



HAL
open science

IRFM - Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique

Rapport Hcéres

► **To cite this version:**

Rapport d'évaluation d'une entité de recherche. IRFM - Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique. 2011, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - CEA. hceres-02030483

HAL Id: hceres-02030483

<https://hal-hceres.archives-ouvertes.fr/hceres-02030483>

Submitted on 20 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



agence d'évaluation de la recherche
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

Rapport de l'AERES sur
l'unité :

Institut de Recherche sur la Fusion par confinement
Magnétique

sous tutelle des
établissements et organismes :

CEA – Commissariat à l'énergie atomique et aux
énergies alternatives

Mars 2011



agence d'évaluation de la recherche
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

Rapport de l'AERES sur l'unité :

Institut de Recherche sur la Fusion par confinement
Magnétique

sous tutelle des
établissements et organismes :

CEA – Commissariat à l'énergie atomique et aux
énergies alternatives

Le Président de l'AERES

Didier Houssin

Section des unités
de recherche

Le Directeur

Pierre Glorieux

Mars 2011



Unité

Nom de l'unité : Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique

Label demandé : Unité propre du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives/Direction des Sciences de la Matière

Nom du directeur : M. Gabriel MARBACH (assisté par M. Alain BECOULET, M. André GROSMAN et M. Bernard SAOUTIC).

Membres du comité d'experts

Président :

M. Jean-Marcel RAX, Ecole Polytechnique, Université de Paris 11, Faculté des Sciences d'Orsay

Experts :

M. Frank CARRE, Direction de l'Energie Nucléaire, Centre d'Etudes de Saclay

M. Pierre CHIAPPETTA, Université Aix-Marseille 2, Vice-Président de l'Université Aix-Marseille 2

M. Nathaniel FISCH, Université de Princeton, Department of Astrophysical Sciences et Princeton Plasma Physics Laboratory, USA

M. Carlos HIDALGO, Université de Madrid, Laboratorio Nacional de Fusion, Espagne

M. Alain POCHEAU, Université Aix-Marseille 1, Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre

M. Philippe REBOURGEARD, Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers, Direction des Sciences de la Matière, CEA Saclay

M. Pascal TIXADOR, Institut National Polytechnique de Grenoble G-INP, Institut Neel et G2Elab

M. Friedrich WAGNER, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik de Greifswald, Allemagne

Représentants présents lors de la visite

Déléguée Scientifique représentant l'AERES :

Mme Anne-Marie CAZABAT

Représentante des établissements et Organismes tutelle de l'unité :

Mme Patricia CHOMAZ, CEA, Direction des Sciences de la Matière, Centre d'Etudes de Saclay



Rapport

1 • Introduction

- Déroulement des quatre demi-journées :

Le Comité d'Evaluation de l'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM) s'est réuni dans les locaux de l'Institut au Centre d'Etudes de Cadarache : (i) le mardi 29 mars de 11 h à 18h, (ii) le mercredi 30 mars de 9h à 18h 30 et (iii) le jeudi 31 mars de 8h 30 à 12h 30.

Ont assisté à l'intégralité des présentations, visites, auditions et délibérations : Frank CARRE, Directeur Scientifique de la Direction de l'Energie Nucléaire, Pierre CHIAPPETTA, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II, Nathaniel FISCH, Professeur à l'Université de Princeton, Carlos HIDALGO, Professeur à l'Université de Madrid, Alain POCHEAU, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille I, Jean-Marcel RAX, Professeur à l'Université de Paris XI, Philippe REBOURGEARD, Directeur Adjoint de l'Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers, Pascal TIXADOR, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble et Friedrich WAGNER, Professeur au Max-Planck-Institut für Plasmaphysik de Greifswald.

L'enchaînement des présentations, visites, auditions et délibérations, prévues à l'ordre du jour, a été respecté et les volumes horaires ont été adaptés à l'importance des points abordés.

Les rapports élaborés par l'institut ((i) le rapport d'activité, (ii) le rapport prospectif et (iii) l'annexe bibliographique), les exposés du directeur et des responsables des différents services et groupes, ainsi que les échanges avec plusieurs agents dans le cadre de l'audition du Conseil d'Unité IRFM, ont permis au comité de développer une vision complète du bilan, de l'activité passée et des projets futurs de l'Institut.

La matinée du 29 mars a débuté par l'audition de la direction de l'IRFM. Durant ces présentations, le bilan des activités scientifiques et technologiques, la structuration de ces activités en trois services et onze groupes, le positionnement des programmes ainsi que les perspectives de l'Institut ont été présentés.

Les objectifs scientifiques et techniques (ST1, ST2, ST3 et ST4) ainsi que les modalités gestionnaires et opérationnelles (M1, M2 et M3) ont été clairement identifiés et une analyse détaillée a été offerte au comité. Les responsables des services ont ensuite présenté leurs missions, argumenté leurs bilans et précisé les perspectives de développement de leurs activités.

Le comité a noté la remarquable articulation interne des différentes activités ainsi que le haut niveau d'intégrations régionale, nationale, européenne et mondiale des activités de l'IRFM.

La matinée du 30 mars a permis de partager un certain nombre d'analyses et d'interrogations avec le Directeur des Sciences de la Matière du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives qui a souligné la richesse des compétences réunies au sein de l'IRFM ainsi que la reconnaissance internationale, au niveau de la physique, de la technologie et du développement, dont jouit l'Institut; richesse et reconnaissance issues d'une longue tradition d'excellence dont la préservation constitue une garantie de succès à long terme et une volonté clairement affichée de la Direction des Sciences de la Matière.

Le comité a insisté sur le renouvellement du contexte international au regard du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) et a noté les engagements et le soutien institutionnel de la DSM aux côtés de l'IRFM pour participer pleinement à cette nouvelle dynamique mondiale qui offre une visibilité accrue et ouvre des champs d'études nouveaux aux équipes de l'IRFM. La visite des installations a permis de mesurer la qualité des recherches expérimentales et technologiques développées au sein de l'Institut. Le comité a été sensible et a pris la mesure de la complexité de la maintenance et de l'opération d'un tokamak supraconducteur. Le comité a apprécié la pertinence de la structuration de l'Institut en trois services et onze groupes couvrant les aspects physique, technologique et opérations, structuration qui garantit, au quotidien, une communication transverse efficace.



L'après-midi du 30 mars a été consacrée aux discussions avec les équipes dans le cadre de trois sessions parallèles de présentations. Ces échanges ont démontré l'existence d'une véritable culture scientifique et technique commune et d'une solide conscience collective qui constituent l'une des clés du succès à long terme des opérations de recherche de l'Institut. Enfin, en complément du rapport d'activité, le comité a souhaité une présentation plus approfondie du projet WEST.

En fin de matinée, le 31 mars, le comité s'est réuni à huis clos afin d'analyser le bilan, la structure, les projets et la stratégie de l'Institut et d'élaborer un ensemble de recommandations issues des discussions, présentations et visites au cours de ces quatre demi-journées.

- **Historique et localisation géographique de l'unité et description synthétique de son domaine et de ses activités :**

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique étant, en première approximation, la combinaison d'une rotation autour des lignes de champ et d'une translation le long des lignes de champ, différentes configurations magnétiques ont été étudiées pour confiner et contrôler les plasmas chauds et, en l'état actuel des connaissances scientifiques et réalisations techniques, les plasmas confinés et contrôlés au sein des configurations tokamak présentent les caractéristiques les plus proches des conditions définies par le critère d'allumage thermonucléaire.

Un plasma de tokamak est un tore d'hydrogène totalement ionisé et magnétisé dont les lignes de champ magnétique sont des hélices tangentes à un ensemble de tores emboîtés appelés surfaces magnétiques. Un tokamak ne constitue pas un piège parfait et il ne doit pas être un piège parfait, car l'extraction de la puissance thermonucléaire déposée au sein du plasma par les particules alpha, ainsi que celle des cendres d'hélium, doivent être possibles pour assurer un fonctionnement en régime continu.

L'identification théorique des remarquables propriétés de confinement d'une configuration tokamak remonte aux travaux fondateurs d'Igor Tamm et André Sakharov au milieu des années cinquante en Union Soviétique. Suivant ce travail, un vaste programme de recherches expérimentales fut mis sur pied à l'Institut Kurchatov de Moscou par L. Artsimovich, accompagné par un programme théorique sous l'autorité de M. Leontovitch. Les premières expériences se heurtèrent aux problèmes des impuretés et de la stabilité MHD. Lors de la conférence IAEA de Genève en 1958 Shafranov formula les conditions nécessaires d'équilibre et de stabilité et les expériences T2, T3, TM2 confirmèrent le bien fondé de la stabilité relative de la configuration tokamak. En 1968, l'annonce des performances de la machine T3 de l'Institut Kurchatov orienta définitivement les efforts de recherches de nombreux pays sur la voie des tokamaks.

Cette orientation historique se traduisit en France par la construction de la machine TFR au Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay aux Roses et des machines WEGA et PETULA au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble. Au début des années quatre-vingt le tokamak TFR permit de valider avec succès les schémas du chauffage cyclotronique ionique et le tokamak PETULA confirma le mécanisme d'absorption unidirectionnelle d'impulsion par résonance Landau nécessaire pour la génération du courant toroidal (15 mégaAmpère dans ITER) en régime continu.

Fort de ces succès et conscient de la nécessité d'en assurer le développement et la valorisation, le Commissariat à l'Energie Atomique décida de transférer l'ensemble de ses activités de recherches relatives au confinement thermonucléaire magnétique sur le site de Cadarache autour du Tokamak Tore Supra (TS).

Le choix, original et audacieux, de la génération du champ toroidal par des bobines supraconductrices (et de la génération du champ poloidal par absorption Landau dans certaines décharges), préfigurant les contraintes d'un réacteur et dicté par la volonté d'explorer la physique et la technologie des décharges longues, s'appuyait sur la solide tradition de cryomagnétisme développée au sein du Commissariat à l'Energie Atomique ainsi que sur les compétences construites autour des expériences TFR et PETULA. Tore Supra fut ainsi la première machine de grande taille possédant un système de refroidissement à hélium superfluide à pression atmosphérique (bain « Claudet ») et le retour sur expérience de cette réalisation innovante fut déterminante pour le LHC qui utilise la même technologie cryogénique

La qualité remarquable des performances du tokamak TS, dont certaines constituent des records mondiaux à ce jour inégalés, confirme, a posteriori, la pertinence du choix de la physique des décharges longues.

La signature, le 21 novembre 2006 à Paris, de l'accord international ITER, structurant les efforts de recherche de l'Europe, des Etats-Unis, de la Chine, de l'Inde, de la Russie, de la Corée du Sud et du Japon, marque



l'aboutissement de cinquante années de recherches sur la fusion thermonucléaire dans les tokamaks et le lancement du premier projet de coopération scientifique à l'échelle mondiale.

Le choix du site de Cadarache pour la construction du tokamak ITER : (i) constitue une reconnaissance de la tradition d'excellence Française dans le domaine de la physique et de la technologie des tokamaks, tradition d'excellence qui avait déjà donné sa mesure internationale à travers les performances de la machine européenne JET et s'est trouvée confirmée par les succès de la machine TS ; mais, (ii) pose le problème complexe du développement, de l'intégration et de l'articulation d'un programme de recherche à vocation nationale, de la participation à un programme de recherche européen et de la participation à un programme de recherche mondial au sein de l'IRFM, au voisinage du centre de référence mondial dans le domaine des tokamaks.

