOM. Il est à noter que d'immenses progrès ont été effectués: ils ont permis le lancement du projet international ITER, dont la construction est en cours à Cadarache (France). De plus, tous les partenaires d'ITER ont pris l'initiative de préparer l'étape suivante, un réacteur de démonstration capable de produire une quantité appréciable d'électricité. Ce projet appelé DEMO est prévu pour les années 2040-2050 et devrait permettre la réalisation industrielle de l'énergie de fusion.

Les recherches menées au CRPP, basé à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), ainsi qu'à l'Université de Bâle s'inscrivent pleinement dans un cadre à la fois européen et international.

## Développements en 2013 au niveau européen

### Nouveau programme européen de recherches en fusion (EUROfusion)

Au niveau européen, 2013 était la dernière année du 7ème Programme Cadre de Recherche et de Développement (PCRD), auquel le Programme européen de recherches en fusion est rattaché. Le PCRD suivant, appelé Horizon 2020, a été finalisé et approuvé en 2013, et durera de 2014 à 2020. Par rapport au 7ème PCRD, la partie Fusion de Horizon 2020 présentera des nouveautés. Son plan de travail est exclusivement basé sur le document « EFDA Roadmap to the realisation of fusion energy » [2]. Le but de cette „Roadmap“ traduit celui formulé par EURATOM, à savoir la réalisation d'un réacteur de démonstration DEMO vers les années 2050. Pour cela, la „Roadmap“ inclut dans son plan de travail des études de physique, des activités de R&D pour la technologie nécessaire à DEMO, ainsi qu'un important volet consacré à l'éducation de nouvelles

générations de scientifiques et d'ingénieurs.

Les Unités de Recherche des pays membres d'EURATOM et des pays associés (la Suisse) participeront à l'exécution scientifique de la „Roadmap“ dans le cadre du consortium EUROfusion. L'année 2013 a été consacrée à la préparation d'EUROfusion, avec des discussions approfondies entre toutes les Unités de Recherche concernées sur la structure de ce consortium et de ses statuts. A la fin de 2013, un Memorandum of Understanding établissant EUROfusion a été proposé pour signature. En parallèle, l'implémentation du plan de travail pour l'année 2014 a été également finalisée. A l'issue d'un processus compétitif sur le plan européen, les Unités de Recherche membres d'EUROfusion se sont vues attribuer des tâches et projets scientifiques et promettre un financement pour les mener à bien. Il est prévu qu'un contrat de cofinancement soit signé entre EURATOM et le

EUROfusion dans la seconde moitié de 2014, finalisant ainsi le processus de transformation du Programme européen de recherches en fusion.

### Participation européenne à la construction d'ITER

Participer à la construction d'ITER constitue l'autre axe fort des activités européennes dans le domaine de la fusion. Cette participation demeure sous la responsabilité de l'entreprise européenne commune Fusion for Energy (F4E). Suite au départ en retraite du Directeur Général F. Briscoe en 2012, le Governing Board de F4E a élu pour le remplacer le danois H. Bindsvlev, qui a pris ses fonctions en 2013. La planification d'ITER reste une préoccupation majeure de tous les partenaires du projet, et un nouveau plan « réaliste » pour la production du premier plasma est en préparation.

Classification de l'AIE : 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse : 3.2 Fusion

## Développements en 2013 au niveau extra-européen

Tout comme EURATOM, plusieurs autres partenaires d'ITER (comme la Chine, la Corée ou l'Inde) visent également la réalisation de DEMO vers 2050. Ceci montre qu'un consensus international existe sur l'industrialisation de la fusion dans la deuxième moitié du XXIème siècle, et une confirmation en

a même été donnée en octobre 2013 lors de la XXème World Energy Conference en Corée. Les participants à la séance de discussion « Fusion : Betting on a different future » y ont en effet conclu que la réalisation de DEMO pour 2050 est un objectif réalisable.

Par ailleurs, les groupes de recherches suisses sont actifs dans certains des 8 Implementing Agreements (IA) pour la fusion mis en place par l'Agence internationale de l'énergie (IEA). La Suisse participe à ces IA par l'entremise de son association avec EURATOM.

## Développements en 2013 entre la Suisse et EURATOM

En 2013, le Parlement Suisse a approuvé à une large majorité de financer la participation de la Suisse au programme Horizon 2020 complet, donc y compris à ses parties consacrées à la fusion nucléaire.

