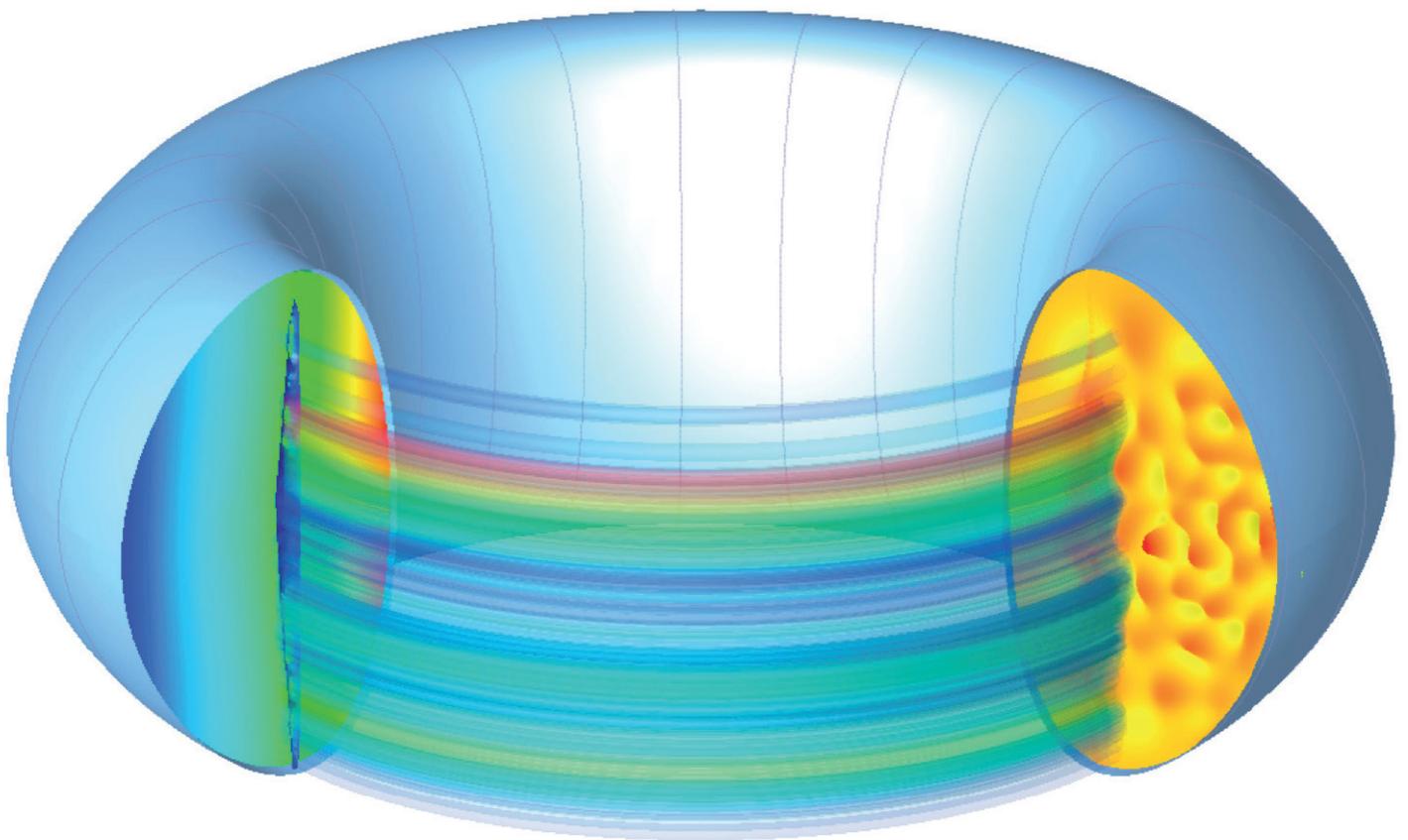


Rapport de synthèse 2011

# 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 :**

**Application d'ondes RF dans le tokamak JET, dans le but de contrôler les oscillations répétitives en dent-de-scie au cœur du plasma**

## **Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire contrôlée**

Rapport de synthèse 2011

### **Mandant :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

### **Chef de programme :**

Vaucher (coordinateur) Claude, Secrétariat à l'éducation et à la recherche (SER) (claude.vaucher@sbf.admin.ch)

