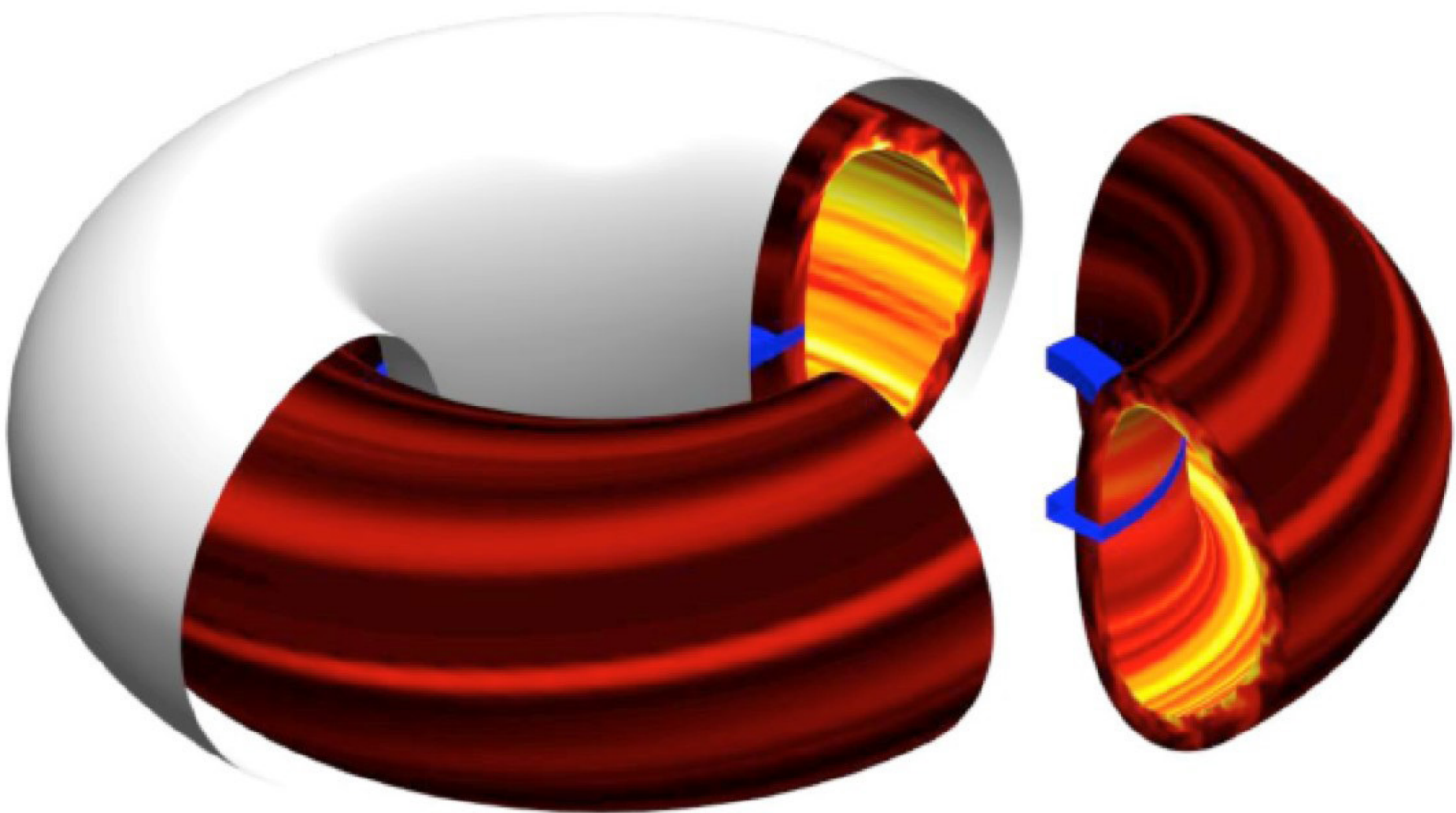


Rapport de synthèse 2015

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 :

Vue instantanée de la turbulence du bord simulée par le code GBS dans le tokamak TCV

Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire

Rapport de synthèse 2015

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne

Auteurs :

Dr. Laurent Villard (CRPP - EPFL), Dr. Laurent Marot (Université de Bâle), Patrice Soom (SEFRI)

Chef de programme :

Dr. Patrice Soom, SEFRI (patrice.soom@sbfi.admin.ch)

Chef de domaine de l'OFEN :

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

www.bfe.admin.ch/forschungskernenergie

Les auteurs de ce rapport portent seuls la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Introduction

Processus actif au cœur des étoiles, la fusion nucléaire libère des quantités extraordinaires d'énergie. Le développement de la science et de la technologie permettant l'exploitation industrielle et commerciale de ce type de réaction pour la production d'énergie représente aujourd'hui un enjeu majeur. En effet, maîtriser la fusion nucléaire doit permettre de produire des quantités énormes d'énergie presque sans émission de CO₂. 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. Ces avantages doivent cependant être mis en regard de la difficulté majeure que représente le fait de réunir les conditions extrêmes nécessaires à la mise en œuvre de la fusion nucléaire sur Terre. Ce défi de taille, autant scientifique que technologique, fait l'objet de recherches intenses qui s'inscrivent aujourd'hui dans un cadre mondialisé.

La Suisse participe de longue date aux recherches internationales en fusion nucléaire. En 1958, la 2^{ème} 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, la Suisse a rejoint les nations pionnières dans ce domaine avec la création du Centre de Recherches en Physique des

Plasmas¹ (CRPP). Dès 1979, un accord de coopération passé avec EURATOM l'associe pleinement au Programme européen de recherches en fusion. Depuis 2014, la participation de la Suisse à ce programme de recherche est réglée par l'accord d'association partielle² au huitième programme-cadre de recherche et d'innovation de l'Union européenne, intitulé « Horizon 2020 ».

Le Programme européen de recherches en fusion s'est concentré dès son lancement sur le développement de la fusion nucléaire comme source d'électricité. Depuis près de 40 ans, cette stratégie a été suivie avec ténacité par EURATOM, notamment à travers la construction dès 1979 du Joint European Torus (JET) au Royaume-Uni. L'exploitation de cette machine, à ce jour encore le tokamak en exploitation le plus puissant au monde, a été couronnée de succès. Elle a permis de réaliser d'importantes avancées dans la maîtrise de la réaction de fusion et d'obtenir en 1997 un rendement énergétique (facteur «Q»), le rapport entre la puissance émise par les réactions de fusion et la puissance extérieure fournie au plasma par les systèmes de chauffage du réacteur) de 0.65.

1 Aujourd'hui Swiss Plasma Center. Site internet : <http://spc.epfl.ch>

2 Accord de coopération scientifique et technologique entre l'Union européenne et la Communauté européenne de l'énergie atomique et la Confédération suisse associant la Confédération suisse au programme-cadre pour la recherche et l'innovation Horizon 2020 : <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2014:370:FULL&from=FR>

D'immenses progrès ont été effectués depuis, permettant le lancement dès 2007 du projet international ITER, dont la construction est en cours à Cadarache (France). L'Union européenne, les Etats-Unis, la Chine, la Corée du Sud, le Japon, l'Inde et la Russie sont les sept partenaires de ce projet. L'objectif principal d'ITER est de démontrer la faisabilité technique d'une installation produisant un solde énergétique positif, en obtenant un facteur Q supérieur à 1. ITER est conçu pour atteindre un facteur Q de 10. Au-delà d'ITER, ces mêmes partenaires ont d'ores et déjà entrepris de préparer l'étape suivante vers l'utilisation de la fusion nucléaire comme source d'énergie commerciale. Il s'agira de concevoir et de bâtir un réacteur de démonstration capable de produire et d'injecter dans le réseau une quantité appréciable d'électricité. Ce projet, appelé DEMO, est prévu pour les années 2030-2050 et devrait permettre la réalisation industrielle et commerciale de l'énergie de fusion.

