



EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE LAUSANNE
POLITECNICO FEDERALE DI LOSANNA
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY LAUSANNE

CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DES PLASMAS
Association EURATOM - Confédération Suisse



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

LE CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DES PLASMAS DE L'EPFL

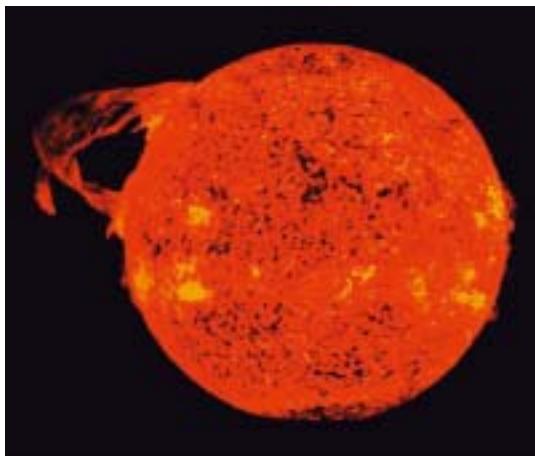
Le Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) est un Centre de la Faculté des Sciences de base de l'EPFL. Son personnel est actuellement d'environ 135 personnes réparties entre le site de l'EPFL (environ 110) et celui de l'Institut Paul Scherrer (PSI) à Villigen; il inclut pas moins de 22 nationalités, ce qui démontre bien de la nature internationale de cette activité de recherche. Ses missions principales découlent de son statut de Centre de Compétence National dans le domaine de la Physique des Plasmas, à savoir, outre l'enseignement et la recherche en physique des plasmas, principalement la conduite des activités scientifiques de recherches en fusion effectuées dans le cadre de l'Association Euratom-Confédération Suisse et, dans une moindre mesure, le développement de ses compétences et le transfert de technologie dans le domaine des matériaux. En tant que responsable de tous les travaux scientifiques en fusion contrôlée effectués en Suisse, le CRPP remplit ainsi un rôle national d'importance internationale.



Au premier plan, les bâtiments du CRPP, sur le site de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Energie de fusion

Il existe deux façons de libérer l'énergie nucléaire: d'une part par la fission des atomes lourds, tel que l'uranium (c'est ce concept qui est employé dans les centrales nucléaires actuelles), d'autre part lors de la fusion des atomes légers en atomes plus lourds, processus qui a lieu dans les étoiles.



Dans les étoiles, les réactions de fusion s'effectuent à des températures relativement basses, en raison des pressions considérables qui y règnent, 'seulement' 15 millions de degrés au centre du soleil. Il n'est guère possible de reproduire sur Terre les réactions extrêmement lentes qui ont lieu dans les étoiles.

Cependant celles mettant en jeu les isotopes lourds de l'hydrogène, le deutérium (D) et le tritium (T), sont accessibles en chauffant ces noyaux à des températures supérieures à 100 millions de degrés. A ces hautes températures, seul l'état dissocié des atomes existe: c'est l'état plasma.

Le Soleil, un réacteur à fusion naturel...

Dans l'eau, du deutérium pour des millions d'années.....

La fusion du deutérium et du tritium en hélium libère environ 100'000 kWh d'énergie thermique par gramme de combustible, comparativement dix millions de fois plus qu'un gramme de pétrole. Le deutérium existe en grande quantité dans l'eau (34 grammes par mètre cube) bien répartie sur le globe. Le tritium, n'existant pas à l'état naturel, est produit à partir du lithium (Li) dont les réserves sont très importantes (plusieurs centaines de millions de tonnes). Dans ce cycle, le volume du lac Léman pourrait fournir suffisamment de deutérium pour couvrir les besoins électriques de la Suisse pendant plusieurs dizaines de millénaires. Ces caractéristiques à elles seules expliquent le grand intérêt d'une telle source d'énergie pratiquement inépuisable.



La fusion thermonucléaire pourrait devenir une source nouvelle et considérable d'énergie avec des avantages intrinsèques importants comparés à d'autres sources:

- les combustibles de base (D, Li) sont non radioactifs, abondants et distribués assez uniformément dans les océans et la croûte terrestre,
- pas de divergence possible du réacteur, puisque la quantité de combustible présente à tout moment dans le réacteur est très faible et qu'une perte de contrôle de la réaction l'arrête aussitôt,
- les problèmes de déchets radioactifs sont limités: pas de cendres radioactives, régénération du tritium dans l'installation même. Avec une sélection rigoureuse des matériaux constitutifs du réacteur, le stockage des composants de la structure mécanique, qui auront été activés par les neutrons, pourrait être limité à moins de cent ans,
- aucune pollution atmosphérique conduisant à des pluies acides ou à des effets de serre.