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

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

### **Auteurs :**

Dr. M.Q. Tran (EPFL), Dr. Villard (EPFL) et Dr. L. Marot (Uni Bâle)

<http://crppwww.epfl.ch>

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

## Introduction

Il n'existe pas à proprement parler de programme fusion thermonucléaire en Suisse. Depuis 1978, les activités de fusion sont fortement liées aux programmes de recherche européen Euratom (Communauté européenne de l'énergie atomique), notamment sa partie concernant la fusion thermonucléaire. La Suisse participe à ces efforts et développe des connaissances dans la physique des plasmas et les technologies de fusion pour obtenir une source d'énergie pratiquement sans limite.

La fusion devrait ainsi produire une énorme quantité d'énergie presque sans production 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 devrait être entièrement recyclé et 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

recherche sur la 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.

L'Europe dans son ensemble se trouve à la pointe de la connaissance dans l'énergie de fusion. Avec la construction du Tore européen commun (Joint European Torus, JET), auquel la Suisse a également participé comme partenaire à part entière, l'Europe était bien préparée pour la prochaine génération de réacteur expérimental de Fusion ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Cet immense projet est la seule étape restante entre les expériences d'aujourd'hui et DEMO, un projet d'usine de démonstration. Ce dernier devrait être le premier réacteur à fusion produisant de l'électricité et prouver la viabilité économique de l'énergie de fusion.

En fin de compte, ITER prouvera la faisabilité technique de la fusion en répondant à la question : est-ce vraiment possible de créer l'énergie du soleil sur terre ? De son côté, DEMO prouvera sa faisabilité économique en fournissant une réponse à cette interrogation : la fusion thermonucléaire est-elle rentable ?

Classification de l'AIE : 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse: 3.2 Fusion

## Centres de gravité du programme

### ITER

Comme annoncé en 2010, le budget de Fusion for Energy (F4E) pour la phase de construction d'ITER a été augmenté à 6,6 milliards d'Euros. Pour les deux dernières années (2012 et 2013) du 7ème Programme Cadre, l'augmentation par rapport à la somme prévue initialement est de 1,3 milliards d'€ : le budget fusion pour 2012 et 2013 s'élève à 2,209 milliards d'€. Le financement a été décidé par l'Union Européenne à la fin de l'année 2011.

### Coopération européenne dans le cadre d'Euratom

L'opération de JET a redémarré en 2011. Le financement des années 2012 et 2013 du programme de fusion (voir plus haut) devra couvrir tous les éléments du programme : programme des Associations, programme de l'European Fusion Development Agreement (EFDA). Le programme de l'EFDA inclut l'exploitation de JET et des activités en vue des réacteurs de démonstration DEMO. Ces dernières ont été déjà lancées en 2011

Le budget européen pour les Associations est en baisse continue depuis 2008. L'Euratom s'attend à ce que les pays contribuent davantage à leurs

programmes nationaux, pour lui permettre de concentrer ses ressources financières sur le projet ITER. Il en résulte que la contribution européenne aux activités des laboratoires nationaux est, elle aussi, en baisse d'une manière significative. Par exemple, pour la Suisse, la contribution européenne a passé à 65% de sa valeur de 2008.

### Euratom et la Suisse

L'accord de coopération entre la Confédération Suisse et Euratom dans le domaine de la fusion, conclu le 14 septembre 1978, est un accord-cadre de durée illimitée. L'association de la Suisse à l'Euratom nécessite par contre un renouvellement pour 2012 et 2013. Trois accords généraux d'exécution fixent les modalités d'exécution avec Euratom : l'Accord sur la Mobilité qui encourage et facilite les échanges de personnel dans le cadre de la fusion, le Contrat d'Association et l'European Fusion Development Agreement (EFDA). Ces deux derniers accords règlent les modalités de collaboration entre les laboratoires suisses associés au programme fusion d'une part, et Euratom et les autres laboratoires européens d'autre part. De plus EFDA, à travers des « Implementing Agreements », permet à la Suisse de participer à l'ex-

ploitation de grandes infrastructures communes. En 2009 deux Implementing Agreements sont en force : le JET Implementing Agreement qui règle l'utilisation du tokamak européen JET et le High Performance Computer Implementing Agreement (HPC-IA). Le HPC-IA a été mis en œuvre en 2009 et permet aux laboratoires européens de fusion d'exploiter un ordinateur européen extrêmement performant dédié seulement à la R&D en fusion. La Suisse a signé le HPC-IA en 2010. Cet IA a permis à la Suisse d'avoir accès à environ 20 millions d'heures CPU sur le serveur européen HPC-FF dédié à la fusion (ce qui correspond à environ 28% des capacités du HPC-FF) pour des projets où ses chercheurs sont soit « Principal Investigator » soit « Co Principal Investigator ». Un IA sur les activités visant un réacteur de fusion du type DEMO (Power Plant Physics and Technology Implementing Agreement) a été soumis à la Suisse pour signature.

