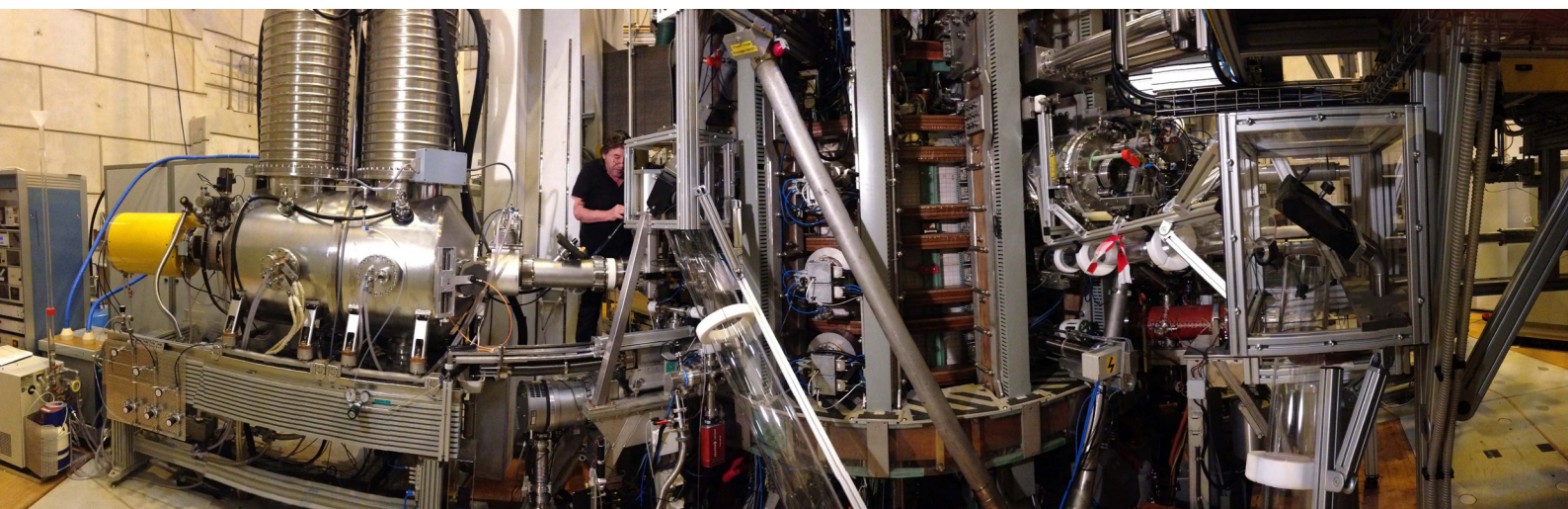


Rapport de synthèse 2016

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 panoramique du Tokamak à Configuration Variable (TCV) installé dans les locaux du Swiss Plasma Center (SPC).

Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire

Rapport de synthèse 2016

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne

Auteurs :

Prof. Dr. Laurent Villard (SPC - EPFL), Dr. Laurent Marot (Université de Bâle), Dr. 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. Maîtriser la fusion nucléaire doit en effet permettre de produire des quantités énormes d'énergie sans émettre 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 pour initier et entretenir la réaction de fusion. Ce défi de taille, autant scientifique que technologique, fait l'objet de recherches qui s'inscrivent aujourd'hui dans un cadre mondialisé.

Le programme européen de recherches en fusion s'est d'emblée concentré sur le développement de la fusion nucléaire en tant que source d'électricité. Depuis près de 40 ans, cette stratégie a été suivie avec ténacité par la Communauté européenne de l'énergie atomique EURATOM, notamment dès 1979, à travers la construction et l'exploitation du Joint European Torus (JET) au Royaume-Uni. Couronnée de succès, l'exploitation de cette machine a permis de réaliser d'importants progrès dans la maîtrise de la réaction de fusion et d'obtenir un grand nombre de réaction de fusion deutérium-tritium avec un rapport puissance injectée-puissance produite jusqu'ici inégalé de $Q=0.65^1$. Aujourd'hui encore le tokamak en exploitation le plus puissant au monde, JET joue toujours un

¹ Q est défini comme le rapport entre la puissance émise par la réaction de fusion et la puissance extérieure fournie au plasma par les systèmes de chauffage du réacteur.

rôle déterminant dans la préparation des étapes ultérieures dans la quête de l'énergie de fusion.

Ces développements ont permis le lancement en 2007 du projet international ITER par l'Union européenne (UE), les Etats-Unis, la Chine, la Corée du Sud, le Japon, l'Inde et la Russie. L'objectif principal d'ITER est la réalisation d'une installation démontrant la faisabilité technique et l'intérêt de la fusion nucléaire pour la production d'énergie à échelle industrielle. Actuellement en construction sur le site de Cadarache en France, ITER est conçu pour générer 500 MW d'énergie de fusion à partir de 50 MW de puissance fournie, visant ainsi à atteindre un facteur Q de 10.

Parallèlement, certains partenaires ont d'ores et déjà entrepris, hors du cadre fixé par l'accord régissant leur collaboration au sein du projet ITER, 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 ou plusieurs réacteurs de démonstration capables de produire et de transférer vers le réseau une quantité substantielle 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.

Participation de la Suisse aux recherches internationales en fusion nucléaire

La recherche suisse en fusion nucléaire s'inscrit pleinement dans ce cadre à la fois européen et international. Principalement au travers du Swiss Plasma Center, rattaché à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et réparti entre le campus de l'EPFL et le Paul Scherrer Institut (PSI) à Villigen, mais aussi de l'Université de Bâle, la Suisse apporte de longue date des compétences spécifiques et une expertise mondialement reconnues.

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 Laboratoire de Physique des Plasmas². Dès 1979, un accord de coopération passé avec EURATOM associe pleinement la Suisse au Programme européen de recherches en fusion. Depuis 2014, cette participation est réglée par l'accord d'association aux programmes-cadres de recherche et d'innovation de l'UE, qui règle tant la participation de la Suisse au programme-cadre de recherche Horizon 2020, qu'au programme de recherche d'EURATOM ainsi qu'aux activités de l'entreprise commune européenne pour ITER et le développement de l'énergie de fusion, Fusion for Energy (F4E).

La Suisse participe ainsi actuellement à la réalisation du projet ITER et aux instruments européens dédiés à la recherche en fusion nucléaire sur la base de l'accord d'association de 2014. Or, celui-ci aurait expiré au 1^{er} janvier 2017 si la Suisse n'avait pas ratifié le protocole d'extension de la libre-circulation des personnes à la Croatie. La ratification en question étant intervenue le 16 décembre 2016, la Suisse est depuis janvier 2017 intégralement associée au huitième programme-cadre de recherche Horizon 2020. Elle peut aussi poursuivre sa participation au programme de recherche en fusion d'EURATOM et continuer à prendre part aux activités de F4E jusqu'au 31 décembre 2020.

² Rebaptisé en 1968 Centre de Recherches en Physique des Plasmas et en 2015 Swiss Plasma Center. sps.epfl.ch

Classification de l'AIE: 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse: 3.2 Fusion

Développements extra-européens en 2016

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. Si ce projet hors normes a fait 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 (France), il faut observer que la dynamique positive initiée par l'entrée en fonction du Directeur Général actuel Bernard Bigot à la tête d'ITER Organization en février 2015 s'est poursuivie en 2016. Au-delà des progrès opérationnels concrets observables sur le site de construction d'ITER et de multiples réformes administratives, c'est l'adoption par le Conseil d'ITER Organization (IO) en novembre dernier d'un échéancier entièrement révisé pour l'ensemble du

projet ITER qui constitue certainement le développement majeur de l'année 2016.

