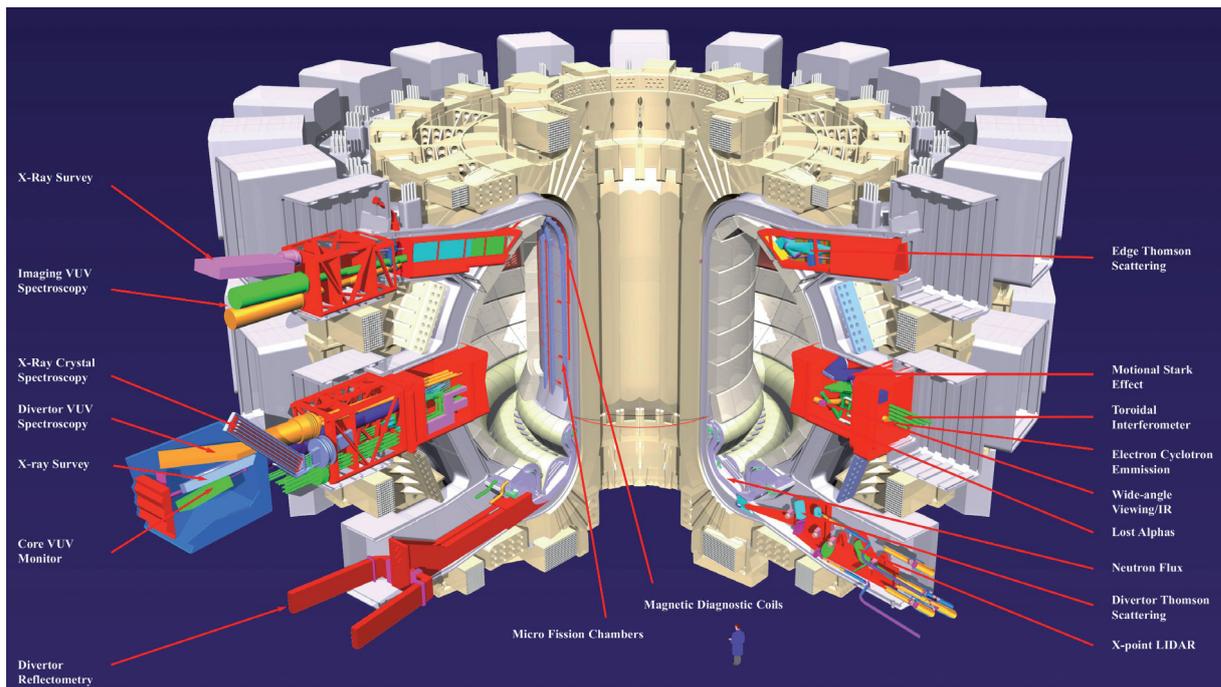


Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Programme de recherche Fusion thermonucléaire contrôlée

Andreas Werthmüller

andreas.werthmueller@sbf.admin.ch



ITER

Le réacteur ITER en coupe, avec les éléments de diagnostic mis en évidence.

Centres de gravité du programme

International thermonuclear experimental reactor (ITER)

La participation formelle suisse dans le projet *ITER* [1] a fait l'objet d'un échange de lettres entre la Suisse et l'Union Européenne. En 2008, le Conseil des États a ratifié, en première lecture, l'échange de lettres. Le Conseil National s'est prononcé le 3 mars 2009.

La construction de *ITER* progresse avec les travaux de génie civil portant sur le site lui-même. La Direction du projet, l'« *ITER Organization* » (*IO*), analyse les conclusions du « *ITER Design Review* » et implémente les mesures nécessaires correspondantes. L'impact de ces mesures sur le coût du projet, son *planning* et sur le *management* est en cours.