Le niveau d'intégration actuel des activités de l'institut et la qualité de sa participation et de ses contributions dans les cadres de : (i) IO (ITER Organization), (ii) F4E (Fusion for Energy), (iii) EFDA (European Fusion Development Agreement), (iv) FRFCM (Fédération de Recherche sur la Fusion par Confinement Magnétique), (v) MSF (Master National Sciences de la Fusion) constituent de solides garanties de succès pour l'avenir et permettent d'aborder cette nouvelle phase de développement de l'IRFM avec confiance. Les quatre axes de développement des objectifs, ST1, ST2, ST3 et ST4 offrent une réponse, jugée pertinente par le comité, à la conjugaison dialectique entre enjeux nationaux et internationaux.

- **Equipe de Direction :**

Directeur : Gabriel MARBACH assisté de Alain BECOULET, André GROSMAN et Bernard SAOUTIC.

La responsabilité du *Service Chauffage et Confinement du Plasma* (SCCP) est assurée par X. LITAUDON, celle du *Service Intégration Plasma-Paroi* (SIPP) par M. FAURY et celle du *Service Tokamak Exploitation et Pilotage* (STEP) par P. BAYETTI.

La responsabilité du *Groupe Support aux Expériences et Modélisation* (GSEM) est assurée par F. IMBEAUX, celle du *Groupe Transport Turbulence et Magnétohydrodynamique* (GTTM) par R. SABOT, celle du *Groupe Chauffage et Génération de Courant Haute Fréquence* (GCHF) par R. MAGNE et celle du *Groupe Injection de Neutres, Distribution Electrique et Alimentations* (GIDEA) par O. BAULAIGUE.

La responsabilité du *Groupe Physique du Plasma de Bord* (GPPB) est assurée par J. BUCALOSSI, celle du *Groupe Conception et Exploitation des Composants Face au Plasma* (GCECFP) par T. LOARER et celle du *Groupe Ingénierie des Projets Mécaniques* (GIPM) par L. DOCEUL.

La responsabilité du *Groupe Pilotage, Asservissement et Scénarios* (GPAS) est assuré par S. BREMOND, celle du *Groupe Assemblage, Réfrigération et Vide* (GARV) par F. SAMAILLE, celle du *Groupe Informatique, Contrôle-Commande et Acquisition* (GICA) par L. ALLEGRETTI et celle du *Groupe Cryomagnétisme* (GCRY) par D. CIAZYNSKY.

- **Effectifs de l'Unité :**

Les effectifs de l'IRFM s'élèvent à :

- 279 agents permanents, dont ;
- 275 agents du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, dont 170 *Ingénieurs*
- 4 agents *Euratom*.
- 23 doctorants et 11 Post-Docs participent aussi aux programmes de recherche et développement de l'Institut.
- 25 Chercheurs sont habilités à diriger les recherches.



2 • Appréciation sur l'unité

- Avis global sur l'Unité :

L'activité de l'Institut se déploie dans le cadre de trois services et de onze groupes et couvre l'ensemble des problématiques du confinement, du chauffage et du contrôle des plasmas thermonucléaires.

Le comité a noté la grande diversité des thèmes abordés, diversité néanmoins bien maîtrisée dans le cadre d'une stratégie globale et à travers une structuration pertinente au regard (i) des disciplines et catégories classiques que sont physique et technologie, contrôle et diagnostic, chauffage et confinement, mais (ii) répondant aussi aux nécessités quotidiennes de l'opération et de la maintenance d'une installation de très haute technologie.

L'Institut, héritier de la tradition d'excellence du Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée (DRFC), a construit au cours des ans une expertise unique et reconnue sur les problématiques du régime continu des décharges tokamak. Cette expertise, incontournable dans la perspective du projet ITER, se décline, entre autres, dans les domaines de l'injection/extraction de puissance, de la génération non-inductive de courant, de la physique et de la technologie des composants face aux plasmas (PFC), du cryomagnétisme appliqué aux tokamaks et de la simulation des décharges, qu'elles soient de nature fondamentale ou intégrée.

Historiquement, l'IRFM (DRFC) fut le premier laboratoire ayant abordé de front l'ensemble des problématiques du régime continu et il a su développer une vision globale des problèmes ainsi qu'une capacité opérationnelle qui constitue désormais le socle expérimental et technologique à partir duquel doivent être élaborées les réponses aux enjeux du contrôle d'un plasma thermonucléaire en régime de combustion quasi-continue dans la perspective des enjeux d'ITER.

L'IRFM est actuellement l'un des laboratoires de référence au niveau mondial sur les problématiques physiques et technologiques des décharges longues, sa production scientifique a été jugée abondante et de qualité par le comité, la vie du laboratoire nous est apparue à la fois sereine en terme de gouvernance et collective en terme d'animation.

Un juste équilibre entre prise de risques et continuité a été identifié après une large réflexion prospective, interne et externe à l'Institut, réflexion rendue nécessaire par la venue du projet ITER. Les quatre axes stratégiques de développement des activités de l'IRFM : ST1 (participation à la réalisation d'ITER et à l'approche élargie), ST2 (préparation de la nouvelle génération de machines), ST3 (convergence des approches phénoménologiques et fondamentales sur les problèmes de physiques critiques) et ST4 (études de concept et développement de l'expertise pour la conception d'un réacteur) ont été jugés cohérents et adaptés à la situation spécifique de l'Institut. La stratégie scientifique proposée par la direction offre un avenir en phase avec les enjeux de la discipline et en conformité avec les politiques nationale et internationale de recherche dans le domaine de l'énergie thermonucléaire. L'IRFM est une unité de très haut niveau, sa visibilité internationale est remarquable, son positionnement international dans le domaine des décharges longues est incontournable et résulte en un impact majeur sur le développement de la discipline.

- Points forts et opportunités :

L'IRFM a su maintenir et amplifier la tradition d'excellence française dans le domaine de la physique et de la technologie des tokamaks, apportant ces dernières années nombre de contributions originales à ce domaine. Le comité a noté les avancées théoriques remarquables dans le domaine de la simulation des décharges tokamaks, de leurs instabilités et de leurs activités turbulentes.

Le code gyrocinétique pentadimensionnel GYSELA offre un outil d'analyse efficace de la relation complexe entre flux, transport, instabilité et turbulence, permettant ainsi une compréhension des mécanismes de confinement qui ont jusqu'à présent inhibé l'accès à l'allumage dans les grands tokamaks, accès pourtant garanti par les anciennes prédictions collisionnelles néo-classiques.

Le code magnétohydrodynamique JOREK permet l'étude de la dynamique à plus grande échelle et est particulièrement adapté à l'étude des modes ELM dont la maîtrise constitue l'un des enjeux majeurs du programme fusion. Le code LUKE intègre l'ensemble des connaissances physiques relatives à la génération de courant non-inductive et conjugue astucieusement les échelles cinétique et macroscopique pour offrir des prédictions qui font référence dans le domaine.



Ces trois outils sont reconnus et appréciés au niveau international comme l'est la suite intégrée CRONOS dont l'ambition est d'offrir un outil de prédiction et d'interprétation modélisant l'ensemble des processus accessibles à l'expérience et intégrant l'ensemble des connaissances acquises à ce jour sur la dynamique d'une décharge tokamak, stabilité, transport, propagation, chauffage. Cette modélisation intégrée a permis à l'IRFM de saisir l'opportunité de se positionner comme un acteur majeur de l'initiative européenne de modélisation au sein de l'EFDA (European Fusion Development Agreement).

Les succès de l'IRFM ces dernières années ne se restreignent pas seulement à l'approche théorique, les domaines expérimentaux et technologiques constituent aussi de solides piliers soutenant la réputation internationale de l'institut ; le comité a apprécié à ce titre le juste équilibre entre expérience, modélisation et développement technologique qui prévaut au sein de l'institut. Cet équilibre est l'un des points forts de l'Institut et devra être préservé à l'avenir car il constitue la garantie de l'élaboration d'une culture scientifique et technique de haut niveau, en prise avec la réalité et en phase avec les potentialités émergeant des acquis. Les capacités uniques du tokamak TS en termes de décharges longues ont permis la construction et la consolidation de plusieurs points forts expérimentaux et technologiques.

Le contrôle et la compréhension de décharges dont le champ poloidal est entretenu par génération de courant non-inductive a permis de découvrir un nouveau régime de décharges longues ouvrant ainsi des perspectives quant à la complexité des couplages entre profils de courant, de température et transport turbulent. Il convient de mentionner que TS fut le premier grand tokamak supraconducteur et que la maintenance et l'amélioration, durant plus de 25 ans, du système cryomagnétique constitue un retour de développement unique au monde sur lequel l'ensemble des expériences supraconductrices s'appuie actuellement, en particulier JT-60SA, W7-X et ITER.

Au delà de la spécificité et des succès du système cryomagnétique supraconducteur, TS est le seul tokamak, au niveau mondial, dont l'ensemble des composants face au plasma (PFC) est activement refroidi. Le développement de composants PFC aptes à soutenir des flux thermiques de l'ordre de 10 mégawatt par mètre carré, leur industrialisation et leur intégration constituent l'un des points forts majeur de l'activité de l'institut ces dernières années.

Les expertises uniques sur les systèmes supraconducteurs, les composants PFC et les systèmes d'extraction de puissance ont trouvé leurs confirmations et leurs accomplissements dans l'établissement du record mondial en termes de durée et d'énergie injectée dans un grand tokamak : une décharge de 6 minutes et demi soutenue par une énergie de 1 gigajoule constitue, à ce jour, une performance demeurée inégalée dont la pertinence au regard du cahier des charges d'un réacteur continu constitue l'un des points forts des résultats de l'IRFM.

Cette performance a permis à l'Institut de se positionner comme le pôle d'expertise mondial pour les scénarios de décharges longues et toutes les problématiques matériaux ouvertes par l'accès à ce régime : rétention, érosion, re-déposition... L'intégration des activités amont de simulations et prédictions, et des activités aval de développement et maintenance des PFC, autour de l'expérience et de ses contraintes d'opération, a démontré sa pleine efficacité dans le cadre de l'obtention de cette performance unique.

La physique et la technologie des chauffages radiofréquence et micro-ondes constituent aussi l'un des points forts de l'IRFM. Les succès du tokamak TFR, à Fontenay aux Roses, dans le domaine du chauffage cyclotronique ionique (ICRH) et du tokamak PETULA, à Grenoble, dans le domaine de la génération de courant par effet Landau associé à l'onde hybride basse (LHCD) positionnèrent, en leurs temps, la France comme leader du chauffage par ondes des tokamaks. L'IRFM est un digne héritier de cette tradition d'excellence et les résultats obtenus récemment en terme de performances plasma mais aussi en terme d'innovation au niveau de la conception et de la construction de structures de couplage, antenne inductive (ICRH) et ouvertures multijonctions (LHCD), ont été appréciés et reconnus au niveau international, entre autres à travers la mission de conception du coupleur LHCD relevant pour ITER. Ces points forts dans le domaine des composants PFC et des systèmes radiofréquence et micro-ondes constituent de remarquables opportunités de collaboration avec les industries pour l'élaboration des matériaux et structures et la fourniture des générateurs, que ce soient de simples tétrodes de puissance ou des klystrons et gyrotrons dédiés.