Dans le cadre de cette planification renouvelée, la réalisation du projet ITER est optimisée afin d'atteindre le plus efficacement possible les deux objectifs centraux que sont, d'une part, l'obtention d'un premier plasma non-nucléaire en 2025 et, d'autre part, la première expérience nucléaire deutérium-tritium en 2035. La phase de construction d'ITER se prolongera donc jusqu'en 2025, avant que ne se succèdent phases d'opération et de construction jusqu'en 2035 afin d'apporter progressivement les modifications nécessaires à la conduite d'expériences nucléaires. Si, du fait que les pays membres livrent le gros de leur contribution en nature, il est difficile d'avoir une vue d'ensemble des coûts engendrés par cette plani-

fication renouvelée, les conséquences pour l'UE sont estimées à environ 7.0 milliards d'euros entre 2021 et 2035³. Cette nouvelle planification d'IO a fait l'objet de différentes évaluations, qui concluent que la stratégie par étape proposée par Bernard Bigot constitue l'approche la plus à même de mener le projet à bien.

Le chantier de construction à Cadarache est en plein développement (voir Figure 1). Le troisième niveau du complexe devant héberger le tokamak est actuellement en cours de réalisation. Le revêtement extérieur du hall d'assemblage est à présent complet et deux grues de 46 mètres permettant de soulever des charges allant jusqu'à 1500 tonnes ont été installées au sommet de l'édifice. Les bâtiments dédiés aux installations cryogéniques et à la maintenance progressent également.

³ Valeur 2008.



Fig. 1 Vue aérienne du site de construction d'ITER à Cadarache, France. Le hall d'assemblage surplombe le complexe qui abritera le tokamak. © ITER Organization, <http://www.iter.org/>

Les équipements nécessaires à la construction des bobines à champ poloidal sont à présent installés sur le site, afin que ces dernières, trop lourdes pour être transportées, puissent être produites à Cadarache même. Autre composant de première importance, la première bobine de champ toroidal, haute de 17 mètres et pesant pas

moins 310 tonnes, a été finalisée en septembre 2016. Enfin, la réalisation de la chambre à vide d'ITER, mesurant 19 mètres de rayon pour 5200 tonnes, où doit concrètement avoir lieu la réaction de fusion, demeure un défi majeur pour l'industrie métallurgique mondiale. L'UE anticipant des difficultés dans la réalisation des sept secteurs dont

elle a la charge, la décision a été prise par le Conseil ITER de transférer la responsabilité de la construction de deux secteurs à l'agence domestique sud-coréenne afin de préserver le calendrier du projet.

Développements européens en 2016

Les priorités et orientations stratégiques de la recherche européenne en fusion nucléaire sont définies dans la Feuille de route 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 son intérêt pour 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 autre architecture de réacteur, les stellarators.

Du point de vue institutionnel, la recherche européenne en fusion a pour double cadre, d'une part, la partie fusion du programme de recherches d'EURATOM, actuellement mise en œuvre par le consortium EUROfusion et, d'autre part, les activités de l'entreprise commune européenne Fusion for Energy en ce qui concerne la contribution européenne à la construction d'ITER.

Activités du consortium EUROfusion

Le consortium EUROfusion est doté d'un budget de 857 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 M€ a été signé entre EURATOM et EUROfusion en octobre 2014, achevant ainsi le processus de transformation du Programme européen de recherches en fusion. Signataire du Consortium Agreement établissant le consortium, l'EPFL est officiellement membre d'EUROfusion. L'Université de Bâle y est affiliée comme «Linked Third Party». Les travaux réalisés en 2016 par ces institutions dans le cadre d'EUROfusion sont présentés dans ce rapport (voir ci-dessous).

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



Fig. 2 Participants à la réunion 2016 de planification générale conjointe du Work Programme de JET (Joint European Torus) et de MST (Medium Size Tokamaks) à Lausanne.

Le consortium EUROfusion a lancé en 2016 le processus de mise à jour la Feuille de route pour l'énergie de fusion. Cette révision vise à prendre en compte les développements au niveau du projet ITER, le projet d'infrastructure dédiée à l'étude du comportement des matériaux soumis à des flux intenses de neutrons (IFMIF/DONES), l'évolution du programme dédié aux échappements du plasma (PEX) et, enfin, l'actualisation de la planification de la machine devant succéder à ITER, DEMO.

L'année 2016 a permis à EUROfusion de profondément revoir la stratégie de développement des outils scientifiques et technologiques nécessaires à la réalisation de centrales nucléaires basées sur la fusion. La principale évolution consiste ici en l'adoption d'une approche focalisée sur la réalisation de systèmes industriels. L'objectif actuel est d'identifier un design conceptuel unique et définitif pour DEMO d'ici 2027, suite à quoi la phase d'ingénierie technique pourra débuter. EUROfusion s'efforce d'associer le plus étroitement possible les partenaires industriels à ce processus.

Les campagnes expérimentales menées en 2016 sur JET ont permis de valider l'utilisation de parois métalliques pour améliorer les performances en matière de rétention du tritium et d'étudier la réduction des disruptions du plasma à l'aide d'outils proches de ceux qui seront installés sur ITER. Dans le même temps, un travail important a été accompli pour améliorer les performances de la machine. Enfin, d'intenses travaux se poursuivent sur les trois tokamaks de taille moyenne sélectionnés par EUROfusion, Asdex Upgrade, MAST et TCV (installation phare du Swiss plasma center, voir plus bas), ainsi que sur le stellarator W7-X entré en service fin 2015.

L'année 2016 a finalement été marquée par l'évaluation intermédiaire

du consortium EUROfusion. Dans son rapport présenté au Comité de programme d'Euratom, le panel d'experts responsable de cet exercice a reconnu l'importance des travaux accomplis et s'est montré satisfait des inflexions stratégiques initiées par EUROfusion. Ceci concerne DEMO, mais aussi l'attention accrue apportée au domaine des matériaux. Il recommande par ailleurs d'explorer la possibilité d'établir des priorités plus claires dans l'implémentation de la Feuille de route pour l'énergie de fusion et d'encourager l'internationalisation des infrastructures de recherche dans le domaine de la fusion, à commencer par JET. Enfin, une collaboration plus étroite avec l'entreprise commune européenne pour ITER, Fusion for Energy, est souhaitée. La quinzaine de recommandations émises dans le cadre de cette évaluation seront examinées par le consortium EUROfusion en 2017.

Activités de Fusion for Energy

Une grande partie du budget d'EURATOM fusion est consacrée à la participation européenne à la construction d'ITER au travers de l'entreprise commune européenne Fusion for Energy (F4E). Forte de l'entrée en fonction le 1^{er} janvier 2016 de son nouveau Directeur Johannes Schwemmer, F4E a pu relever d'importants défis en 2016. La réforme de F4E initiée en 2015 par le Directeur ad interim Pietro Barabaschi sous forme d'un vaste plan d'actions a été prolongée en 2016 par une refonte de l'organigramme de l'entreprise. Un effort substantiel a également porté sur le suivi des activités opérationnelles. Il en ressort des performances accrues depuis le troisième trimestre 2015.

Le principal défi en 2016 pour F4E consistait dans la préparation de sa contribution à la mise en place de la nouvelle planification d'IO et dans l'adaptation de son propre programme de travail à

ces nouvelles contraintes. Cette entreprise a débouché sur le plan « Straight Road to First Plasma » (SR2FP), qui vise essentiellement à optimiser la gestion des ressources et des risques pour stabiliser la date prévue du premier plasma tout en veillant à minimiser l'impact du renvoi de multiples projets à une date ultérieure à 2025. Au niveau financier, SR2FP a été mis en place de manière à ce que le plafond financier de 6.6 milliards d'euros décidé en 2010 par l'UE pour sa participation à la construction d'ITER jusqu'en 2020 soit respecté. F4E estime que la contribution européenne additionnelle nécessaire jusqu'en 2025 s'élève à 3.8 milliards d'euros. 3.2 milliards d'euros supplémentaires seront ensuite nécessaires d'ici aux premières expériences nucléaires en 2035, portant la contribution européenne prévue à un total de 13.6 milliards d'euros sur la période 2007-2035.