Tout au long de 2013, des représentants suisses ont pris une part active

à la préparation d'EUROfusion tant sur les plans administratif scientifique. L'EPFL a signé le Memorandum of Understanding établissant EUROfusion et y représente l'ensemble des chercheurs suisses actifs dans le domaine de la fusion. Des projets du CRPP et de l'Université de Bâle ont été sélectionnés pour le programme scientifique de

l'année 2014. De plus, trois membres du CRPP ont été choisis comme chefs de projets d'Eurofusion. La Suisse devrait donc jouer un rôle important dans le cadre du Programme européen de recherches en fusion sous Horizon 2020.

## Highlights Recherche et Développement

### CRPP

En 2013, le CRPP a participé aux activités scientifiques et technologiques du programme EURATOM ainsi qu'au projet ITER, notamment au travers de l'agence domestique européenne Fusion for Energy F4E. Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée sont effectuées sur deux sites : à l'EPFL, les activités portent sur la physique du confinement magnétique, avec le tokamak TCV, l'expérience de base TORPEX, la théorie et la simulation numérique, la technologie de la fusion liée au chauffage du plasma et la génération de courant par ondes hyperfréquences ; au PSI, les activités sont consacrées à la supraconductivité. De plus, le CRPP participe aux expériences sur le Joint European Torus (JET), qui reste à ce jour la plus grande expérience de fusion magnétique au monde en opération. Toutes ces activités de recherche ont abouti en 2013 à une centaine d'articles dans des revues scientifiques à comité de lecture et à une centaine de communications lors

de congrès internationaux, dont plusieurs en tant que papiers invités [3].

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a une trentaine de doctorants dont plusieurs ont obtenu en 2013 leur titre de doctorat. Enfin, en 2013, le CRPP a maintenu ses tâches d'enseignement de base et ses nombreuses activités de relations publiques visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion contrôlée à des non-spécialistes.

### Travaux sur le tokamak TCV

La machine TCV (Tokamak à configuration variable) sur lequel travaille le groupe du même nom présente deux propriétés uniques au monde : d'une part, la grande flexibilité de sa conception et de son mode d'opération permet la création et le contrôle de plasmas de formes très différentes, ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futurs réacteurs de fusion ; d'autre part, le système

d'injection d'ondes millimétriques afin de chauffer le plasma et générer du courant est caractérisé par une grande souplesse et permet d'orienter la puissance injectée selon des profils spécifiques. C'est en utilisant ces caractéristiques uniques que les recherches sur le TCV se poursuivent.

Le tokamak TCV a été exploité de façon très intensive en 2013, en prévision d'un arrêt prévu en 2014. Ce « shut-down » permettra une modification importante de la chambre à vide en vue de l'installation d'un nouveau système par injection de faisceaux de neutres de 1 MW pour chauffer les ions du plasma. Les travaux préparatoires pour la modification de la chambre à vide de TCV ont été achevés, et des contrats industriels ont pu être signés. Cette deuxième phase de l'augmentation de chauffage de TCV démarrera début 2014, pour une mise en service prévue en 2015. En attendant, une moisson impressionnante de résultats scientifiques a pu être récoltée en 2013.