Les recherches menées au Swiss Plasma Center, basé à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), ainsi qu'à l'Université de Bâle s'inscrivent pleinement dans ce cadre à la fois européen et international, permettant à la Suisse de jouer un rôle important dans le développement de l'énergie de fusion. La Suisse apporte dans le domaine de la fusion nucléaire des compétences spécifiques et une expertise reconnues internationalement.

Classification de l'AIE: 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse: 3.2 Fusion

Développements en 2015 au niveau extra-européen

Renouveau du projet ITER

Au niveau mondial, les recherches en matière de fusion s'articulent aujourd'hui autour de la réalisation du réacteur expérimental thermonucléaire international ITER. Alors qu'il a été par le passé l'objet de nombreuses critiques liées à l'accumulation de retards et de surcoûts dans le processus de construction des installations sur le site de Cadarache, le projet est entré dans une nouvelle dynamique depuis l'entrée en fonction en février 2015 du nouveau Directeur général Bernard Bigot à la tête d'ITER Organization. L'ancien administrateur du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA, France) a mis en place un vaste plan d'actions visant à réformer en profondeur la gestion et la planification du projet. Conformé-

ment à ses engagements, Bernard Bigot a présenté une révision substantielle de la planification du projet au Conseil d'ITER Organization lors de sa rencontre de novembre 2015. Cette nouvelle planification, qui comprend un calendrier de construction révisé ainsi qu'une estimation actualisée des investissements nécessaires pour achever la construction d'ITER, doit à présent être évaluée par les différents partenaires du projet et sera vraisemblablement rendue publique dans le courant de l'année 2016.

Le chantier de construction à Cadarache (France) est actuellement en plein développement. Les fondations du complexe devant héberger le tokamak ont été réalisées et d'imposants travaux de génie civil sont en cours. Le toit de 730 tonnes a été hissé en sep-

tembre 2015 sur les vingt-deux piliers de la structure métallique du bâtiment d'assemblage. Des équipements de grande taille sont également arrivés sur le site, tel que des transformateurs électriques ou certains réservoirs de combustible pour le tokamak. Enfin les premières équipes intégrées de développement rassemblant à la fois du personnel provenant d'ITER Organization et des collaborateurs issus des agences domestiques³ ont été déployées sur le site de construction.

³ Chaque pays membre d'ITER Organization a établi une agence domestique destinée à verser ou à livrer la contribution du pays en question à ITER Organization, qui elle coordonne la réalisation du projet.

Développements en 2015 au niveau européen

La recherche européenne en fusion a pour cadre principal la partie fusion du programme de recherches d'EURATOM et se déroule selon le plan de travail défini dans la Feuille de route européenne pour l'énergie de fusion⁴. Ce document prévoit la réalisation des projets ITER et DEMO avec l'objectif d'avoir démontré d'ici 2050 la faisabilité de la fusion nucléaire pour un temps prolongé et sa capacité à injecter des quantités substantielles d'énergie dans le réseau électrique. Aussi, la Feuille de route inclut-elle des recherches en physique, des activités de R&D pour la technologie nécessaire à ITER et DEMO, mais aussi un important volet consacré à la formation de nouvelles générations de scientifiques et d'ingénieurs. Tout en étant centrée autour du concept de tokamak, elle soutient également le développement d'une architecture alternative de réacteur, les stellarators.

La participation de la Suisse à EURATOM fusion et à ITER est régie par l'accord d'association partielle au programme-cadre de recherche et d'innovation Horizon 2020 de décembre 2014. Selon cet accord, la Suisse participera au programme EURATOM,

⁴ EFDA roadmap to the realisation of fusion energy.
<https://www.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

et au projet ITER, au moins jusqu'au 31 décembre 2016. Une continuation de la participation de la Suisse dépend du développement des relations politiques entre la Suisse et l'Union européenne dans le domaine de la libre circulation des personnes au-delà de 2016. La ratification du protocole d'extension de la libre-circulation des personnes à la Croatie doit permettre à la Suisse d'être associée à l'ensemble du programme Horizon 2020 jusqu'à son terme et de poursuivre sa participation au Programme de recherche en fusion. Considérant l'absence de développement politique significatif à cet égard, la participation de la Suisse à Euratom au-delà de 2016 était toujours, au 31 décembre 2015, incertaine. Dans ces conditions, la Suisse a participé en 2015 à l'instrument principal de la partie fusion du programme de recherches d'EURATOM, à savoir le consortium EUROfusion. La Suisse a aussi participé comme Etat membre à l'entreprise européenne commune Fusion for Energy (F4E), chargé de livrer la contribution européenne à ITER.⁵

⁵ Le SEFRI a publié un aperçu statistique de la participation suisse à la partie fusion d'Euratom ainsi qu'à la construction d'ITER dans le cadre du rapport « Participation de la Suisse aux programmes-cadres européens de recherche, Faits et chiffres 2015 ».

Activités du consortium EUROfusion

Le consortium EUROfusion est doté d'un budget de 850 millions d'euros pour les années 2014 à 2018, dont la moitié est financée par les participants, EURATOM apportant l'autre moitié. Un contrat de cofinancement de 424.8 millions d'euro a été signé entre EURATOM et EUROfusion le 8 octobre 2014, achevant ainsi le processus de transformation du Programme européen de recherches en fusion. L'EPFL est officiellement le membre suisse d'EUROfusion. L'Université de Bâle y est affiliée comme «Linked Third Party». Les travaux réalisés en 2015 par ces institutions dans le cadre d'EUROfusion sont présentés dans ce rapport.

Le programme de travail d'EUROfusion se focalise sur le développement d'ITER et de DEMO. La partie consacrée à ITER comprend une série d'expérimentations conduites sur les trois tokamaks de taille moyenne classés prioritaires au niveau européen : Asdex-Upgrade (IPP – Allemagne), MAST (CCFE – UK) et le Tokamak à Configuration Variable (TCV) du Swiss Plasma Center. Une rencontre de planification s'est tenue à l'EPFL en janvier 2015 pour jeter les bases du programme de recherche commun sur ces installations et sur le Joint European Torus JET (CCFE). C'est dans ce contexte que le Swiss Plasma

Center a accueilli en 2015 une cinquantaine de chercheurs étrangers qui ont pu participer aux expériences conduites sur le TCV.

Parallèlement, une étape importante a été franchie en 2015 dans le programme de travail d'EUROfusion, avec la mise en service du stellarator Wendelstein 7-X à Greifswald en Allemagne. Lors d'un premier démarrage le 10 décembre 2015, un plasma d'hélium a été maintenu durant un dixième de seconde, atteignant une température de l'ordre du million de degrés. Plus grand stellarator du monde, Wendelstein 7-X doit permettre d'évaluer le potentiel de ce type d'installation et de le comparer aux performances des tokamaks.