Dans sa résolution du 27 octobre 2016, le Parlement européen a accordé la décharge au Directeur de F4E concernant les comptes de l'exercice 2014. C'est un développement important puisque le Parlement européen avait décidé en avril 2016 de retenir la décharge, appliquant par là une pression très importante à la fois sur F4E et sur IO. La décision d'accorder la décharge et le contenu de la résolution du Parlement accompagnant cette dernière confirment les progrès importants réalisés dans le projet ITER et sa gestion.

Highlights Recherche et Développement

Swiss Plasma Center⁵

L'année 2016 a été extraordinairement productive scientifiquement, avec en particulier la plus intense activité expérimentale jamais réalisée sur le tokamak TCV (Tokamak à Configuration Variable), qui est l'installation phare du SPC. De façon plus globale, les activités du SPC se sont déroulées tant dans le cadre du programme national que dans celui du consortium EUROfusion, mais également avec des contributions au projet ITER, notamment au travers de l'agence domestique européenne F4E. Les recherches du SPC 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, ainsi que la technologie de la fusion liée au chauffage du plasma et la génération de courant par ondes hyperfréquences et par injection de faisceaux de neutres ; 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 installation destinée à la 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) d'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 plus de trente doctorants dont plusieurs ont obtenu en 2016 leur titre de doctorat. En 2016, le SPC a assuré

⁵ Rapports annuels du SPC : <http://spc.epfl.ch/page-48260-fr.html>

ses tâches d'enseignement aux niveaux du Bachelor, du Master et de l'Ecole Doctorale de l'EPFL. De nombreuses activités de relations publiques, visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion contrôlée à des profanes, ont été menées tout au long de l'année.

Travaux scientifiques sur le tokamak TCV

L'expérience **TCV (Tokamak à Configuration Variable)** représente l'effort principal des équipes de recherche du SPC. 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 européenne pour la réalisation de l'énergie de fusion. 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. Le TCV a franchi une étape supplémentaire importante en 2016 : un système de chauffage des ions du plasma par injection de faisceaux de neutres (NBI), installé en 2015, a permis 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.

Le TCV a été en opération presque continuellement durant l'année 2016, après une année 2015 principalement consacrée à des ajouts majeurs, incluant un injecteur de particules neutres (NBI) d'une puissance de 1MW, deux nouvelles sources hyperfréquence (gyrotrons) de 0.75MW chacune pour le chauffage des électrons du plasma et la génération de courant aux fréquences cyclotroniques électroniques (EC), ainsi que des modifications et améliorations substantielles de ses diagnostics et infrastructures. La campagne de 2016 a été extraordinairement productive, avec une efficacité croissante, mesurée par le nombre de tirs par jour de plus de 35, et un taux de succès – avec tous les critères techniques satisfaits - de plus de 60%. En tout, 1030 tirs réussis ont été réalisés sous les auspices de la Task Force « MST » (Medium Size Tokamak) de l'EUROfusion, et 1133 tirs réussis dans le cadre du programme national. Notons que ce dernier est le pôle des travaux de thèses de doctorat, qui représentent un aspect fondamental de notre mission en tant qu'institution académique.

Avec l'injection de particules neutres (NBI), des températures ioniques de plus de 25 millions de degrés ont été atteintes au centre du plasma de TCV, bien au-delà des valeurs obtenues précédemment sans NBI, inférieures à 10 millions de degrés. En plus de chauffer le plasma, le NBI a pour effet de mettre le plasma en rotation, avec des vitesses mesurées de quelques 250 km/s, alors que sans NBI la vitesse est de l'ordre de 30km/s. La rotation du plasma est importante, car elle a le potentiel de stabiliser certains modes du plasma et ainsi d'améliorer la qualité du confinement. Le NBI a aussi eu pour effet de générer du courant dans le plasma.

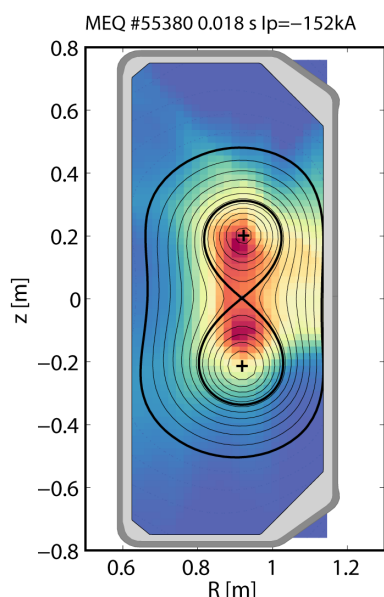


Fig. 3 Un plasma « doublet » créé dans le tokamak TCV. Les deux axes magnétiques sont indiqués par les symboles +. Les lignes noires indiquent les surfaces magnétiques. Les couleurs sont une reconstruction tomographique du rayonnement X émis par le plasma.

La flexibilité unique de TCV a permis de réaliser une percée majeure en 2016 : la création d'une configuration magnétique « doublet ». Ce type de configuration (Figure 3) est caractérisé par trois régions distinctes du plasma : deux plasmas autour de deux axes magnétiques (+), avec une séparatrice magnétique commune avec un point-X, et une troisième région enveloppant les deux premières. C'est la première fois que l'on obtient un doublet bien contrôlé dans un tokamak moderne, qui offre des possibilités de développer des configurations et des scénarios d'opération d'intérêt pour un réacteur de fusion. Les doublets ont le potentiel de combiner de bonnes propriétés de confinement dans les deux plasmas intérieurs, avec une région périphérique qui permet d'éviter la concentration de puissance en certains endroits de la paroi.

Un problème extrêmement important pour tout réacteur de fusion est celui de l'évacuation de la chaleur et des particules combinée avec le maintien d'une bonne performance. Cette évacuation s'effectue en grande partie le long de la configuration magnétique, caractérisée par une structure dite de « divergeur ». La puissance se concentre le long des « bras » du divergeur, avec pour conséquence des densités de puissance sur les parois localement très importantes, ce qui pose un problème de résistance thermique des matériaux de la cible du divergeur. Une des approches possibles est donc de jouer avec la géométrie du champ magnétique, afin d'étaler au maximum la puissance im-

partant les parois, mais également en augmentant la longueur de connexion des lignes de champ, afin qu'une bonne fraction de la puissance puisse être rayonnée avant d'arriver trop concentrée sur la paroi. La flexibilité opératoire de TCV a permis de mener de telles études, et de modifier en particulier les propriétés géométriques du champ magnétique au voisinage du divergeur. Des configurations nommées « divergeur-X », « divergeur super-X », et « snowflakes » ont été réalisées. Les résultats montrent que certaines de ces configurations sont plus prometteuses que d'autres. En particulier, le « 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, a été étudié en détail pour toutes ces configurations. Une technique pour augmenter la puissance rayonnée dans les jambes du divergeur consiste à ensemencher le plasma périphérique avec de petites quantités d'impuretés. Sur TCV, de l'azote a été utilisé. En particulier, une prédiction de la simulation numérique a pu être vérifiée : dans le cas du « snowflake », une zone de puissance rayonnée augmentée, située entre les deux points-X, a été observée (Figure 4).