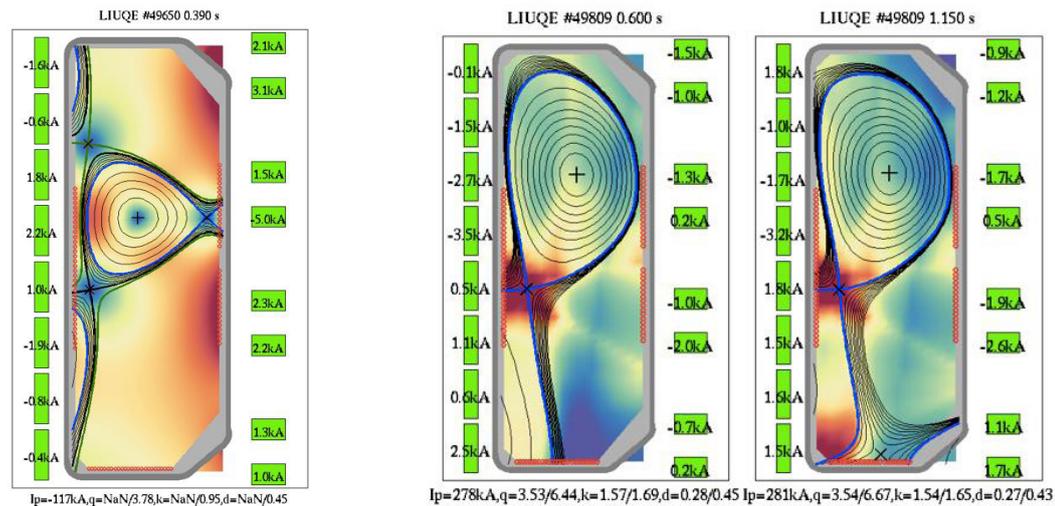


Fig. 1: Configurations exotiques du plasma dans le tokamak TCV. A gauche, le triple-X. Au milieu, une configuration X standard évoluant à droite vers le super-X.

- Un nouveau régime de confinement amélioré, appelé « IN-mode », a été découvert sur TCV. Il est caractérisé par des profils très raides de la densité près du bord du plasma, alors que les gradients de température restent plus modestes, ce qui permet d'éviter certaines instabilités et les phénomènes transitoires délétères associés, tout en obtenant un bien meilleur confinement. Ce régime a le potentiel de conduire à une plus haute efficacité pour l'opération d'un réacteur de fusion. Une campagne de mesures a été entreprise pour analyser en détail la région près du bord (les 10% extérieurs de la colonne de plasma). Une des découvertes majeures est que les profils, dans cette région, ne sont pas aussi « rigides » que ceux plus à l'intérieur du plasma. La « rigidité » des profils résulte du fait que le transport turbulent augmente très rapidement au-delà d'un certain gradient dit « critique » : une augmentation même très importante de la puissance ne résulte alors qu'en une augmentation modeste de la température. Le fait que cette rigidité soit absente, ou pour le moins réduite, dans les régions périphériques, permet d'expliquer l'amélioration du confinement dans certains régimes d'opération.
- Plusieurs études ont porté sur la détermination du seuil de puissance nécessaire pour atteindre le mode de confinement amélioré prévu comme scénario principal pour ITER, dit « H-mode ». Dans ITER, la première phase de l'opération sera effectuée dans de l'hydrogène, puis de l'hélium (afin d'éviter l'activation), avant de passer au deutérium. Les mesures effectuées sur TCV ont montré que le seuil de puissance est 15-20% plus élevé pour l'hydrogène et l'hélium que pour le deutérium. Ce seuil est en outre fortement dépendant de la longueur de la séparatrice extérieure.
- Les régimes d'opération avancés du tokamak ont continué à être étudiés. Les barrières de transport électroniques (caractérisées par des gradients localement très élevés de la température électronique) ont été revisitées en bénéficiant de mesures de haute qualité des propriétés ioniques : aucune barrière n'apparaît sur les ions. Une documentation complète du comportement du champ électrique radial pendant la formation des barrières de transport a été recueillie.
- Un régime d'opération très intéressant pour un réacteur a été revisité : celui pour lequel le courant dans le plasma est entièrement généré par l'effet dit de « bootstrap », qui est un mécanisme couplant les gradients de température et de densité avec le courant plasma dans la direction toroidale. L'opération d'un tokamak nécessite la présence d'un courant, et la méthode traditionnelle, dite « ohmique », basée sur le phénomène d'induction électromagnétique, résulte en un temps limité de l'opération lorsque le transformateur est complètement déchargé. Avec 100% de courant généré par l'effet bootstrap, l'opération d'un tokamak peut devenir vraiment continue. Plus de 100% de courant bootstrap a même pu être obtenu sur TCV en rechargeant le transformateur ohmique, ce qui montre définitivement la robustesse de cet effet.
- L'amélioration du confinement en fonction de la forme triangulaire de la section du plasma, un phénomène mis en évidence sur TCV, a reçu toute l'attention des chercheurs. Une campagne intensive a été conduite dans le but de documenter les propriétés de la turbulence et des instabilités associées, grâce à une combinaison unique de plusieurs diagnostics : imagerie à contraste de phase, corrélation de l'émission cyclotronique électronique et rétrodiffusion Doppler. Une forte réduction de l'amplitude de la turbulence a été détectée dans les