Un autre point saillant est la livraison d'un super-ordinateur réservé à la fusion à Rokkasho dans le cadre de l'Approche Elargie. L'Union Européenne (y compris la Suisse) et le Japon seront les principaux utilisateurs de ce super-ordinateur (Voir plus bas).

## Highlights Recherche et Développement

### Le CRPP : l'Association Suisse/EURATOM et ITER

En 2011, le CRPP a continué à participer 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 essentiellement 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 hyper-fréquences ; au PSI, les activités sont consacrées à la supraconductivité et aux matériaux. 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.

Le TCV (Tokamak à configuration variable) est la plus grande installation expérimentale exploitée sur le site de l'EPFL. Elle 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. La campagne expérimentale 2011 a été particulièrement intense, interrompue seulement pour de brèves périodes pour des interventions techniques.

### Résultats obtenus sur TCV

Le contrôle des « Edge Localized Modes » (ELM) par l'application de chauffage cyclotronique électronique (ECH). Il est bien connu que, sous certaines conditions, une région de turbulence réduite peut apparaître près du

bord du plasma, formant ainsi une « barrière de transport », avec des gradients très élevés de température et de densité, établissant ainsi un régime de confinement amélioré appelé « mode H ». Dans ce régime, on observe que le plasma est sujet à des instabilités répétitives (ELMs) qui s'accompagnent de bouffées de chaleur et de particules qui s'échappent du plasma et peuvent potentiellement endommager la première paroi de la chambre à vide. Cette problématique a été identifiée comme une des plus critiques pour le succès d'ITER et est l'objet d'intenses recherches. Sur TCV, en injectant des ondes ECH près du bord, il a été démontré, pour la première fois, que la fréquence de répétition des ELMs pouvait être doublée et que la quantité d'énergie expulsée par chaque ELM était réduite d'un facteur 2.

Dans des expériences similaires mais où la puissance ECH au bord était modulée en temps réel avec les ELMs, il a été démontré qu'il était possible de réduire considérablement la dispersion statistique de la fréquence de répétition des ELMs (ceux-ci étant de nature erratique), et en particulier d'éviter l'apparition d'ELMs « géants », particulièrement dommageables pour l'opération d'un réacteur.

L'opération en « mode H » est essentielle au succès d'ITER, d'où l'importance d'établir des scénarios et de caractériser les conditions d'accès à ce mode de confinement amélioré. Dans les premières phases d'exploitation d'ITER, il est prévu d'opérer avec de l'hélium afin d'éviter la production de neutrons. Le seuil de puissance nécessaire pour accéder au « mode H » dépend de la composition isotopique mais il y a peu d'observations à ce jour dans les tokamaks. Ce seuil a été mesuré sur TCV, et les résultats montrent une valeur plus élevée de 30% pour un plasma d'hélium que pour le deutérium.

Sur TCV, il a été montré que le seuil de puissance nécessaire à l'accès au « mode H » pouvait varier jusqu'à 60% en faisant varier la géométrie du divergeur, plus précisément en variant la longueur de la séparatrice entre son point X et la paroi.