Un effort vigoureux a été consacré en 2016 à l'étude du problème des disruptions. Les disruptions sont des pertes brutales du courant électrique circulant dans le plasma, dues à certaines instabilités. En plus de poser des problèmes sur la structure du réacteur, elles s'accompagnent parfois de

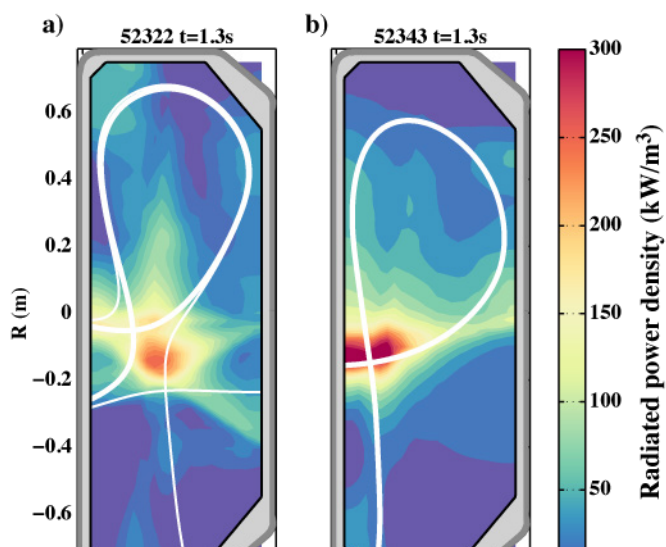


Fig. 4 A gauche, une configuration de divergeur dite « snowflake », avec deux points-X ; à droite, une configuration divergée standard, avec un point-X. Les images montrent les niveaux de la puissance rayonnée dans des expériences d'ensemencement par de l'azote. Dans le cas du snowflake, une zone de rayonnement intense apparaît entre les deux points-X, en accord avec la prédiction de la simulation numérique.

la génération d'électrons hyper-énergétiques, dits « runaway ». Elles font donc partie des phénomènes d'intérêt crucial pour la recherche en fusion. Sur TCV, plusieurs techniques pour éviter ou atténuer l'effet des disruptions et des runaways ont été explorées : génération de courant très focalisé par ondes hyperfréquences, injection massive de néon ou d'argon et contrôle du transformateur ohmique.

Un troisième thème d'importance pour l'opération d'un réacteur de fusion est celui du contrôle. Dans la campagne TCV de 2016, un nouveau contrôleur de la forme du plasma, un contrôleur de la pression et du profil de courant du plasma, un contrôleur de la densité du plasma et un contrôleur de modes instables du plasma par injection d'ondes hyperfréquence ont été mis en opération simultanément avec succès. Ces progrès s'inscrivent dans la stratégie à long terme du SPC de développer l'intégration de multiples contrôleurs, ce qui sera nécessaire pour un réacteur de fusion.

En vue de préparer l'opération future d'ITER, des scénarios ont été développés et testés sur TCV, en conjonction avec des expériences similaires sur les tokamaks JET et MAST, pour obtenir un accès à un mode de confinement amélioré « H-mode ». La technique développée avec succès a consisté à trouver un chemin stable d'opération évitant les instabilités, tout en obtenant une amélioration du confinement de 50%.

Technologie des diagnostics

Tous les résultats scientifiques obtenus sur le tokamak TCV reposent sur des systèmes de mesure sophistiqués du plasma. Plusieurs d'entre eux font appel à des techniques de spectroscopie, opérant à diverses longueurs d'onde allant du visible à l'ultraviolet et l'ultraviolet extrême. D'autres opèrent aux fréquences micro-ondes. L'année 2016 a été très intense, avec l'effort se partageant principalement entre, d'une part, des améliorations de diagnostics et, d'autre part, la ré-

intégration des anciens diagnostics dans le nouveau système de contrôle du TCV. Plutôt que de donner ici la liste de tous ces travaux, nous présentons ci-dessous un exemple significatif et illustratif : le système de diffusion Thomson.

Le principe de la diffusion Thomson est d'injecter un faisceau laser intense à travers le plasma. Les particules du plasma, réagissant au champ électromagnétique du laser, réémettent du rayonnement qui est collecté par un ensemble de spectromètres. Ces spectromètres mesurent l'intensité et les fréquences de la lumière, en fonction desquelles on peut en déduire la température électronique et la densité du plasma sur un ensemble de points de mesure le long de la ligne de visée du laser. Ce système a été entièrement remanié, avec l'ajout de plusieurs nouveaux spectromètres et d'un nouveau réseau collecteur de fibres optiques. Le but de l'opération est d'améliorer la résolution spatiale, d'étendre la fiabilité des mesures à des basses densités ou

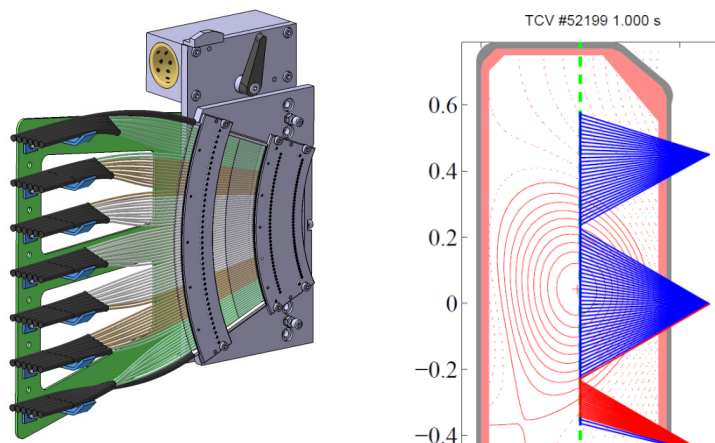


Fig. 5 À gauche, le nouveau design des fibres optiques du système de diffusion Thomson ; à droite, la couverture de la section de TCV par le système de diffusion Thomson. La ligne verticale traitillée est la trajectoire du faisceau laser incident. Les lignes de vue bleues ont une résolution spatiale de 12mm, les rouges de 6mm.

des basses températures et de préparer le système pour son intégration dans le contrôle en temps réel de TCV. La Figure 5 montre le nouveau design des fibres optiques et la couverture spatiale sur le tokamak.

Technologie de chauffage

Faisceaux de particules neutres (NBI)

En 2016, le premier injecteur de faisceau de particules neutres (NBI) a été

installé et mis en service sur le TCV. Cet injecteur a une puissance nominale de 1MW de particules neutres d'énergie 25keV. Malgré un retard sur la livraison, le faisceau et son alimentation électrique ont pu être installés avec succès avant le début des campagnes expérimentales d'EUROfusion (MST). Le système a fonctionné avec une bonne fiabilité sur l'ensemble de la campagne MST, avec un total de 702 tirs réussis, même si la divergence du faisceau s'est avérée problématique

et a contraint à opérer avec une limite d'énergie injectée de 500kJ. Un des critères du design du système NBI était la possibilité de moduler la puissance injectée de façon complexe. Ceci a très bien fonctionné.

Ce système NBI apporte une nouvelle capacité au programme scientifique de TCV, celle de pouvoir chauffer directement les ions du plasma, et ainsi représente le complément du système de chauffage hyperfréquence (EC),

décrit ci-dessous qui, lui, chauffe directement les électrons. Cette capacité a ouvert de larges champs d'investigations, comme l'étude de la rotation du plasma et de la thermalisation des ions rapides (simulant

les particules alpha issues de la fusion). La figure 6 montre un exemple d'évolution de la température des ions (à gauche) et des électrons (à droite). Avec la pleine puissance NBI, la température des ions a pu atteindre le dou-

ble de celle des électrons, et c'est une première pour TCV.

