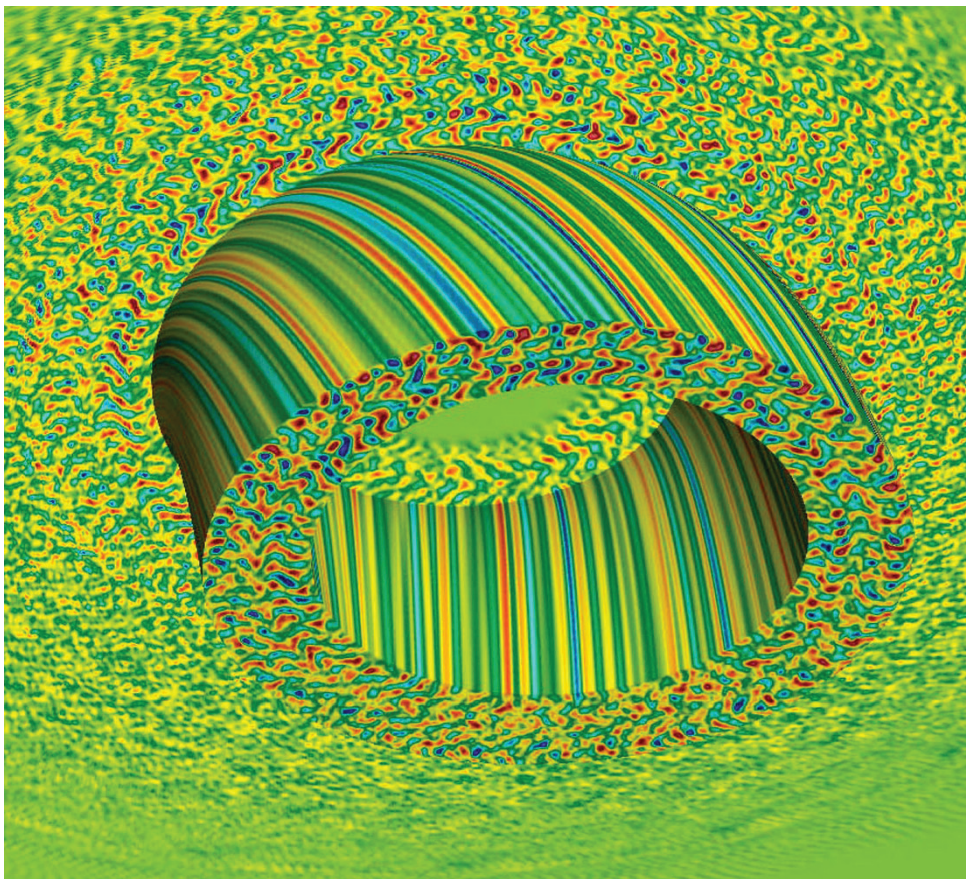


Rapport de synthèse 2012

Programme de recherche Fusion thermonucléaire contrôlée



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Page de couverture :

Vue instantanée et en coupe d'une simulation globale de la turbulence dans un plasma d'ITER

Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire contrôlée

Rapport de synthèse 2012

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne

Chef de programme (coordinateur) :

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

Chef de domaine de l'OFEN :

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

Auteurs :

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

<http://crppwww.epfl.ch>

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

Introduction

Il n'existe pas à proprement parler de programme fusion thermonucléaire en Suisse. Les activités de fusion sont fortement liées au programme de recherche européen *Euratom* (Communauté européenne de l'énergie atomique), notamment sa partie concernant la fusion thermonucléaire.

Depuis de nombreuses années, la Suisse a été associée aux recherches sur la fusion. En effet, 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, avec la création du Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP), la Suisse s'est jointe au club des nations pionnières dans ce domaine. En 1979, par un traité international avec l'Euratom, elle s'est associée pleinement au programme européen sur la fusion en y apportant des compétences spécifiques et, grâce à cette association, a permis leur valorisation au niveau international.

La Suisse participe donc à ces efforts et développe des connaissances dans la physique des plasmas et les technolo-

gies de fusion pour obtenir une source d'énergie pratiquement sans limite.