On observe souvent que le plasma des tokamaks est en rotation dans la direc-

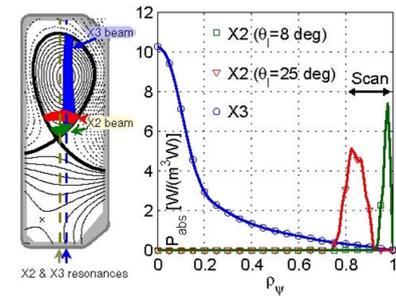


Figure 1 : Expériences de contrôle des ELMs par injection d'ondes RF près du bord du plasma. L'image de gauche montre une coupe du tokamak TCV et des surfaces magnétiques, la séparatrice étant en gras, et des faisceaux d'ondes millimétriques utilisés : X3 pour chauffer le centre (bleu), X2 pour chauffer le bord (rouge et vert). L'image de droite montre les profils de déposition de puissance.

tion toroidale. La rotation, et notamment son cisaillement, peut avoir un effet stabilisant sur la turbulence, d'où l'intérêt de comprendre les mécanismes en jeu. Poursuivant une recherche dans laquelle TCV a joué un rôle pionnier dans les dernières années, nous avons étudié l'effet de la relaxation interne du plasma (appelée « dent-de-scie ») sur la rotation du plasma : le profil de vitesse change systématiquement, avec une augmentation à l'intérieur du rayon de la dent-de-scie et une diminution à l'extérieur. De plus, en vue de positionner le plasma de façon plus favorable pour la mesure de ces vitesses de rotation, un scénario « mode-H » approprié a été développé.

L'influence de la largeur du profil de déposition de puissance sur la qualité du confinement, dans des décharges chauffées par ondes cyclotroniques électroniques (ECH), a été investiguée en détail. Il a été montré que les profils larges ne sont pas meilleurs de ce point de vue, alors que déposer la puissance bien au centre s'avère bénéfique.

Des progrès significatifs ont été accomplis sur l'expérience TCV concernant le contrôle des profils du plasma et des instabilités, qui sont tous deux essentiels pour l'opération d'ITER. Une nouvelle technique de contrôle en temps réel des phénomènes de relaxation récurrente du centre du plasma (« dents-de-scie ») a été développée. Il a été possible de déclencher des dents-de-scie selon une séquence prédéfinie.

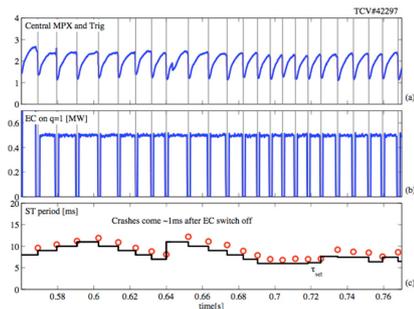


Figure 2 : Contrôle des « dents-de-scie » dans le tokamak TCV. Par l'application modulée de puissance radiofréquence (milieu), il a été possible de déclencher les dents-de-scie (en haut) selon une séquence préprogrammée (en bas).

Contrôler les « dents-de-scie » est important pour ITER, car ces relaxations internes du plasma peuvent à leur tour déclencher d'autres instabilités, les « neoclassical tearing modes » (NTMs), qui conduisent à une dégradation des performances et de la qualité du confinement magnétique.

Contrôler le profil de courant dans un réacteur de fusion est essentiel pour l'opération dans certains scénarios. En même temps, contrôler d'autres paramètres du plasma est désirable. Sur TCV, grâce à l'application, en une boucle de rétroaction, de la puissance radiofréquence de 2 gyrotrons orientés de façon appropriée, il a été possible de contrôler simultanément l'inductance interne (qui dépend de la largeur du profil de courant) et la température électronique, selon des séquences prédéterminées. Cette technique ouvre de nombreuses perspectives pour l'opération de scénarios avancés.

La configuration dite « snowflake », démontrée ces dernières années pour la première fois par des expériences sur TCV, a été créée pour tenter de résoudre le problème de l'évacuation de puissance de sortie du plasma. Elle offre de nombreux avantages potentiels, une de ceux-ci étant de répartir le flux de puissance sur 4 secteurs (« strike points ») au lieu de 2 dans les configurations standard. La campagne expérimentale de 2011 a permis de mesurer les flux de chaleur aux différents « strike points » : plus la configuration s'approche d'un « snowflake », plus la puissance sur les secteurs additionnels augmente. C'est le cas aussi

pour la puissance instantanée évacuée lors des relaxations du bord (ELMs).

Une autre façon d'atténuer le problème de la puissance éjectée lors de relaxations du bord (ELMs) est de modifier la forme du plasma. Le tokamak TCV est actuellement le seul au monde capable d'explorer en particulier des triangularités négatives. Il a été démontré que pour celles-ci, la fréquence de répétition des ELMs croît d'un facteur 3, alors que la puissance éjectée par ELM décroît d'un facteur 3, par rapport à des plasmas de triangularité positive.