Activités de Fusion for Energy

Une grande partie du budget d'EURATOM fusion est destinée à la contribution européenne à la construction d'ITER au travers de l'entreprise commune européenne F4E. L'année 2015 a constitué pour celle-ci une période charnière. Sous l'impulsion de son directeur général ad interim Pietro Barabaschi, l'agence a mis en place un vaste plan de réformes afin de gagner en efficacité et agilité. Elle a également renouvelé la plus grande partie de sa gouvernance, en se dotant notamment d'un nouveau directeur général en la personne de Johannes Schwemmer. Celui-ci est entré en fonction en janvier 2016.

Les retards pris dans la construction d'ITER ont grandement affecté les activités de F4E, conduisant à d'importantes difficultés dans l'implémentation des plans de travail et des budgets des dernières années. Aussi F4E a-t-elle renoncé à près d'un demi-milliard d'euros sur l'exercice budgétaire 2015, que la Commission européenne a temporairement alloué au Fond européen d'investissement stratégique. Cette capacité d'investir sera retournée à F4E entre 2018 et 2020. Par ailleurs, F4E a participé, en marge de ses activités opérationnelles, à la révision de la planification du projet ITER en fournissant à ITER Organization des projections actualisées concernant le calendrier et les coûts de construction de l'installation.

Développements institutionnels au niveau suisse

Inauguration du Swiss Plasma Center

Le Centre Recherches en Physique des Plasma (CRPP) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) s'est officiellement mué en Swiss Plasma Center (SPC) le 22 septembre 2015, en présence des communautés scientifiques et politiques impliquées dans la recherche en fusion. Consacrant la renommée internationale du Swiss Plasma Center et son rôle dans le développement de la fusion nucléaire, l'événement inaugural a permis de

mettre en valeur l'élargissement des activités du centre à des domaines tels que l'astrophysique, la médecine ou encore les applications industrielles de la physique des plasmas.

Figurant parmi les trois installations de taille moyenne sélectionnées par le consortium EUROfusion pour la mise en œuvre de la Feuille de route pour l'énergie de fusion, le TCV, installation phare du SPC, bénéficiera d'améliorations techniques substantielles sur la période 2017-2020 grâce à une enveloppe de 10 millions de francs

accordée par le Conseil des EPF. Ces fonds contribueront principalement à l'installation de nouveaux équipements dédiés à l'étude de l'échappement dans les réacteurs de fusion en évaluant les performances de différentes configurations de divergeurs.⁶

⁶ Le «divergeur» est la partie du tokamak où les plus forts flux de chaleur et de particules sont attendus.

Highlights Recherche et Développement

Swiss Plasma Center⁷

En 2015, le SPC a participé aux activités scientifiques et technologiques du consortium EUROfusion, ainsi qu'au projet ITER, notamment au travers de l'agence domestique européenne 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 SPC 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 SPC a également participé aux campagnes expérimentales sur le tokamak Asdex-Upgrade du Max-Planck Institut für Plasma Physik (IPP) dans le cadre des activités Medium-Sized Tokamaks (MST) de l'EUROfusion. Toutes ces activités de recherche ont abouti en 2015 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 contributions invitées.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation. Le SPC forme une trentaine de doctorants dont plusieurs ont obtenu en 2015 leur titre de doctorat. En 2015, le SPC a assuré ses tâches d'enseignement aux niveaux du Bachelor, du Master et de l'École Doctorale. De nombreuses activités de relations publiques, visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion contrôlée à des non-spécialistes, ont été menées tout au long de l'année.

Travaux sur le tokamak TCV

L'expérience **TCV (Tokamak à configuration variable)** représente l'effort principal des équipes de recherche du SPC. Le tokamak TCV possède 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 visant à chauffer les électrons du plasma et à générer du courant est caractérisé par une grande souplesse et permet d'orienter la puissance injectée selon des profils spécifiques. En 2015, le TCV a rajouté une corde supplémentaire à son arc : un système de chauffage des ions du plasma par injections de faisceaux de neutres (NBI), qui permettra d'atteindre une palette encore plus large de paramètres physiques, en particulier le rapport des températures ionique et électronique, jusque dans la plage de fonctionnement prévue pour les réacteurs de fusion. La mission centrale de TCV est de contribuer à l'établissement des bases physiques pour une exploitation plus efficace d'ITER, mais également à l'optimisation du concept et de l'opération du tokamak, ceci en vue de l'étape qui suivra ITER, c'est-à-dire le projet DEMO.

Rappelons que le TCV est, avec MAST au Royaume-Uni et Asdex-Upgrade en Allemagne, l'une des trois machines nationales de type tokamak retenues pour leur contribution à la Feuille de route pour la réalisation de l'énergie de fusion. L'opération de modernisation du TCV a franchi une étape significative en été 2015 avec l'installation du premier injecteur de neutres (NBI). Les tests d'acceptation ont été accomplis et sont presque terminés. Entre octobre et décembre 2015, la première campagne expérimentale sous les auspices du Medium Size Tokamak (MST) de l'EUROfusion a été effectuée sur le TCV, en parallèle avec l'exploitation du programme national. Grâce à plusieurs améliorations dans les systèmes de contrôle et d'acquisition de données, le temps entre deux expériences suc-

cessives a pu être diminué de façon conséquente, améliorant l'efficacité de l'exploitation de la machine : 587 tirs pour le programme MST et 197 pour le programme national ont été effectués. Ceci contribue à améliorer l'attractivité de TCV en tant que plateforme sur laquelle de nouvelles idées peuvent être rapidement testées en profondeur.

Un effort vigoureux a été consacré à étudier le problème des disruptions. Appartenant aux problèmes les plus cruciaux pour la réalisation d'ITER, les disruptions sont des pertes brutales du courant de décharge du plasma, dues à certaines instabilités. Des techniques pour atténuer l'effet délétère de ces disruptions, ou pour les éviter, ont été explorées : par exemple, par injection massive de gaz, ou encore par injection d'ondes rf cyclotroniques électroniques avec l'assistance de la modélisation en temps réel. Un des problèmes posé par les disruptions est la génération d'électrons hyper-énergétiques, dits « runaway ». Une méthode permettant d'effectuer une décroissance douce du courant de plasma a été développée, de manière à éviter les instabilités magnéto-hydrodynamiques (MHD) violentes. Celles-ci pourraient se révéler dangereuses dans ITER. Un autre champ d'investigation a consisté en l'utilisation de certains signaux de relaxation en « dent-de-scie » comme précurseurs d'une disruption imminente : la modélisation a permis de prédire correctement l'occurrence de disruptions dans plusieurs expériences sur TCV.

