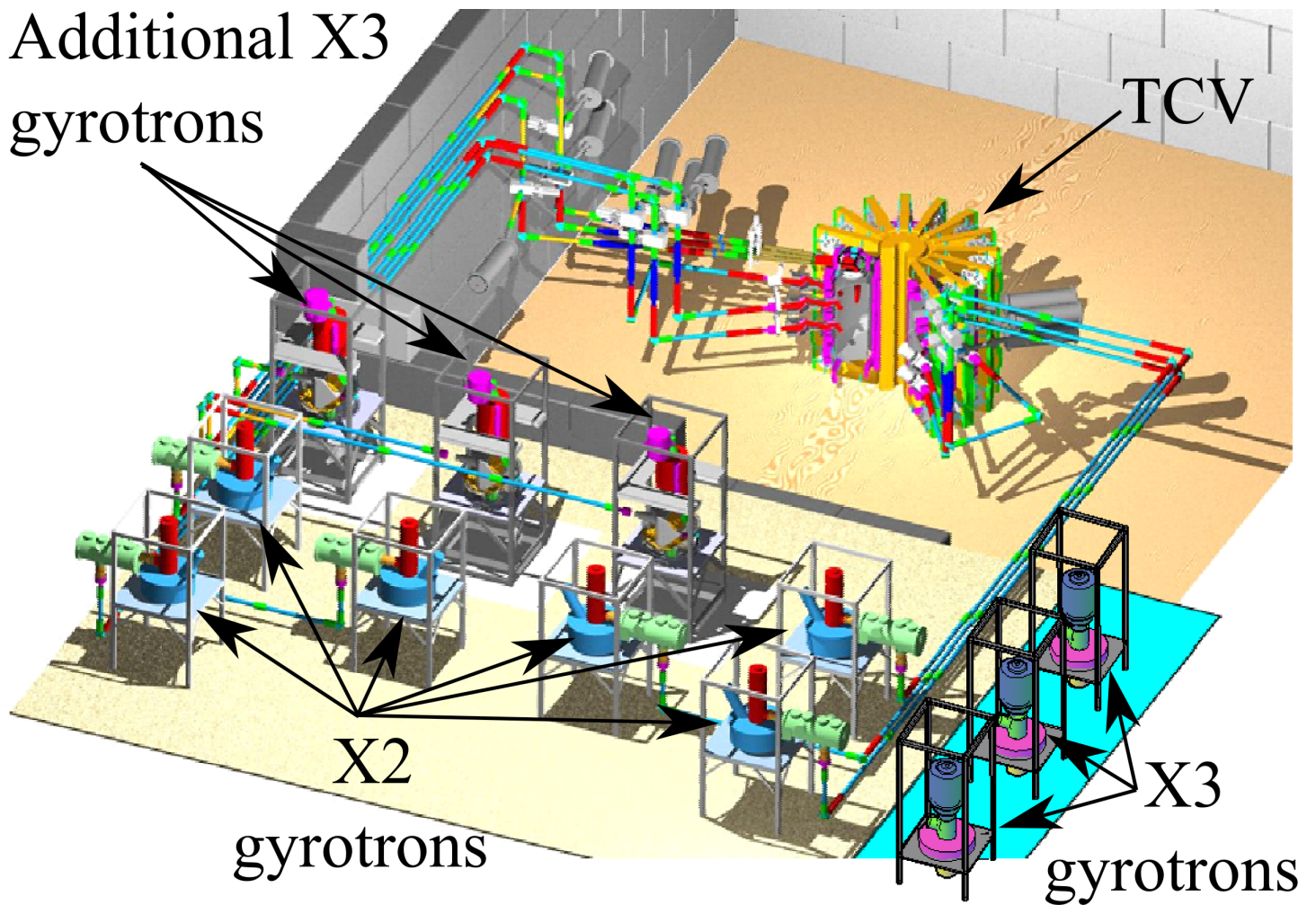


Rapport de synthèse 2014

# 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:**

Configuration du futur système amélioré de chauffage radiofréquence EC sur TCV (CRPP - EPFL)

**Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire**

Rapport de synthèse 2014

**Mandant:**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

**Auteurs:**

Dr. Laurent Villard (CRPP - EPFL), Dr. Laurent Marot (Université de Bâle), Dr. Davide Fiocco (SEFRI)

**Chef de programme:**

Xavier Reymond, SEFRI (xavier.reymond@sbfi.admin.ch)

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

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

[www.bfe.admin.ch/forschungkernenergie](http://www.bfe.admin.ch/forschungkernenergie)

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

## Introduction

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

Les avantages et défis de la fusion sont remarquables. Cette technologie devrait permettre de produire une énorme quantité d'énergie presque sans émission de CO<sub>2</sub>. Le combustible est disponible en grande quantité et bien réparti sur terre. Un réacteur de fusion est intrinsèquement sûr et sa puissance peut être transformée en chaleur, électricité ou utilisée pour la production d'hydrogène. Une centaine d'années après son déclassé, le matériel activé par la réaction devrait pouvoir être entièrement recyclé, et

déclaré non-radioactif. Tous ces avantages doivent être mis en regard d'une difficulté majeure: la fusion nucléaire nécessite des conditions extrêmes pour sa mise en service. Le défi est autant scientifique que technologique. Le Programme européen de recherches en fusion s'est concentré dès son début 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 et l'exploitation couronnée de succès du tokamak JET au Royaume-Uni. Cette machine, à ce jour encore le tokamak en exploitation le plus puissant, a permis de tester le fonctionnement de la réaction et d'obtenir un rendement énergétique (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.

D'immenses progrès ont été effectués depuis, qui ont permis 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 constater la rentabilité énergétique de la fusion, en obtenant un Q supérieur à 1. De fait ITER est conçu pour atteindre un Q de 10. Tous les partenaires d'ITER ont pris l'initiative de préparer l'étape suivante, un réacteur de démonstration capable de produire une quantité appréciable d'électricité et branché au réseau. Ce projet appelé DEMO est prévu pour les années 2040-2050 et devrait permettre la réalisation industrielle de l'énergie de fusion.