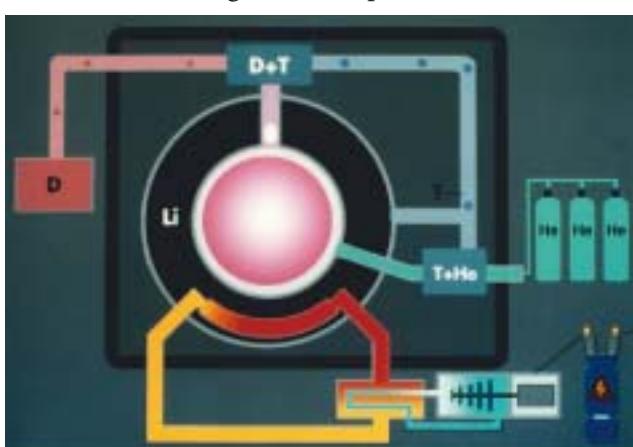


Schéma de principe d'une centrale à fusion D-T. Les particules d'hélium, confinées dans le plasma, participent au chauffage du plasma. Les neutrons issus des réactions de fusion traversent la première paroi, ralentissent dans le manteau contenant du lithium, régénérant ainsi le tritium. L'énergie est récupérée par un échangeur de chaleur, et finalement grâce à la vapeur, une turbine générant de l'électricité.

Du point de vue économique, il est encore trop tôt pour évaluer l'impact d'une centrale à fusion avec

précision. Les coûts d'investissement seront certes plus élevés que pour les centrales à charbon ou à fission, mais le coût de combustible et les coûts indirects sont insignifiants.

L'Association Euratom-Confédération Suisse

Depuis 1979, la Suisse est associée au programme européen de recherche en fusion thermonucléaire contrôlée dont l'objectif est de développer un réacteur thermonucléaire à fusion. L'exécution de la fraction suisse de ce programme est effectuée au Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) de l'EPFL. Depuis 1961, le CRPP est actif dans la recherche en physique des plasmas et, depuis 1979, plus spécialement dans la fusion thermonucléaire contrôlée effectuée à l'aide d'installations expérimentales de type tokamak. En 1994, le groupe de technologie de la fusion de l'institut Paul Scherrer (PSI) a été rattaché au CRPP et est devenu «l'antenne» de celui-ci au PSI. Les activités «fusion» de l'Association Euratom-Confédération Suisse se trouvent ainsi concentrées sous la bannière du CRPP.

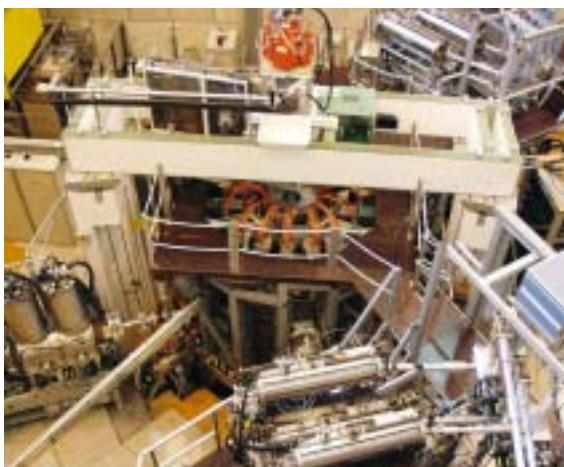


Site du PSI à Villigen, sur les bords de l'Aar

La participation de la Suisse, fonction du Produit National Brut, au budget de l'EURATOM s'élève à environ 3,5 % du budget de l'EURATOM budget de celui-ci. Une partie du budget global est investie dans l'exploitation du tokamak européen JET et dans les activités requises par le projet ITER, un très grand tokamak international, l'autre partie est redistribuée vers les centres associés. C'est ainsi que l'EURATOM contribue au budget des centres associés en couvrant 20 % de leurs dépenses totales et dans certains cas 40 % des gros investissements de recherches en «support prioritaire». Le CRPP avait reçu ce support pour la construction du tokamak de TCV et de son système de chauffage du plasma, ainsi que pour les installations de technologie SULTAN et de PIREX.