Les points forts que nous venons d'analyser ne doivent pas occulter l'expertise unique des équipes de l'IRFM dans le domaine de l'instrumentation des diagnostics pour les plasmas thermonucléaires. La diversité des questions abordées face au problème de la mesure physique sur une décharge tokamak, et la qualité des réponses apportées à travers l'ingéniosité des dispositifs et la fiabilité de leurs principes, constituent aussi un point fort de l'IRFM.



La diversité et l'originalité des problèmes de physique et de technologie, la richesse des compétences des équipes de recherche et la qualité des collaborations internationales font de l'IRFM un lieu idéal de formation par la recherche.

L'implication exemplaire de l'Institut dans ces tâches de formation est un point fort essentiel car il conditionne la continuité de la transmission des savoirs et savoir-faire, continuité présentant un caractère impérieux au regard : (i) des enjeux du projet ITER, (ii) des perspectives énergétiques à l'horizon 2050 et (iii) de la relative désaffection des étudiants français pour les filières scientifiques ces dernières années.

Avec 23 doctorants et 11 post doc, l'IRFM forme un vivier de jeunes chercheurs qui permettront de renouveler les équipes fusion en France, en Europe et dans le monde. Au delà de la formation par la recherche, la formation dans le cadre de stages et l'intervention à travers des séminaires et visites au niveau des formations initiales (collèges, lycées, licences, écoles) demeure un souci permanent des agents de l'IRFM.

L'implication de plusieurs agents de l'Institut au sein de la structure de formation nationale que constitue le Master National Sciences de la Fusion permet d'offrir aux étudiants au niveau M2 des enseignements en phase avec les acquis récents de la discipline.

Enfin, le comité a été sensible à la multiplicité et à la qualité des collaborations nationales et internationales qui constituent un point fort majeur de l'Institut ; au niveau international mentionnons le fait que : (i) 14 agents ont ainsi collaboré aux activités de l'unité de support rapprochée (CSU) de l'EFDA (l'un des responsables est issu de l'Institut), (ii) 8 ingénieurs ont participé activement à la construction de W7-X et (iii) une implication croissante dans le projet IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility).

L'ensemble de ces points forts et opportunités offre une convergence vers la physique et la technologie des décharges longues, convergence issue de la cohérence de la politique scientifique de l'IRFM. Cette convergence constitue l'un des atouts majeurs du projet WEST dont nous développerons l'analyse dans le cadre des recommandations.

- Points à améliorer et risques :

Dans les prochaines années l'IRFM doit assurer une transition de ses activités au delà du périmètre actuel dédié à la physique des plasmas, la technologie des PFC, des antennes, du cryomagnétisme, la maintenance d'une installation de haute technologie... L'enjeu de cette transition est l'articulation entre, d'une part : (i) une activité collaborative centrée sur l'analyse de scénario, l'étude de composants, la réalisation de systèmes, le support modélisation dans le cadre du programme ITER et, d'autre part : (ii) le maintien d'un programme propre, à long terme, orienté vers les enjeux non directement accessibles au programme ITER, valorisant les savoirs et savoir-faire de l'Institut, et permettant d'apporter des réponses définitives quant à la faisabilité et les potentialités de la fusion comme source d'énergie commerciale.

Cette transition historique va de pair avec un repositionnement géographique des compétences mondiales sur les problématiques des décharges longues à travers la construction des tokamaks KSTAR en Corée et EAST en Chine. L'unicité et la spécificité des capacités de Tore Supra seront ainsi remises en cause, dans un premier temps en termes de système supraconducteur, puis dans un deuxième temps en termes de PFC activement refroidi.

Dans une perspective géographique et historique plus vaste, ce sont les prodromes d'un basculement de leadership de l'Europe vers l'Asie, dans le domaine de la fusion, qu'il convient d'identifier ; en effet, les machines EAST en Chine, KSTAR en Corée, SST-1 en Inde, et JT-60 SA au Japon offriront à ce continent, dans quelques années, des installations scientifiques et technologiques qui prendront nécessairement le relais des machines Européennes et Américaines. L'émergence de cette concurrence scientifique, puissante, organisée et déterminée, (i) confirme la pertinence des choix stratégiques de TS, mais (ii) constitue un risque majeur qui doit être intégré dans la définition de la stratégie à long terme.

Le rapport *Fusion Facilities Review Panel* élaboré en octobre 2008 n'a pas directement inclus TS dans le premier cercle des machines relevantes pour ITER. Cette analyse, ajoutée à une forte baisse de la part européenne du budget en support général passant de 10 megaeuro en 2008 à 6 megaeuro en 2011, met ainsi en péril la possibilité d'un certain nombre de programmes expérimentaux dans le cadre du 8th *European R&D Framework Program*.



Le projet West constitue une réponse volontaire, responsable et scientifiquement opportune à l'analyse du *Fusion Facilities Review Panel*. Il offre la possibilité d'étudier et d'analyser l'ensemble des questions relatives à la fabrication et à l'opération d'un divertor tungstène de conception semblable à celui prévu sur ITER et porte ainsi un fort potentiel d'innovations. En janvier 2011 un panel international a approuvé les choix physiques et technologiques et souligné la nécessité de minimiser les risques liés à la fabrication puis à l'opération d'un tel dispositif directement sur ITER à travers la validation préliminaire dans une machine telle que TS. Au delà de l'impact stratégique et de la minimisation des risques, la création d'un point X pour ce nouveau divertor permettrait à TS d'explorer plus avant la physique des modes présentant un confinement amélioré, intégrant ainsi le périmètre des machines offrant des régimes de confinement similaires à ceux attendus sur ITER ; dans cette perspective une articulation stratégique des axes ST1 et ST3 est nécessaire.

Les risques résultant du caractère critique de la transition entre le fonctionnement des 20 dernières années et celui des 20 prochaines années n'ont échappé ni au comité, ni à la direction, ni aux agents rencontrés lors de l'audition du conseil d'unité de l'IRFM.

En l'état actuel de leurs fonctionnements, les mécanismes d'appels d'offres F4E pour les fournitures de composants et systèmes pour ITER offrent une perspective de développement de l'activité faible. Le niveau élevé de segmentation des appels ne permet pas d'établir des plannings à moyen terme et de construire une expertise spécifique, donc stratégique au regard de l'environnement compétitif de la communauté tokamak.

Ces mécanismes offrent une faible opportunité pour la mise en valeur des compétences intégrées développées au sein de l'IRFM et amplifient ainsi la difficulté de maintien du niveau d'expertise actuel. L'analyse SWOT proposée dans les rapports et les présentations révèle la nécessité d'amplifier les relations industrielles.

Malgré la difficulté associée à la segmentation des appels d'offres, l'IRFM est impliqué à un haut niveau au sein des activités de l'approche élargie. La prochaine étape pour la participation de l'IRFM au projet ITER devra valoriser le rôle de leader qu'occupe l'Institut au sein de l'initiative européenne Plasma Integrated Modelling, mais cette étape ne sera effective que lorsque le comité de programme d'ITER sera pleinement opérationnel sur la base de règles de fonctionnement clairement définies. L'IRFM doit être prêt à saisir cette opportunité et un déficit d'engagement lié à la complexité institutionnelle d'un projet mondial constitue aussi l'un des risques de la stratégie future.

- **Recommandations :**

Le Comité d'évaluation, fort de sa vision de la discipline et soucieux de la cohérence des choix au regard des politiques scientifiques nationale, européenne et mondiale dans le domaine de la fusion magnétique, approuve les grandes orientations ST1 (participation à la réalisation d'ITER et à l'approche élargie), ST2 (préparation de la nouvelle génération de machines), ST3 (convergence des approches phénoménologiques et fondamentales sur les problèmes de physique critiques) et ST4 (études de concept et développement de l'expertise pour la conception d'un réacteur).

A travers ces orientations, l'IRFM a répondu, avec volontarisme, aux enjeux créés par la signature de l'accord ITER.

La réflexion sur les modalités d'ajustement des objectifs ST1, ST2, ST3 et ST4 à la réalité institutionnelle doit être amplifiée, en particulier sur les mécanismes de préservation des acquis scientifiques et techniques de ces 20 dernières années sur la physique et la technologie des décharges longues.

Les équipes de l'IRFM doivent amplifier l'effort de leadership au sein de l'initiative européenne *European Integrated Tokamak Modelling Task Force* et ce rôle de porteur de référence au sein de la communauté de modélisation intégrée européenne doit préfigurer une ambition plus vaste pour la mise en place d'une initiative de conception d'un réacteur commercial.

Ce type d'étude de faisabilité, multidisciplinaire, intégrant, au delà de la physique et de la technologie, toutes les contraintes industrielles et commerciales, (i) permettrait de capitaliser l'immense savoir-faire des équipes de l'IRFM, (ii) s'inscrit dans la continuité de la modélisation physique, (iii) s'appuierait sur les compétences technologiques des différentes directions du Commissariat à l'Energie Atomique, en particulier pour les matériaux, la neutronique et la thermohydraulique. La possibilité (volonté) d'un positionnement porteur au sein d'une initiative Européenne sur la conception d'un réacteur commercial doit donc entrer dans le champ des réflexions actuelles. Les équipes de l'IRFM ont su développer des compétences uniques et reconnues en



physique et technologie des tokamaks et l'ensemble de ces expertises trouvera dans le contexte du développement d'une vaste initiative sur la faisabilité d'un réacteur commercial un champ élargi de questionnement et une source renouvelée de problématiques.

Au delà de cette initiative de conception, afin de préserver la position de l'IRFM, au niveau européen et au niveau mondial, il est impératif de maintenir l'activité expérimentale sur Tore Supra ainsi que l'activité des bancs tests technologiques pour développer des approches combinées, physique et technologique, pour ITER et pour l'étape post ITER.

Une nation comme la France, qui peut s'enorgueillir d'avoir formé dans ses écoles et laboratoires les concepteurs des machines TFR, JET, TS et ITER et dont la communauté de physique et technologie des tokamaks est reconnue comme l'une des toutes premières au niveau mondial, ne peut espérer entretenir une vie scientifique collective au sein de la communauté fusion magnétique nationale sans une machine active ; en effet, au-delà de la production de résultats originaux et pertinents, les grands tokamaks ont aussi une fonction symbolique en terme d'identité, ils sont les éléments fédérateurs au sein des communautés nationales comme le prouve un rapide survol des principaux pays développant une activité de recherche dans le domaine de la fusion magnétique : au niveau international les acteurs majeurs du domaine sont essentiellement les communautés fédérées autour d'installations expérimentales actives et conséquentes.