Un autre problème extrêmement important pour tout réacteur de fusion est celui de l'évacuation de la chaleur et des particules. La flexibilité opératoire de TCV a permis d'étudier diverses formes de plasmas et de modifier en particulier les propriétés géométriques du champ magnétique au voisinage du divergeur. La Figure 1 illustre la panoplie des formes testées sur TCV. Les études menées en 2015 ont notamment porté sur les conditions dans lesquelles un « détachement » du divergeur peut être obtenu. On parle de « détachement » lorsque le plasma chaud du cœur est découplé du plasma plus froid devant les structures solides assurant l'évacuation de chaleur et de particules. La variété de formes a permis

⁷ Rapports annuels du SPC : <http://spc.epfl.ch/page-48260-fr.html>

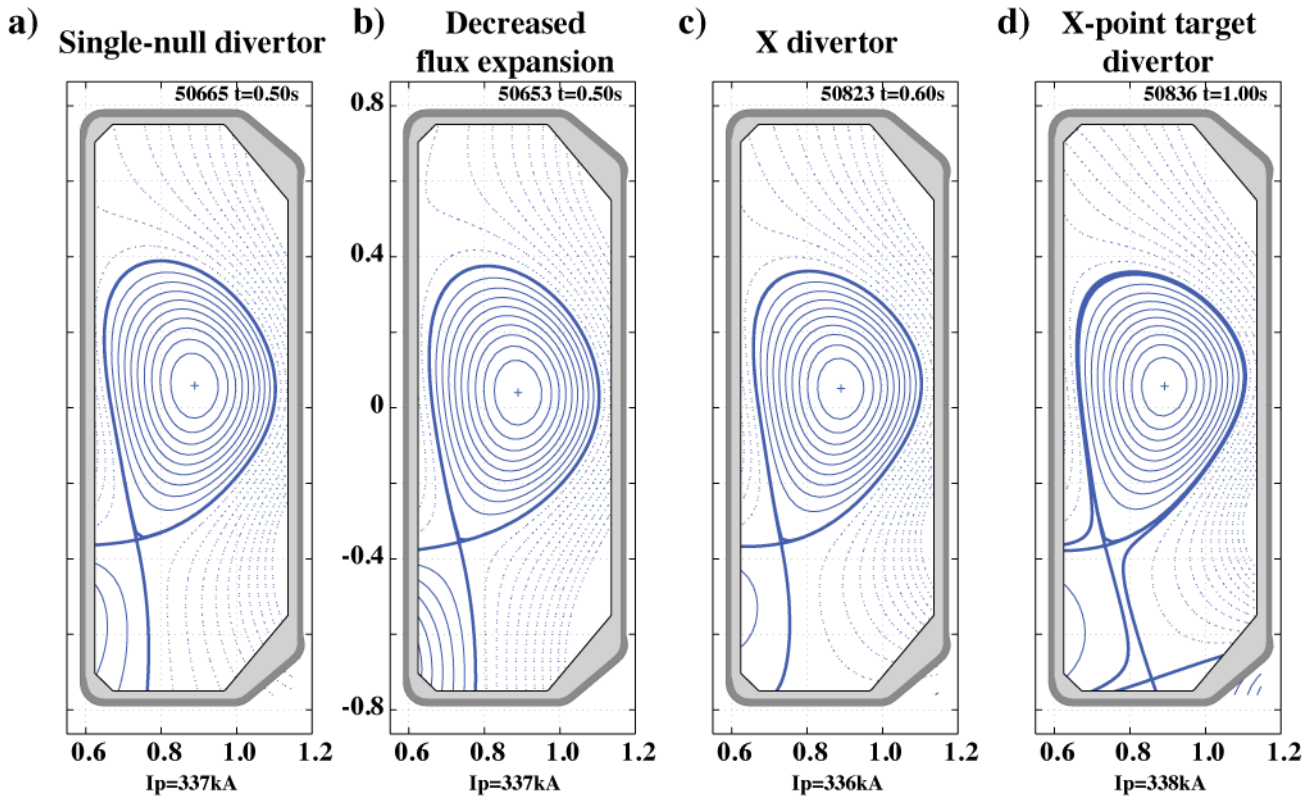


Fig.1 : Une sélection de formes de plasma et de configurations de divergeur réalisées sur le tokamak TCV : (a) la configuration standard, (b) avec une expansion de flux restreinte, (c) avec une expansion de flux augmentée, (d) avec un point X secondaire sur une des jambes du divergeur, (e) et (f) des "snowflakes", avec des positions relatives des points X secondaires différents.

d'obtenir des longueurs de connexion très différentes et d'étudier comment la largeur des profils de déposition de puissance, notamment en opérant à haute densité, pouvait en dépendre.

Un troisième thème d'importance cruciale pour l'opération d'un réacteur de fusion basé sur le concept du tokamak est celui des « Edge Localized Modes » (ELMs), qui se présentent sous la forme de bouffées de chaleur et de particules expulsées du plasma de manière répétitive, conduisant à des valeurs de flux instantanées dangereuses pour l'intégrité des structures de la paroi du réacteur. Des expériences ont été menées pour atténuer l'effet des ELMs en utilisant à la fois des techniques de chauffage rf aux fréquences cyclotroniques électroniques et l'application de perturbations magnétiques. Ces travaux ont requis des développements et améliorations continus sur le système de contrôle de TCV. Un résultat significatif consiste en ceci qu'un contrôleur généralisé de la forme et de la position du plasma, basé sur une reconstruction en temps réel de l'équilibre, a été déployé et testé avec succès.

Enfin, certaines instabilités peuvent conduire à une perte d'efficacité du confinement magnétique et imposent ainsi des limites à la pression de confinement pour un champ magnétique donné. Il s'agit des « Neoclassical Tearing Modes » (NTMs), qui brisent la structure imbriquée des surfaces magnétiques en certains endroits du plasma, les surfaces magnétiques dites « rationnelles ». En présence de ces instabilités, les surfaces magnétiques se déchirent, conduisant à une perte de pression dans le plasma. Les NTMs sont parfois déclenchés par d'autres phénomènes, par exemple les relâchements en « dents-de-scie » du cœur du plasma. Une façon d'empêcher le déclenchement des NTMs est donc de contrôler le comportement des dents-de-scie. De telles stratégies ont été développées sur le TCV.

Technologie de chauffage

Comme indiqué plus haut, une bonne partie de l'année 2015 a été consacrée à des améliorations et une modernisation du tokamak TCV, notamment de ses systèmes de chauffage du plasma. Ces améliorations vont permettre d'atteindre de nouveaux régimes d'opération, par exemple un régime dans lequel le rapport entre les températures électroniques et ioniques du plasma sera de l'ordre de l'unité, avoisinant ce à quoi l'on s'attend dans un réacteur de fusion. Dans le cadre du projet « TCV Upgrades », un système de chauffage des ions par injection de faisceaux de neutres (NBI) a été installé sur le tokamak TCV.

En 2015, le premier des deux injecteurs NBI de 1MW a été installé sur le TCV. Le second est prévu pour une phase ultérieure. Les tests d'acceptation ont été effectués dans la deuxième moitié de l'année. Par ailleurs, un système de protection de la première paroi du TCV, consistant en une surveillance rapide de la température de surface, a dû être installé avant d'autoriser l'injection NBI dans la chambre à vide. En effet, lorsque le faisceau NBI sera lancé dans

le plasma, il devrait normalement être bien absorbé par celui-ci. Cependant, pour maintenir l'intégrité de la machine en cas de problème, des mesures doivent être prises pour s'assurer que la température de surface de la paroi n'excède pas le seuil au-delà duquel des dégâts seraient causés.

Trois régions de la paroi à l'intérieur de la chambre à vide ont été identifiées comme étant les plus vulnérables à une surchauffe rapide (Fig. 2) : près de l'entrée du faisceau dans la chambre, les tuiles sur la colonne centrale situées sur la trajectoire du faisceau et les éléments de la paroi en face de l'entrée

du faisceau qui, en cas d'absence du plasma, recevraient alors l'essentiel de la puissance du faisceau. Un ensemble de pyromètres a été installé et calibré à ces endroits critiques.