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

Tous ces avantages doivent être mis en regard d'une difficulté majeure: la fusion nucléaire nécessite des conditions extrêmes pour sa mise en service. Le défi est autant physique que technologique. Le programme européen de recherche sur la fusion s'est concentré dès son début sur le développement de l'électricité. Depuis près de 40 ans, cette stratégie a été suivie avec ténacité par Euratom.

L'Europe dans son ensemble se trouve à la pointe de la connaissance dans l'énergie de fusion. Avec la construction du Tore européen commun (Joint European

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

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

Les avantages et défis de la fusion sont bien connus. Il est à noter que d'immenses progrès ont été effectués: ils ont permis le lancement d'ITER, dont la construction est en cours à Cadarache (France) et devrait s'achever vers la fin de la décennie. Quant à DEMO, ce réacteur est prévu pour les années 2040–2050.

Classification de l'AIE : 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse: 3.2 Fusion

Centres de gravité du programme

L'extension de deux ans (2012–2013) du programme Euratom est entrée en force. Elle couvre, comme lors des années précédentes, deux parties principales, ITER et le programme européen de R&D en fusion.

ITER

Le budget européen alloué à ITER pour 2012–2013 s'élève à 2,2 milliards d'Euros. Si la majorité de cette somme sert à l'achat de composants pour la construction de l'infrastructure, une partie du budget est affectée à de la R&D effectuée dans les laboratoires.

Coopération européenne dans le cadre d'Euratom

Le programme Euratom en fusion comprend deux parties: programme national des associations et programme sous l'égide de l'European Fusion Development Agreement (EFDA). Ce dernier inclut l'exploitation scientifique du tokamak européen JET et des activités en vue des réacteurs de démonstration DEMO.

L'Euratom s'attend à ce que les pays contribuent davantage à leurs programmes nationaux pour lui permettre de concentrer ses ressources financières sur le projet ITER, qui deviendra dans la deuxième décennie du XXI^{ème} siècle l'ins-

tallation de pointe pour tous les pays actifs dans la recherche en fusion. Cette politique amène naturellement une baisse de la contribution européenne aux programmes nationaux, comme mentionné dans le rapport de synthèse des années passées.

Euratom et la Suisse

L'Accord de Coopération entre la Confédération suisse et l'Euratom dans le domaine de la fusion, conclu le 14 septembre 1978, est un accord-cadre illimité. Toutefois, l'association de la Suisse à l'Euratom nécessite un renouvellement pour 2012 et 2013.

Le 30 novembre 2011, le Conseil fédéral a autorisé le prolongement de l'association de la Suisse au programme Euratom 2012–2013, sous réserve de l'ouverture des crédits correspondants dans le cadre du premier supplément au budget 2013.

Du point de vue opérationnel, toutes les activités qui dépendent de cet accord d'association se sont déroulées normalement. L'Implementing Agreement sur les activités visant le réacteur DEMO a été signé en 2012 (Implementing Agreement for Power Plant Physics and Technology). L'extension de l'Implementing Agreement pour JET a été également signée en 2012.

Faits saillants de la recherche

En 2012, le CRPP a participé aux activités scientifiques et technologiques du programme Euratom ainsi qu'au projet ITER, notamment au travers de l'agence domestique européenne Fusion for Energy (F4E). Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée sont effectuées sur plusieurs sites : à l'EPFL, les activités portent sur la physique du confinement magnétique, avec le tokamak TCX, 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 et aux matériaux. De plus, le CRPP participe aux expériences sur le Joint European Torus (JET), qui reste à ce jour la plus grande expérience de fusion magnétique au monde en opération.

Highlights Recherche et Développement

Tokamak à configuration variable (TCV)

Le TCV est la plus grande installation expérimentale sur le site de l'EPFL. Elle présente deux propriétés uniques au monde : d'une part, la grande flexibilité de sa conception et de son mode d'opération permet la création et le contrôle de plasmas de formes très différentes, ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futurs réacteurs de fusion ; d'autre part, le système d'injection d'ondes millimétriques afin de chauffer le plasma et générer du courant est caractérisé par une grande souplesse et permet d'orienter la puissance injectée selon des profils spécifiques. C'est en utilisant ces caractéristiques uniques que les recherches sur le TCV se poursuivent. La campagne expérimentale 2012 n'a démarré qu'en novembre, suite à une interruption planifiée, débutant en janvier, destinée à effectuer d'importants travaux de maintenance, notamment la révision complète de l'alternateur.