La capacité opérationnelle et les expertises physique et technologique actuelles de l'IRFM offrent un cadre adéquat et cohérent pour le programme WEST. Le comité recommande donc la construction d'un divertor tungstène, un tel programme permettant : (i) pour TS d'accéder aux régimes de confinements améliorés avec point X, augmentant ainsi la pertinence des études sur la turbulence, (ii) pour ITER de minimiser grandement les risques, inhérents et importants, liés à la construction d'un système de haute technologie sans validation initiale sur prototype et (iii) pour le Commissariat à l'Energie Atomique de développer un programme de hautes technologies clefs dans le domaine de l'énergie thermonucléaire et présentant un fort potentiel d'innovation.

Convaincu de la qualité du projet WEST et conscient des risques, pour TS et pour ITER, que constituerait l'impossibilité de le mener à terme, le comité approuve et soutient cette orientation stratégique et recommande que soient rapidement identifiés les partenaires internationaux potentiels de ce projet et que les modalités des partenariats soient ensuite rapidement explorées.

Trois conditions président à la mise en place de ce programme innovant : (i) la construction et la dotation d'un budget offrant une marge opérationnelle à la hauteur des enjeux du projet, (ii) l'identification des compétences internes au niveau de la physique et de la technologie, et (iii) l'articulation de ces compétences internes avec les compétences industrielles externes nécessaires à l'achèvement de ce programme.

Un tel projet permettrait d'offrir des conditions de créativité renouvelées et le comité a noté le très fort engagement collectif des équipes de l'IRFM derrière ce projet, engagement qui constitue une solide garantie de succès ; le comité a aussi été impressionné par la détermination de l'équipe de direction pour ce projet.

Le comité recommande le maintien de la structure actuelle d'organisation des activités en trois services où sont intégrées transversalement théorie, expérience et technologie ; mais, un ajustement des savoirs et des expertises au regard du positionnement par rapport à ITER et par rapport au programme européen peut s'avérer nécessaire ; dans ce cas, un principe d'action s'articulera autour d'une délimitation critique du périmètre d'activité des groupes reposant sur une discrimination entre (i) valorisation à court terme, (ii) prestations de services contractuelles et (iii) programmes d'études sur le long terme.

Compte tenu du caractère critique de la transition actuelle, le conseil scientifique de l'IRFM, qui veille de manière récurrente à la cohérence de l'engagement d'objectifs de l'institut, est invité à s'impliquer davantage, en termes de réflexions et de conseils, dans l'analyse du positionnement stratégique par rapport à ITER et dans le cadre du programme européen.

Enfin, les choix issus de la réflexion de la direction et des différents conseils ne doivent pas être exclusivement orientés par ces perspectives d'intégration dans des grands projets ou de larges initiatives, mais aussi par la curiosité scientifique des chercheurs et le goût de l'innovation des ingénieurs et techniciens, ainsi que par leurs volontés renouvelées de travailler ensemble ; ces deux éléments, individuels et collectifs, sont les clés du succès de l'IRFM, au même titre que l'originalité des résultats, la spécificité des expertises ou la pertinence du positionnement international.



- **Données de production :**

Parmi les 164 ingénieurs travaillant au sein de l'institut, 89 relèvent de la catégorie publiant au regard des critères AERES définissant les chercheurs et enseignants chercheurs produisant en recherche et valorisation.

Une analyse plus fine révèle que 63 agents peuvent être considérés comme publiants réguliers et 26 occasionnels. Les agents impliqués dans les tâches de management et de maintenance étant, de par leurs missions statutaires, moins productifs que les agents impliqués dans le développement des programmes de recherches.

Sur la période 2006-2009 le nombre total de publications s'élève à 744, présentant ainsi une moyenne de 2 publications par an et par agent pour les 89 publiants de l'Institut, ou de 3 publications par an et par agent pour les 63 publiants réguliers.

Plus de 60% des articles de l'IRFM sont publiés dans les 6 revues internationales majeures de la discipline : (i) Nuclear Fusion (95), (ii) Plasma Physics and Controlled Fusion (70), Physics of Plasmas (49), Journal of Nuclear Materials (94), Fusion Engineering and Design (106) et Fusion Sciences and Technologies (39). Cette spécialisation n'excluant pas les soumissions aux revues plus généralistes, on notera en particulier une moyenne de 4 articles par an dans la revue Physical Review Letters.

3 • **Appréciations détaillées :**

- **Appréciation sur la qualité scientifique et la production :**

- **Pertinence et originalité des recherches, qualité et impact des résultats :**

Les programmes de recherches en physique et technologie des plasmas thermonucléaires confinés par champs magnétiques se heurtent actuellement à quatre grands problèmes qui conditionnent la mise au point d'un réacteur techniquement fiable et économiquement viable. Ces quatre questions-clés, physiques et technologiques, sont : (i) le contrôle de l'injection/extraction de puissance et la compréhension de l'interaction plasma-paroi en régime quasi-continu, (ii) la compréhension et le contrôle de la turbulence, (iii) la génération et le contrôle du courant en régime continu et (iv) la maîtrise de la dynamique des populations suprathermiques en régime thermonucléaire. En effet, dans un réacteur tokamak en régime de combustion continue : (i) l'injection/extraction de puissance à la périphérie du plasma doit s'effectuer en respectant de sévères contraintes technologiques de tenue des matériaux aux flux intenses de rayonnements et particules, (ii) la turbulence et le transport doivent être diagnostiqués et contrôlés en temps réel et maintenus à un niveau compatible avec l'entretien de la combustion thermonucléaire, (iii) quelques dizaines de millions d'ampères doivent être entretenus en régime continu afin d'assurer le confinement orbital et l'accès à des profils de courants optimaux et (iv) la population de particules alpha d'origine thermonucléaire et les ions suprathermiques doivent être confinés, diagnostiqués et contrôlés afin d'assurer une combustion et un pilotage efficaces.

La conception d'un réacteur thermonucléaire, techniquement fiable et économiquement viable, passe donc par l'étude approfondie des processus d'interaction plasma-paroi, le développement de matériaux et procédés remplissant le cahier des charges d'un régime de combustion continu, par l'analyse des mécanismes d'instabilités et de turbulence, ainsi que par l'identification de nouveaux procédés de diagnostic et de contrôle du courant et des populations suprathermiques à l'origine de la réactivité thermonucléaire. C'est l'achèvement de ce vaste programme de physique et de technologie qui constitue l'objectif des programmes de recherches actuels des laboratoires de physique des tokamaks en général et de l'IRFM en particulier.

La pertinence des activités de l'IRFM est donc totale au regard de l'ambition scientifique et technique que constitue l'objectif ambitieux de confiner et contrôler l'énergie d'un plasma (i) porté à 100 millions de degrés, (ii) présentant une densité de l'ordre de 10^{14} particules par centimètre cube, (iii) sur une durée de l'ordre d'une minute (iv) au sein d'un champ magnétique de quelques teslas.

Au delà de l'engagement, quotidien et déterminé, de ses agents, la pertinence et l'originalité de l'activité de l'Institut résultent du choix stratégique, décidé il y a plus de 30 ans, d'aborder de front la physique des décharges



longues et donc de construire le premier tokamak supraconducteur au monde. Ce choix, non exempt de risques, permet aujourd'hui à l'IRFM de développer une activité remarquablement originale sur la physique et la technologie des décharges longues et sur la gestion d'une installation supraconductrice de haute technologie ; cette originalité se décline aussi en termes de composants PFC, puisque TS est la seule machine dont l'ensemble des composants PFC est activement refroidi. Ce bref survol de l'adéquation entre activités et objectifs et de l'originalité des résultats de l'institut pourrait laisser croire que les études sont principalement centrées sur les développements technologiques, ce n'est pas le cas et le comité a apprécié le juste équilibre entre physique, technologie et opération ; et, (i) dans le domaine de la physique, l'intégration réussie entre théorie, modélisation et expérimentation, (ii) dans le domaine de la technologie, l'articulation entre maintenance, développement et innovation.

L'institut est reconnu au niveau international pour la qualité des codes de modélisation physique (GYSELA, JOREK, LUKE, CRONOS) dont l'impact peut se mesurer par le positionnement de l'Institut au sein de l'initiative européenne de modélisation. Dans le domaine des développements technologiques la qualité de l'expertise sur les composants PFC se mesure aussi par l'impact majeur des contributions aux programmes JET et ITER.

La qualité des travaux des équipes de cryomagnétisme est tout aussi reconnue comme l'attestent les participations majeures au programme japonais JT-60SA et au programme allemand W-7X.

L'impact d'un travail de recherche est une quantité accessible à l'expérience à travers le retour d'impact que constituent les reconnaissances nationale et internationale ; que ce soit dans le domaine de la physique ou de la technologie, ou à leur interface. Une mesure de la qualité et l'impact des résultats de l'IRFM nous est ainsi fournie par l'implication remarquable de nombre d'agents dans les différentes structures internationales d'organisation, d'animation et de gestion de la recherche aux niveaux européen et mondial : EFDA, ITPA, F4E, IAEA....

Ce haut niveau de reconnaissance, est confirmé par le fait que plus de 84% des publications de l'institut sont cosignées avec des partenaires internationaux.

– Quantité et qualité des publications, communications, thèses et autres productions :

Avec plus de 275 publications en 2009 dans les revues avec comité de lecture et les actes de colloques et de conférences, pour 89 chercheurs publiants ; les disparités de productivité scientifique entre les onze groupes résultant de la différence des missions assignées à ces groupes dont le spectre des activités va de la physique non-linéaire à la maintenance électrotechnique en passant par le développement de systèmes de pompage ou de refroidissement innovants.

Sur la période 2006-2009, le nombre total de publications s'élève à 744, présentant ainsi une moyenne de 2 publications par an et par agent pour les 89 publiants de l'institut, ou de 3 publications par an et par agent pour les 63 publiants réguliers.

Comme il est d'usage dans les communautés scientifiques travaillant sur de très grands instruments, les signatures sont essentiellement collectives. De l'ordre de 245 présentations orales dans le cadre de congrès et ateliers de travail ont été données par les agents de l'IRFM sur la période 2006-2009.

Les facteurs H des 89 agents publiants au regard des critères AERES est une fonction croissante de l'ancienneté de l'activité de recherche. La valeur du facteur H pris en moyenne sur ces 89 agents est de 15.7 et l'ancienneté moyenne est de l'ordre de 16.8, ainsi le ratio de ces deux quantités, qui constitue l'une des rares mesures pertinentes de la productivité et de sa continuité, est de l'ordre de 0.93.

Une analyse plus fine de la qualité des publications à travers les données bibliométriques révèle que ce rapport se situe essentiellement entre 1.5 et 0.5 si la dispersion des données est prise en compte au delà de la simple moyenne ; 63 chercheurs présentent un facteur H supérieur à 12, 36 chercheurs présentent un facteur H supérieur à 18 et 9 un facteur supérieur à 25.

Chaque année la revue de référence du domaine, Nuclear Fusion, établit un classement des 10 articles les plus lus et des articles les plus cités, 4 parmi 10 des articles les plus lus sont issus de l'IRFM et 3 parmi 10 pour le classement des citations.