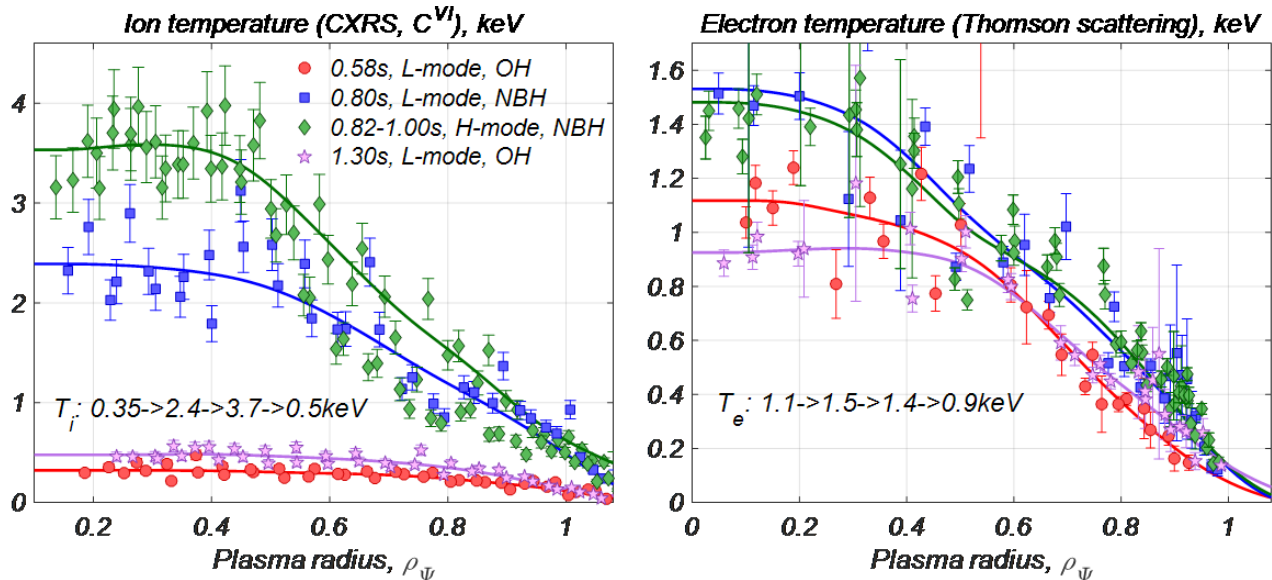


Fig. 6 Température des ions (à gauche) et des électrons (à droite) dans le plasma du TCV. Avec l'injecteur de particules neutres à pleine puissance, pour la première fois les ions ont atteint le double de température des électrons.

Ondes hyperfréquence pour le chauffage électronique cyclotronique (EC)

Le système de chauffage et de génération de courant aux fréquences cyclotroniques électroniques (EC) est assuré, sur TCV par des sources de haute puissance appelées gyrotrons. En 2016, trois de ces gyrotrons, d'une puissance de 0.5MW chacun, ayant atteint 20 ans d'opération, ne pouvaient plus être réparés, et ils ont donc été remplacés par deux gyrotrons de 0.75MW chacun. Le système EC sur TCV consiste donc actuellement en 5 gyrotrons pour le chauffage ou la génération de courant à la 2^{ème} harmonique (soit 82.6GHz, 2.75MW), ainsi que 3 gyrotrons fonctionnant à la 3^e harmonique (soit 118GHz, 1.25MW). Ce système a été intensément utilisé dans les campagnes expérimentales de 2016.

En vue d'une augmentation des performances de TCV, il est prévu d'installer deux gyrotrons supplémentaires de 1MW chacun. Ceux-ci auront la capacité de fonctionner à deux fréquences différentes (84 ou 126GHz) et donc à la 2^{ème} ou à la 3^{ème} harmonique. Ces gyrotrons sont en cours de fabrication par Thales Electron Devices. En parallèle à ces développements, tous les systèmes auxiliaires nécessaires à l'opération de ces gyrotrons ont été dessinés. En particulier, afin d'étendre la flexibilité opérationnelle de TCV, l'intégration de ces deux nouvelles sources rajoute une complexité non négligeable au système de lignes de transmission entre les gyrotrons et le tokamak. Une vue du futur système est montrée à la Figure 7.

Le SPC est membre du consortium européen EGYC. Celui-ci est responsable du développement des gyro-

trons pour ITER, sous les auspices de F4E. L'essentiel des activités en 2016 se sont portées sur la caractérisation et l'exploitation du premier prototype de gyrotron capable d'opérer en continu, à une fréquence de 170GHz et à une puissance de 1MW. Le prototype a produit d'excellents résultats, atteignant une performance de 0.8MW pendant 180s, la limite de temps étant due seulement à une limitation de l'alimentation électrique. En vue d'étendre la durée de test jusqu'à une heure, des modifications essentielles du stand de test au SPC ont été effectuées en 2016.

Le développement du lanceur d'onde pour ITER s'est poursuivi en 2016. Il fait partie du système de confinement premier d'ITER (First Confinement System, FCS), et donc est soumis aux exigences les plus strictes en matière de qualité, de sécurité et de qualité du vide.

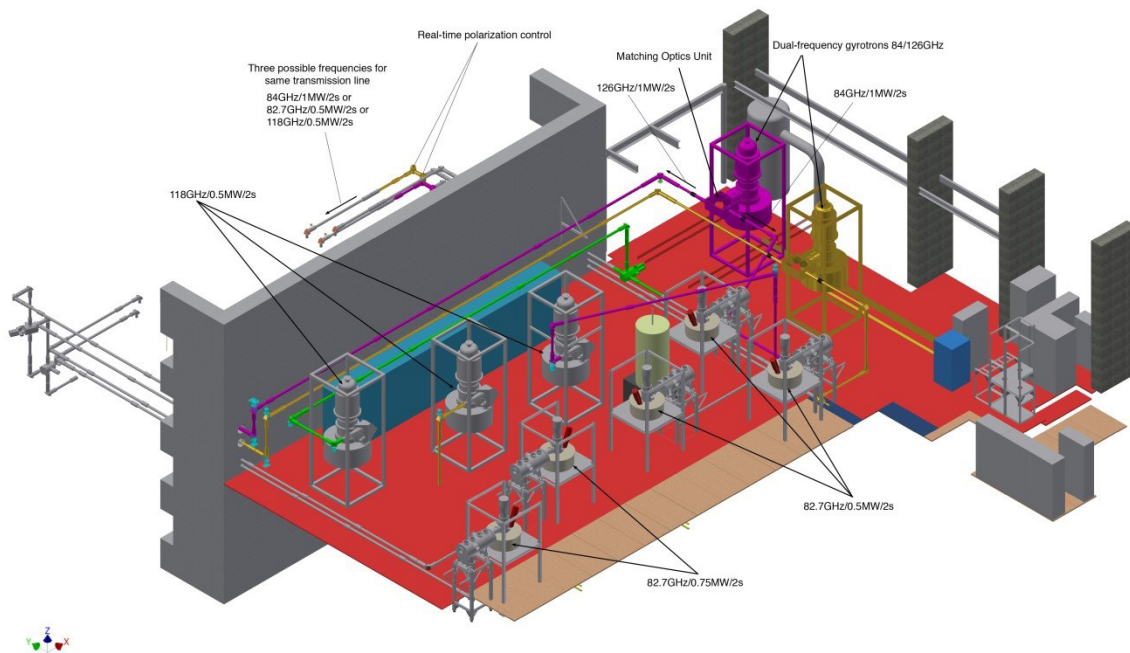


Fig. 7 Système de chauffage hyperfréquence de TCV, dans sa configuration incluant les deux futurs gyrotrons (en jaune et en violet) à fréquence duale (84 ou 126GHz).