- L'accent a été mis sur le développement et la démonstration de techniques de contrôle en temps réel, utilisant un nouveau système digital et impactant pratiquement tous les thèmes scientifiques.
- Une nouvelle méthode de mesure de la rotation du plasma, faisant appel à l'asymétrie de l'écoulement dans le sens toroidal, a été mise au point et testée avec succès sur TCV. Elle a permis d'obtenir une bien meilleure précision, surtout lorsque les vitesses impliquées sont faibles, ce qui limite les techniques standard.
- Il a été montré que l'apparition de barrières de transport internes (régions où le transport turbulent est fortement réduit) n'est pas dû à la stabilisation par le cisaillement des écoulements zonaux : ceux-ci sont en effet nettement insuffisants pour pouvoir jouer un rôle lorsque la barrière de transport apparaît. Sur TCV, il est par contre établi que l'apparition de barrières de transport soit liée au cisaillement inversé des lignes de champ magnétiques.

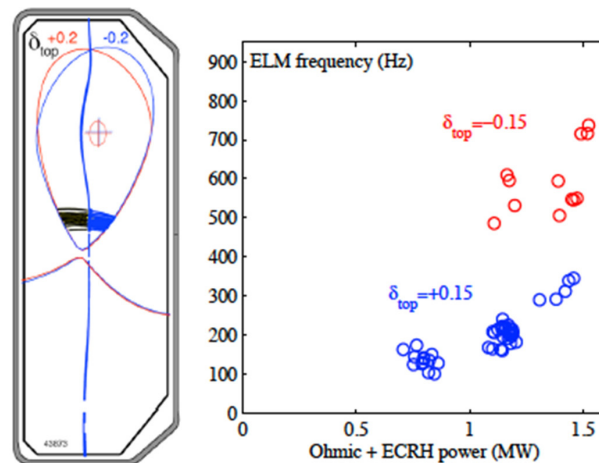


Figure 1 : (A gauche) Deux formes de plasma avec des parties supérieures modifiées. (A droite) Fréquence de répétition des ELMs pour les 2 formes correspondantes en fonction de la puissance totale appliquée.

- TCV a démontré un effet inédit de la forme du plasma sur le comportement des modes localisés au bord. Rappelons que ces modes « Edge Localized Modes (ELM) » se manifestent comme des bouffées de chaleur et de particules qui s'échappent du plasma et pourraient endommager la paroi de la chambre à vide. Cette problématique est identifiée comme une des plus critiques pour le succès d'un réacteur de fusion de type tokamak et fait l'objet d'intenses recherches. Sur TCV, en jouant sur la forme de la partie supérieure du plasma, il a été possible d'augmenter la fréquence de répétition des ELMs d'un facteur 3 (voir Fig.1) et de réduire d'un facteur correspondant la quantité d'énergie expulsée par ces modes.
- La configuration dite « snowflake », créée pour la première fois il y a quelques années sur TCV, a exhibé des propriétés très intéressantes en ce qui concerne les ELMs. Elle permet de répartir la puissance éjectée sur plusieurs points d'impact et de réduire ainsi les dommages potentiels à la paroi. De plus, une plus grande fraction de cette puissance est rayonnée, réduisant la puissance d'impact sur la paroi d'un facteur 2 : la figure 2 montre des profils de rayonnement infrarouge à divers instants et pour des configurations s'approchant

de celle du snowflake. L'équipe du TCV qui a étudié cette configuration « snowflake » a reçu en 2012 le prix « R&D 100 Innovation Reward » aux Etats- Unis.