Coopération européenne dans le cadre d'Euratom

En 2008, l'Euratom a organisé une évaluation scientifique de sa stratégie à long terme et de l'infrastructure à disposition pour mener à bien cette stratégie. Cet examen a été effectué par un comité international comprenant des spécialistes de la fusion ainsi que d'autres personnalités hors de la fusion. Il est intéressant de noter que, dans le rapport final, le *tokamak* *TCV* du CRPP [2] est une des quelques installations européennes dont l'importance est reconnue jusqu'à la mise en exploitation d'*ITER* (prévue pour 2018) : en conséquence le maintien du *TCV* jusqu'à cette date est recommandé par le Comité d'évaluation. Le rôle important des autres infrastructures du CRPP a été également souligné.

Pratiquement, toute la recherche effectuée en Europe dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée se déroule au sein du programme « Fusion » de l'UE, dans le cadre du traité Euratom [3]. Ce programme, rattaché aux Programmes-cadres de recherche et développement de l'UE, et dont le budget représente environ 30 % des sommes totales attribuées à la fusion en Europe, finance l'exploitation des grandes infrastructures de recherche, comme le *JET* [4], de même que la participation européenne à *ITER* [5]. En outre, il cofinance de nombreuses activités conduites dans les laboratoires nationaux qui lui sont associés, comme, pour la Suisse, le CRPP de l'EPFL. Au titre du 7^e PCRD d'Euratom (2007 – 2011), la recherche en fusion dispose de 1'947 M€ (millions d'euros). Selon une décision du Conseil de l'Union Européenne, 900 M€ sont destinés à la participation européenne à *ITER*. Pour la gestion de cette participation, Euratom a mis sur pied une entreprise commune, appelée « *JU F4E* » (pour

« *Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy* », plus simplement dite : « *Joint Undertaking Fusion for Energy* », d'où dérive le sigle utilisé) [6].

Euratom et la Suisse

L'Accord de coopération entre la Confédération suisse et la Communauté européenne de l'énergie atomique dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée et de la physique des plasmas, conclu le 14 septembre 1978, est un accord-cadre de durée illimitée. Des accords plus spécialisés, dits accords d'exécution, fixent les modalités de la coopération avec Euratom en matière de fusion. Ces accords sont actuellement au nombre de quatre : l'*EFDA* (« *European Fusion Development Agreement* »), le *JIA* (« *JET Implementing Agreement* »), qui règle l'utilisation de la grande installation européenne *JET*, l'Accord sur la mobilité, qui encourage et facilite les échanges de personnel entre les Associations, et le Contrat d'association, qui précise les rapports scientifiques, techniques, administratifs et financiers du CRPP/EPFL avec le Programme « Fusion » de l'UE. Ces contrats ont été renouvelés en 2007 pour des durées de un à six ans.

Le CRPP et l'Association Suisse / Euratom

Le CRPP a continué en 2008 à participer aux activités scientifiques et technologiques du programme Euratom. Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée portent, d'une part, sur la physique du *Tokamak*, la technologie de la fusion (en particulier, le chauffage du plasma et la génération de courant par ondes hyper-fréquences), la théorie et la simulation numérique, à l'EPFL et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux, au PSI, à Villigen.

Le *TCV* (*Tokamak à Configuration Variable*) est la plus grande installation expérimentale exploitée sur le site de l'EPFL. Elle présente deux propriétés uniques au monde : d'une part, la grande flexibilité de sa conception et de son mode d'opération permet la création et le contrôle de plasmas de formes très différentes ; ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futurs réacteurs de fusion ; d'autre part, la densité de puissance hyper-fréquence injectée dans le plasma est un record mondial. C'est en utilisant ces deux caractéristiques uniques que les recherches sur le *TCV* se poursuivent. En 2007 - 2008, une série d'améliorations et de réparations ont été effectuées, impliquant notamment le démontage et le nettoyage des quelque 1'600 tuiles de graphite constituant la paroi. Malgré une campagne

expérimentale relativement courte, de nouveaux résultats significatifs ont été obtenus.