Les recherches menées au CRPP, basé à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), ainsi qu'à l'Université de Bâle [4] s'inscrivent pleinement dans un cadre à la fois européen et international.

Classification de l'AIE: 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse: 3.2 Fusion

## Développements en 2014 au niveau européen

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

Au niveau européen, 2014 était la première année du 8<sup>ème</sup> Programme Cadre de Recherche et de Développement (PCRD), appelé Horizon 2020, auquel le Programme européen de recherches en fusion est rattaché. Horizon 2020 durera de 2014 à 2020. Par rapport au 7<sup>ème</sup> PCRD, conclu en 2013, la partie Fusion de Horizon 2020 présente des nouveautés. Son plan de travail est exclusivement basé sur le document «EFDA Roadmap to the realisation of fusion energy» [2]. Le but de cette «Roadmap» traduit celui formulé par EURATOM, à savoir la réalisation d'un réacteur de démonstration DEMO vers les années 2050, capable de montrer la faisabilité de la fusion nucléaire pour un temps prolongé, et l'injection d'énergie électrique dans le réseau. Pour cela, la Roadmap inclut dans son plan de travail des études de physique, des activités de R&D pour la technologie nécessaire à DEMO, ainsi qu'un important volet consacré à la formation de nouvelles générations de scientifiques et d'ingénieurs. La Roadmap prépare aussi les chercheurs en fusion européens à une utilisation fructueuse d'ITER.

En décembre 2014 l'accord entre la Suisse et EURATOM signé en 1978 (et qui avait une durée indéterminée) a été remplacé par un accord entre la Suisse et l'Union européenne et EURATOM conclu dans le cadre des négociations pour l'association partielle de la Suisse à Horizon 2020.

Selon cet accord, la Suisse participera au programme EURATOM et au projet ITER au moins jusqu'au 31 décembre 2016. Une continuation de la participation de la Suisse est selon cet accord liée au développement des relations politiques entre la Suisse et l'Union européenne dans le domaine de la libre circulation des personnes au-delà de 2016. Cette limitation découle du vote populaire du 9 février 2014 par lequel la Suisse s'est décidée à renforcer le contrôle de l'immigration sur son territoire, y compris de l'immigration en provenance des pays de l'Union européenne.

Les Unités de Recherche des pays membres d'EURATOM et de la Suisse participent à l'exécution scientifique de la «Roadmap» dans le cadre du consortium EUROfusion. L'année 2014 a vu le démarrage des activités d'EUROfusion. L'EPFL a signé en juillet 2014 un Consortium Agreement (CA) pour en devenir membre tandis que l'Université de Bâle y est affiliée comme «Linked Third Party». Au total, 29 instituts de recherche en Europe sont membres d'EUROfusion, et plus de 40 prennent part à ses activités. Le coût des activités d'EUROfusion durant les années 2014 à 2018 est estimé à 850 M€. Le coût de ces activités sont pour moitié supportés par les participants. EURATOM de son côté met durant cette période le tokamak JET à disposition du consortium, et finance le solde du coût des activités.

Un contrat de cofinancement de 424.8 M€ a été signé entre EURATOM et EUROfusion le 8 octobre 2014, finalisant ainsi le processus de transformation du Programme européen de recherches en fusion.

### Participation européenne à la construction d'ITER

Participer à la construction d'ITER constitue l'autre axe fort des activités européennes dans le domaine de la fusion. L'Europe est en effet responsable de la plus grande part des coûts de construction d'ITER (6 parts sur 11) et est chargée de la construction d'éléments stratégiques, notamment du bâtiment abritant la machine. La participation européenne est sous la responsabilité de l'entreprise européenne commune Fusion for Energy (F4E), basée à Barcelone. Le retard important pris par ce projet et les surcoûts qui en découleront restent des préoccupations majeures de tous les partenaires concernés. Fin 2014, des changements importants ont eu lieu à la tête de F4E. Sa direction est à présent assurée ad interim par Pietro Barabaschi jusqu'à fin 2015.

## Développements en 2014 au niveau extra-européen

Tout comme EURATOM, plusieurs autres partenaires d'ITER visent également la réalisation de DEMO vers 2050. La Chine et l'Inde envisagent même chacune la construction de machines intermédiaires entre ITER et DEMO. Ceci montre qu'un consensus international existe sur l'industrialisation de la fusion dans la deuxième moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle.

Le chantier d'ITER à Cadarache est en plein développement, et les premières pièces de grande taille du tokamak y ont été livrées fin 2014. Toutefois, l'année 2014 a été critique pour le projet ITER.

Au début 2014, le résumé d'un rapport relevant des problèmes graves au niveau de la gestion et proposant des mesures pour assainir le projet ITER a été rendu public du fait d'une fuite dans la presse. Un changement de personnel aussi rapide que possible à la tête d'ITER était notamment préconisé. Les Etats-Unis ont conditionné la poursuite de leur participation à ITER à une mise en œuvre intégrale des recommandations contenues dans ce rapport.

Dans ce climat, ITER a choisi son nouveau Directeur-Général entré en fonction en février 2015 : il s'agit de Bernard Bigot, jusque-là administrateur général en France du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Bernard Bigot s'est engagé à mettre en œuvre les recommandations du rapport et à présenter dans cette optique une révision substantielle de la planification du projet ITER dans son ensemble et de son budget pour la fin de l'année 2015.