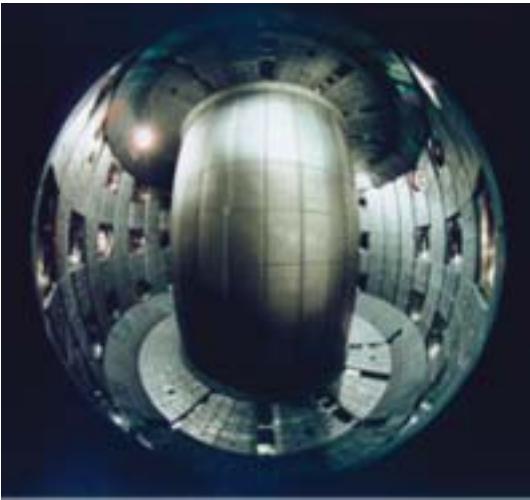
Le CRPP: recherches à Lausanne et à Villigen

Comme les plasmas sont constitués de particules chargées électriquement, il est possible d'agir sur celles-ci en utilisant des champs électriques et magnétiques. Pour maintenir le plasma (chaud) loin des parois de l'enceinte le contenant, une des solutions envisageables est d'immerger le plasma dans un champ magnétique de forme torique. Le tokamak, basé sur le principe d'un simple transformateur pour la génération du courant dans le plasma, est un des concepts à confinement magnétique. Le plasma dans l'enceinte a la forme d'un tore (comme un pneu). Le courant électrique qui circule dans le plasma, le chauffe et contribue, avec le champ magnétique vertical, à l'équilibre de la configuration. Les bobines, qui créent ce champ magnétique vertical, participent également à donner la forme de la section du plasma.



Le tokamak TCV du CRPP

Le tokamak TCV (Tokamak à Configuration Variable) est la plus grande installation expérimentale de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Il a pour objectif de repousser les frontières de fonctionnement des tokamaks vers des régimes d'opération encore inexplorés dont les performances seraient améliorées (temps de confinement et rapport de l'énergie contenue dans le plasma sur l'énergie magnétique). Les scénarios de production des plasmas allongés verticalement font l'objet d'études systématiques. Pendant plusieurs années, des études théoriques ont été effectuées afin d'assurer les objectifs du projet.



Intérieur de TCV

L'interaction entre les expérimentateurs et les théoriciens demeure nécessaire, voire cruciale pour la bonne marche du projet. Le TCV a été mis en service en novembre 1992, des courants de plasma dépassant 1'000'000 ampères (valeur nominale: 1,2 MA) ont été obtenus. Les plasmas ont une durée de quelques secondes et sont produits toutes les 15 minutes environ.

L'installation est complétée par des instruments de mesure des paramètres du plasma, qui sont installés autour du tokamak. La forme (programmée) de la section du plasma est l'un des paramètres majeurs qui peut être modifié lors des différentes études. La position du plasma dans le tore doit être contrôlée pendant toute la phase d'existence du plasma, faute de quoi il dériverait vers les parois et disparaîtrait. Les diverses formes de plasma obtenues à ce jour ont largement démontré la flexibilité de l'installation.

Une impulsion de plasma dans le TCV, en présence de chauffage, nécessite une puissance de 60 MWatts pendant 5 secondes. La puissance électrique utile au TCV est délivrée par un alternateur qui découpe l'installation du réseau électrique.

Un programme important de chauffage additionnel (par rapport à celui produit par le courant du plasma) est entrepris sur le TCV. A cette fin, des tubes à hyperfréquences sont employés: les gyrotrons. Les fréquences générées sont de 83 GHz (6 tubes) et de 118 GHz (3 tubes). Ces 9 gyrotrons délivrent une puissance totale de 4,5 MW. Ils sont installés dans l'extension sud de la halle TCV. Des guides d'onde acheminent la puissance micro-onde vers le plasma dans TCV.

Le TCV est une installation expérimentale complexe où plusieurs milliers de variables doivent être acquises et contrôlées. Ainsi, l'important volume de données à traiter nécessite une multitude de tâches automatisées et contrôlées par ordinateur.