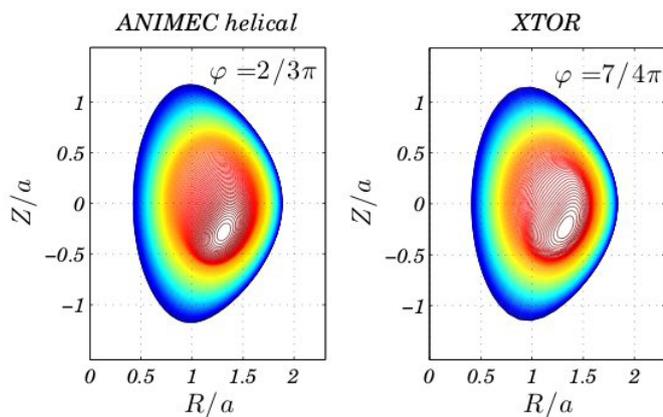


Fig. 2 : Vues en coupe du tokamak MAST présentant une déformation hélicoïdale du cœur. À gauche, le résultat d'un calcul numérique d'un état d'équilibre 3D ; à droite, le résultat d'une simulation dynamique non linéaire. Cette déformation a pour conséquence de modifier la déposition d'énergie des faisceaux de neutres rapides.

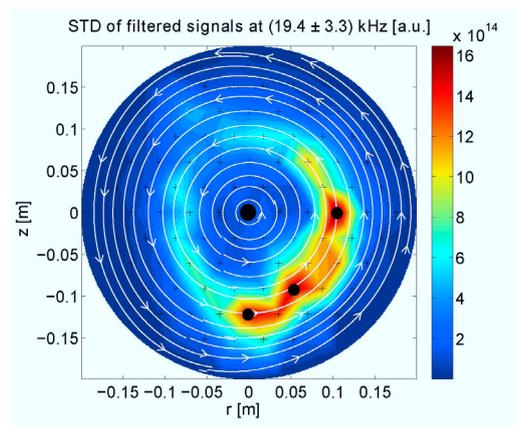


Fig. 3 : Dans une configuration Torpex avec conducteur toroidal (point noir au centre), des surfaces magnétiques sont créées (lignes blanches) et les fluctuations de densité (contours de couleur) sont observées par des sondes.

décharges à triangularité négative, jusque bien à l'intérieur du plasma, là où paradoxalement la forme des surfaces magnétiques n'est pratiquement pas triangulaire. Ceci pose un défi à la théorie.

- L'étude à plusieurs diagnostics de phénomènes liés à la turbulence, en particulier des oscillations dites géodésiques-acoustiques (GAM) s'est poursuivie. En changeant le courant plasma dans une même décharge, une transition entre la présence d'un mode global, de fréquence bien définie, et celle d'un continu de fréquences a pu être observée pour la première fois.
- Grâce à son système de chauffage électronique de 4.5MW, l'équipe TCV est également pleinement engagée dans l'étude fondamentale de l'interaction onde-particule et en particulier de la dynamique des électrons rapides. Avec un nouveau diagnostic de rayons X durs, les premières images tomographiques d'un tokamak non circulaire ont été obtenues. Les asymétries prédites par la théorie ont été confirmées expérimentalement.
- La physique du bord du plasma est aussi un domaine d'activité important pour l'équipe TCV, tant pour les configurations conventionnelles que pour les formes de plasmas plus sophistiquées. Dans un réacteur de fu-

sion tel que DEMO, il sera impératif qu'une large fraction de la puissance soit dissipée par rayonnement, afin d'éviter une trop forte charge de la paroi. Dans cette perspective, des impuretés de Néon ont été injectées pour augmenter la fraction de puissance rayonnée. En comparant une forme de plasma dite « snowflake », développée sur TCV, avec une forme plus conventionnelle, il a été montré que le snowflake rayonne 15% de plus : ceci est dû à son plus grand volume rayonnant.

- La flexibilité de la forme de TCV a été exploitée pour valider une récente prédiction théorique de la rotation du plasma au bord du plasma. Cette théorie prédit notamment l'inversion de la direction de rotation lorsque le point-X du diverteur est déplacé vers l'extérieur. Les résultats expérimentaux confirment cette prédiction.
- Des formes de plasma encore plus exotiques ont été tentées avec succès à la fin de la campagne 2013 : le triple-X (3 points X régulièrement espacés le long de la frontière du plasma) et le super-X (caractérisé par la présence d'un deuxième point X sur une des jambes du diverteur), voir Fig. 1. Ceci forme une base pour l'exploration future des propriétés potentiellement favorables de ces nouvelles formes.