Parmi les points forts obtenus, le *TCV* a apporté une contribution importante à l'étude des régimes stationnaires dans les *tokamaks* : un courant de plasma de plus de 70 kA a pu être maintenu grâce à l'effet dit de « *bootstrap* », dans des décharges présentant par ailleurs une barrière de confinement interne, améliorant d'un facteur 3 à 4 la qualité du confinement par rapport aux lois d'échelles semi-empiriques obtenues dans des décharges standard.

Un autre résultat original a été la création, en première mondiale, d'une configuration appelée « *snowflake* » dans laquelle la configuration magnétique au voisinage de la séparatrice crée un plus grand étalement de la puissance de sortie, offrant ainsi une possibilité de diminuer le maximum de la densité de puissance atteignant les structures de la paroi de la chambre à vide, qui est l'un des facteurs principaux limitant l'opération d'un réacteur de fusion.

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. Un des résultats importants obtenus en 2008 a été la démonstration de simulations de turbulence en état stationnaire du point de vue statistique, grâce à de nombreuses améliorations apportées aux schémas numériques. Les premières simulations globales de la turbulence d'électrons piégés ont été effectuées avec succès. Un autre résultat majeur a été la prédiction, suivie d'une vérification expérimentale sur le *tokamak* européen *JET*, du contrôle de l'instabilité dite « dent-de-scie » par l'effet des ions rapides créés par chauffage radiofréquence.

Les recherches du groupe de physique des plasmas de base ont pour but la compréhension des fluctuations, de la turbulence et des phénomènes de transport dans les plasmas magnétisés toriques. L'avantage de la machine *TorpeX* est qu'elle permet des mesures *in situ* à haute résolution spatio-temporelle. Parmi les résultats obtenus en 2008, mentionnons les interactions des ions rapides avec la turbulence, l'étude d'un régime de confinement amélioré, la découverte d'aspects universels de la statistique des fluctuations, l'étude de l'existence d'un gradient critique pour le déclenchement de la turbulence, le développement d'un nouveau code fluide 3D et la caractérisation complète de la propagation de filaments de plasma.

Le groupe *Fusion Technology Materials*, au PSI, a pour objectif principal l'étude des effets des dégâts provoqués par l'irradiation des matériaux structuraux entourant les futurs réacteurs de fusion. Dans ces machines, les neutrons de fusion à haute énergie produiront des cascades de déplacements et des transmutations nucléaires. Ces études ont porté, en particulier, sur les alliages métalliques à faible activation, des aciers ferritiques ou à base de tungstène, et la qualification de ces matériaux pour *ITER* et pour *IFMIF* (« *International Fusion Material Irradiation Facility* », un projet d'installation destinée à des matériaux de fusion sous irradiation). L'approche scientifique est basée sur une analyse à échelle multiple (micro-, méso- et macroscopique) et comporte un volet expérimental et un volet de modélisation. Les expériences d'irradiation ont été effectuées sur le *Swiss Spallation Neutron Source (SINQ)* au PSI, ainsi que sur d'autres installations en Belgique, aux Pays-Bas et en Hongrie.

Une part importante des travaux effectués au CRPP en 2008 est étroitement liée à *ITER* :

- Le développement des gyrotrons européens. Un premier prototype a été testé en utilisant le banc d'essai des gyrotrons spécialement développé pour *ITER*. Une puissance de pointe de 1,4 MW a été atteinte sur une impulsion courte.
- Le lanceur d'ondes hyper-fréquences pour *ITER*. Le CRPP représente la principale Association impliquée dans la conception, l'analyse et le test de ce lanceur. Le système de focalisation et d'orientation dynamique a été validé. Un prototype a été testé et a montré la faisabilité des choix initiaux.
- L'usage de l'installation Sultan pour le développement et le test des supraconducteurs d'*ITER*. L'installation Sultan est unique au monde pour qualifier les supraconducteurs qui seront utilisés pour *ITER*. En 2008, plusieurs échantillons destinés aux bobines de champ toroïdal ont été testés pour leurs propriétés de courant critique et de pertes AC.
- Le développement des diagnostics magnétiques sur *ITER* s'est poursuivi en 2008, avec notamment la quantification des niveaux de bruit et le développement de prototypes de bobines rapides.
- Le développement du système de contrôle et d'acquisition de données pour *ITER* a abouti à la version finale d'un concept, après révision par les partenaires d'*ITER*.
- Le développement de simulations numériques complètes du *tokamak ITER*, servant à la mo-

délisation de scénarios, a impliqué la combinaison d'un code de calcul d'évolution de l'équilibre et d'un code de transport.