### Théorie et simulation numérique

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines suivants : la turbulence et le transport de chaleur et de particules dans les tokamaks, l'analyse de l'équilibre et de la stabilité MHD (magnéto-hydrodynamique) des tokamaks et stellarators, l'application d'ondes radiofréquence et la prospection et l'optimisation de nouvelles configurations de confinement magnétique.

La présence d'ions rapides, créés par exemple par le chauffage RF, l'injection de faisceaux de neutres ou par le processus de fusion, a pour effet de provoquer des relaxations « dents-de-scie » géantes au cœur du tokamak, pouvant conduire à une dégradation du confinement, voire même des disruptions (termination brutale de la décharge). Par des simulations numériques intégrant de façon consistante le calcul de la propagation d'ondes, leur absorption, la génération d'ions rapides et l'effet sur la stabilité des dents-de-scie (voir figure en page de titre), nous avons pu démontrer qu'il était possible de contrôler celles-ci en jouant sur la direction de propagation des ondes RF. Ces simulations confirment complètement des expériences réalisées avec succès sur JET. La simulation numérique prédit que ce scénario sera efficace sur ITER.

Des simulations numériques de la turbulence causée par les gradients de température ionique (ITG) ont permis de mettre en évidence un effet synergétique entre les collisions entre ions et les instabilités de petite échelle qui sous-tendent l'état turbulent : le flux

de chaleur avec collisions et micro-turbulence est systématiquement supérieur à la somme du flux causé par les collisions seules et du flux causé par la micro-turbulence sans collisions. Le rôle central des écoulements zonaux, générés par la microturbulence, mais eux-mêmes sujets à une instabilité limitant leur cisaillement, a été mis en évidence.

Les tokamaks, bien que nominalemment axisymétriques, peuvent être le siège de brisures spontanées de symétrie : dans certaines circonstances, un nouvel équilibre peut apparaître avec une déformation hélicoïdale importante du plasma par rapport au cas axisymétrique. Ceci est d'importance cruciale notamment pour certains scénarios envisagés pour ITER. En effet, cette

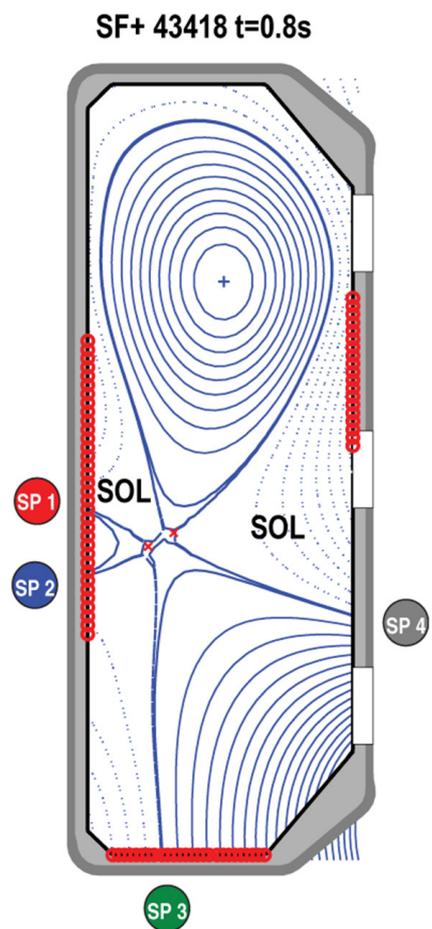


Figure 3 : Un instantané d'une simulation de la turbulence, montrant ici les perturbations de densité (à gauche). Le transport de chaleur avec turbulence+collisions (losanges) est supérieur à la somme du transport collisionnel (traitillés rouges) et du transport turbulent sans collisions (bleu).

rupture de symétrie implique des propriétés très différentes pour le confinement des particules du plasma. Grâce à des simulations numériques, nous avons pu reproduire des structures hélicoïdales similaires aux observations expérimentales, notamment sur JET.

Des simulations numériques de la turbulence dans le bord du plasma ont montré des effets importants de la composante magnétique des perturbations. En augmentant la pression, ces perturbations augmentent d'amplitude, et le transport s'en trouve augmenté.