- Le contrôle en temps réel prend de plus en plus d'importance. Cet aspect imprègne pratiquement tous les thèmes scientifiques de l'équipe TCV. Au cœur de ces développements, les chercheurs ont démontré la capacité de calculer très rapidement (à une échelle de temps inférieure à la milliseconde) un équilibre reconstruit à partir des mesures du plasma, afin de l'inclure dans la boucle de contre-réaction en temps réel. Cette fonctionnalité nouvelle a été utilisée entre autres pour contrôler certaines instabilités en injectant de la puissance RF à des endroits bien précis du plasma. La démonstration d'un prototype de contrôleur de forme généralisé a aussi pu être effectuée avec succès.

## Théorie et simulation numérique

Le groupe de Théorie et simulation numérique se focalise sur une approche de la compréhension des machines de fusion basée sur les principes premiers de la physique. Ceci est essentiel pour interpréter les résultats des expériences existantes et prédire ceux des machines de fusion futures. Comprendre et simuler le comportement du plasma représente un défi considérable, néces-

sitant à la fois des théories analytiques avancées et des codes de calcul numérique à la pointe du progrès. Ces codes, développés au CRPP et dans le cadre de collaborations internationales, sont utilisés en production sur certaines des plateformes de calcul à haute performance (HPC) parmi les plus performantes au monde et en Suisse : Helios (IFERC-CSC, au Japon, financé dans le cadre de l'accord « Broader Approach », et dont l'accès est réservé aux participants aux Programmes de recherches en fusion européen et japonais), ainsi que Rosa (CSCS) et Lemanicus (Cadmos) en Suisse. Des dizaines de millions d'heures de calcul ont été allouées à des projets dirigés par des membres du CRPP. L'expertise du groupe en matière de HPC a continué d'être sollicitée, en particulier par la participation active d'un de ses membres au projet « High Level Support Team » du Programme européen de recherches en fusion.

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines de recherche suivants. (1) La simulation de la turbulence dans le cœur des tokamaks ; (2) L'analyse des instabilités fluides (MHD) dans les tokamaks et d'autres configurations tridimensionnelles, ainsi que leur interaction avec les particules rapides ; (3) L'investigation de la dynamique des plasmas au bord des réacteurs de fusion.

Le groupe maintient des liens très étroits avec le groupe TCV, avec une activité importante dans la modélisation et l'interprétation des résultats expérimentaux. Les investigations de la turbulence dans la machine TORPEX constituent également un atout important pour le groupe.

- Il a été montré que la turbulence dans le tokamak TCV, causée par des instabilités produites par les électrons piégés, génère des oscillations, appelées modes géodésiques acoustiques. La mesure de ces oscillations avec divers diagnostics a été comparée avec succès à des simulations numériques globales. Cette étude a permis de confirmer la validité des modèles théoriques.
- Les premières simulations globales de la turbulence dans des tokamaks ayant la forme d'ITER ont été accomplies en utilisant le modèle

des électrons piégés. Une première étude a montré que les effets globaux dus à la taille finie du plasma sont d'une importance comparable à ceux obtenus avec un modèle plus simple supposant une réponse adiabatique des électrons. De plus, par comparaison avec des simulations dans des plasmas ayant les mêmes paramètres sauf la forme circulaire du plasma, l'effet bénéfique de la forme du plasma d'ITER, qui se manifeste par une réduction substantielle du transport de chaleur dû à la turbulence, a pu être mis en évidence.

- La dynamique des ions et des électrons dans un plasma est très différente. C'est le cas en particulier au voisinage de certaines surfaces bien particulières du plasma, appelées « surfaces rationnelles ». Une recherche systématique de la dynamique de la turbulence et de l'effet des surfaces rationnelles a été menée, en comparant entre eux les résultats de différents modèles pour la dynamique des électrons. Il a été montré que les électrons passants créent des structures formant des barrières de transport aux voisinages des surfaces rationnelles.
- Le transport turbulent de chaleur dans les tokamaks est généralement caractérisé par une augmentation très rapide au-delà d'un certain gradient de température critique, résultant en des profils rigides : une augmentation de la puissance ne résulte qu'en un changement de gradient très modeste. Cependant, il a été montré que les profils sont rigides au cœur du plasma, mais beaucoup moins en périphérie, et que de plus cette rigidité dépend de la forme triangulaire du plasma, résultant en un confinement amélioré pour des triangularités négatives.
- Les tokamaks ont été conçus pour avoir un axe de symétrie. Cependant, il a été montré que même avec un bord axisymétrique, le cœur du plasma pouvait se déformer en hélice. Deux approches théoriques différentes ont été appliquées à la description de ces phénomènes : d'une part, en considérant que le plasma atteint un état d'équilibre hélicoïdal et d'autre part en consi-