## Highlights Recherche et Développement

### CRPP

En 2014, le CRPP 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 CRPP participe aux expériences sur le Joint European Torus (JET), qui reste à ce jour la plus grande expérience de fusion magnétique au monde en opération. Toutes ces activités de recherche ont abouti en 2014 à une centaine d'articles dans des revues scientifiques à comité de lecture et à une centaine de communications lors de congrès internationaux, dont plusieurs en tant que papiers invités.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a une trentaine de doctorants dont plusieurs ont obtenu en 2014 leur titre de doctorat. Enfin, en 2014, le CRPP a maintenu ses tâches d'enseignement de base et ses nombreuses activités de relations publiques visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion contrôlée à des non-spécialistes.

### Travaux sur le tokamak TCV

La machine TCV (**Tokamak à configuration variable**) représente l'effort principal des équipes de recherche du CRPP. 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 le plasma et à générer du courant est caractérisé par une grande souplesse et permet d'orienter la puissance injectée selon des profils

spécifiques. 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.

Du fait de ces caractéristiques remarquables, le tokamak TCV est une des trois machines nationales en Europe qui ont été retenues comme des contributions essentielles à la «EFDA Roadmap to the realisation of fusion energy». Afin d'honorer ce rôle significatif attribué à TCV dans la communauté internationale de recherche en fusion, une modernisation du tokamak TCV a été lancée. Cette opération concerne en particulier l'augmentation des capacités de chauffage du plasma, par l'installation d'un nouveau système de chauffage par injecteurs de faisceaux de neutres. Ainsi, la machine TCV a été arrêtée pendant toute l'année 2014 pour mener à bien ces travaux. La modification majeure a été celle de la chambre à vide, nécessaire pour donner l'accès aux faisceaux de neutres susmentionnés. En parallèle, le CRPP a procédé à d'importantes tâches de maintenance et plusieurs remplacements de composants parmi les plus âgés de l'infrastructure.

Les efforts scientifiques durant 2014 ont été consacrés à l'analyse des données expérimentales passées et aux efforts de modélisation associés. Une partie de ce travail a été réalisé, pour la première fois, sous les auspices de la Task Force «Medium Size Tokamaks» du consortium EUROfusion nouvellement créé. Dans ce cadre, il est prévu que, dès 2015, la participation aux campagnes expérimentales sur TCV soit ouverte aux membres d'EURATOM et à ses partenaires.

Un des sujets «chauds» de la recherche en fusion est le problème de l'évacuation du flux de chaleur. La géométrie magnétique associée, appelée «divergeur», a été étudiée en détail. Dans ce cadre, le CRPP a poursuivi les analyses et la modélisation de configurations avancées de divergeurs, en particulier une configuration appelée «X», et une autre, pour laquelle TCV a joué un rôle pionnier, appelée «snowflake». Pour le divergeur X, le CRPP a mis en évidence une réduction notable du

flux de chaleur sur la cible extérieure. Avec le snowflake, des expériences d'injection contrôlée d'impuretés de Néon ont montré des pertes par rayonnement accrues (ce qui est bon pour les cibles du divergeur, tout ce qui est rayonné réduisant d'autant l'impact sur les cibles).

Toujours sur le même sujet, l'analyse de diverses variantes de la configuration snowflake a indiqué clairement la possibilité d'une réduction supplémentaire de la chaleur éjectée. Grâce à des simulations numériques, le CRPP a découvert le rôle significatif des écoulements cisailés qui apparaissent spontanément dans la région du bord du plasma : en effet, ceux-ci provoquent une distorsion des perturbations en forme de filament, réduisant par là même le transport turbulent de chaleur.

Un autre sujet crucial pour la fusion est le phénomène d'oscillations répétitives appelées «ELM» (pour Edge Localized Modes) qui apparaissent dans la région périphérique du plasma et sont potentiellement dangereuses pour l'intégrité des parois du réacteur. Ces ELMs sont en effet accompagnés de bouffées de chaleur, qui peuvent atteindre des valeurs trop grandes pour être supportées sans dommage par la structure. L'analyse du CRPP a mis en évidence le rôle essentiel d'un mécanisme de physique non linéaire qui peut ainsi expliquer la valeur élevée de ces flux de chaleur pour le type d'ELM potentiellement le plus dangereux.

### Technologie de chauffage

Comme indiqué plus haut, toute l'année 2014 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 et configurations de plasma, par exemple un régime dans lequel le rapport entre les températures électroniques et ioniques du plasma sera voisin de l'unité. Dans le cadre de ce projet «TCV Upgrades», la décision d'inclure un système de chauffage des ions par injection de **faisceaux de neutres (NBI)** a nécessité une modification de la chambre à vide, afin d'aménager l'accès de ces faisceaux. Deux ports ont ainsi été modifiés *in situ* par la firme qui avait fabriqué la version originelle de la chambre. Des tuiles de graphite, de forme spécialement adaptée et à haute capacité de charge thermique, ont été montées à

l'intérieur. La Fig. 1 montre une vue éclatée du tokamak TCV et de son futur injecteur de neutres.

Le design de l'injecteur lui-même a été terminé en 2014. Rappelons que l'énergie des particules sortantes sera entre 18 et 35keV, sa puissance sera réglable jusqu'au maximum de 1MW, avec une durée d'impulsion jusqu'à 2s. Les travaux ont aussi porté sur les systèmes d'alimentation électrique à haute puissance, le refroidissement et le contrôle.

En ce qui concerne les systèmes de chauffage par ondes radiofréquence millimétriques aux fréquences cyclotroniques électroniques (EC), ou **gyrotrons**, il a été décidé d'apporter des améliorations et remplacements d'équipements devenus obsolètes. Rappelons que le système originel de chauffage EC sur le tokamak TCV était composé de 6 gyrotrons de 0.5MW chacun, opérant à la deuxième harmonique (X2, 82.6GHz), ainsi que de 3 gy-

rotrons de 0.5MW chacun, opérant à la troisième harmonique (X3, 118GHz). Deux gyrotrons X2 ont été commandés pour remplacer certaines unités défectueuses. De plus, deux gyrotrons, pouvant opérer à deux fréquences différentes (126 et 84GHz), donc pouvant commuter entre les modes X2 et X3, ont été améliorés dans leur design : en particulier, il a été montré qu'avec une modification mineure, la puissance pouvait être poussée au-delà de 1MW, au lieu des 0.75MW prévus initialement.