Au regard de l'ensemble de ces données, la production de l'IRFM dans les revues internationales avec comité de lecture a été jugée abondante et de qualité par le comité ; qualité situant l'Institut parmi les 10 premiers pôles de



référence dans le domaine au niveau mondial. Cette conclusion est confirmée par l'impact élevé de plusieurs articles issus des travaux de l'Institut et par la participation soutenue et récurrente de nombreux agents de l'Institut aux différents comités d'experts internationaux, comités d'édition des revues internationales, comités scientifiques des congrès nationaux et internationaux et structures de suivi, gestion et évaluation des programmes européens et mondiaux.

Sur la période 2006-2009, 24 thèses ont été soutenues dans le cadre des activités de recherches de l'IRFM ; la moyenne annuelle de soutenances s'élève à 6 thèses/an ces dernières années.

Les affiliations académiques des doctorants sont dispersées sur un ensemble d'établissements allant de l'Université d'Aix-Marseille aux Universités de Paris en passant par l'Université de Nancy. Certains de ces établissements ont maintenu le régime de la mention très honorable avec félicitations et d'autres l'ont abandonné. On notera néanmoins que le pourcentage de félicitations relatif aux travaux doctoraux est élevé, démontrant ainsi la qualité de la production et de l'encadrement doctoral au sein de l'IRFM. Les données statistiques sur le devenir des docteurs (en sortie de thèse ou en fin de post doc) n'étant pas disponibles au niveau des institutions de rattachement, et étant globalisées au niveau du ministère, le comité n'est pas en mesure d'estimer l'impact final de la formation par la recherche au sein de l'IRFM.

Au regard des critères de pertinence, d'originalité et de qualité, le comité a donc unanimement apprécié la très haute qualité scientifique de l'ensemble des travaux de l'IRFM et son leadership international dans le domaine de la physique et de la technologie des décharges longues.

– Qualité et pérennité des relations contractuelles :

Les relations contractuelles constituent un élément essentiel du fonctionnement de l'Institut. En effet, sur les 42 mégaeuros de ressources financières annuelles, la dotation récurrente du CEA représente 68.6% et l'apport des contrats 31.4%.

Notons que 6.3 mégaeuros issus de la dotation du CEA sont consacrés aux projets dédiés à l'approche élargie.

La diversité des sources contractuelles constitue une garantie de pérennité globale du budget et un gage d'autonomie programmatique ; la répartition des contrats s'établit comme suit : le contrat d'association Euratom s'élève à 12.3 mégaeuros, les contrats ITER-IO et F4E contribuent à hauteur de 0.64 mégaeuros et les contrats ANR à hauteur de 0.22 mégaeuros.

La baisse récente de la part contractuelle européenne qui est passée de 10 mégaeuros à 6 mégaeuros est de nature essentiellement conjoncturelle et la pérennité des relations contractuelles doit être considérée comme une donnée structurelle. En effet, la qualité des résultats scientifiques issus de l'Institut permettent à l'IRFM de se positionner avantageusement lors des soumissions ANR dont la récurrence est parfois difficile à assurer au regard du niveau de compétitivité élevée ; la pérennité du support contractuel des structures internationales F4E et ITER-IO est elle aussi garantie par l'expertise unique de l'Institut dans les domaines du cryomagnétisme, des PFC activement refroidis, des coupleurs ICRH et LHCD en particulier et de la physique et de la technologie des tokamaks en régime quasi-continu en général.

L'Institut a su développer des relations contractuelles pérennes et de qualité avec l'ensemble des acteurs institutionnels, nationaux et internationaux que sont l'Euratom, F4E, ITER-O, l'ANR et la région PACA.

- **Appréciation sur le rayonnement, l'attractivité et l'intégration de l'unité de recherche dans son environnement :**

– Prix, distinctions et invitations :

Deux doctorants et un agent de l'IRFM ont été distingués ces dernières années, par deux prix de thèses (EPS et X) et une médaille d'argent (CNRS).

Le mode de fonctionnement de la communauté de physique et technologie des tokamaks est par tradition international et cette tradition a été institutionnalisée au niveau le plus élevé par la signature fin novembre 2006 à l'Élysée de l'accord international ITER, structurant les efforts de recherches de l'Europe, des États-Unis, de la Chine, de l'Inde, de la Russie, de la Corée du Sud et du Japon. L'IRFM participe au plus haut niveau à cette activité internationale et ses agents sont sollicités de manière récurrente par des invitations à participer aux recherches



d'autres laboratoires, ou à présenter de nouveaux résultats dans le cadre de conférences internationales ; les invitations croisées avec des institutions telles que l'ASIPP (Chine), le MIT, PPPL, UCSD, Oak Ridge (USA), RAS, (Ru), IPR (Inde), pour ne citer que les principales, attestent du rayonnement de l'institut.

– Capacité à recruter des chercheurs, post doctorants ou étudiants de haut niveau, en particulier à l'étranger :

De par son rayonnement international et son implication nationale au sein du Master Sciences de la Fusion (INSTN, Ecole Polytechnique, Universités de Paris VI, XI, Aix-Marseille, Bordeaux et Nancy) l'IRFM a su développer une remarquable capacité à attirer et intégrer des étudiants de haut niveau au sein de ses programmes de formation par la recherche.

Au delà de la quantité, 23 doctorants et 11 Post-Docs, la qualité de ces recrutements constitue un élément notable, plusieurs normaliens et polytechniciens effectuant actuellement leur travail de thèse au sein de l'IRFM ainsi que des étudiants des universités de Paris, Aix-Marseille et Nancy. Deux prix de thèse récents attestent du standard élevé du niveau des thèses soutenues à l'IRFM.

La multidisciplinarité de l'environnement scientifique fait de l'institut un lieu idéal de formation par la recherche. Notons qu'un étudiant chinois prépare actuellement une thèse au sein de l'IRFM et plusieurs post Docs étrangers complètent leur formation par la recherche au sein des services de l'IRFM.

Dans le passé, la capacité à recruter des chercheurs européens constituait une solide tradition du Département de Recherches sur la Fusion (DRFC) par le biais des postes Euratom ; la réorientation du déploiement du personnel de statut Euratom a notablement diminué cette capacité mais le nombre et la qualité des visiteurs étrangers attestent d'un potentiel attractif intact.

– Capacité à obtenir des financements externes, à répondre ou à susciter des appels d'offres :

Le taux de succès des soumissions de projets et demandes de financement au niveau de l'ANR et des collectivités territoriales est supérieur à 50%.

Le type de recherches développées à l'IRFM, certes largement multidisciplinaires, mais hautement finalisées vers l'objectif de la fusion thermonucléaire contrôlée, ne permet pas de développer une large autonomie au regard de la dialectique répondre ou susciter des appels d'offres, cette contrainte de finalisation d'objectifs étant identifiée, le comité a apprécié la capacité de l'institut à répondre aux appels d'offre ou à susciter des collaborations. L'IRFM a su valoriser son expertise en répondant de façon volontaire aux besoins de l'approche élargie.

Les besoins de financement du projet WEST constituent un enjeu où la capacité de l'IRFM à obtenir des financements devra être déployée à des niveaux industriels et internationaux élevés.

Le comité demeure confiant au regard de la détermination affichée par l'équipe de direction, détermination s'appuyant sur une longue tradition de collaborations internationales et de négociation de financements externes, détermination et tradition qui constituent de solides garanties quant à la capacité renouvelée à obtenir des financements externes.

La mise en place récente d'une interface de gestion et suivi des contrats ITER, F4E et EFDA, a permis la coordination de plus de 75 appels d'offre ; 150 projets EFDA sont ainsi gérés au sein de l'association EURATOM-CEA, 10 projets pour IO et F4E, confirmant ainsi la capacité de l'Institut dans le domaine des appels d'offres internationaux.

– Participation à des programmes internationaux ou nationaux :

Au niveau national, l'IRFM est fortement impliqué au sein de deux programmes : (i) la fédération de recherche FR-FCM structurant les efforts de recherches du CEA, du CNRS et de l'INRIA et de 6 Universités et (ii) le Master National Sciences de la Fusion regroupant dans un format commun l'offre de formation des Universités de Paris VI, XI, Aix-Marseille, Bordeaux et Nancy et de plusieurs écoles, l'Ecole Polytechnique et l'ENSAM principalement.

Ces deux structures nationales articulent leurs activités autour du pôle fédérateur que constitue l'IRFM ; la qualité et la sérénité des relations institutionnelles entre l'IRFM et ces deux structures nationales sont exemplaires en matière de collaboration, structuration et intégration de la recherche et de la formation au niveau national.



Au niveau international, l'IRFM est fortement impliqué depuis de nombreuses années dans les programmes JET, ITER et l'approche élargie (ITER, JT-60SA, IFERC et IFMIF EVEDA).

Cette implication n'est pas exclusive et l'Institut collabore avec plus de 23 nations différentes dans le cadre de différents programmes de recherches. De l'ordre de 9 "homme-années" participent à plein temps aux programmes internationaux de collaboration.

Au niveau Européen, sur la période 2006-2010 plus de 385 publications communes ont été cosignées dans le cadre de 35 programmes avec 13 nations européennes.

Au niveau extra-européen, au delà des échanges et collaborations anciennes et soutenues avec le MIT, Princeton (PPPL), Oak Ridge, l'Université de Californie SD, la Russie et ses Instituts de l'Académie des Sciences, l'émergence de liens, forts et structurés, avec les institutions Chinoises et Indiennes démontre que l'IRFM a su prendre la mesure des évolutions et des besoins au niveau mondial.

La participation aux grands programmes nationaux et internationaux est donc au cœur de l'activité et de la stratégie de l'Institut qui a su adapter ses collaborations à l'émergence des nouveaux acteurs du domaine de la fusion thermonucléaire par confinement magnétique.

Le choix de Cadarache pour la construction de la machine ITER a offert à l'IRFM, au-delà d'une reconnaissance effective de la qualité de son expertise, une visibilité et une intégration au niveau international à un niveau élevé, qu'illustre la diversité des collaborations et coopérations.

- **Appréciation sur la gouvernance et la vie de l'unité :**

- Pertinence de l'organisation de l'unité, qualité de la gouvernance et de la communication interne et externe :

L'organisation actuelle est structurée autour de trois services et onze groupes qui présentent une forte transversalité si nous analysons les activités à travers la grille classique physique-technologie-opération et maintenance d'un grand instrument.

Cette transversalité a été particulièrement propice à la mise en place d'une gestion collective des moyens techniques et au renforcement d'une culture scientifique et technique commune.

L'équipe de direction et les responsables d'équipes ont su maintenir un équilibre et une synergie entre les différents groupes et réunir les conditions d'une harmonie entre les différents programmes et les multiples activités. Les auditions du conseil d'unité IRFM et de l'ensemble des étudiants de l'Institut ont démontré que les personnels apprécient le mode de fonctionnement au quotidien de l'Institut et partagent la vision stratégique élaborée par la direction ; les échanges au cours de la visite des installations et des sessions de présentations des activités des groupes ont confirmé la qualité de la gouvernance et la confiance des équipes quant aux choix actuels et aux options futures.

La gouvernance au quotidien, ainsi que l'élaboration des choix et options à moyen terme, s'appuient sur une structuration qui a démontré son efficacité. Le comité d'expériences (COEX), qui se réunit toutes les deux semaines, valide et coordonne le programme expérimental en s'assurant de la cohérence des propositions au regard des missions statutaires de l'Institut. Les Réunions de Coordination Techniques (RCT) assurent l'implémentation pratique et effective au niveau de la machine.