dérant que cet état résulte d'une évolution non linéaire saturée d'une instabilité à partir d'une configuration symétrique. Pour la première fois, ces deux approches ont pu être comparées en détail (Fig. 2). Cette brisure spontanée de symétrie a des conséquences sur le transport des ions rapides : ceux-ci sont en effet partiellement expulsés du cœur du plasma. Le groupe a pu calculer cet effet et le comparer avec succès avec l'expérience conduite sur le tokamak MAST (UK).

- L'étude de la dynamique dans les régions périphériques du plasma (« Scrape-Off Layer », SOL) a également progressé. Des comparaisons systématiques des caractéristiques de la turbulence entre les simulations numériques non linéaires 3D et les mesures expérimentales sur plusieurs tokamaks (TCV, JET, C-MOD, Compass et Tore Supra) ont été menées, avec un bon accord sur une grande plage de paramètres.
- Il y a de plus en plus de preuves expérimentales que les écoulements du plasma dans le SOL jouent un rôle crucial en déterminant la rotation du cœur du plasma. Grâce à des simulations 3D de la turbulence, le groupe a mis en évidence les mécanismes qui conduisent à l'apparition de cette rotation.
- Les effets de la pression finie sur la turbulence dans le SOL ont été investigués. Lorsque celle-ci augmente, la turbulence acquiert des structures globales de grande longueur d'onde, ce qui conduit à un transport de plus en plus important.

## Travaux sur TORPEX

Le programme de recherches conduit par le groupe TORPEX sur la machine du même nom est motivé par l'étude de la turbulence telle qu'elle a lieu dans le bord du plasma du tokamak, dans un environnement similaire, mais dont la relative simplicité, par rapport au tokamak, a l'avantage de permettre des mesures in situ à haute résolution spatio-temporelle.

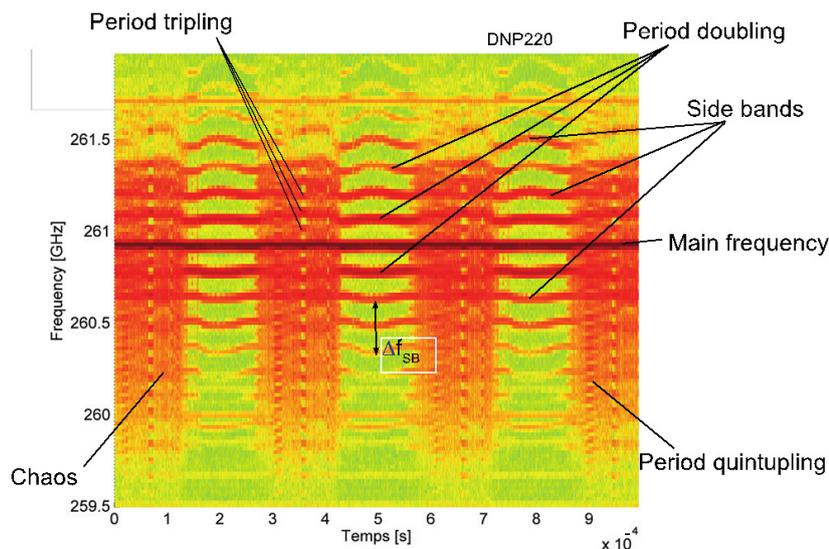


Fig. 4 : Spectrogramme mesuré expérimentalement des fréquences d'un gyrotron au voisinage de 261 GHz, mettant en évidence l'apparition de phénomènes de doublement de la période menant à des phases chaotiques.