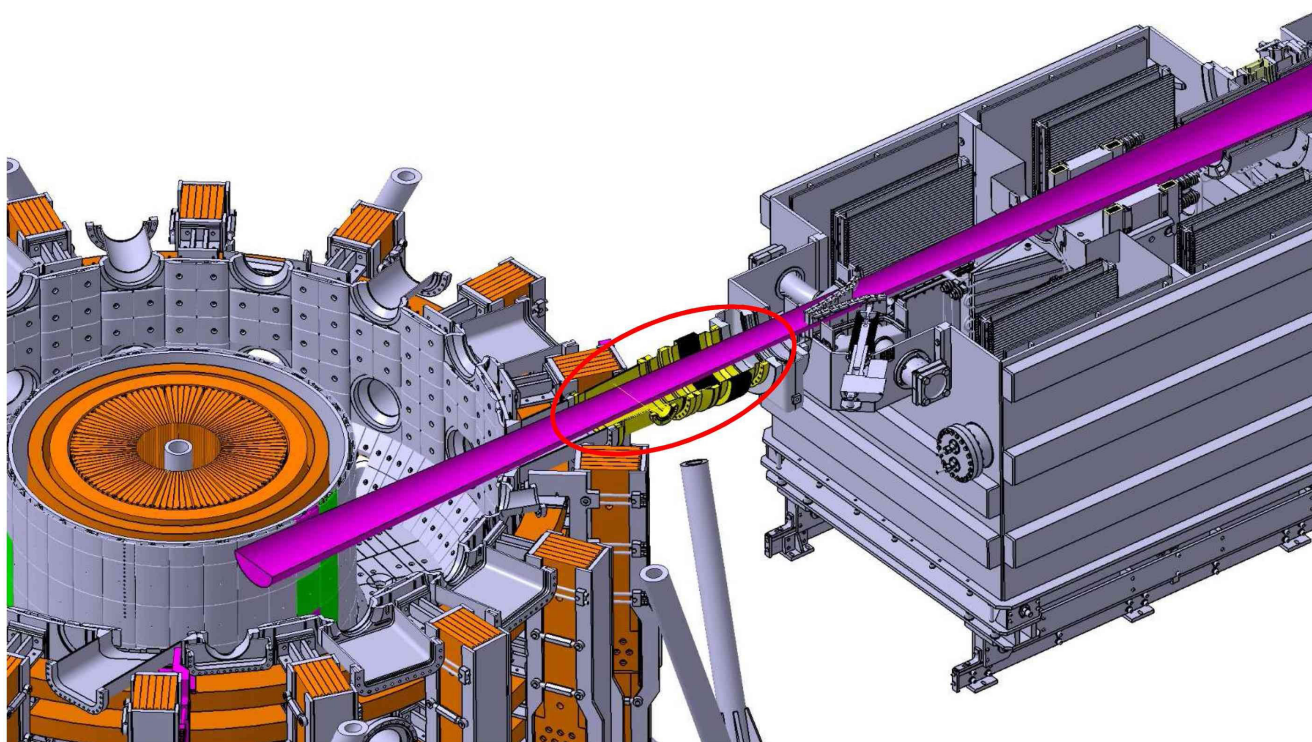
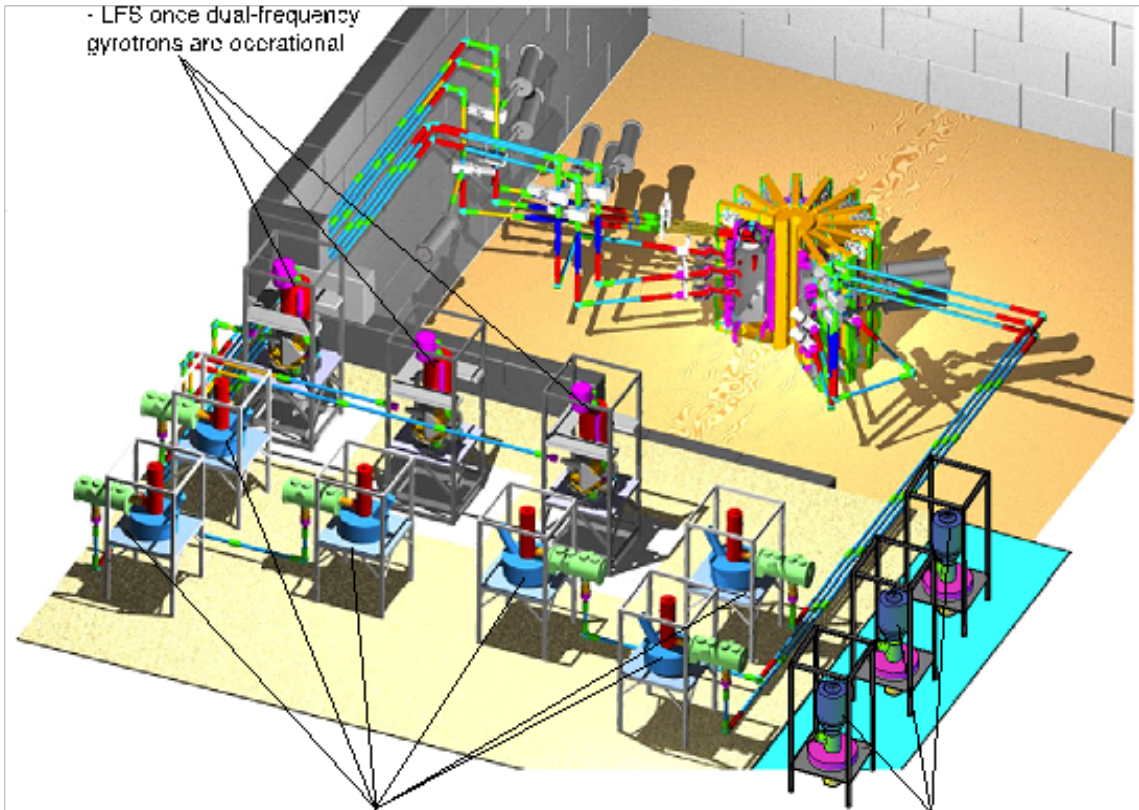