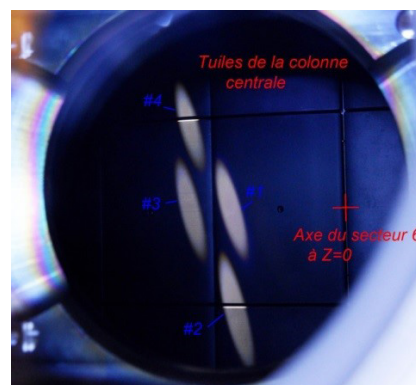
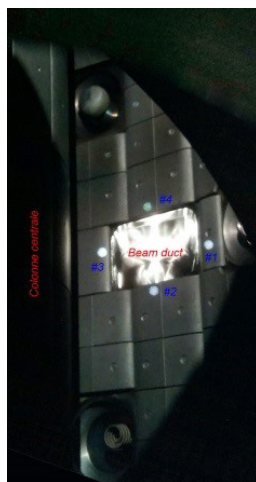
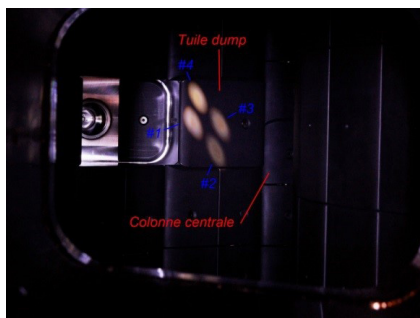


Fig.2 : Trois régions critiques à l'intérieur de la chambre à vide du tokamak TCV, où des systèmes de mesures rapides de la température ont été installés pour préserver l'intégrité de la machine en cas d'opération avec le faisceau d'injecteur de neutres.

En ce qui concerne les systèmes de chauffage par ondes radiofréquence millimétriques aux fréquences cyclotroniques électroniques (EC), ou gyrotrons, rappelons que le système installé sur le TCV comprend 4 gyrotrons à 82.6GHz de 0.5MW chacun, opérant à la deuxième harmonique (X2) et 3 gyrotrons de 118GHz de 0.5MW chacun, opérant à la troisième harmonique (X3). Ils sont reliés à un système de lanceurs (« antennes ») permettant d'orienter chaque faisceau en temps réel dans une direction, et, entre les tirs, dans une deuxième direction. Ce système a été utilisé intensivement avec succès tout au long de la campagne expérimentale MST mentionnée plus haut. Grâce à l'automatisation poussée du système, il a été possible de former des opérateurs EC en très peu de temps, de l'ordre de quelques semaines seulement.

Pour maintenir une puissance et une flexibilité d'opération compatibles avec les missions scientifiques du TCV, deux nouvelles unités de gyrotrons ont été commandées. Elles disposeront de performances améliorées (82.7GHz, 0.75MW chacun). Le premier gyrotron a été livré et les tests d'acceptation

sont presque terminés. Il sera prêt pour la prochaine campagne expérimentale MST sur le TCV en avril 2016. Le deuxième le sera à l'automne.

De plus, le développement de nouveaux gyrotrons, capables d'opérer à deux fréquences différentes (84 et 126 GHz), soit X2 et X3, a été poursuivi et un contrat avec l'industrie portant sur l'achat de deux exemplaires a été conclu. La livraison du premier d'entre eux est prévue pour 2017.

Le SPC est membre du consortium européen EGYC. Celui-ci est responsable du développement des gyrotrons pour ITER, sous les auspices de F4E. La stratégie s'articule autour de la production de deux gyrotrons, le premier à courte durée d'impulsion, destiné à valider le design, tandis que le deuxième aura pour but de satisfaire pleinement les spécifications pour ITER. Le premier a été testé extensivement : il a été montré qu'il pouvait délivrer 1MW de puissance, avec une efficacité de 35% et sans oscillations parasites, validant ainsi le design. Le deuxième, opérant en continu, a été livré en automne 2015 et les tests d'acceptation sont prévus pour le début 2016.

Toujours en relation à ITER, le développement du lanceur d'onde s'est poursuivi en 2015. Ce lanceur d'onde, faisant partie du système de confinement premier d'ITER (First Confinement System, FCS), est soumis aux exigences les plus strictes en matière de qualité, de sécurité et de qualité du vide. Les modèles de tous les composants FCS ont été redessinés pour satisfaire ces standards.

Il est devenu clair que les tests à haute puissance des prototypes de gyrotrons nécessitent l'établissement d'un banc d'essai en Europe. Ce banc d'essai a été installé au SPC pour le gyrotron ITER fourni par le programme européen.

Dans le cadre des activités de l'EUROfusion sur le chauffage et la génération de courant (WPHCD), deux tâches ont été accomplies. D'une part, les oscillations parasites ont été modélisées grâce à l'adaptation d'un code numérique développé au SPC. D'autre part, deux méthodes différentes de mesure des propriétés quasi-optiques des composants diélectriques des gyrotrons ont été testées et comparées.

Théorie et simulation numérique

Le groupe de Théorie et simulation numérique a pour objectif général d'apporter une compréhension de la physique des plasmas de fusion en se basant sur les théories fondamentales. Ceci est essentiel pour interpréter les résultats des expériences existantes et prédire ceux des machines de fusion futures. Cet objectif représente un défi considérable, nécessitant à la fois des théories analytiques avancées et des méthodes numériques à la pointe du progrès.

Les codes de calcul développés au SPC sont utilisés en production sur certaines des plateformes de calcul à haute performance (HPC) parmi les plus puissantes au monde : HELIOS, de l'IFERC-CSC, au Japon, dont l'accès est réservé aux participants aux programmes de recherches en fusion européen et japonais, ainsi que PIZ DAINI (CSCS), à Lugano, qui est la machine la plus puissante en Europe. Des dizaines de millions d'heures de calcul ont été allouées à des projets dirigés ou codirigés par des membres du SPC.

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines de recherche suivants.

- La simulation de la turbulence dans le cœur des tokamaks ;
- L'analyse des instabilités magnétohydrodynamiques (MHD) dans les tokamaks et d'autres configurations tridimensionnelles, ainsi que leur interaction avec les particules rapides ;
- L'investigation de la dynamique des plasmas au bord des réacteurs de fusion.

Le groupe entretient 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.

Alors que l'expertise du groupe théorique du SPC est régulièrement sollicitée par les autres lignes de recherches du SPC, elle l'est aussi au niveau européen. Un membre du SPC participe notamment au « HPC High Level Support Team » d'EUROfusion. Dans le cadre suisse, le groupe est aussi actif dans un projet PASC (Platform for Advanced Scientific Computing) pour le développement de méthodes numériques pour les codes « Particle-In-Cell » (PIC) adaptées aux nouvelles architectures HPC, en particulier celles équipées d'accélérateurs (Many Integrated

Core et Graphical Processing Unit). Un facteur d'accélération jusqu'à 4 a été démontré, ainsi qu'une excellente variabilité d'échelle, allant jusqu'à 4096 nœuds de calcul de PIZ DAINI. Enfin, dans le cadre d'une collaboration avec le Lawrence Livermore National Laboratory aux USA, un code de calcul simulant les interactions non-linéaires laser-plasma a été développé en incluant les effets des collisions inter-particulaires.