Gyrotrons de 83 et 118 GHz dans la halle TCV



Installation SULTAN

Divers aspects de la technologie liée au développement des tokamaks sont abordés à l'antenne du CRPP qui se trouve à l'Institut Paul Scherrer (PSI). C'est l'équipe de la Technologie de Fusion qui réalise les études des supraconducteurs et des matériaux qui entrent dans la construction des installations de recherches et plus particulièrement dans les futurs réacteurs expérimentaux. Avec l'installation de test de supraconducteurs, SULTAN (SUpraLeiter Test ANlage) située au PSI, le CRPP est doté d'un instrument unique au monde pour la caractérisation et l'étude des câbles supraconducteurs à basse température destinés aux aimants requis par les machines à fusion. SULTAN est actuellement l'installation de test de tous les câbles développés pour ITER. La supraconductivité à haute température est également développée pour une utilisation éventuelle dans les amenées de courant d'ITER. Une retombée de

la compétence ainsi acquise a été le développement d'un prototype de câble supraconducteur refroidi à une température proche de celle du néon liquide pour le transport d'énergie, projet soutenu par le gouvernement (par le biais de l'OFEN, du PSEL) et par l'industrie (UMS et KWB) électrique.

Dans un réacteur à fusion, les matériaux de structure s'activent sous le flux des neutrons de fusion. Il est essentiel, pour l'aspect environnemental de la fusion, de disposer de matériaux structurels dont l'activation résiduelle, au bout de quelques dizaines d'années, est suffisamment basse pour pouvoir recycler ces matériaux et éviter ainsi un stockage de longue durée. Le CRPP travaille avec l'industrie suisse (Sulzer Innotec) et ses partenaires européens et mondiaux sur deux familles de matériaux, les aciers ferritiques martensitiques et des alliages de titane, qui ont une faible activation résiduelle. En attendant qu'une source de neutrons de fusion suffisamment intenses soit disponible sur le plan mondial (comme pourrait l'être la source IFMIF), les échantillons provenant de coulées de laboratoire ou industrielles sont irradiés dans le faisceau de protons de 600 MeV du PSI (installation PIReX: Proton IRradiation EXperiment). Dès 2004, l'installation SINQ prendra le relais de PIReX.



Tête d'irradiation des échantillons

Le CRPP est également un centre de compétence dans le domaine de la physique et de la technologie des gyrotrons à très haute fréquence ($f = 100$ GHz), de grande puissance unitaire (0.5 - 1 MW). Il collabore avec des partenaires européens en vue de développer ces tubes pour le chauffage des plasmas de TCV et d'autres machines européennes.

Etude de plasma pour procédé industriel



Le CRPP a entrepris depuis une dizaine d'années une diversification dans le domaine des matériaux en utilisant sa compétence en physique des plasmas. Cette diversification porte sur le développement de procédés utilisables par l'industrie, leur diagnostic et la compréhension des phénomènes. Les activités présentes couvrent divers domaines: dépôt de couches de silicium, formation de couche décoratrice pour l'industrie horlogère, dépôt de diamant sur des outils, de revêtement pour emballage, étude de torches à plasma pour la formation de couche, fabrication de disques compacts. Toutes ces études se font en collaboration avec des industries (Charmilles Technologies, Sulzer-Metco, Tetrapak, Unaxis,...) et des laboratoires européens.

Le CRPP participe également d'une part à l'enseignement de la physique générale, de la physique des plasmas et de la fusion thermonucléaire, et d'autre part à la formation des jeunes chercheurs dans le cadre des travaux de doctorats qui sont effectués au laboratoire sous la direction des professeurs et des scientifiques du Centre. Actuellement environ 25 doctorants, d'onze pays d'origine, étudient au CRPP.

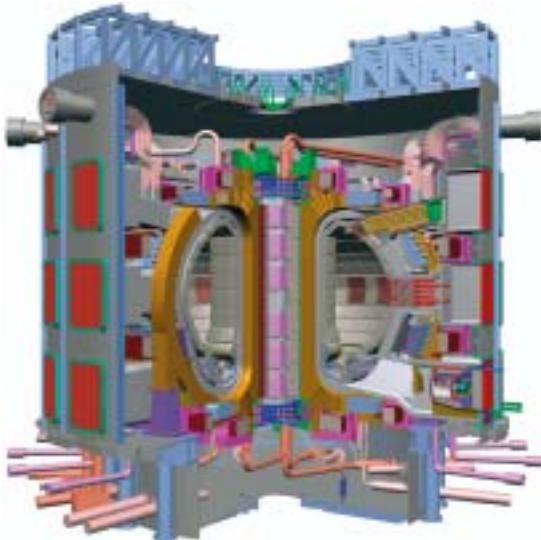
Les relations internationales

JET

A la faveur de sa participation au programme européen de fusion, le CRPP contribue aux expériences qui sont menées sur le grand tokamak européen, JET (Joint European Torus), d'une part en déléguant des membres du laboratoire pour participer à des expériences sur le site et d'autre part à travers des travaux théoriques et numériques qui se font à Lausanne.