Le programme de recherches conduit sur la machine TORPEX est motivée 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. Mentionnons en particulier :

Des mesures in situ des profils de courant parallèle au champ magnétique ont été faites au voisinage des filaments de plasmas, ou « blobs », couramment observés dans les expériences de confinement magnétique. Elles ont permis de valider les modèles théoriques développés par le CRPP pour la propagation de ces filaments.

Par l'application d'électrodes au bord du plasma, il a été possible de démontrer qu'il était possible d'influencer la dynamique des blobs.

Un bon confinement des ions rapides est essentiel au bon fonctionnement d'un réacteur de fusion. Le transport d'ions rapides dans le plasma a été mesuré dans TORPEX et comparé avec des simulations numériques. L'effet de la turbulence a ainsi pu être mis en évidence.

L'application de méthodes d'imagerie rapide a permis l'étude non invasive de la turbulence, et en particulier de la dynamique des blobs. Ce diagnostic a permis d'obtenir des mesures à haute résolution (spatiale et temporelle) dans un large domaine de paramètres du plasma, fournissant ainsi les bases pour des comparaisons détaillées entre théorie et expérience.

### Fusion Technology Materials

Le groupe Fusion Technology Materials, localisé au PSI, a pour objectif principal l'étude des effets des dégâts provoqués par l'irradiation des matériaux structurels entourant les futurs réacteurs de fusion. Dans ces machines, les neutrons de fusion à haute énergie produiront des cascades de déplacements et des transmutations nucléaires, ce qui affecte les propriétés de ces matériaux. Les activités de Recherche et Développement (R&D) se sont portées en particulier sur :

L'amélioration des propriétés de ductilité et de résistance aux hautes températures d'alliages d'acier à activation réduite, comprenant une optimisation des conditions de fabrication et une caractérisation détaillée de leur nano- et microstructure, ainsi que de leurs propriétés mécaniques après soumission à irradiation.

Le développement de matériaux structurels à base de tungstène, avec en particulier la production d'un nouvel alliage aux propriétés prometteuses.

Les travaux de simulation numérique se sont portés notamment sur la modélisation par dynamique moléculaire des dommages d'irradiation dans des alliages métalliques, tels que les dislocations, les lacunes et les bulles d'hélium.

La participation à plusieurs actions collaboratives et de coordination pour la science des matériaux pour l'énergie de fusion, permettant en outre d'éta-

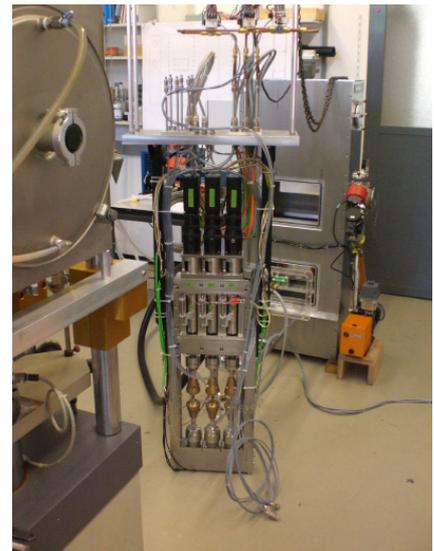


Figure 5 : Vue du CFTM dans le laboratoire d'essai.

blir une base de données de taille statistiquement significative sur la microstructure des aciers à faible activation.

### Superconductivity

Le groupe Superconductivity, localisé au PSI, a été actif principalement pour le test des supraconducteurs pour ITER sur l'installation SULTAN, pour la préparation d'une nouvelle installation de test (EDIPO), ainsi que pour des activités de R&D sur les supraconducteurs à haute température envisagés pour DEMO. Le test des supraconducteurs a reçu une attention toute particulière de la part de la communauté de la fusion, et a été la priorité.