- Afin d'imiter ce qui se passe dans le bord d'un tokamak, avec une région où les lignes de champ sont confinées et une région où celles-ci touchent la paroi, un conducteur toroidal a été ajouté à la configuration de base de Torpex., Ceci permet de créer des lignes de champ magnétique avec torsion et ainsi de former une région avec des surfaces magnétiques fermées (Fig. 3).
- L'année 2013 a été consacrée à la caractérisation de cette configuration avec surfaces magnétiques fermées. Le plasma obtenu a une densité, une température et un potentiel électrostatique comparables au cas sans conducteur toroidal. La forme du plasma, toutefois, change pour pratiquement s'aligner avec les surfaces magnétiques. Les fluctuations de densité dans de tels plasmas ont montré une structure dite « ballonnée », c'est-à-dire dont l'amplitude est maximale dans les régions où la courbure du champ magnétique est défavorable. Des oscillations quasi-cohérentes ont également été identifiées.
- L'autre sujet principal d'investigation a été l'étude de l'interaction des ions rapides avec la turbulence. Dans un réacteur, des ions rapides

sont générés par le processus de fusion, mais aussi par l'injection de faisceaux de neutres ou encore d'ondes RF. Dans Torpex, c'est une source miniature d'ions de Lithium qui est utilisée. Le transport des ions rapides a été mesuré et comparé avec des simulations numériques qui incluent un diagnostic synthétique.

## Technologie de chauffage

Le groupe Gyrotron poursuit ses activités dans le développement de sources RF millimétriques, essentielles pour le bon fonctionnement d'un réacteur de fusion. Le groupe est impliqué dans plusieurs programmes de recherche: le chauffage EC (electron cyclotron) de TCV, le système EC d'ITER et celui du stellarateur W7X. Un effort significatif a porté sur l'extension des capacités de la simulation numérique des sources RF de haute puissance et de haute fréquence.

- Un nouveau développement de codes numériques a été accompli, permettant de calculer de l'interaction entre le faisceau d'électrons et les ondes RF. L'évolution dynamique

du champ RF est ainsi obtenue. Ces codes ne bénéficient pas seulement à l'effort de R&D pour la fusion, mais aussi au développement de concepts avancés pour la spectroscopie à résonance magnétique nucléaire, ainsi que pour les recherches fondamentales sur les systèmes dynamiques fortement non-linéaires d'ondes et de particules en interaction.

- Ces nouveaux codes ont permis au groupe de prédire, puis de démontrer expérimentalement l'existence d'un régime intermittent, avec des pulsations de l'ordre de la nanoseconde. Des phénomènes dynamiques très riches ont été mis en évidence, avec notamment, pour la première fois, l'observation d'une transition vers un régime chaotique par un phénomène dit de « cascade avec doublement de la période » (Fig.4).

Dans le cadre du système EC d'ITER, deux projets sont en cours en collaboration avec des laboratoires européens. Le premier porte sur le développement des gyrotrons à 170 GHz délivrant 1MW que F4E devra livrer à ITER, et pour lequel le CRPP est le coordinateur. Le second concerne le développement de l'antenne qui servira à lancer les ondes EC dans ITER (Fig. 5), pour lequel le CRPP est chargé du design de l'optique pour la propagation du faisceau.

## Supraconductivité

Le groupe Supraconductivité, localisé au PSI, a poursuivi ses activités dans le test et la qualification des conducteurs pour ITER sur l'installation Sultan, conformément au contrat signé en 2012 avec l'ITER Organisation (IO). Ces tests concernent les câbles pour les bobines de champ toroïdal, poloïdal, pour le solénoïde central et les bobines de correction.

En parallèle à ces activités, la mise en service de l'installation EDIPO a été poursuivie, avec des tests du champ magnétique et du transformateur qui seront terminés en 2014.

Le troisième volet des activités du groupe est le développement des

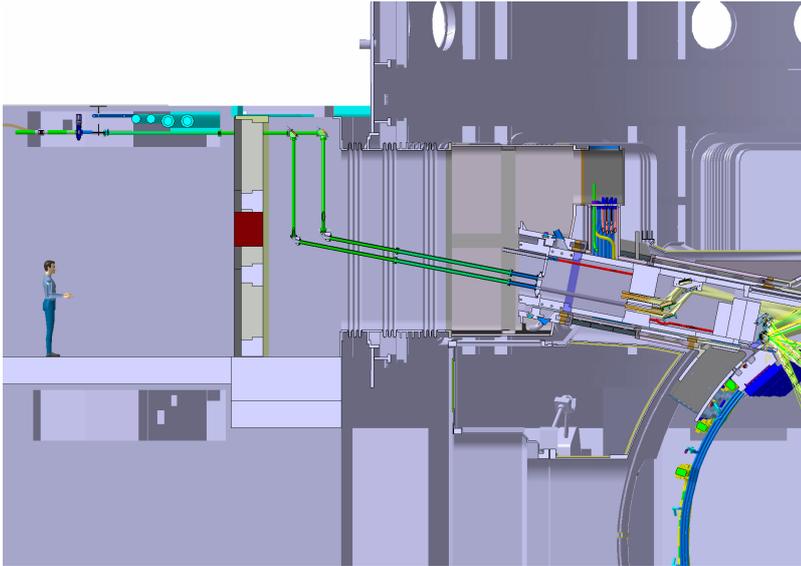


Fig. 5 : Vue en coupe du lanceur d'ondes EC dans ITER.