Grâce à l'association de la Suisse à l'EURATOM, notre industrie collabore à la construction de plusieurs expériences européennes et au développement de nouveaux appareillages.





Elle s'est montrée compétente et compétitive dans ces domaines de haute technologie.

L'Association Euratom - Confédération Suisse participe aux travaux de conception et d'ingénierie du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), qui regroupe la Fédération de Russie, le Japon et l'Union Européenne (CE + la Suisse + le Canada) et récemment la Chine et les USA. Dans la stratégie de développement de la fusion comme source d'énergie, ITER est considéré comme la seule étape intermédiaire nécessaire entre les installations présentes et un réacteur industriel de démonstration. Dans sa forme actuelle, la construction d'ITER ne dépend plus que d'une décision politique.

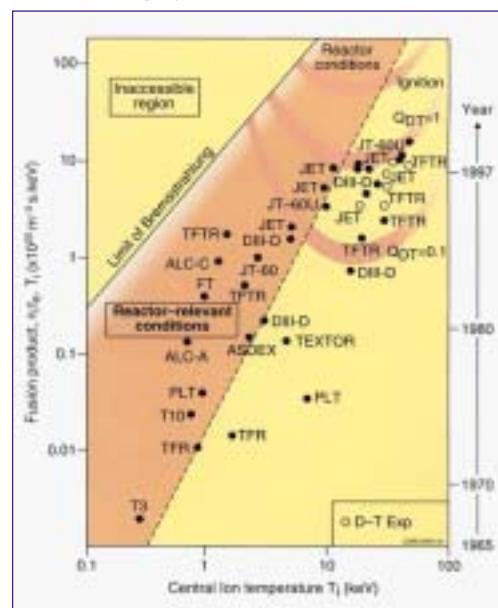
De plus, le laboratoire collabore avec de multiples instituts de recherche à l'étranger et en Suisse. Citons-en quelques uns: KFA (Jülich), FZK (Karlsruhe) et IPP (Garching) en Allemagne, CEA (Cadarache) en France, IST à Lisbonne (Portugal), Université de Cork (Irlande), Royal Inst. of Technology (Stockholm) en Suède, JAERI (Naka) et NIFS au Japon, MIT (Boston) et UCLA (Los Angeles) aux USA, les instituts Kurchatov et Keldysh (Moscou) en Russie, l'UKAEA (Culham) et Imperial Collège (Londres) en G.-B., l'Académie des Sciences (Prague) en République Tchèque, l'ENEA (Frascati) et le Consortium CREATE (Naples) en Italie.

Où en sommes-nous dans la fusion?

Amélioration des performances des tokamaks (1998)

Des progrès importants ont été réalisés dans le domaine de la recherche en fusion durant ces dernières décennies comme le montrent les faits marquants suivants:

- l'obtention d'une puissance de fusion deutérium-tritium importante dans des tokamaks: 10.7 MW durant 0.4 s dans TFTR (USA, 1996), 16.1 MW durant 0.8 s et 4.5 MW durant 5 s (au total environ 23 MJ d'énergie, arrêté seulement pour limiter le nombre de neutrons!) dans le tokamak européen JET (1997), expériences auxquelles le CRPP a participé;
- un facteur d'amplification Q (= puissance de fusion/puissance de chauffage nécessaire pour maintenir la température du plasma) proche de 1 sur JET et une valeur de Q équivalent (réalisé avec du deutérium pur et converti pour un mélange 1/1 deutérium et tritium) d'environ 1.25 sur le tokamak japonais JT-60 U (1998).



Ces résultats, fruits d'une recherche soutenue et ayant une vision à long terme, permettent de considérer avec confiance la réalisation des buts scientifiques et technologiques d'ITER, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses et encourageantes pour la fusion comme source d'énergie inépuisable et respectueuse de l'environnement.

CRPP, avril 2003

**Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**

PPB

CH-1015 Lausanne, Suisse

Tél: ++41-21-693 34 82/87

Fax: ++41-21-693 51 76

<http://crppwww.epfl.ch>