Fig.1 Une vue éclatée du tokamak TCV (à gauche) et de l'injecteur de faisceaux de neutres (à droite)

X3 gyrotrons: 118GHz/0.5MW

Injection: - Top a. present

- LFS once dual-frequency  
gyrotrons are operational



X2 gyrotrons: 82.7GHz/0.5MW  
Injection: LFS

X2-X3 upgrade:  
Dual-frequency gyrotrons: 125-84GHz/1MW  
Injection: -X3/Top for 126GHz  
-X2/LFS for 84GHz

Fig.2. Configuration du futur système amélioré de chauffage radiofréquence EC sur TCV.

En vue de l'installation de ces nouveaux systèmes, une réorganisation du plan de structure a été effectuée. La Fig. 2 montre la nouvelle configuration de la future «ferme de gyrotrons» du TCV. Le CRPP est membre du consortium européen EGYC, qui est responsable du développement des gyrotrons pour ITER, sous les auspices de F4E. La stratégie s'articule autour de la production de 2 tubes gyrotrons, le

premier de courte durée d'impulsion, destiné à valider le design, tandis que le deuxième aura pour but de satisfaire pleinement les spécifications pour ITER. A la fin de 2014, le premier tube a été fourni et testé avec succès, ce qui a permis au CRPP de valider le design.

Toujours pour ITER, le développement du lanceur d'onde s'est poursuivi en 2014, en s'adaptant aux changements qui ont eu lieu sur la machine et les

bâtiments d'ITER. Les travaux effectués au CRPP sur les coupleurs de guide d'onde méritent d'être en particulier mentionnés. Ils ont confirmé leurs propriétés d'étanchéité même lorsqu'ils ont été soumis à des forces et couples de force supérieurs au pire scénario envisageable.

### Théorie et simulation numérique

Le groupe de **Théorie et simulation numérique** se focalise sur une compréhension de la physique des plasmas de fusion basée sur les principes premiers. Ceci est essentiel pour interpréter les résultats des expériences existantes et prédire ceux des machines de fusion futures. Simuler le comportement du plasma représente un défi considérable, nécessitant à la fois des théories analytiques avancées et des codes de calcul numérique à la pointe du progrès. Ces codes, développés au CRPP et dans le cadre de collaborations nationales et internationales, sont utilisés en production sur certaines des plateformes de calcul à haute performance (HPC) parmi les plus performantes au monde: HELIOS, de l'IFERC-CSC, au Japon, la plus puissante qui soit dédiée à un seul domaine de recherche, et dont l'accès est réservé

aux participants aux Programmes de recherches en fusion européen et japonais, ainsi que PIZ DAINI (CSCS), basée au Tessin (Lugano) qui est la machine la plus puissante en Europe, et Lemanicus (Cadmos, EPFL). Des dizaines de millions d'heures de calcul ont été allouées à des projets dirigés par des membres du CRPP. L'expertise du groupe en matière de HPC a été reconnue par l'attribution, en 2014, d'un projet PASC (Platform for Advanced Scientific Computing) d'une durée de 3 ans.

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 fluides (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 a développé 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.