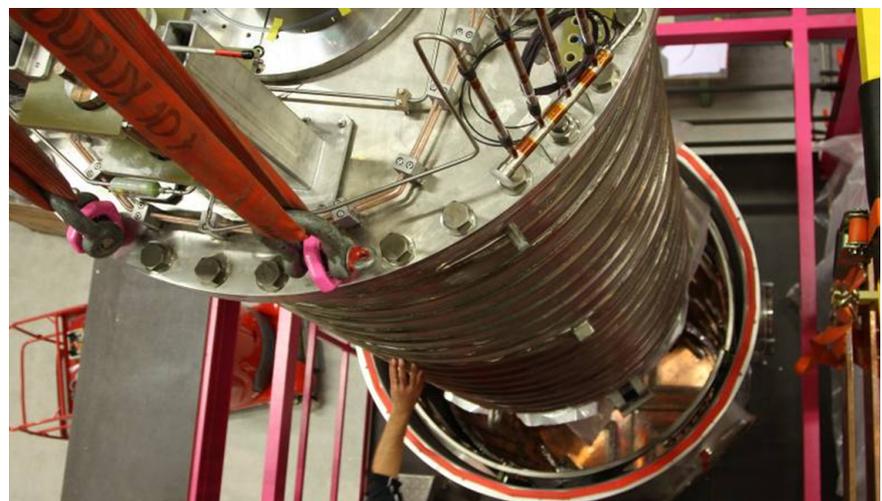


Figure 4 : Insertion de l'assemblage des bobines de la nouvelle installation de test EDIPO dans la chambre à vide.

SULTAN a été en opération pratiquement ininterrompue et un nombre record de campagnes de tests a pu être effectué. Ceux-ci ont été conduits sous contrats bilatéraux avec les différentes agences nationales et avec l'organisation internationale ITER elle-même. Ils ont concerné tant les conducteurs des bobines du champ torique, celles du champ poloïdal, celles de correction, ainsi que le solénoïde central. L'ensemble des bobines pour EDIPO a été reçu et installé (Figure 6).

Une feuille de route pour le développement de supraconducteurs à haute température et leur utilisation dans les réacteurs de fusion du futur a été établie par le projet « Power Plant Physics and Technology » de l'EFDA. Le CRPP s'est penché en particulier sur les problèmes de stabilisation électrique, la protection en cas de « quench » (perte accidentelle de l'état supraconducteur) et la caractérisation des échantillons.

## Gyrotron

Le groupe gyrotron poursuit ses activités dans le développement de sources RF millimétriques. L'application de telles ondes est en effet une composante essentielle pour le fonctionnement d'un réacteur de fusion. Le groupe est impliqué dans plusieurs programmes de recherche dans lesquels des gyrotrons sont utilisés : le chauffage EC (electron cyclotron) de TCV, le système EC du stellarateur W7X et celui d'ITER. Un effort significatif a porté sur l'extension des capacités de la simulation numérique de sources RF de haute puissance.

Un nouveau code de simulation numérique a été développé et appliqué à l'étude d'interactions statiques et dynamiques pouvant induire des pertes de l'ordre de 10% dans la puissance RF émise. Il a aussi été appliqué au phénomène d'émission de fréquences d'oscillation parasites, ainsi que pour le design détaillé des gyrotrons d'1MW prévus pour un upgrade futur du système EC de TCV.

De nouvelles structures permettant d'éviter des instabilités qui peuvent apparaître dans le tube du gyrotron ont été proposées, étudiées et simulées.

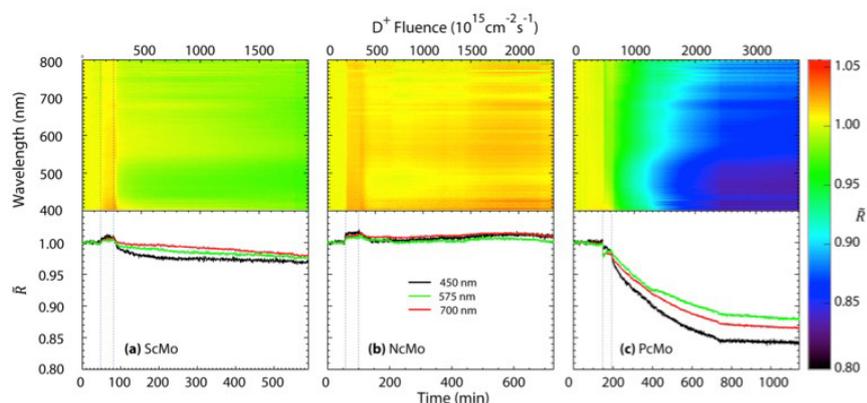


Figure 6 : Time evolution of the reflectivity spectrum of (a) ScMo, (b) NcMo and (c) PcMo, between 400 and 800 nm during deuterium exposure, relative to the first time slice. The dashed vertical lines indicate the plasma switch-on, followed by the application of a -200V bias. The bottom panels show time traces corresponding to three wavelengths, including 450, 575 and 700 nm.