Les activités en 2016 ont porté sur l'amélioration de tous les composants FCS, en accord avec les requêtes de changement du projet et sur un contrat de fourniture de prototype de valves d'isolation. En plus, le stand de test pour les gyrotrons sera équipé d'un gyrotron fourni par F4E, qui servira de source de puissance pour le test des composantes du lanceur d'ITER : un contrat-cadre de 7 ans a été placé avec succès à cet effet.

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, une étude théorique des instabilités dans les guides de faisceaux des gyrotrons équipés de diélectrique a été initiée, après avoir mené à bien la parallélisation du code de calcul utilisé. Cette amélioration permet de simuler un grand nombre de modes transverses en un temps de calcul raisonnable. D'autre part, des mesures de permittivité de divers matériaux appropriés pour les guides de faisceaux ont été conduites.

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. Notons que le groupe entretient des liens très étroits avec les groupes expérimentaux de TCV et de TORPEX.

Les codes de calcul utilisés par les scientifiques du SPC ont pour la plupart été développés au SPC, parfois en collaboration avec d'autres instituts de renommée internationale. Ils 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, MARCONI de CINECA, en Italie, ainsi que PIZ DAINI (CSCS), à Lugano, qui est la machine la plus puissante en Europe et la huitième plus puissante

au monde. Des dizaines de millions d'heures de calcul ont été allouées à des projets dirigés ou codirigés par des membres du SPC.

L'expertise computationnelle du groupe de théorie du SPC est régulièrement sollicitée par les autres lignes de recherche du SPC, et également aux niveaux suisse, européen et international. Par exemple, le SPC participe activement au High Level Support Team (HLST) d'Eurofusion. Au niveau Suisse, le groupe est actif dans un projet de co-design, en collaboration avec le CSCS, dans le cadre de l'initiative Platform for Advanced Scientific Computing (PASC), dont le but premier est de développer des nouveaux algorithmes et codes numériques permettant d'utiliser les architectures nouvelles et émergentes de calcul à haute performance (HPC), en particulier celles comportant un grand nombre de cœurs (Many Integrated Core, MIC) ou d'accélérateurs (Graphical Processor Unit, GPU). Dans ce cadre, le développement de nouveaux codes, ainsi que l'adaptation de codes existants, pour la simulation de la turbulence avec la méthode Particle-In-Cell (PIC) s'est poursuivi vigoureu-

ment. Des études de scalabilité parallèle et de performance ont été conduites, en particulier sur la nouvelle version du Piz Daint du CSCS, installé à la fin 2016. Enfin, dans le cadre d'une collaboration avec le Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), un code de calcul cinétique a été développé, implémentant un modèle de collision entre particules amélioré : le nouveau code permet de satisfaire les propriétés de symétrie et de conservation jusqu'à la précision machine.

Le SPC est impliqué dans le développement de méthodologies rigoureuses de vérification et de validation des codes de calcul numérique. En 2016, l'effort s'est porté en particulier sur les codes PIC, permettant de vérifier l'implémentation correcte des équations du modèle et de quantifier l'incertitude numérique affectant les résultats de la simulation. Le SPC a également dirigé un effort de validation au niveau européen, ciblé sur la simulation de la dynamique des « blobs » observés dans l'expérience TORPEX (les blobs sont des structures intermittentes de la turbulence qui se propagent à travers les régions périphériques du plasma.)

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 magnéto-hydrodynamiques (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 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, des collisions et des fluctuations électromagnétiques, ont été entreprises lors d'une expérience TCV impliquant une variation continue de la triangularité, tout en gardant une puissance de chauffage constante. Les simulations reproduisent clairement le confinement amélioré pour la triangularité négative et, pour la première fois, des valeurs du flux de chaleur comparables à celles mesurées expérimentalement.

Des simulations de la turbulence dans TCV, faites à haute résolution, ont permis de mettre en évidence un phé-

nomène remarquable pour le transport de chaleur par les électrons : une structure du transport turbulent apparaît en relation étroite avec la structure du champ magnétique du tokamak. Celle-ci, rappelons-le, est constituée de surfaces magnétiques imbriquées. Pour certaines d'entre elles, les lignes de champ se referment exactement sur elles-mêmes : on les appelle « surfaces rationnelles ». Le résultat remarquable est une correspondance entre le transport turbulent et cette structure de surfaces rationnelles (Fig. 8), qui apparaissent ainsi comme des « bons conducteurs » de chaleur et de matière.

En relation avec le stellarator Wendelstein 7-X de l'institut Max-Planck à Greifswald (Allemagne), les travaux du SPC sur le chauffage ionique cyclotronique (ICRH) et le chauffage par injection de neutres (NBI) ont porté sur la modélisation de diverses configurations et scénarios expérimentaux possibles. En particulier, un nouveau schéma ICRH utilisant trois espèces ioniques a été simulé. Les résultats montrent qu'il pouvait être utilisé pour générer des ions rapides ayant plusieurs fois l'énergie thermique moyenne. Notons que la physique du confinement des ions rapides est l'un des objectifs fondamentaux de l'expérience W7-X.

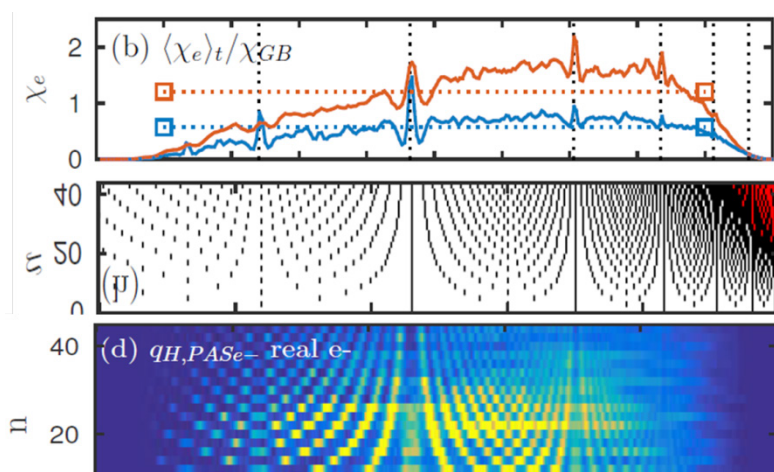


Fig. 8 Transport turbulent de chaleur par les électrons, simulé avec le code gyrocinétique global ORB5. En haut : coefficient de diffusion de chaleur. Au milieu : positions des surfaces rationnelles. En bas : flux de chaleur électronique pour différents nombres d'ondes. La correspondance entre flux de chaleur et surfaces rationnelles est remarquable.

En préparation de l'opération future de JET avec le mélange deutérium-tritium (DT), une campagne a été menée par le SPC pour obtenir des records de production de neutrons. L'expérience a montré qu'un des problèmes critiques pour JET, et qui le sera très probablement pour ITER, est l'accumulation d'impuretés de tungstène dans le cœur du plasma. Nos simulations montrent que le problème est exacerbé par la présence de modes internes brisant la symétrie du plasma. La Figure 9 montre la simulation des impuretés de tungstène dans un plasma axisymétrique (à

gauche), et dans un plasma déformé par la présence d'une perturbation interne (à droite).