Le tokamak TCV a démontré un meilleur confinement de la chaleur pour des formes de plasma à « triangularité négative » (c'est-à-dire dont la section est en forme d'un D inversé) que pour les plasmas à « triangularité positive » (dont la section est en forme de D). Des simulations de la turbulence, incluant les effets de la taille finie du système, les collisions et la présence d'impuretés de carbone ont permis de vérifier que la turbulence dans le plasma à triangularité négative est plus faible que dans le plasma à triangularité positive. C'est d'ailleurs le cas dans tout le plasma, y compris dans les régions centrales où la forme des surfaces magnétiques n'est pas très différente entre les deux cas (voir Fig. 3). Ceci constitue une percée importante pour notre compréhension de ce phénomène, qui a été observé il y a une dizaine d'années déjà sur TCV.

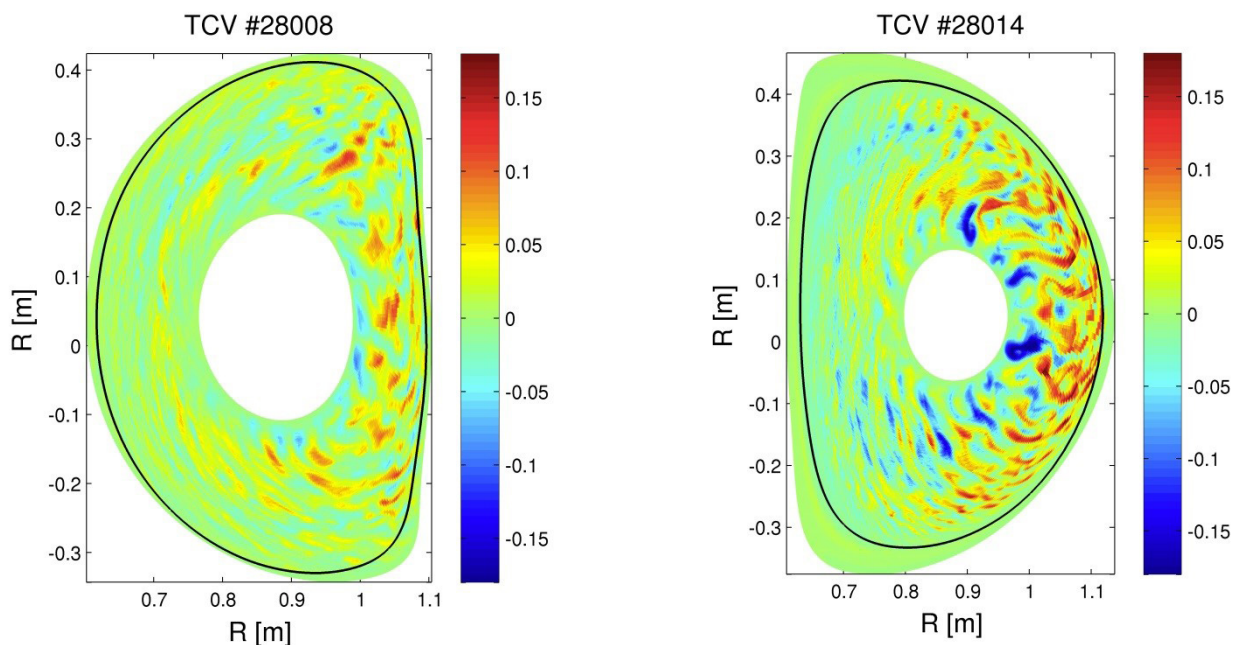


Fig. 3 : Vues instantanées en coupe des perturbations de densité dues à la turbulence dans le tokamak TCV, issues de simulations gyrocinétiques globales. La turbulence dans le plasma « en D inversé » (à gauche) est d'amplitude inférieure à celle dans le plasma « en D » (à droite), en accord qualitatif avec les observations expérimentales.

D'autres travaux sur la turbulence ont mis en évidence les effets de la dynamique des électrons, qui résulte en une corrugation des profils de température. Ceux-ci prennent une forme en escalier. D'autres travaux ont, eux, permis d'étudier la présence d'oscillations cohérentes : dans les simulations numériques, celles-ci sont excitées par la turbulence, et présentent une fréquence, une longueur d'onde et une extension radiale en très bon accord avec les

mesures expérimentales sur TCV. Enfin, dans le cadre d'EUROfusion, une comparaison de plusieurs codes gyrocinétiques de simulation de la turbulence a été effectuée avec succès, portant sur une série de configurations tokamak de formes différentes.

En relation avec le stellarator Wendelstein 7-X mis en service en 2015, les travaux du SPC sur le chauffage ionique cyclotronique (ICRH) ont permis

de prédire des profils d'absorption de puissance très différents et dépendant du type de configuration de Wendelstein 7-X. De plus, la création d'une population d'ions rapides due à l'application de l'ICRH a été modélisée. Il a pu être montré par le SPC que celle-ci était facilitée par la présence du champ électrique radial intrinsèque à la configuration du stellarator.

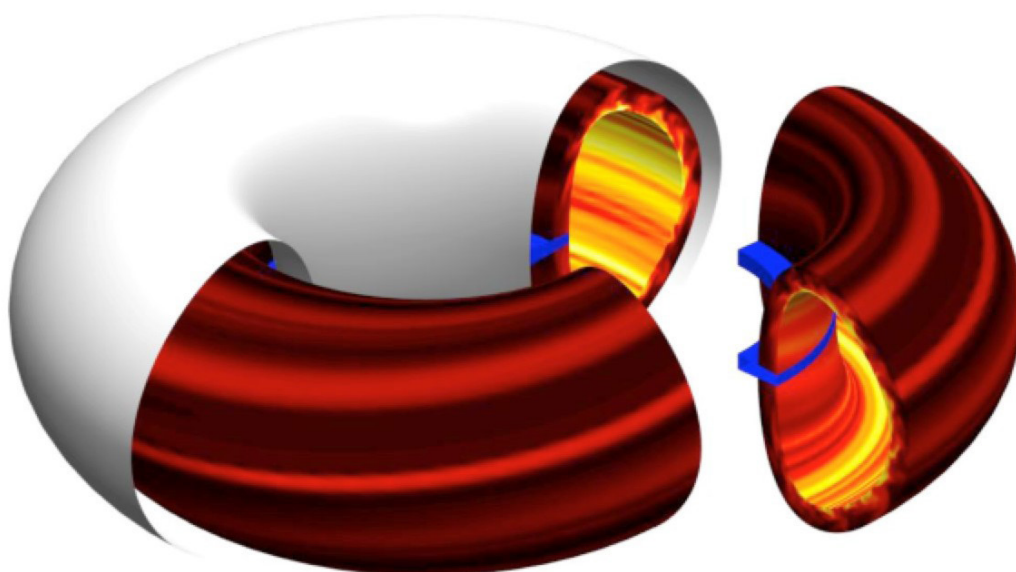


Fig. 4 : Vue instantanée de la turbulence du bord simulée par le code GBS dans le tokamak TCV

La dynamique des plasmas au bord des machines de fusion reste un sujet d'importance primordiale, pour lequel le SPC a continué de consacrer un effort important. La dynamique de la couche de plasma de bord, appelée « Scrape-Off Layer » (SOL), est caractérisée par une amplitude de fluctuation très importante. Le transport de chaleur et de matière s'effectue en grande partie via des phénomènes intermittents. En 2015, le SPC a procédé à des améliorations conséquentes du code de simulation GBS, qui permettent maintenant de simuler le SOL des tokamaks dans son entier. La Figure 4 montre un exemple de simulation de la turbulence dans le SOL du tokamak TCV. La caractérisation de la turbulence a été comparée avec des mesures d'imagerie effectuées sur le tokamak Alcator C-Mod du MIT, avec un bon accord quantitatif pour les pro-

priétés de corrélation, les vitesses de propagation des perturbations, ainsi que les spectres de fréquence.