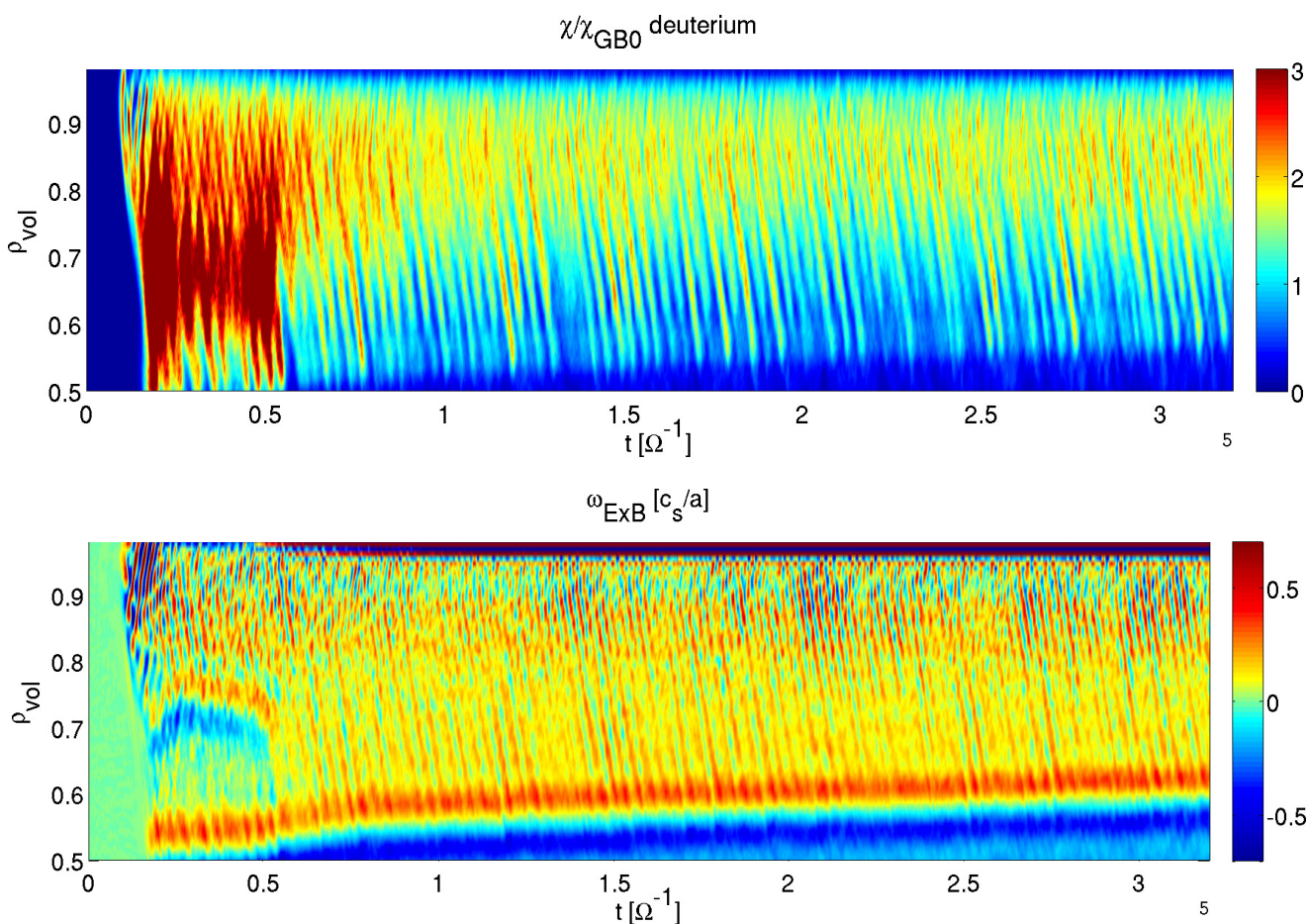


Fig.3 Transport turbulent de chaleur (haut) et taux de cisaillement des écoulements zonaux (bas) en fonction du rayon et du temps, obtenus par une simulation globale de la turbulence. Le phénomène d'avalanches répétitives, se propageant à travers une bonne partie du plasma, est clairement mis en évidence.



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 numériques intensives de la turbulence ont été effectuées pour ces deux formes de plasma. Une nouvelle interprétation des résultats a été formulée, qui fait appel à la «rigidité» des profils de température dans le cœur du plasma. Une augmentation importante de la puissance injectée ne résulte qu'en un très faible accroissement du gradient de température, alors que les régions périphériques du plasma ne semblent pas rigides. Une augmentation de la puissance conduit donc à un accroissement important du gradient de température, et ceci, de plus, d'une façon qui dépend de la forme du plasma (D ou D inversé).

De façon plus générale, la notion de «rigidité» des profils a été analysée par des simulations globales de la turbulence dans un plasma typique de TCV. Les résultats montrent que des phénomènes de transport turbulent non-locaux apparaissent : changer le gradient de température dans les régions du cœur du plasma modifie le flux de chaleur non seulement à cet endroit, mais aussi dans les régions périphériques. La réciproque est également vraie : changer le gradient de température dans les régions périphériques modifie le flux de chaleur non

seulement à cet endroit, mais aussi dans le cœur. L'explication heuristique de cet état de fait tient à la présence d'avalanches répétitives qui se propagent à travers les régions périphériques et centrales du plasma. Le cisaillement de la turbulence par des écoulements zonaux joue un rôle central dans ces phénomènes (Fig. 3).

Un autre sujet d'actualité, pertinent pour un réacteur de fusion, est la physique liée à la présence d'ions rapides. Le groupe de théorie du CRPP est actif dans ce domaine sur plusieurs fronts : étude des orbites en présence de rotation et déformation hélicoïdale du plasma, étude de la contribution de ces ions rapides à la stabilité cinétique-magnétohydrodynamique (MHD), ou encore étude du transport des ions rapides en présence de perturbation magnétique résonante. Pour cette dernière étude, deux approches contrastées ont été appliquées : d'une part, en considérant le champ résultant de la perturbation créée par des bobines externes comme s'ajoutant au champ d'équilibre MHD axisymétrique, et, d'autre part, en calculant de façon consistante l'équilibre MHD tridimensionnel incluant la réponse du plasma à la déformation des surfaces de flux.

Rappelons que la «Roadmap» de EUROfusion inclut, en plus des tokamaks dont ITER fait partie, la ligne de recherche des stellarateurs, caractérisés par un confinement ne nécessitant pas de courant net dans le plasma et

dont la figure de proue est le stellarateur W7-X, la plus grande expérience de ce type, qui va bientôt entrer en service à Greifswald, en Allemagne. Le CRPP a calculé des scénarios de chauffage radiofréquence à la fréquence cyclotronique ionique (ICRH) dans des configurations d'équilibre MHD 3D de W7-X, grâce à un code global développé au CRPP. Une fréquence optimale d'excitation pour obtenir une bonne déposition de puissance au centre du plasma a pu être trouvée, qui limite aussi l'absorption périphérique. La Fig. 4 montre un exemple de résultat obtenu.

La dynamique des plasmas au bord des machines de fusion reste un sujet d'importance primordiale, pour lequel le CRPP a continué de consacrer un effort important. Par exemple, un phénomène de rotation dite «intrinsèque» ou «spontanée» a été observé : le CRPP a clarifié le mécanisme qui conduit à ce phénomène, dans lequel la turbulence joue le premier rôle. Le CRPP a mis en évidence que les conditions aux bords agissent comme une source effective de moment cinétique. Plusieurs autres études ont été menées, concernant entre autres les effets géométriques sur la turbulence de bord. Enfin, le CRPP a mené des comparaisons systématiques avec les mesures expérimentales sur plusieurs tokamaks. Les résultats de ce programme de validation ont grandement accru la confiance dans les résultats des simulations numériques effectuées au CRPP.