Au delà de ces structurations horizontale et verticale autour de la machine, les missions du comité de coordination des actions transverses (CCAT), mis en place il y a quelques années, ont été récemment repositionnées suivant deux axes : (i) le comité des programmes et (ii) le comité des projets. Au niveau de la direction, la mise en place de la structure CAP Fusion comme portail d'entrée des contrats ITER, EFDA et F4E s'imposait de par les volumes des actions collaboratives. La structure d'organisation, contrôle, gestion, administration et gouvernance ainsi mise en place semble avoir atteint un niveau d'opérationnalité satisfaisant, aussi, le comité d'évaluation considère qu'il est inutile de développer une architecture plus élaborée au-delà des trois services (SCCP, SIPP, STEP), onze groupes (GSEM, GTTM, GCHF, GIDEA, GP2B, GCECFP, GIPM, GPAS, GARV, GICA, GCRY) et quatre comités (COEX, RCT, CCAT-CProjets, CCAT-CProgrammes) structurant l'organisation actuelle de l'Institut.



Les missions d'analyse et de conseil amont sont assurées par un conseil scientifique interne (CSI) et des réunions scientifiques et techniques (RST) complètent le dispositif de gouvernance.

Des séminaires scientifiques sont régulièrement organisés au sein de l'Institut et des actions de communications vers les lycées et les collèges complètent le dispositif de communication externe.

Il est important de noter, par delà quelques ressemblances superficielles et analogies hâtives, la très grande différence entre un laboratoire opérant un tokamak et un laboratoire opérant un accélérateur de particules. Ces deux entités relèvent effectivement de la même catégorie des grands équipements, avec tout ce que cela comporte de contraintes, mais, depuis ses origines la physique nucléaire et des particules s'est structurée en communautés clairement identifiées : théoriciens des particules, spécialistes des accélérateurs, spécialistes des détecteurs... Le mode de fonctionnement autour d'un tokamak était radicalement différent et la survivance de la figure du savant-ingénieur y était notable : des physiciens spécialistes de la simulation peuvent être appelés à construire un diagnostic, des théoriciens spécialistes de théorie cinétique à calculer l'impédance d'une antenne et des ingénieurs versés dans la conception de composants de haute technologie à interpréter des mesures relevant de la physique des plasmas... L'origine de cette remarquable mobilité thématique, déclinante dans de nombreux laboratoires étrangers, est principalement de nature historique et est liée : (i) aux modalités de développement d'une discipline impliquant au quotidien la conjugaison de contraintes technologiques et de problèmes physiques vers un objectif finalisé et appliqué ; (ii) aux spectres de compétences, extrêmement larges, allant de la physique à l'engineering, des fondateurs de la discipline à la fin des années cinquante. La physique et la technologie des tokamaks entrent actuellement dans une phase de développement où cette spontanéité de la transversalité et de la mobilité sera inhibée par le caractère impératif des engagements d'objectifs et ne pourra donc pas être préservée. Le mode de fonctionnement futur d'ITER sera très éloigné des atmosphères scientifiques entretenues jadis autour de TFR, PETULA ou JET dans les années 90. La direction de l'IRFM a su anticiper cette évolution majeure du mode de fonctionnement des laboratoires tokamak en structurant rationnellement l'activité sur la base des objectifs et enjeux, mais en préservant néanmoins une marge d'autonomie individuelle conforme à la tradition qui prévalait jadis dans le domaine des tokamaks en général, et au sein du DRFC en particulier.

– Pertinence des initiatives visant à l'émergence et à la prise de risque :

Le programme de recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée est historiquement l'un des programmes de recherches les plus ambitieux et les plus risqués de ces dernières décennies ; la pertinence scientifique de son objectif ultime est validée dans le cadre du corpus de connaissances de base que constitue la physique des plasmas thermonucléaires et la physique des tokamaks ; la progression, continue sur trois décennies, des performances, en terme de densité, température et contrôle, confirme le bien fondé de ce programme ambitieux et de cet objectif par essence risqué. L'exploitation du tokamak ITER apportera une réponse définitive et convaincante aux enjeux scientifiques de ce programme.

Le comité considère que les inquiétudes récurrentes sur la pérennité des sources d'énergies fossiles et la disponibilité des sources d'énergies durables renforcent et renouvellent la pertinence des ambitions des programmes de recherches sur le confinement magnétique des plasmas thermonucléaires en général, et des programmes de l'IRFM en particulier.

L'analyse de la prise de risques spécifiques au choix d'une technologie supraconductrice et d'une spécialisation sur les décharges longues a été donnée dans un paragraphe précédent et l'analyse de la prise de risque dans le cadre des projets à moyen et long termes sera proposée dans un paragraphe suivant.

– Implication des membres de l'unité dans les activités d'enseignement et dans la structuration de la recherche en région :

La création du Master National Sciences de la Fusion, à l'initiative de plusieurs universités et écoles et de l'INSTN, a offert aux chercheurs et ingénieurs de l'IRFM une opportunité de participation aux formations initiales au niveau M2 que plusieurs agents ont su saisir avec volontarisme.

La participation au Master SF (1060 heures/an) n'est pas exclusive et les agents de l'IRFM sont aussi appelés à intervenir dans le cadre d'autre cursus (1570 heures/an) et d'autres établissements (Grenoble, CNAM, Ghent...). Plus de 30 chercheurs participent aux missions de formations initiales et par la recherche et le nombre de professeurs INSTN a été multiplié par deux au sein de l'Institut ces dernières années. L'Institut est en charge de l'organisation de



deux semaines de formation sur son site chaque année en février, ces deux semaines intensives se soldant par la délivrance de 9 ECTS.

Cette implication exemplaire dans les tâches de formation participe à la structuration de la recherche en région PACA car plusieurs centaines d'heures de cours sont données dans le cadre des cursus de l'Université d'Aix-Marseille, amplifiant ainsi les liens historiques et pérennes entre les équipes de l'IRFM et les enseignants-chercheurs et chercheurs des laboratoires de l'Université. L'organisation d'une école d'été récurrente participe aussi au resserrement et à la visibilité des liens entre l'IRFM et l'Université d'Aix-Marseille.

Le comité a jugé l'implication dans les tâches de formation exemplaire, que ce soit au niveau M2, mais aussi à travers les interventions dans les établissements secondaires régionaux et la formation d'étudiants européens dans le cadre d'actions collaboratives contractuelles.

Les auditions de la direction, des responsables, des agents et des étudiants ont convaincu le comité de l'excellence de la gouvernance et de la vie du laboratoire, tant en terme de gestion et management qu'en terme d'animation et d'organisation des activités de recherches.

- **Appréciation sur la stratégie et le projet :**
 - Existence, pertinence et faisabilité d'un projet scientifique à moyen ou long terme :

La lecture et l'analyse du projet scientifique de l'IRFM doivent prendre en compte les évolutions récentes de la discipline qui entre dans une nouvelle phase avec la construction de la machine ITER.

Pour répondre aux enjeux multiples de cette phase, d'une durée de vingt cinq ans, qui précède l'achèvement du programme scientifique et technologique qui verra la construction ultérieure d'un démonstrateur industriel ou d'un prototype de démonstrateur, l'IRFM a développé une stratégie déclinée en piliers (P1, P2, P3, P4), objectifs scientifiques (ST1, ST2, ST3, ST4) et objectifs managériaux (M1, M2, M3).

Le comité atteste de la cohérence de ces objectifs avec les différents engagements au sein de l'EURATOM, l'EFDA, F4E et l'approche élargie (ITER, JT-60SA, IFERC et IFMIF EVEDA), et il mesure la complexité de gestion et management de la multiplicité des ces objectifs au sein de la diversité de ces partenaires, que ce soit sur le moyen ou le long terme.

Le comité a particulièrement apprécié la pertinence du pilier P4 (Production d'Energie: préparer la conception d'un réacteur) et de l'objectif ST4 (développement de capacités pour la conception d'un réacteur). Cette orientation stratégique à long terme trouvera au CEA un environnement d'expertises unique au monde (matériaux, neutronique, thermique, thermohydraulique, contrôle-commande des réacteurs, sécurité...), environnement propice à un positionnement dans la continuité du leadership Français dans le domaine de la fission.

Le comité est convaincu qu'un vaste programme de conception d'un réacteur intégrant, au delà des paramètres physiques et technologiques, les variables industrielles et commerciales, qui sont appelées à évoluer rapidement dans les prochaines décennies dans le secteur de l'énergie, offrira à l'IRFM un projet ambitieux et pérenne dans un cadre adéquat pour la valorisation de ses savoirs faire.

L'analyse SWOT (forces-faiblesses-opportunités-menaces), proposée lors des présentations, confirme la pertinence de ST4 car il permettrait, au regard de cette analyse SWOT et de ses limites, d'amplifier les relations industrielles.

Par contraste les objectifs ST1 (participer à la réalisation d'ITER et des programmes de l'approche élargie, JT-60SA, IFERC et IFMIF EVEDA) et ST2 (préparer l'opération de la prochaine génération de machines) semblent plus s'inscrire dans la continuité que dans la rupture. Cette continuité constitue une garantie de faisabilité, et le caractère compétitif/collaboratif au niveau international de ces axes prospectifs en démontre la pertinence au regard des demandes engendrées par la signature de l'accord ITER. Mais cette continuité des objectifs ST1 et ST2 (diagnostics, antennes, PFC, cryomagnétisme...) n'est qu'apparente car le projet WEST de divertor tungstène, constitue un enjeu, scientifiquement pertinent et technologiquement réaliste, dont le caractère innovant au sein des projets à moyen terme, n'a pas échappé au comité.



– Originalité et prise de risques :

Comme nous l'avons argumenté dans les paragraphes précédents, de par ses objectifs ambitieux, la prise de risque est constitutive des programmes de recherches sur le confinement magnétique des plasmas thermonucléaires.

La prise de risque n'est pas une fin en soi ou une vertu en soi, c'est la capacité à identifier et maîtriser un risque qui constitue une mesure de l'originalité et de la pertinence d'une démarche scientifique. Le projet WEST s'inscrit dans ce type de démarche, il est particulièrement original et pertinent car il permettra d'apporter une réponse aux problèmes soulevés par la fabrication et l'opération du divertor tungstène d'ITER.

Le projet WEST a été évalué par un comité international en janvier 2011 et a été jugé original, nécessaire et réaliste. Le comité a identifié plusieurs points critiques dont la complexité technologique avec la mise en œuvre de 500 composants et un total de 15000 éléments de tungstène. Le comité a noté la cohérence de ce projet technologique avec les axes stratégiques physiques, en particulier la possibilité d'étudier les ELM énergétiques en contexte relevant. La cohérence avec l'axe stratégique de conception d'un réacteur commercial est aussi assurée à travers le retour d'expérience, nécessairement innovant, et sa déclinaison au cas d'un réacteur.