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 et des phénomènes intermittents (« blobs »). Le code de simulation GBS a été amélioré dans

son implémentation numérique, ce qui permet maintenant d'effectuer des simulations tridimensionnelles globales, avec forçage de flux, de la région du bord et du SOL de tokamaks de taille moyenne telle que TCV. En particulier, nous avons pu montrer un effet de la forme du plasma : la triangularité négative et l'élongation réduisent l'échelle spatiale de pression dans le SOL. Cette échelle spatiale est un des paramètres cruciaux : une échelle spatiale réduite signifie que la puissance de sortie est très concentrée, ce qui rend d'autant plus difficile son

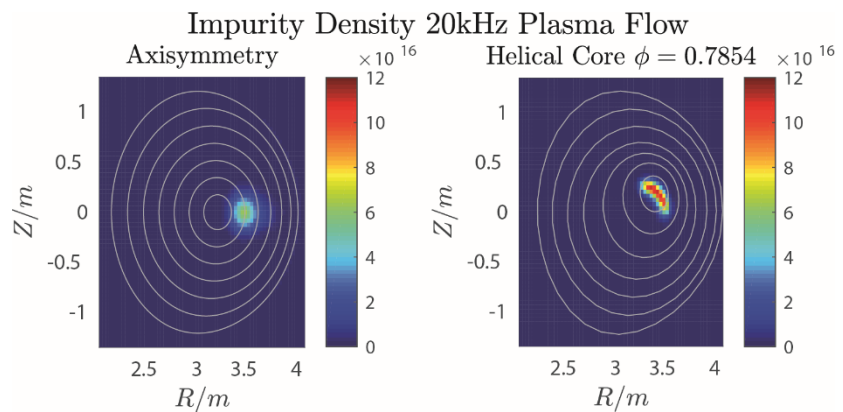


Fig. 9 Simulations de la densité d'impuretés de tungstène dans JET, dans un plasma axisymétrique (à gauche) et en présence d'une perturbation interne (à droite).

extraction sans endommager les structures idoines du réacteur.

Un nouveau modèle auto-cohérent couplant le plasma et la physique des atomes neutres a été utilisé pour la simulation de la turbulence dans les régions périphériques du plasma. En particulier, la présence de fluctuations de la densité des atomes neutres affecte l'émission de lumière dite « D-alpha ». Nos résultats montrent que les fluctuations de densité du gaz neutre sont anti-corrélées avec les fluctuations de densité et de température électronique du plasma, et que ceci résulte en une diminution de l'émission de lumière D-alpha.

Enfin, le groupe de théorie du SPC apporte un soutien direct appréciable aux expériences. Mentionnons en particulier les activités liées au contrôle en temps réel. Par exemple, des contrôleurs des profils de pression et de courant, initialement développés par quatre autres groupes (CEA-Cadarache, GYPSA-Grenoble, ITER-IO et TU-Eindhoven) ont été testés, initialement avec le code RAPTOR, développé au SPC comme simulateur remplaçant le tokamak réel. Puis, ces contrôleurs

ont été implémentés dans le TCV et testés dans des expériences. Celles-ci se sont avérées couronnées de succès. Ce processus constitue la première démonstration mondiale de développement et de test des contrôleurs intégrés qui seront utilisés dans ITER.

D'autres activités ont porté sur l'optimisation de la phase de terminaison des tirs sur les tokamaks TCV et Asdex-Upgrade, dont certains ont été intégrés à la base de données ITER. Les outils de simulation développés au SPC sont importants, car ils réduisent le nombre d'expériences de test nécessaires.

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. Ces mesures peuvent ensuite être confrontées aux calculs théoriques et aux résultats de simulations numériques. En 2016,

les activités se sont focalisées sur l'interaction entre les phénomènes intermittents de la turbulence, associés à des « blobs » se propageant radialement, avec des faisceaux d'ondes hyper-fréquences et avec des ions rapides. En parallèle, de nouveaux diagnostics ont été développés afin de caractériser la structure tridimensionnelle des blobs.

Dans ITER, des ondes hyperfréquences seront utilisées notamment pour stabiliser certains modes. La présence de blobs dans la périphérie du plasma pourrait causer une dispersion du faisceau d'ondes et empêcher sa focalisation. Dans le but d'étudier la physique de ce processus, un système a été développé et installé sur TORPEX. Les premiers résultats montrent l'effet des blobs ayant taille comparable à la longueur d'onde du faisceau.

La turbulence a également un effet sur le transport des ions rapides. Dans TORPEX, de multiples améliorations de l'équipement expérimental ont été apportées en 2016, permettant une résolution temporelle accrue et l'identification en particulier de l'effet des blobs.

La dynamique des blobs a jusqu'ici souvent négligé leur aspect tridimensionnel, et par là leur comportement le long des lignes de champ magnétique. Afin de pouvoir caractériser ces aspects expérimentalement, un nouveau réseau de sondes de Langmuir a été conçu, construit et assemblé sur TORPEX, voir Figure 10. Les premiers résultats de mesures expérimentales ont été obtenus en 2016 et ont montré la validité du nouveau concept, avec la possibilité de reconstruire les structures tridimensionnelles des blobs et leur évolution temporelle.

Supraconductivité

Le groupe Supraconductivité, situé au PSI, a poursuivi ses activités de test et de qualification de tous les supraconducteurs pour ITER sur l'installation SULTAN, conformément au contrat signé en 2012 avec ITER Organisation. Ces tests concernent les câbles pour les bobines de champ toroïdal et poloïdal, pour le solénoïde central et les bobines de correction. 19 campagnes de test ont été effectuées en 2016. Les échantillons testés étaient en provenance de divers partenaires d'ITER : l'Union eu-

ropéenne, la Chine, le Russie, le Japon et les USA.

Une autre partie des activités du groupe s'est portée sur le développement et les tests de supraconducteurs à basse et haute température pour DEMO. Une amélioration du design du conducteur Niobium-Etain (Nb₃Sn) a permis, grâce à un meilleur support contre les forces électromagnétiques, d'élever la température critique d'un degré K. Le problème de la dégradation des performances du prototype de supraconducteur à haute température (HTS) a été examiné en 2016 dans des

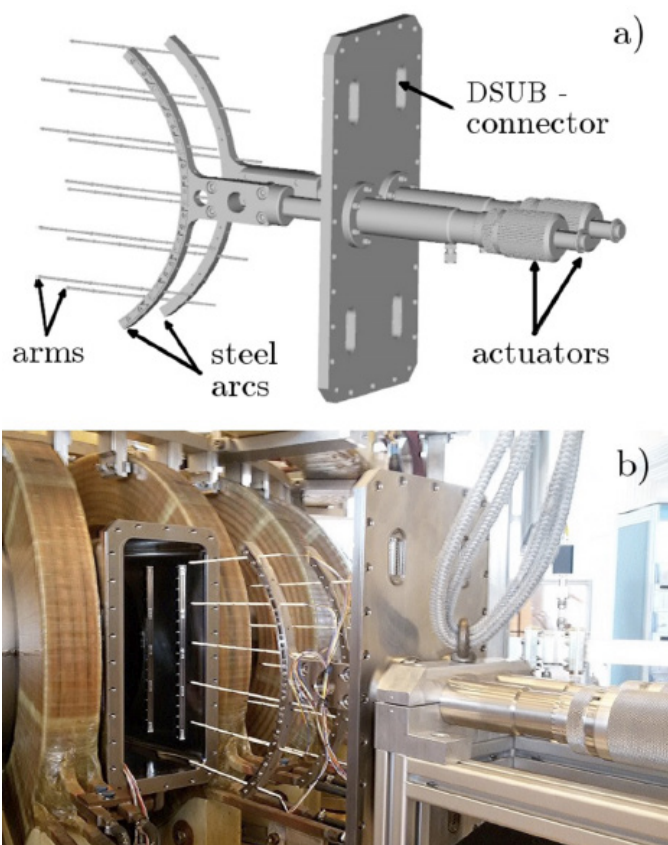


Fig. 10 Nouveau système de sondes de Langmuir permettant des mesures de la structure 3D des perturbations de densités appelées « blobs », ainsi que leur évolution temporelle : (a) design ; (b) installation sur TORPEX.

tests jusqu'à 5000 cycles de contrainte mécanique. Il en a résulté le design de deux nouvelles configurations de HTS qui seront assemblées en 2017.