Toutes ces activités de recherches ont abouti en 2008 à une centaine d'articles scientifiques dans des revues spécialisées et à une centaine de communications lors de congrès internationaux, dont plusieurs en tant que papiers invités.

Notons encore que le CRPP a été l'organisateur local de la 22nd IAEA Fusion Energy Conference qui a eu lieu du 13 au 18 octobre 2008 au Palais des Nations à Genève, sous les auspices de l'AIEA (Agence Internationale de l'énergie atomique, à Vienne) et de la Confédération Suisse. C'était exactement le 50^e anniversaire de sa première tenue à Genève lors du 2^e Salon international des applications pacifiques de l'énergie atomique « L'atome pour la paix », du 1^{er} au 14 septembre 1958.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a environ 40 doctorants sur

un effectif total de 160 personnes. Enfin, en 2008, 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.

En parallèle, le CRPP a initié les actions qui lui ont été confiées par le SER/SBF dans le cadre des engagements suisses pour la « *Broader Approach* » (approche élargie). Ceux-ci portent sur :

- la livraison d'alimentation haute tension pour les gyrotrons du tokamak japonais JT60-SA.
- La conception d'une cellule de test dans IFMIF (« *International Fusion Material Irradiation Facility* »).
- La R&D en vue de la caractérisation des matériaux en utilisant des mini-échantillons ou éprouvettes.

En plus, le CRPP assure la tâche de promotion industrielle dans le domaine de la fusion et d'*ITER*.

Collaboration nationale

Studies related to plasma-wall interaction in *ITER*, University of Basle [7, 8] : The growing interest about the use of rhodium (Rh) as a material for the first mirrors in *ITER* and the necessity of using it as a thin film deposited on a polished substrate has raised the necessity of the development of a robust deposition technique for the preparation of high-reflectivity mirrors.

Preparation of Rh-coated mirrors by magnetron sputtering has been studied in Basle, and Rh layers with a thickness of 2 μm (micrometers) have been produced so far with a negligible amount of impurities in the layers. Different deposition conditions such as gas pressure, deposition rate and substrate temperature were investigated.

The films have a low roughness and their structure exhibit nanometric crystallites with a dense columnar structure. Amongst all investigated parameters, only the gas pressure during the deposition was observed to have an influence on the optical properties of the film. Otherwise, the measured reflectivity is close to the reflectivity calculated from optical constants of pure rhodium. Storage of the samples in air did not affect the reflectivity. The first laboratory test of erosion by deuterium ions and also annealing cycles are promising in view of diagnostic mirror applications. It is also important to note that the layer survived under erosion conditions in real tokamak (*Textor*), although the reflectivity was decreased after exposure in tokamak plasmas, further tokamak exposures are scheduled.