L'IRFM propose une stratégie, à moyen et long terme, originale et équilibrée entre rupture et continuité, les éléments de cette stratégie présentant une prise de risque résultant des engagements sur le projet ITER et de l'impérieuse nécessité d'assurer son succès. Le comité réaffirme l'urgence à identifier et déployer rapidement le cadre industriel et international des collaborations permettant la réalisation du projet WEST.

En conclusion, le projet de l'IRFM à moyen et long terme est novateur, en particulier les objectifs ST1, ST2 et ST3 offrent un fort potentiel d'innovation et présentent un compromis entre prise de risques et valorisation de compétences reconnues.

4 • Analyse équipe par équipe et/ou par projet

Les activités de l'IRFM sont organisées dans le cadre de trois services structurés en onze groupes. Cette organisation permet le développement d'une forte transversalité, préserve une nécessaire marge d'autonomie pour les groupes et accroît la lisibilité des activités.

L'analyse des bilans de l'IRFM sera développée sur la base de cette organisation et, par souci de clarté et de concision, sera restreinte au niveau des services : SCCP, SIPP et STEP.

Intitulé de l'opération : Service Chauffage et Confinement du Plasma (SCCP)

Nom du responsable : X. LITAUDON

- **Effectifs du service:**

108 agents travaillent au sein du SCCP, 61 ingénieurs de recherches permanents, 22 techniciens permanents et 25 non permanents : 3 visiteurs étrangers, 12 doctorants et 6 post doc.

- **Appréciation sur la qualité scientifique de la production :**

– **Pertinence et originalité des recherches, qualité et impact des résultats :**

Les activités de recherche du SCCP abordent de front les problématiques cruciales du chauffage et du confinement. Le périmètre de l'activité des opérations de recherches du SCCP englobe l'ensemble des études expérimentales et théoriques sur le chauffage, la génération de courant, le transport, les instabilités, la



turbulence et la modélisation physique intégrée ; cette délimitation autour de la physique du cœur implique une intense transversalité interne entre groupes et externe entre services.

Le comité a noté l'originalité de nombre de résultats, en particulier : (i) la caractérisation de l'activité fishbone, (ii) l'ensemble des résultats du code pentadimensionnel gyrocinétique GYSELA, (iii) du code de MHD non linéaire JOREK au regard des problématiques clés des ELM et (iv) du code cinétique toroïdal LUKE qui permet d'aborder la question de la génération de courant non inductive en géométrie réaliste sur de solides bases physiques.

La qualité des résultats est avérée par les nombreuses publications dans des revues de rang A et des invitations récurrentes aux conférences internationales (EPS, APS, IAEA...) ; le leadership de ce service dans le domaine de la modélisation intégrée (CRONOS) ou de la simulation des expériences de génération non inductive de courant (LUKE) témoigne de l'impact de ses résultats sur le développement de la discipline.

Afin de dégager une analyse plus fine, le comité a procédé à une audition par groupes de recherches, les présentations des groupes *Groupe Support aux Expériences et Modélisation (GSEM)*, *Groupe Transport Turbulence et Magnétohydrodynamique (GTTM)*, *Groupe Chauffage et Génération de Courant Haute Fréquence (GCHF)*, *Groupe Injection de Neutres, Distribution Electrique et Alimentations (GIDEA)* ont confirmé la pertinence des recherches et l'originalité des résultats ; la disparité des niveaux de publications entre les groupes est essentiellement due à la différence de missions statutaires.

– Quantité et qualité des publications, communications, thèses et autres productions :

Les conclusions du comité quant à la quantité (744 articles dans les revues internationales avec comité de lecture sur la période 2006-2009) et à la qualité (503/744 dans les revues de rang A) des publications au niveau de l'Institut ont été données dans un paragraphe précédent.

Ces conclusions sont aussi pertinentes pour l'activité du SCCP qui est le service le plus productif en termes de publications. Les signatures des articles étant essentiellement de nature collective, comme c'est souvent le cas sur les grands instruments et les grandes installations, et impliquant des auteurs appartenant aux trois services, l'affectation d'une publication à un service spécifique nécessiterait l'emploi d'une règle définie afin d'éviter la confusion que constituerait la différence entre le tout et la somme de ses parties et apporterait peu d'informations pertinentes pour l'évaluation.

Les travaux de thèse présentent par contre une forte spécificité de service et dans le cas du SCCP l'attribution de deux prix de thèse confirme la qualité de l'encadrement doctoral.

– Qualité et pérennité des relations contractuelles :

Le SCCP participe à 5 contrats ANR (M2TFP, ASTER, ANIKA, STUDYFUS et EGYPT) au niveau national, 4 contrats EFDA au niveau européen.

Le caractère stratégique des actions collaboratives contractuelles sur (i) les antennes ICRH, (ii) la pertinence d'un système hybride basse pour la génération de courant dans ITER, (iii) la modélisation intégrée et (iv) les études sur les sources d'ions négatifs pour l'injecteur de neutres ITER, garantit la pérennité des relations contractuelles des différents groupes du SCCP.

• Appréciation sur le rayonnement, l'attractivité et l'intégration du service dans son environnement :

– Prix, distinctions et invitations :

Deux prix de thèse (EPS et X) et une médaille d'argent (CNRS) pour ce qui concerne les distinctions, et des invitations récurrentes aux grandes conférences internationales (EPS, APS, IAEA...).



- Capacité à recruter des chercheurs, post doctorants ou étudiants de haut niveau, en particulier à l'étranger, capacité à obtenir des financements externes, à répondre ou susciter des appels d'offre, participation à des programmes internationaux ou nationaux, collaborations avec des laboratoires étrangers :

Le comité a apprécié l'implication et la reconnaissance internationale du SCCP, les chercheurs du SCCP sont en charge de plusieurs actions internationales : (i) les scénarios avancés sur JET (EFDA-JET), (ii) les topical groups européens sur le chauffage, le transport, la MHD, la génération de courant et l'injection extraction de matière et le transport, (iii) les consortiums de conception d'un système hybride de génération de courant pour ITER et de modélisation intégrée ; au-delà des fonctions de responsabilité et d'animation, les chercheurs du SCCP sont aussi sollicités dans le cadre de la conception des antennes ICRH d'ITER et des alimentations de puissance pour JT-60SA.

La participation à des programmes internationaux est donc exemplaire et atteste de la capacité à obtenir des financements et à répondre à des appels d'offre. Le comité a noté la forte implication du SCCP au sein de la fédération nationale de recherches et au sein du master national sciences de la fusion.

Le groupe d'injection de neutres et de gestion des installations haute tension est impliqué dans plusieurs collaborations nationales ou internationales : coordination d'une ANR regroupant sept laboratoires français (ANR-ITER-NIS) ; contrat avec ITER-IO sur les arcs de haute énergie ; collaboration avec JAEA sur les sources d'ions pour ITER ; leader du projet d'alimentations de puissance des bobines de JT-60SA. L'ensemble témoigne d'une expertise reconnue sur les plans nationaux et internationaux.

Le comité considère que le rayonnement et l'attractivité du SCCP sont remarquables, sa capacité à recruter des étudiants de haut niveau est attestée par les embauches récentes et les entrées en thèse de ces dernières années. La visibilité internationale est quant à elle attestée par de nombreux indicateurs et, plus simplement et directement, par les membres étrangers du comité.

- **Appréciation sur le projet :**

- Existence, pertinence et faisabilité d'un projet scientifique à moyen ou long terme, Originalité et prise de risques :

Les objectifs scientifiques à moyen terme et la stratégie scientifique à long terme du SCCP s'inscrivent dans une double démarche : (i) de valorisation de son expertise, c'est-à-dire dans la continuité, et (ii) de participation aux choix stratégiques de l'Institut dictés par les évolutions à l'échelle mondiale, c'est-à-dire dans la rupture.

Parmi les deux directions stratégiques que constituent : (i) l'amplification de l'effort de modélisation intégrée et l'inflexion vers une vaste initiative de conception d'un réacteur commercial, et (ii) le projet WEST de conception, construction et opération d'un divertor tungstène, le SCCP sera impliqué principalement dans le premier.

Le comité considère que cette implication est un enjeu à la hauteur du volontarisme et des capacités du service et est en phase avec le projet global de l'institut et les attentes résultant des engagements européens et mondiaux de la France.

Le SCCP se distingue par son expertise et sa production aux niveaux physique et technologique. Au niveau physique la conduite d'expériences permettant de construire un modèle cohérent et prédictif du confinement et du chauffage s'appuie sur une batterie d'outils numériques originaux. Au niveau de la technologie, le SCCP est l'héritier de deux traditions d'excellence : (i) l'une issue de l'expérience TFR (Fontenay aux Roses) pour la conception et la construction des antennes ICRH et (ii) l'autre issue de l'expérience PETULA (Grenoble) pour la conception et la construction de coupleurs LH. Ce double héritage a été valorisé par le choix innovant de nouvelles structures ICFH et LH. Cette démarche, présentant les risques inhérents à l'innovation technologique, a permis de positionner le SCCP comme un service de référence auprès de nombreux partenaires (Europe, Chine, Inde) souhaitant dépasser les conceptions conservatrices classiques des structures de couplages (antennes inductives et capacitives) radiofréquence et micro-ondes. Le comité a jugé la prise de risque à la hauteur des enjeux du programme fusion.



- Conclusion :

- Avis global sur les groupes du service :

L'activité et les projets des groupes du SCCP ont été jugés de qualité et ambitieux. La structuration en trois groupes orientés physique plus un groupe orienté technologie est d'abord apparue surprenante au comité, mais au fil des auditions et présentations, l'image d'une forte cohérence et d'une bonne transversalité interne au service s'est dégagée. Le groupe en charge des systèmes radiofréquences, de par sa double culture, physique et technologique, est l'un des garants de cette cohérence interne au service.

- Points forts et opportunités, points à améliorer et risques, Recommandations:

Les points forts du service sont principalement : (i) une remarquable expertise, expérimentale, théorique, numérique et technologique sur les problèmes du confinement et du chauffage du cœur du plasma, cette expertise reconnue s'inscrit dans la continuité de la tradition développée sur les machines TFR et PETULA ; (ii) la qualité et la diversité des diagnostics qui permettent la confrontation expérience-théorie constituent aussi un point fort majeur du service.

Le comité a noté que le périmètre de l'activité du SCCP ne se restreignait pas à la physique et la technologie du confinement et du chauffage ; ainsi, le SCCP est aussi responsable de l'alimentation électrique générale de l'IRFM pour la sécurité de laquelle il a installé une ligne redondante. Cela l'a conduit à développer des simulations de systèmes de puissance électrique, notamment en transitoire. Cette expertise dans le domaine des hautes tensions est aussi nécessaire pour la conception de la partie accélératrice des injecteurs de neutres. Un banc test de production d'ions négatifs et de leurs dispositifs d'accélération (MANTIS) a été réalisé nécessitant de s'adapter aux voltages et énergies élevées. Dans le domaine des hautes fréquences, des interrupteurs électriques ont été développés pour assurer la protection des klystrons. Des expériences sur les arcs électriques à haute tension et haute énergie (200kV, 500J) ont été menées afin de guider le choix des configurations à adopter sur ITER.