Théorie et simulation numérique

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines suivants : la turbulence et le transport de chaleur et de particules dans les tokamaks, l'analyse de l'équilibre et de la stabilité MHD (magnéto-hydrodynamique) des tokamaks et stellarators, l'application d'ondes radiofréquence et la prospection et l'optimisation de nouvelles configurations de confinement magnétique. Le CRPP a aussi participé au développement spectaculaire des moyens de calcul à haute performance (HPC). Il est actif tant au niveau de l'EPFL et de l'Arc Lémanique, avec le projet CADMOS BlueGene/Q, qu'au niveau Suisse avec le projet « HP2C » du CSCS, au niveau européen avec le serveur « HPC-FF » de l'EFDA, et au niveau mondial avec le Computational Simulation Centre (CSC) de l'IFERC (Rokkasho, Japon) avec un serveur (HELIOS) de 1,5 PetaFlops dédié à la recherche en fusion. Le CRPP a été sélectionné parmi les tous premiers utilisateurs de HELIOS dans le

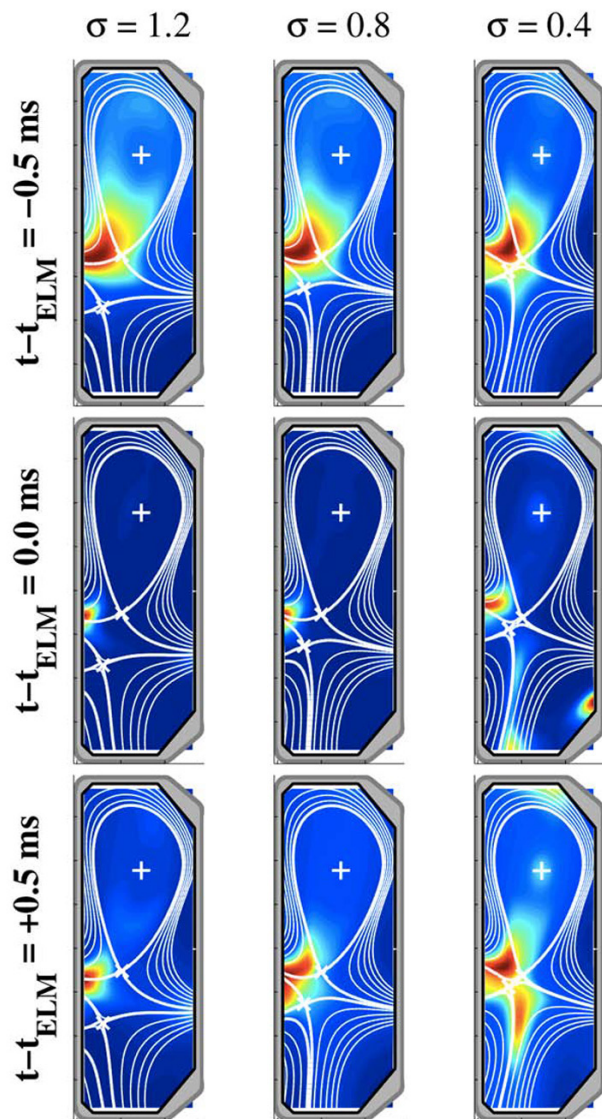


Figure 2 : Rayonnement infrarouge à différents instants (de haut en bas) et pour des configurations s'approchant du « snowflake » (de gauche à droite).

cadre d'un projet pilote (Lighthouse Project). Par la suite, les projets dirigés ou co-dirigés par des membres du CRPP ont reçu une allocation de 111 millions d'heures de calcul pour la période novembre 2012 – novembre 2013, lors d'un appel à propositions très compétitif. Cela représente près de 20 % des ressources totales disponibles sur HELIOS.

- Des simulations globales de la turbulence ont été faites d'une expérience spécifique du tokamak TCV. Cette turbulence est caractérisée par des phénomènes d'avalanches et par l'apparition d'oscillations des écoulements zonaux dans la région périphérique du plasma, dont la fréquence

et la longueur d'onde ont été comparées avec les mesures expérimentales, donnant un excellent accord. Ceci constitue une étape cruciale de la validation des modèles théoriques.

- Pour la première fois, des simulations globales de la turbulence dans un plasma d'ITER ont été faites (Figure en page de titre). Ces simulations ont nécessité une résolution d'un milliard de points de maillage et plusieurs milliards de particules numériques. Le résultat principal est que la forme allongée du plasma d'ITER est favorable à la qualité du confinement : par rapport à un plasma qui aurait la même taille mais une section circulaire, la

diffusivité thermique due à la turbulence est considérablement réduite.