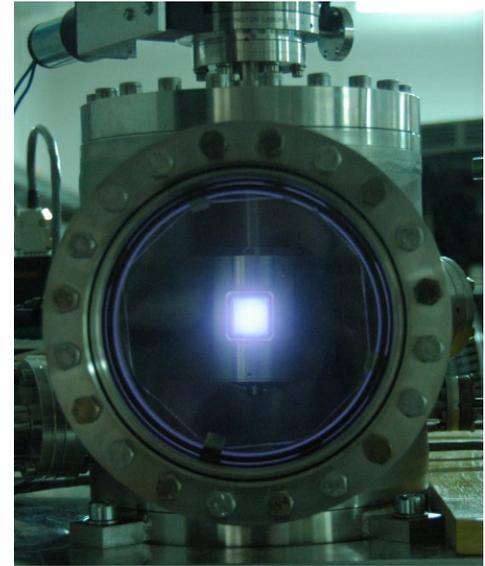


Fig. 6 : Plasma d'argon pour nettoyer un dépôt sur un miroir par bombardement ionique.

conducteurs et des bobines pour le réacteur DEMO dans le cadre de l'IA "Power Plant Physics and Technology" de l'IEA.

### Activités internationales sur les tokamaks

Les CRPP a conduit plusieurs activités sur le tokamak JET (UK), qui est à ce jour le plus grand au monde en opération.

- Des expériences ont été menées, sous la conduite du CRPP, qui ont montré pour la première fois la pertinence de l'application d'ondes RF aux fréquences cyclotroniques ioniques (ICRH) pour contrôler les oscillations répétitives en « dents-de-scie » qui apparaissent spontanément lors de l'opération. Ces dents-de-scie, lorsqu'elles sont de trop forte amplitude, peuvent déclencher d'autres instabilités du plasma et ainsi conduire à une dégradation de la qualité du confinement. Il est d'autant plus important de

pouvoir les contrôler dans un réacteur que la présence des ions rapides générés par le processus de fusion a pour effet de créer des dents-de-scie géantes. Les résultats de 2013 montrent spécifiquement qu'un scénario compatible avec les paramètres d'ITER, soit une injection ICRH avec résonance du côté à bas champ, est efficace pour réduire l'amplitude des dents-de-scie.

- La mesure de la composition isotopique (mélange deutérium-tritium) est nécessaire dans un réacteur de fusion, afin de pouvoir optimiser sa performance. L'idée est de mesurer les fréquences propres de certaines oscillations du plasma, appelées « modes d'Alfvén toriques », et de pouvoir en inférer sa composition isotopique à différentes positions. Des expériences menées par le CRPP sur JET ont montré la pertinence de cette approche. Les résultats indiquent que cette méthode devrait être applicable aux futurs réacteurs (ITER, DEMO).

### Université de Bâle: Etudes concernant l'interaction plasma - paroi dans ITER (PWIS)

Dans le cadre de l'étude de l'interaction plasma -paroi dans ITER, un point a été spécialement étudié à l'aide du tokamak JET . Il s'agit de l'étude de nettoyage de miroirs utilisés pour réfléchir la lumière du plasma vers les instruments de diagnostic d'ITER [4]. Ce nettoyage peut être réalisé en appliquant un plasma radio fréquence directement sur le miroir. Une nouvelle enceinte à vide a été réalisée et est en cours de test à JET. L'idée est d'enlever un dépôt de béryllium (élément de la première paroi d'ITER) déposé sur des miroirs. Le béryllium étant toxique ces expériences doivent être menées dans un environnement contrôlé tel que JET propose.

## References

[1] Website CRPP: [crpp.epfl.ch/](http://crpp.epfl.ch/)

[2] EFDA roadmap to the realisation of fusion energy:  
<http://www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

[3] Rapports annuels du CRPP: <http://crpp.epfl.ch/page-48260-fr.html>

[4] L. Marot, E. Meyer, Universität Basel : Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/IB): <http://nanolino.unibas.ch/pages/research/fusion.htm>