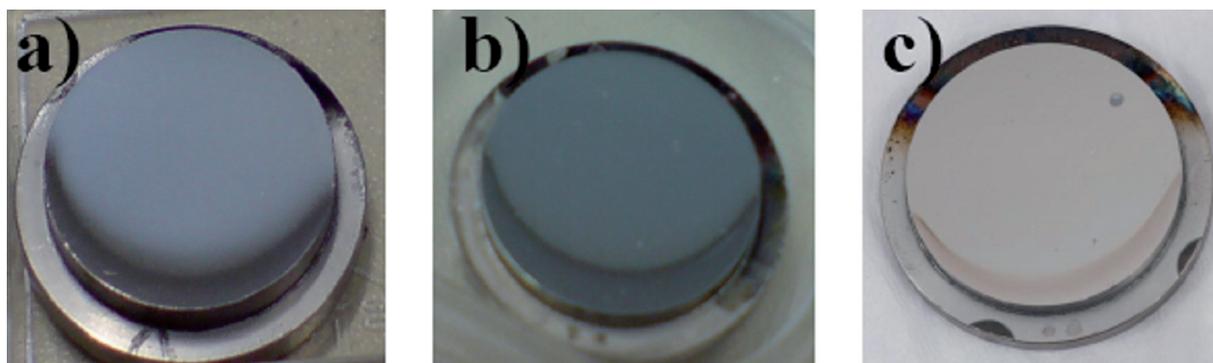


Figure 1 : view of the mirrors after exposure : a) Rh-coated mirror 234_Rh (Univ. of Basle) ; b) Rh-coated mirror ENEA (ENEA Frascati) ; c) Mo-coated mirror 215_Mo. (Univ. of Basle)

A robust method for the finishing of high quality mirrors was successfully tested at the University of Basle. Cleaning of the mirror surface by hydrogen glow discharge is now routinely applied before detailed optical characterisation for mirrors to be exposed in different *tokamaks*. The optimization of the mirror reflectivity by such technique is a prerequisite for a successful mirror test (Figure 1).

Such experiments are ongoing in the present project, and a modified plasma chamber enables us *in-situ* monitoring of the mirror reflectivity during cleaning in deuterium RF plasma. A molybdenum

(Mo) mirror exposed in the deposition dominated area of *Textor* was used for this test. Removal of the carbon layer is achieved by chemical erosion and enhanced by increasing the surface temperature. However, for all the conditions investigated, no complete recovery of the reflectivity was achieved. The reason for that seems to be the presence of molybdenum carbide at the interface between the molybdenum substrate and the carbon film. Such carbide can not be removed by chemical sputtering only and an increase of the ion energy to values higher than the physical sputtering threshold would be necessary.

Collaboration internationale

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

Le programme de l'AIE en fusion nucléaire est étroitement coordonné avec les programmes de recherche nationaux et avec d'autres programmes internationaux, y compris le programme Euratom. Les « *Implementing Agreements* » (IA, ou Accords d'exécution) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) permettent de réaliser des activités de R&D en exploitant efficacement le savoir combiné d'experts et en évitant des duplications inutiles.

Neuf IA sont actuellement en cours d'exécution, sous la supervision du « *Fusion Power Co-ordinating Committee* », FPCC, dans lequel la Suisse est également représentée. Ils couvrent des thèmes divers liés à la physique des plasmas, aux matériaux et aux aspects socio-économiques de la fusion. Euratom participe à tous ces IA, et les chercheurs suisses sont directement impliqués dans deux de ces IA, l'un concernant la recherche sur les matériaux (EPFL et PSI), l'autre étudiant les interactions plasma-paroi du réacteur (Université de Bâle).

Références

- [1] Site internet ITER : <http://www.iter.org>, Informations sur le projet ITER.
- [2] Site internet CRPP : <http://crppwww.epfl.ch>.
- [3] Site internet EFDA : <http://www.efda.org>, Informations sur la recherche européenne dans le domaine de la fusion.
- [4] Site internet JET : <http://www.jet.efda.org>, Informations sur le Joint European Torus JET.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Site internet Universität Basel : <http://pages.unibas.ch/phys-esca>.
- [8] L. Marot, P. Oelhafen, Universität Basel : Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/JB) <http://pages.unibas.ch/phys-esca/fusion.html>.
- [9] Site internet des Accords d'exécution en fusion nucléaire de l'AIE <http://www.iea.org/Textbase/techno/technologies/fusion.asp>.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermann Druck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter

Dr. Andreas Werthmüller
Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF/SER
Hallwylstrasse 4
CH-3003 Bern
andreas.werthmueller@sbf.admin.ch

Bereichsleiter

Dr. Christophe de Reyff
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
christophe.dereyff@bfe.admin.ch