- La dynamique des ions et des électrons dans un plasma est très différente, à cause de leur masse respective. Un des effets mis à jour par les simulations numériques est l'apparition de structures dans les écoulements zonaux au voisinage de certaines surfaces bien particulières du plasma, appelées « surfaces rationnelles ». Ces structures, par leur interaction avec la turbulence sous-jacente, résultent en des profils de température et de densité en forme d'escalier.
- De nouvelles limites de stabilité des modes MHD dans des tokamaks en rotation ont été calculées. Il a été montré que des instabilités peuvent se produire même loin des surfaces rationnelles, contrairement aux plasmas sans rotation.
- Les tokamaks ont été conçus pour avoir un axe de symétrie. Cependant, il a été montré que même avec un bord axisymétrique, le cœur du plasma pouvait se déformer en hélice. Cette brisure spontanée de symétrie a des conséquences sur le transport des ions rapides : ceux-ci sont en effet partiellement expulsés du cœur du plasma.
- La modélisation de la turbulence dans les régions périphériques du plasma (« Scrape-Off Layer », SOL) ont également progressé. Une des difficultés est la présence de lignes de champ magnétique pénétrant la paroi. De nouvelles conditions aux bords, faisant appel à une description mixte fluide et cinétique, ont été implémentées. Des simulations ont ainsi pu être faites de la région du SOL, montrant une transition douce entre les différentes régions
- Des investigations des effets de la taille du plasma sur la turbulence dans le SOL ont été entreprises. L'aspect critique est la détermination de l'épaisseur du SOL, car elle impacte directement le design des composantes de la paroi en contact avec le plasma dans un réacteur.

TORPEX

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

- Un bon confinement des ions rapides est essentiel au bon fonctionnement d'un réacteur de fusion. Le transport d'ions rapides dans le plasma a été mesuré dans TORPEX et comparé avec des simulations numériques. L'effet de la turbulence a ainsi pu être mis en évidence. Le dispositif expérimental est maintenant prêt à l'étude des différents régimes de transport des ions rapides prédits par la théorie.
- Un nouveau dispositif a été introduit dans TORPEX, sous la forme d'un conducteur placé dans la chambre à vide et produisant, en combinaison avec celui créé par les bobines extérieures, un champ magnétique possédant des surfaces magnétiques fermées, comme à l'intérieur d'un tokamak. Le but est de comparer la turbulence dans cette configuration à celle où les lignes de champ magnétique sont ouvertes.
- L'étude des filaments (ou « blobs ») de turbulence s'est enrichie grâce au développement d'une sonde miniaturisée permettant la mesure du courant électrique parallèle associé à la dynamique de ces « blobs ».

Technologie de chauffage

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

- Le développement d'un nouveau code de simulation numérique s'est poursuivi, incluant sa parallélisation. Il a pu être mis en évidence que les gyrotrons de TCV à 118 GHz souffrent d'une instabilité dans le lanceur qui a pour conséquence une diminution de 10% de la puissance RF émise.
- Une campagne expérimentale dédiée à l'étude des instabilités parasites a été entreprise dans le gyrotron de TCV à 118 GHz, qui a été reçu en novembre après réparation.

Dans le cadre du système EC d'ITER, deux projets sont en cours en collaboration avec des laboratoires européens. Le premier porte sur le développement des gyrotrons à 170 GHz délivrant 1 MW que l'UE devra livrer à ITER. Le second concerne le développement de l'antenne qui servira à lancer les ondes électron cyclotron dans ITER.

Science et technologie des matériaux

Les matériaux d'un réacteur à fusion sont soumis au bombardement par des neutrons énergétiques qui produisent des défauts mécaniques ainsi que des transmutations nucléaires. Ces dernières à leur tour affaiblissent les propriétés mécaniques des matériaux. Les activités du groupe « Fusion Technology: Materials » se sont concentrées en 2012 sur :

- l'amélioration des propriétés mécaniques des aciers à activation réduite, grâce à une optimisation des conditions de fabrication;

- une meilleure compréhension des propriétés des matériaux sous irradiation par simulation numérique.