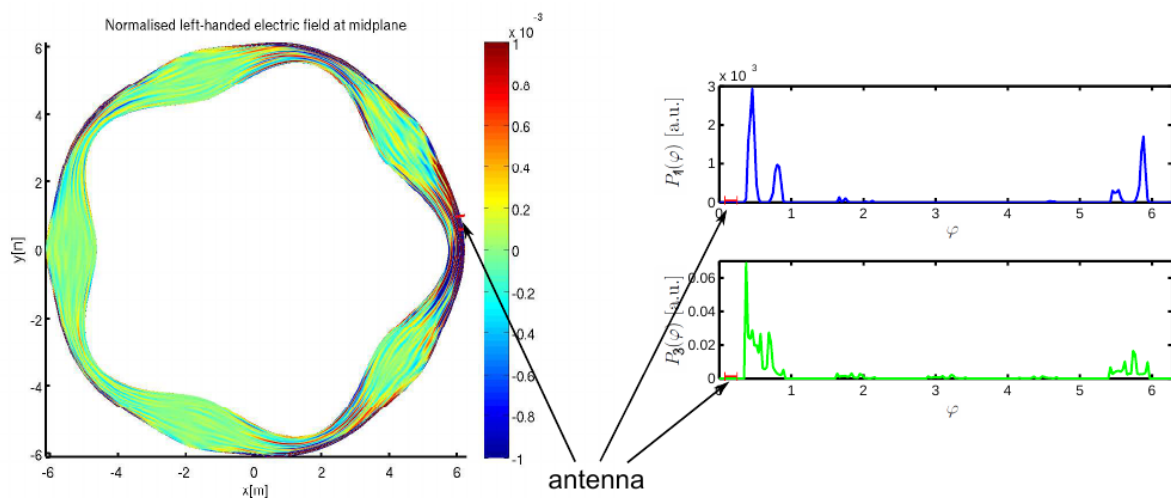


Fig. 4 Une vue en coupe du stellarateur W7X (à gauche) montrant la norme du champ électrique RF et, à droite, profils de déposition de puissance au centre (courbe bleue), respectivement au bord (courbe verte), obtenus avec le code global ICRH LEMAN. L'antenne est indiquée en rouge.

### 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.

En 2014, des progrès significatifs ont été effectués selon plusieurs axes de recherches, comme l'étude de l'interaction des ions supra-thermiques avec les « blobs » intermittents ou les premières expériences en présence d'une configuration magnétique avec un point-X dans la machine. Le détail de ces avancements est rapporté ci-dessous.

La compréhension du transport turbulent des ions supra-thermiques, c'est-à-dire des ions avec des énergies plus grandes que celle du plasma, est d'une grande importance pour une variété de systèmes naturels ou de laboratoire. Dans un réacteur comme ITER ou DEMO, un bon confinement des ions supra-thermiques, issus des réactions de fusion ou du chauffage additionnel, est nécessaire pour atteindre les

conditions du plasma nécessaires à la fusion. Sur TORPEX, le CRPP a mené des études sur l'interaction entre la turbulence et les ions produits par une source miniaturisée d'ions  $\text{Li}^{6+}$  (10eV-1keV, Fig. 5). En comparant les données avec des simulations numériques, ces études ont prouvé l'existence de plusieurs régimes de transport, de sub-diffusifs à un super-diffusifs, pour les ions supra-thermiques, selon leur énergie et le niveau de turbulence.

L'existence de plusieurs régimes de transport non-diffusif doit être naturellement reliée à différentes signatures dans les traces temporelles des ions supra-thermiques détectés, et ceci pourrait être la seule méthode pour identifier des régimes de transport différents dans les plasmas de machines de fusion, plus difficiles à diagnostiquer. Les résultats obtenus sur TORPEX indiquent une transition claire dans l'intermittence entre le cas correspondant au régime sub-diffusif et le cas super-diffusif. Ils indiquent aussi que l'intermittence observée est causée par l'interaction des ions supra-thermiques avec les « blobs ».

En plus de la configuration SMT (lignes de champ magnétique hélicoïdales),

le nouveau système de fil conducteur toroïdal interne permet de courber les lignes de champ. Une transformée rotationnelle (comme dans un tokamak) peut donc être créée, améliorant ainsi la pertinence de TORPEX par rapport aux machines de fusion par confinement magnétique. Les fluctuations du plasma en présence de lignes de champ fermées ont été complètement caractérisées et montrent clairement une signature de « ballonnement » avec la présence de modes quasi-cohérents. Ces modes sont alignés le long des lignes de champ magnétiques, en cohérence avec des instabilités de type « interchange » comme celles observées dans les tokamaks. Le système avec un fil conducteur toroïdal interne ouvre de nouvelles lignes de recherches puisqu'il permet en principe la création de géométries magnétiques avec un simple ou double point-X mais aussi la configuration du divergeur « snowflake », démontrés sur TCV. Des premiers exemples de configuration avec un seul point-X ont été produits.

Le groupe a montré la présence de fluctuations du plasma autour de la région du point-X ainsi que la génération de « blobs » intermittents qui se propagent vers la paroi externe de la machine.