D'autre part, un nouveau modèle incluant les interactions entre le plasma et le gaz neutre a été développé et implémenté dans le code GBS. Ce modèle inclut les effets de l'ionisation, de l'échange de charges, de la recombinaison et des collisions élastiques. Il a été appliqué à l'étude du transport dans le SOL en fonction de la densité, montrant un changement de régime. Des comparaisons avec d'autres modèles théoriques ont pu être menées à bien. Le modèle est maintenant appliqué à l'étude de l'impact de la présence de gaz neutre sur les caractéristiques de la turbulence, notamment à haute densité.

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.

Diverses configurations magnétiques peuvent être créées dans TORPEX. D'une part, des configurations simples, avec une composante toroïdale dominante à laquelle une composante verticale est ajoutée, créant des lignes de champ hélicoïdales. D'autre part, des configurations avec des surfaces magnétiques fermées, créées grâce à un conducteur toroïdal placé dans la chambre à vide (Fig. 5), y compris

des configurations avec séparatrice et point-X, qui sont très pertinentes pour les expériences de fusion.

En 2015, la plupart des expériences ont été consacrées aux deux thèmes : premièrement l'interaction entre les ions énergétiques et la structure intermittente de la turbulence et deuxièmement la propagation de structures turbulentes en présence de point-X.

Les ions dits « énergétiques » ont par définition une énergie cinétique bien supérieure à la moyenne de la population des ions en équilibre thermody-

namique. Dans les expériences de fusion, on trouve d'une part ceux créés comme noyaux d'hélium par le processus de fusion lui-même, et d'autre part ceux créés par injection de faisceaux de neutres (NBI) ou par injection d'ondes aux fréquences radio. Il est important de comprendre leur comportement dans le plasma en présence d'une turbulence. Nous avons montré que, selon l'énergie de ces ions, le transport pouvait être diffusif (c'est-à-dire prédit par un processus de diffusion standard), ou sous-diffusif (plus lent que prédit par la théorie de la diffusion), ou

super-diffusif (plus rapide que prédit par la théorie de la diffusion).

La propagation des structures de la turbulence, appelées « blobs » ou « filaments », a été mesurée en détail pour la première fois dans des configurations magnétiques avec point-X. Les observations montrent une accélération des blobs, qui a pu être modélisée en tenant compte de la présence d'écoulement, de la structure dipolaire de ces filaments et de la géométrie de la configuration.

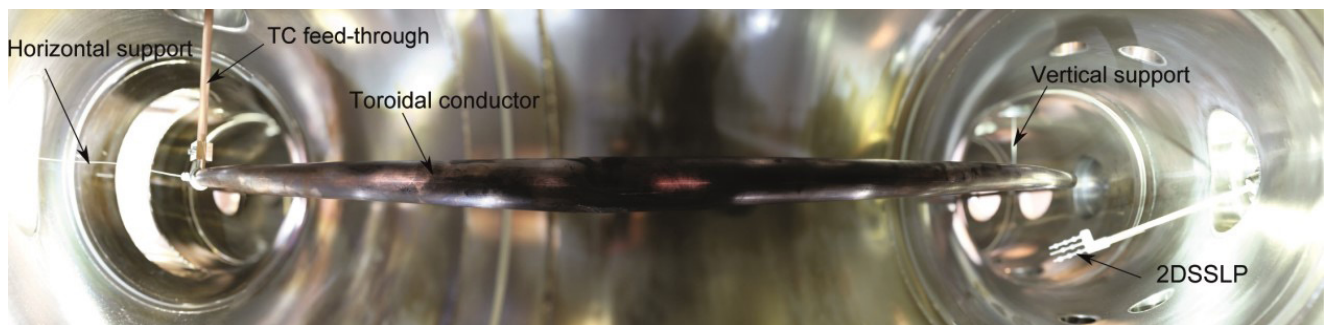


Fig. 5 : Vue grand angle de l'intérieur de la chambre à vide de TORPEX, montrant en particulier le conducteur toroïdal permettant de moduler la configuration magnétique.

Supraconductivité

Le groupe Supraconductivité, situé au PSI, a poursuivi ses activités dans le test et la qualification de tous les supraconducteurs pour ITER sur l'installation SULTAN, conformément au contrat signé en 2012 avec ITER Organization. Ces tests concernent les câbles pour les bobines de champ toroïdal et poloïdal, pour le solénoïde central et les bobines de correction. Un total de 16 campagnes de test ont été effectuées en 2015.

Un autre volet d'activité du groupe a concerné le développement et les tests de supraconducteurs à basse et haute température pour DEMO. Des études de design pour le solénoïde central de DEMO ont commencé en 2015, avec des supraconducteurs à haute tem-

pérature opérant à un champ magnétique de 16 Tesla dans les couches intérieures et des supraconducteurs conventionnels dans les couches extérieures afin de minimiser les coûts.

Les tests d'acceptation de la nouvelle installation EDIPO ont été conclus avec succès au printemps 2015. Des comparaisons avec des tests similaires effectués sur l'installation SULTAN ont donné de très bons résultats. Des adaptations et améliorations ont ensuite été apportées, qui permettront le test de supraconducteurs à haute température.

Le développement de méthodes d'examen non-destructifs pour les joints des bobines magnétiques pour ITER s'est poursuivi. Elles sont basées sur la mesure, à température ambi-

ante, de profils de résistance électrique anormaux. Le but est de préparer l'équipement nécessaire à ces mesures, qui sera ensuite utilisé in situ par les fabricants des bobines d'ITER.

Activités internationales sur les tokamaks

Le SPC a conduit plusieurs activités sur le tokamak JET (UK), qui est à ce jour le plus grand au monde en opération, ainsi que sur le tokamak Asdex-Upgrade, en Allemagne. Le SPC a également conduit le projet de « Divertor Tokamak Test » (DTT), qui a pour but d'évaluer des concepts alternatifs de divergeur et leur compatibilité avec DEMO.

Joint European Torus (JET)

Similaire à celui qui sera installé sur ITER, le divergeur en tungstène de JET présente le défi de réussir à contrôler et éviter l'afflux d'impuretés de tungstène vers le cœur du plasma, ce qui affecterait négativement la performance de fusion. Des expériences ont été menées pour aborder ce problème. Une des méthodes est d'injecter des ondes aux fréquences cyclotroniques ioniques (ICRH) dans le centre de la décharge. Deux techniques ont été testées pour limiter le flux de chaleur sur les éléments en tungstène : d'une part par injection volontaire d'impuretés de néon à la périphérie, qui contribuent à faire baisser le flux de chaleur arrivant jusqu'à la paroi en dissipant une partie de l'énergie par rayonnement ; d'autre part par modulation du champ magnétique, afin de balayer les points d'impact sur le divergeur. Les premiers résultats sont encourageants, avec 30% de puissance rayonnée par le néon, et un abaissement marqué de la température de surface du tungstène résultant de la technique du balayage.