Dans le cadre de l'Approche Élargie (« Broader Approach »), les deux tâches de la Suisse ont été terminées en 2012. Le prototype du « Creep Fatigue Test Module » pour l'installation IFMIF a passé avec succès les tests et a montré qu'il satisfait toutes les spécifications. Le développement des méthodes de tests pour des mini-échantillons a aussi été complété.

Supraconductivité

Le groupe Supraconductivité, localisé au PSI, a poursuivi ses activités dans le test des conducteurs pour ITER sur l'installation Sultan. En 2012, l'ITER Organisation (IO) a signé avec le CRPP un contrat cadre de trois ans qui assure pour tous les partenaires d'ITER la possibilité de tester et de qualifier les conducteurs destinés à ITER. Ces tests concernent les câbles pour les bobines de champ toroïdal, poloidal, pour le solénoïde central et les bobines de correction. En parallèle avec ces activités, l'installation EDIPO a été mise en marche : elle a été refroidie à la température de l'Hélium liquide à la fin de 2012. Le troisième volet des activités du groupe est le développement des conducteurs et des bobines pour le réacteur DEMO dans le cadre de l'IA « Power Plant Physics and Technology ».

Toutes ces activités de recherche ont abouti en 2012 à une centaine d'articles dans des revues scientifiques à comité de

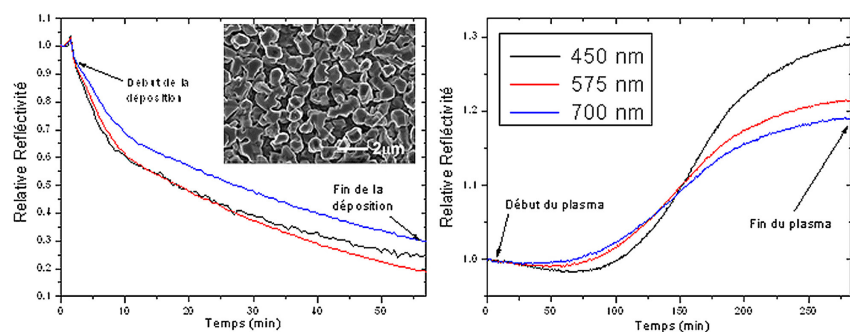


Figure 3 : Evolution de la réflectivité d'un miroir lors de la déposition d'un film sur la surface (image MEB insérée) et lors du nettoyage par un plasma d'argon.

lecture et à une centaine de communications lors de congrès internationaux, dont plusieurs en tant que papiers invités.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a environ 35 doctorants dont plusieurs d'entre eux ont obtenu en 2012 leur titre de doctorat. Enfin, en 2012, 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.

L'interaction plasma – paroi dans ITER [1]

Parallèlement aux activités du CRPP, l'Université de Bâle mène des recherches sur les parois du futur ITER. Dans le cadre de l'étude de l'interaction plasma – paroi dans ITER, un point a été spécialement étudié à l'Université de Bâle lors d'un contrat avec ITER IO. Il s'agit de l'étude de nettoyage de miroir utilisé pour transmettre la lumière du plasma dans les diagnostics d'ITER. Ce nettoyage a été réalisé en appliquant un plasma radio fréquence directement sur le miroir. Un

exemple de la dégradation de réflectivité d'un miroir lors de la déposition d'un film sur la surface et l'augmentation lors du nettoyage plasma avec des ions argon est représenté sur la figure 1. Une image réalisée par microscopie électronique à balayage du film nettoyé est insérée.

Collaboration Internationale

Collaboration dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) [9]. La Suisse est signataire de l'Implementing Agreement sur les matériaux pour les réacteurs de fusion. Elle participe également aux autres Implementing Agreements à travers l'Euratom. Elle est représentée au Fu-

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

References

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

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

[3] Site internet Joint Undertaking F4E : http://fusionforenergy.europa.eu/index_en.htm, Informations sur le Joint Undertaking «Fusion For Energy»; et ses activités, incluant des appels d'offres ou des offres d'emplois

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

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

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

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

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

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