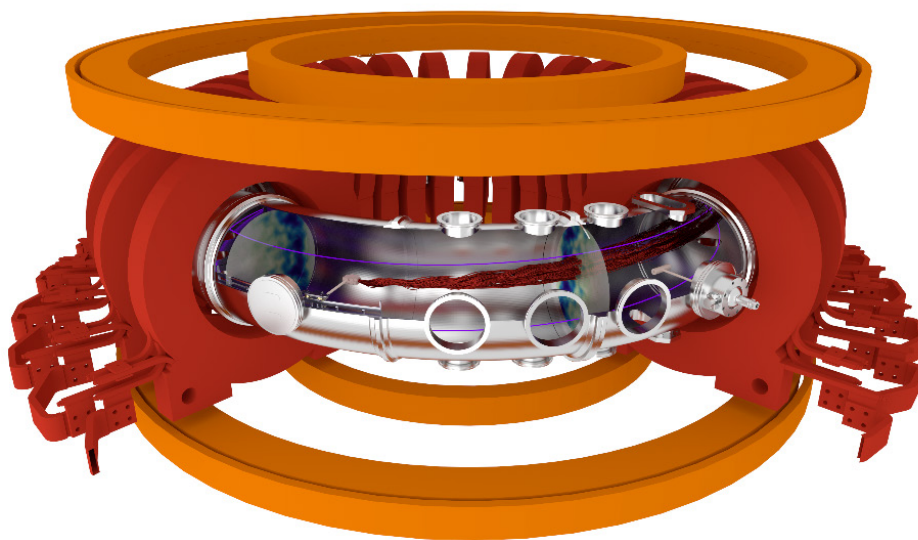


Fig. 5 Vue de la machine TORPEX avec la source et un détecteur d'ions supra-thermiques. Une ligne de champ hélicoïdale est visible en violet. La source d'ions est montée sur un système mobile dans la direction toroïdale. Des exemples de trajectoires simulées pour ions de 30eV sont visibles en rouge. Le potentiel du plasma extrait des simulations non-linéaires est visible à deux positions toroïdales.

### Supraconductivité

Le groupe Supraconductivité, localisé 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 Organisation. Ces tests concernent les câbles pour les bobines de champ toroïdal, poloïdal, pour le solénoïde central et les bobines de correction.

Afin de renforcer les capacités de tests des supraconducteurs pour la fusion, il a été décidé il y a quelques années, de construire une nouvelle installation, EDIPO (European DIPOle). En 2014, en parallèle aux activités sur SULTAN, la mise en service de l'installation EDIPO, a été poursuivie, avec des travaux sur le système de refroidissement de la bobine primaire. Cette deuxième installation servira aussi à tester les câbles électriques destinés à ITER.

Le troisième volet des activités du groupe est le développement des conducteurs et des bobines pour le réacteur DEMO. Ces travaux ont porté à la fois sur la technologie Niobium-Etain et sur la technologie des supraconducteurs à haute température.

### Activités internationales sur les tokamaks

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

Des expériences ont été menées sur l'application d'ondes RF aux fréquences cyclotroniques ioniques (ICRH) pour contrôler les oscillations répétitives en «dents-de-scie» qui apparaissent spontanément lors de l'opération. Ces dents-de-scie, lorsqu'elles sont de trop forte amplitude, peuvent déclencher d'autres instabilités du plasma et ainsi conduire à une dégradation de la qualité du confinement. Il est d'autant plus important de pouvoir les contrôler dans un réacteur que la présence des ions rapides générés par le processus de fusion a pour effet de créer des dents-de-scie géantes. En 2014, le CRPP a en particulier montré qu'en plus de pouvoir contrôler les dents-de-scie, il était possible d'évacuer les impuretés du cœur du plasma, évitant ainsi leur accumulation au cours du temps.

### Université de Bâle

#### Etudes concernant l'interaction plasma - paroi dans ITER, [5]

Le tungstène utilisé comme élément de la première paroi d'ITER et envisagé pour DEMO va être bombardé par de l'hélium produit lors de la réaction de fusion. L'effet de l'hélium sur la surface de tungstène a été étudié à l'Université de Bâle, tout d'abord par l'exposition à un plasma d'hélium radio fréquence pour un flux de l'ordre de  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  et aussi par l'incorporation d'hélium par pulvérisation cathodique magnétron (Fig. 6).

Une rugosité de surface et la création de trous ont été observées lors d'exposition à un plasma pour du tungstène poly- et nanocristallin. Des dépôts réalisés avec majoritairement de l'hélium ajouté à de l'argon génèrent des films poreux et une structure granulaire, alors qu'avec 50% He/Ar, une structure dense se forme. La présence d'hélium dans les films est confirmée par des mesures de spectrométrie à décharge lumineuse et de désorption thermique. Une fraction d'hélium est désorbée à 1500K. Des traitements plasma à plusieurs températures montrent la plus importante modification de surface à 1500K, attribuée à l'activation massive d'hélium liée à des sites vacants dans le réseau cristallin du film.

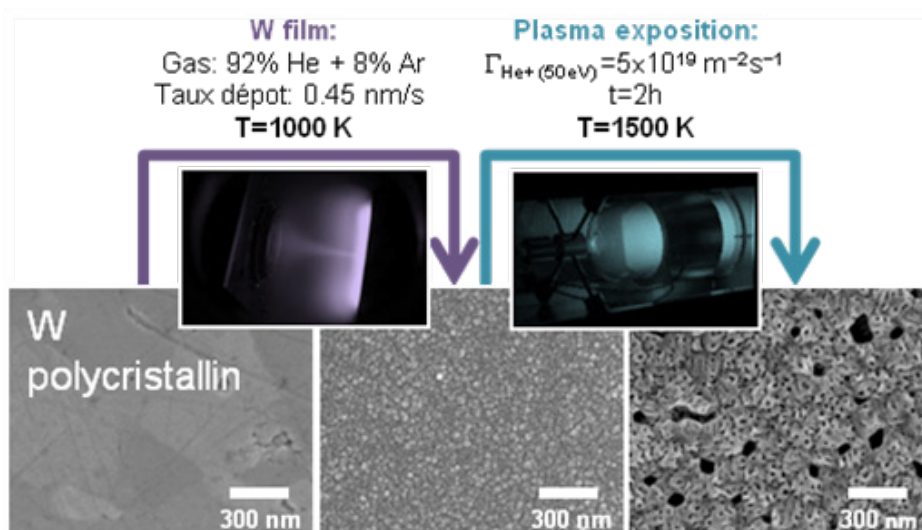


Fig. 6: Dépôt de W nano cristallin sur un poly cristal de W et exposition à un plasma d'hélium.

## Références

[1] Site web CRPP:

<http://crpp.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 CRPP:

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

[5] L. Marot, E. Meyer, Universität Basel: Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/JB): <https://nanolino.unibas.ch/?id=research&subid=fusion>