Les instabilités générées par la présence d'ions rapides ont été étudiées sur JET. La mesure de ces instabilités, en particulier de leurs fréquences, a pu être utilisée comme indicateurs de la structure magnétique interne du plasma, celle-ci

étant difficilement mesurable directement. Ces données ont pu ensuite être comparées avec d'autres mesures et avec des résultats de codes de reconstruction numérique de l'équilibre magnétique. D'autres études ont porté sur les « Edge Localized Modes » (ELMs) et leur « signature » magnétique, tentant en particulier d'identifier de possibles précurseurs.

Asdex-Upgrade

Sur le tokamak Asdex-Upgrade, les expériences menées par le SPC ont porté notamment sur la physique du transport dans le bord du plasma (« Scrape-Off Layer », SOL), sur le contrôle en temps réel de certaines instabilités (« Neoclassical Tearing Modes », NTM), sur l'inclusion des mesures magnétiques dans le système de contrôle en temps réel, ainsi que sur l'opération à haute densité en conservant une haute qualité du confinement et des ELMs tolérables.

Divertor Tokamak Test (DTT)

Dans le cadre de ce projet, partie intégrante de la Feuille de route européenne pour l'énergie de fusion, différents concepts de divergeur ont été comparés, notamment en rapport à

la solution de base envisagée pour DEMO. Du point de vue de la géométrie du divergeur, les solutions les plus prometteuses sont le divergeur « X », avec expansion de flux augmentée (Fig. 1c), le divergeur « super-X », avec une position du divergeur à plus grand rayon, et le divergeur « snowflake » (Fig. 1e et 1f). Du point de vue des matériaux, des solutions utilisant des alliages liquides de lithium et d'étain ont été également examinées.

Ces configurations alternatives ont été développées en tenant compte de densités réalistes de courant dans les bobines et en ménageant suffisamment d'espace pour le manteau de lithium de surgénération ainsi que pour l'écrantage des neutrons. La faisabilité technique de ces configurations a ainsi été démontrée. Les calculs de performance en matière d'évacuation de la chaleur se poursuivent. Le projet a déjà permis de conclure qu'un concept intégré avec des cibles en métal liquide, incluant le cycle complet, avec un refroidissement et des matériaux compatibles avec l'environnement du réacteur, était nécessaire pour estimer le potentiel d'extraction de la puissance.

Université de Bâle

Etudes concernant l'interaction plasma - paroi⁸

Les travaux de l'Université de Bâle ont été consacrés à l'étude du comportement des miroirs pourvus de revêtements protecteurs en couches minces dans les conditions extrêmes d'érosion qui prévaudront dans un réacteur de fusion. Ces miroirs seront en effet exposés au flux intense de chaleur et de particules du plasma. Des maquettes de miroirs avec des revêtements de rhodium (Rh) et de molybdène (Mo) de différentes épaisseurs, avec et sans ref-

roidissement à eau, ont été exposées à des flux élevés de plasma d'hydrogène et d'argon dans l'installation Magnum-PSI (Hollande). Les mesures de réflectivité après exposition (voir un exemple en Figure 6) ont révélé des comportements très différents. Alors que les films de Rh d'épaisseur de 5 microns ont échoué aux tests, les films de 1 micron d'épaisseur ont montré une perte de 10% de réflectivité seulement dans la zone exposée au flux. Pour comparaison, les miroirs refroidis à eau avec couche de Mo montrent, eux, une perte de réflectivité de plus de 50% dans le domaine du visible, et ceci sur la surface entière du miroir. Les miroirs non refroidis, avec couche de Mo ont,

quant à eux, exhibé des pertes inférieures à 4%.

Trois phénomènes sont proposés pour expliquer ces comportements. Le premier invoque les propriétés mécaniques d'adhésion de la couche sur le substrat en acier. Le deuxième implique un dépolissage de la surface qui est plus marqué à basse qu'à haute température. Le troisième mécanisme est une oxydation de la surface du Mo, qui n'est par contre pas observée avec le Rh.

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

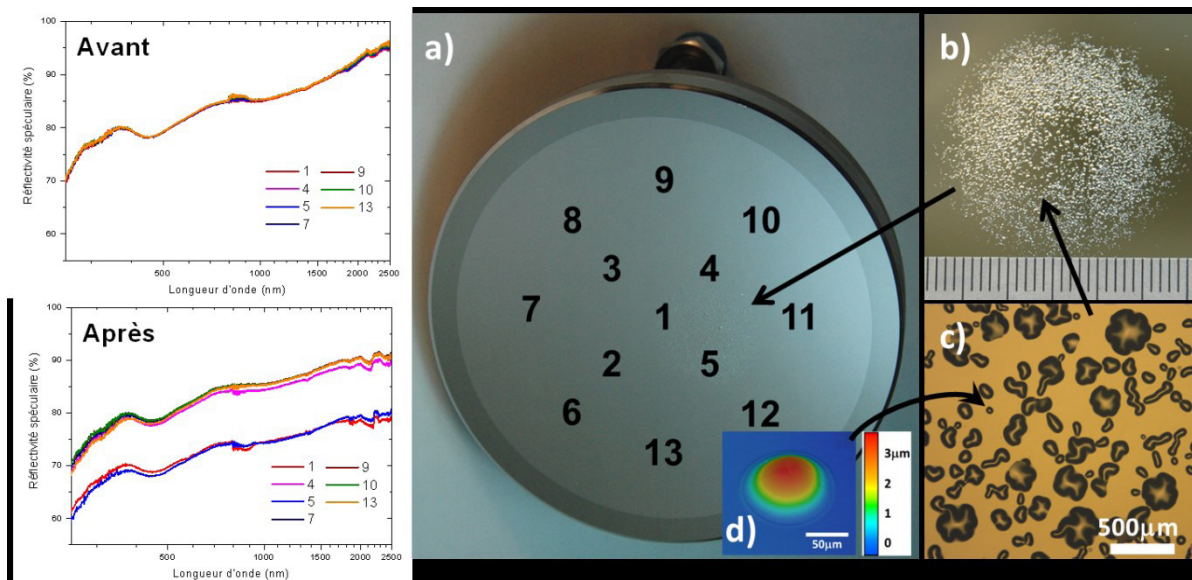


Fig. 6 : Réflectivité spéculaire d'un miroir avec 1 μm de Rh sur de l'acier inoxydable avant et après exposition à un plasma H₂/Ar (10%). Les points de mesures figurent sur l'image a). Les images b) et c) représentent des grossissements supérieurs de la partie bombardée. Pour l'image b) la graduation est en millimètre. L'image d) illustre une version 3D d'une cloque.

Références

[1] Site web du Swiss Plasma Center : <http://spc.epfl.ch>

[2] EFDA roadmap to the realisation of fusion energy :

<https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

[3] Accord de coopération scientifique et technologique entre l'Union européenne et la Communauté européenne de l'énergie atomique et la Confédération suisse associant la Confédération suisse au programme-cadre pour la recherche et l'innovation Horizon 2020 :

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2014:370:FULL&from=FR>

[4] Rapports annuels du SPC :

<http://spc.epfl.ch/page-48260-fr.html>