Le développement de méthodes d'exams non-destructifs pour les joints des bobines magnétiques pour ITER s'est terminé en 2016, avec un rapport complet livré à l'organisation ITER.

Les tests des supraconducteurs prototypes pour les bobines du champ torique de DEMO ont été conduits dans

l'installation EDIPO. Malheureusement, un incident technique (quench) s'est produit à haut champ qui a détruit les bobines magnétiques. Des plans sont à l'étude, au niveau international, pour restaurer l'installation.

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 égale-

ment conduit le projet EUROfusion de « Divertor Tokamak Test » (DTT), qui a pour but d'évaluer des concepts alternatifs de divergeur et leur compatibilité avec DEMO. Il a aussi participé au projet EUROfusion de « Plant level System Engineering, Design Integration and Physics Integration » (WPPMI) sur les pertes de particules alpha dans DEMO.

Joint European Torus (JET)

Le SPC a mené des expériences sur JET pour créer des plasmas à hautes performances, dans le but de préparer

des scénarios qui seront utilisés dans la future campagne deutérium-tritium, prévue dans deux ans. Ces scénarios dits « hybrides » ont la particularité d'éviter les instabilités au cœur du plasma, résultant en des oscillations en « dent-de-scie », tout en ayant des gradients de pression élevés, permettant de soutenir une bonne fraction du courant de plasma par l'effet dit de « bootstrap ». Un des défis posés par ces plasmas à haute performance est d'éviter un autre type d'instabilités, appelé « NTM » (Neoclassical Tearing Mode) qui, lorsqu'elles apparaissent, conduisent à un déchirement des surfaces magnétiques dans le plasma et ainsi à une dégradation des propriétés de confinement. En plus, il faut éviter l'accumulation des impuretés dans le centre du plasma : cela a impliqué de contrôler un autre type d'instabilités, appelées « Edge Localized Modes » (ELM). Tous ces problèmes ont été examinés et optimisés. Des techniques pour minimiser l'échauffement du divergeur en balayant les positions d'impact ont également été développées.

En dépit de ces exigences qui doivent toutes être simultanément satisfaites, une fenêtre d'opération a été trouvée, et les expériences sur JET ont été couronnées de succès. Avec une puissance de chauffage de 33MW pendant plus de 5s, des records de production de neutrons ont été obtenus pour une machine dont la première paroi est entièrement métallique, comme cela sera le cas sur ITER. Les ELMS ont pu être contrôlés avec succès, les instabilités en dent-de scie évitées, et une haute pression du plasma maintenue pendant une période allant jusqu'à 5s. A partir de ces résultats, il est possible d'extrapoler la future performance dans le deutérium-tritium : une puissance de fusion de 8MW devrait pouvoir être obtenue.

En plus de la coordination des expériences susmentionnées, le SPC a

déployé le package de codes numériques SCENIC pour la modélisation du chauffage radiofréquence cyclotronique ionique (ICRH) en support de plusieurs expériences sur JET.

DEMO

Le SPC a conduit les travaux d'un Work Package d'EUROfusion consacré à l'étude de concepts alternatifs pour l'extraction de la puissance dans un réacteur de fusion et leur compatibilité avec DEMO. En 2016, un rapport sur diverses géométries du divergeur a été livré, ainsi que sur un concept de divergeur en métal liquide. Il a été montré que les contraintes électromécaniques pouvaient être satisfaites avec ces concepts alternatifs. Des plages de fonctionnement de température compatibles à la fois avec une faible rétention du tritium et des flux d'évaporation acceptables ont été identifiés. Le rapport a toutefois mis en lumière le fait que des prédictions quantitatives plus précises seront nécessaires. Le travail effectué a fourni une base pour le développement d'une stratégie européenne dans le domaine.

Dans le cadre d'un Work Package d'EUROfusion, le SPC a contribué aux études portant sur les pertes des ions rapides dans le projet de réacteur DEMO, causées par les imperfections du champ magnétique confinant le plasma. Rappelons que ces ions rapides sont des particules alpha, autrement dit des noyaux d'hélium, créés par le processus de fusion lui-même. Un des codes développés au SPC, VENUS-LEVIS, a été utilisé et ses résultats comparés avec ceux d'un autre code, ASCOT. Les résultats sont qualitativement en bon accord, mais avec une puissance perdue prédite plus élevée dans le cas de VENUS-LEVIS (environ 1.6MW) que pour ASCOT (1.3MW).

En regard de la stratégie générale de ce domaine, cette première phase de l'étude des pertes de particules alpha dues aux imperfections du champ peut

être considérée comme terminée. Dans la période suivante, des analyses de transport plus fines seront effectuées, permettant une meilleure estimation des profils de densité et de température du plasma. Cela servira de base à la création d'un ensemble de scénarios de référence pour les calculs des interactions entre ondes et particules alpha, qui représentent un autre aspect important de la problématique des ions rapides dans un réacteur de fusion.

Université de Bâle : Etudes concernant l'interaction plasma – paroi ⁶

Dans le cadre de l'étude des interactions plasma - paroi dans ITER, un point a été spécialement étudié à l'Université de Bâle, à savoir le comportement des miroirs utilisés pour réfléchir la lumière du plasma vers les diagnostics d'ITER. Des miroirs composés de différents matériaux comme du rhodium ou du molybdène ont été testés lors de nettoyages plasma. Un film de 25 nanomètres d'aluminium et de tungstène a d'abord été déposé sur la moitié du miroir, ce film simulant le béryllium et le tungstène provenant de la première paroi d'ITER. Ensuite, ces miroirs ont été bombardés par des ions argon pour enlever le dépôt et la réflectivité a ensuite été mesurée et comparée à la valeur initiale. Ce processus a été répété plus de 20 fois pour surveiller l'évolution de la réflectivité au fur et à mesure des cycles de dépôts et de nettoyage. Les résultats sont très satisfaisants pour le rhodium et le molybdène sous forme de mono ou de nano cristaux alors que dans le cas de polycristaux, une augmentation de la rugosité entraîne une baisse de la réflectivité.

⁶ L. Marot, E. Meyer, Universität Basel : Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/JB): <http://nanolino.unibas.ch/pages/research/Fusion.htm>

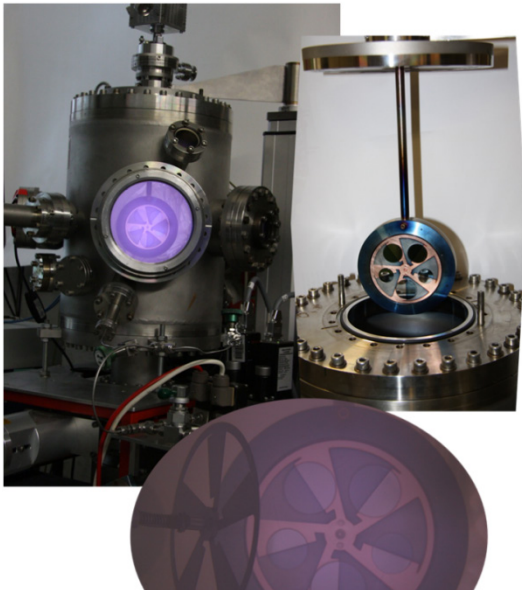


Fig. 11 Chambre à vide permettant de déposer 25 nanomètres d'aluminium et tungstène sur des miroirs rhodium et molybdène. Ces miroirs sont ensuite nettoyés par un plasma d'argon.

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/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:

<https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20150612/index.html>

[4] Rapports annuels du SPC :

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