La simulation numérique a permis d'optimiser des composants passifs utilisés dans la physique des ondes millimétriques. Ce projet a bénéficié d'une activité de type « spin-off » dans le domaine des gyrotrons pour les appareils de résonance magnétique nucléaire.

Le CRPP a aussi participé au développement spectaculaire des moyens de calcul à haute performance (HPC). Il est actif tant au niveau de l'EPFL, avec notamment le projet CADMOS BlueGene/P, qu'au niveau Suisse avec le projet « HP2C » du CSCS, au niveau européen avec le serveur « HPC-FF » de l'EFDA, et au niveau mondial avec le Computational Simulation Centre (CSC) de l'IFERC (Rokkasho, Japon) dans le cadre de l'Approche Elargie. Ce dernier vient de mettre en opération un serveur de plus de 1 PetaFlops dédié à la recherche en fusion (serveur Helios), et le CRPP a été sélectionné pour être parmi les tous premiers utilisateurs dans le cadre d'un projet pilote (Lighthouse Project).

Toutes ces activités de recherche ont abouti en 2011 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.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a environ 35 doctorants dont une dizaine d'entre eux ont obtenu en 2011 leur titre de doctorat. Enfin, en 2011, le CRPP a maintenu ses tâches d'ensei-

gnement de base et ses nombreuses activités de relations publiques visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion contrôlée à des non-spécialistes.

## Relation avec ITER

Le CRPP a activement participé à l'exploitation du tokamak Européen JET. Des expériences récentes, effectués dans des campagnes dirigées par du personnel scientifique du CRPP, ont permis de contrôler des phénomènes de relaxation interne, appelés « dents-de-scie » et susceptibles de déclencher d'autres instabilités dégradant la qualité du confinement. Les ions rapides sont en effet susceptibles de créer des conditions dans lesquelles les « dents-de-scie » sont géantes, et il est important de pouvoir les éviter. L'analyse théorique détaillée s'est poursuivie et a montré un excellent accord avec les expériences. De plus, des prédictions ont été faites pour ITER, démontrant leur potentiel. D'autres modes peuvent être déstabilisés par les ions rapides dans un réacteur de fusion ; c'est pourquoi la mesure de leur fréquence et de leur amortissement est essentielle. Grâce aux travaux du CRPP, ces modes peuvent être détectés de façon routinière sur JET et leur longueur d'onde automatiquement identifiée, ce qui a permis l'accumulation d'une riche base de données de résultats, y compris aux longueurs d'ondes potentiellement les plus dangereuses pour ITER.

## Collaboration Internationale

Collaboration dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) [9]

La Suisse est signataire de l'Implementing Agreement sur les matériaux pour les réacteurs de fusion. Elle participe également aux autres Implementing Agreements à

travers l'Euratom. Elle est représentée au Fusion Power Coordinating Committee.

A travers l'Euratom, le CRPP poursuit des collaborations avec les laboratoires de fusion du monde entier.

## References

[1] Site internet CRPP : <http://crppwww.epfl.ch>

[2] Site internet Universität Basel : <http://pages.unibas.ch/phys-esca>

[3] Site internet Joint Undertaking F4E : [http://fusionforenergy.europa.eu/index\\_en.htm](http://fusionforenergy.europa.eu/index_en.htm), Informations sur le Joint Undertaking  $\square$ Fusion For Energy $\square$  et ses activités, incluant des appels d'offres ou des offres d'emplois

[4] Site internet ITER-industry : <http://www.iter-industry.ch> Informations sur les offres d'emplois et sur les appels d'offres en relation avec le projet ITER ou sur la recherche européen dans le domaine de la fusion

[5] Site internet EFDA : <http://www.efda.org>, Informations sur la recherche européenne dans le domaine de la fusion

[6] Site internet ITER : <http://www.iter.org>, Informations sur le projet ITER

[7] Site internet JET : <http://www.jet.efda.org>, Informations sur le Joint European Torus JET

[8] L. Marot, P. Oelhafen, Universität Basel : Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/JB), <http://pages.unibas.ch/phys-esca/fusion.html>

[9] Site internet des Accords d'exécution en fusion nucléaire de l'AIE : <http://www.iaea.org/Textbase/techno/technologies/fusion.asp>