Le comité recommande de définir des niveaux de priorités entre les différents diagnostics physiques, accédant au cœur du plasma, mis en œuvre pour la confrontation expérience-théorie. Le travail de délimitation du périmètre des diagnostics pertinents dans la perspective du projet ITER doit être amplifié et l'abandon de thématiques moins productives ne doit pas être vécu comme un échec mais comme un achèvement.

Dans le cadre de l'approche élargie (BA) le développement d'un centre de calcul, puissant et dédié, offre une opportunité pour valoriser le savoir faire en modélisation intégrée. Le comité recommande que les conditions de ce positionnement porteur du SCCP soient réunies au niveau du service et de l'Institut. Le risque majeur pour le SCCP serait de ne pas prendre toute la mesure du rôle historique qu'il est amené à jouer au sein de la communauté tokamak mondiale au niveau de la modélisation intégrée et de ne pas se donner les moyens d'assumer ce rôle.

Le comité recommande que la capitalisation des savoirs et savoir-faire sur la physique des décharges longues soit utilisée pour explorer l'optimisation de différents paramètres, certains étant de nature plus économique que physique, à travers un programme scientifique innovant ; le problème de l'accumulation des impuretés au sein des décharges haute densité, haut bêta constituant à cet égard un point critique sur le chemin menant au réacteur et le problème de l'extraction active, et non passive, des cendres un second point critique sur ce chemin.

L'exploitation physique des ressources technologiques, uniques au monde en termes de performances et fiabilités combinées, que constituent les systèmes de génération, transport et couplage au plasma des puissances ICRH et LH, doit être amplifiée à travers un vaste effort d'identification de directions innovantes telles que le contrôle des populations rapides ou la possibilité de transférer irréversiblement, des ondes au plasma, non seulement un contenu énergétique (ICRH) et un contenu impulsif (LH), mais aussi une quantité de moment angulaire significative dont la valeur est un paramètre de contrôle très sensible d'une partie de l'activité turbulente.

Enfin, le comité recommande le développement d'une initiative de conception d'un réacteur, intégrant les contraintes industrielles et commerciales ; le groupe porteur de cette vaste initiative devra être rapidement



identifié au sein de l'IRFM, mais, quel que soit ce groupe, cette initiative nécessitera une validation physique, systématique et approfondie, renouvelant ainsi l'approche des problématiques au sein du SCCP.

Intitulé de l'opération : Service Intégration Plasma Paroi (SIPP)

Nom du responsable : M. FAURY

- **Effectifs du service :**

83 agents travaillent au sein du SIPP, 38 ingénieurs de recherches permanents, 25 techniciens permanents et 20 non permanents : visiteurs étrangers, doctorants et post doc.

- **Appréciation sur la qualité scientifique de la production :**

Que ce soit au niveau de l'organisation, ou au niveau du fonctionnement, un rôle stratégique est dévolu au service SIPP de par son positionnement. En effet, la connexité et la continuité entre la physique du cœur et la physique du bord impliquent de travailler de concert avec le SCCP et l'usure et l'érosion des PFC nécessite une vision et une approche commune au SIPP et au STEP pour la conception, l'élaboration et la maintenance des dispositifs définissant le bord ultime du plasma. Une fraction significative du retour d'expérience du SIPP constituant une base de données opérationnelles pour le STEP.

- **Pertinence et originalité des recherches, qualité et impact des résultats :**

La communauté tokamak s'accorde largement sur le caractère critique (i) de la tenue des PFC aux contraintes thermiques et (ii) des performances des systèmes d'extraction de matière et de puissance, pour le développement d'un réacteur industriel ; cet accord unanime illustre la pertinence des activités du SIPP.

Les deux enjeux stratégiques : PFC et extraction de puissance et matière, sont au cœur des activités du SIPP (PFC et extraction de puissance) et du STEP (contrôle des flux de matière).

La complexité de la physique de bord, où se conjuguent les aspects plasmas et matériaux, dans des régimes de puissance rendant les diagnostics difficiles à mettre en place, à opérer et à interpréter, est abordée de front, mais avec méthode, par les trois groupes du SIPP.

Comme pour l'étude du plasma de cœur, la diversité des diagnostics constitue le point d'appui de l'approche expérimentale ; la simulation sur la base des codes, développée pour partie au sein du SCCP, permet une confrontation dialectique entre expérience et théorie.

Les décharges longues de TS offrent des conditions uniques d'accès aux données critiques sur le comportement des matériaux et composants en régime de contraintes intenses.

Comme résultats pertinents et originaux citons : (i) le design et l'opération de composants PFC activement refroidis innovants, (ii) une étude numérique complète, convaincante et originale, du contrôle magnétique des ELM, (iii) une caractérisation des phénomènes de transport dans la couche de bord (SOL), et (iv) l'ensemble des études matériaux (échauffement, érosion, redéposition, rétention, migration) en condition de décharges longues.

Afin d'élaborer une analyse plus fine, le comité a procédé à une audition par groupes de recherches, les présentations des groupes Groupe Physique du Plasma de Bord (GPPB), Groupe Conception et Exploitation des Composants Face au Plasma (GCECFP) et Groupe Ingénierie des Projets Mécaniques (GIPM) ont confirmé la pertinence des recherches et l'originalité des résultats ; la disparité des niveaux de publications entre les trois groupes est essentiellement due à la différence de missions statutaires entre groupes orientés recherche et groupes orientés maintenance et développement.



– **Quantité et qualité des publications, communications, thèses et autres productions, Qualité et pérennité des relations contractuelles :**

Les conclusions du comité quant à la quantité (744 articles dans les revues internationales avec comité de lecture sur la période 2006-2009) et à la qualité (503/744 dans les revue de rang A) des publications au niveau de l'Institut ont été données dans un paragraphe précédant ; les signatures des articles étant essentiellement de nature collectives et impliquant des auteurs appartenant aux trois services, l'affectation d'une publication à un service spécifique nécessiterait l'emploi d'une règle définie afin d'éviter la confusion que constituerait la grande différence entre le tout et la somme de ses parties.

Le comité a jugé le niveau d'encadrement des thèses et la qualité de cet encadrement satisfaisant. Les activités contractuelles du SIPP sont variées, le comité a noté : (i) la participation à 3 projets ANR (CAMITER, EGYPT, ESPOIR), (ii) 2 contrats EFDA-JET et (iii) 13 contrats EFDA.

Ces relations contractuelles sont pérennes de par l'objectif à long terme qui oriente les activités du SIPP et du nécessaire renouvellement des soutiens pour atteindre les objectifs à long terme.

- **Appréciation sur le rayonnement, l'attractivité et l'intégration du service dans son environnement :**

- Capacité à recruter des chercheurs, post doctorants ou étudiants de haut niveau, en particulier à l'étranger, Capacité à obtenir des financements externes, à répondre ou susciter des appels d'offre, Participation à des programmes internationaux ou nationaux, collaborations avec des laboratoires étrangers :

Les chercheurs du SIPP occupent plusieurs responsabilités importantes au sein de structures internationales telles que (i) le groupe de travail EFDA PWI sur la rétention de combustible, (ii) le groupe d'action JET S1 pour les scénarios JET, (iii) le groupe thématique international sur les divertors ITPA ; ces responsabilités attestent de la visibilité internationale du SIPP, visibilité internationale confirmée par les membres étrangers du comité.

La qualité de ce positionnement permet au SIPP d'attirer des étudiants et des visiteurs de qualité ; l'activité de formation par la recherche est moins intense qu'au sein du SCCP, mais le comité a jugé que la capacité à recruter des chercheurs, post doctorants ou étudiants de haut niveau et que la participation à des programmes internationaux ou nationaux, collaborations avec des laboratoires étrangers se situent à un niveau remarquable.

La capacité à répondre à des appels d'offre a aussi été analysée et l'implication dans des actions nationales et internationales atteste de son haut niveau. Ce niveau résulte d'un fort engagement au sein de collaborations avec des associations européennes, en particulier JET (UK), ASDEX upgrade (RFA), et MAST (UK) que ce soit sur les problématiques de limiteur ou de divertor.

- **Appréciation sur le projet :**

- Existence, pertinence et faisabilité d'un projet scientifique à moyen ou long terme, Originalité et prise de risques :

Les équipes travaillant au sein du SIPP sont appelées à jouer un rôle majeur dans la nouvelle phase d'exploitation de TS. L'implication au cœur du projet WEST (ST1, ST2) à travers la participation à sa définition mais aussi par la conception et la réalisation de diagnostic dédiés, ou la redéfinition de diagnostics existants, constitue l'une des clés de la réussite de ce projet.

La maîtrise des codes de simulations (GYSELA, TOKAM, JOREK, ...) placera aussi le SIPP en position d'acteur majeur d'une initiative de conception d'un réacteur commercial (ST4).

Le comité juge ces deux projets à long terme pertinents. Mais l'engagement du SIPP à moyen et long terme suivant ces deux directions n'est pas exclusif et les études sur les diagnostics IR/VIS pour ITER, la forte implication au côté des expériences JET et le développement avancé des codes GYSELA, TOKAM, JOREK, sur la base du retour des expériences et des mesures de bord, constituent des directions originales et pertinentes dans le contexte actuel de la physique des tokamaks.



- Conclusion :

- Avis global sur les groupes du service, Points forts et opportunités :

La segmentation en trois groupes reflétant trois types de compétences, complémentaires et indispensables pour aborder la complexité de la structure et de la dynamique du plasma de bord, a permis au SIPP de développer une expertise reconnue et appréciée au niveau international sur la physique et la technologie du plasma de bord.

Une fraction significative des problèmes inhibant actuellement le développement d'un réacteur industriel se situe au niveau de l'interface plasma-paroi et il est fort probable, une fois les régimes $Q = 10$ et $Q = 5$ atteints dans ITER, que la partie se joue ultimement là, entre plasma et paroi. Compte tenu de cet enjeu, le positionnement stratégique des activités du SIPP constitue à la fois un point fort et une énorme responsabilité. La réalisation d'un point X dans le cadre du projet WEST offrira au SIPP des conditions expérimentales renouvelées et cette opportunité permettra de donner toute sa mesure à l'expertise développée au niveau des diagnostics et simulations, dans la perspective d'un réacteur.

- Points à améliorer et risques, Recommandations :

Le service SIPP a su imposer son expertise et faire reconnaître son originalité au niveau international ; l'un des risques pour ce service serait de trop s'attarder à présent sur la physique des plasmas en configuration limiteur dont il est établi qu'ils offrent beaucoup moins d'opportunités pour identifier des régimes de confinement amélioré. Le comité considère que le retour d'expérience, en termes de composants PFC et de matériaux, des décharges sans point X de tore supra est remarquable mais il réitère son soutien au projet WEST qui permettrait d'étendre le périmètre de ces acquis scientifiques et technologiques aux régimes de confinements améliorés envisagés dans ITER et un réacteur.

La physique des décharges présentant un point X a déjà été abordée depuis de nombreuses années au sein du SIPP dans le cadre de collaborations internationales et ce service compte plusieurs spécialistes, de renommée internationale, de la topologie magnétique de bord et des structures et dynamiques des plasmas de divertor ; ces conditions sont extrêmement favorables pour envisager l'engagement du SIPP dans le cadre du programme WEST et le comité recommande et appuie l'inflexion des programmes suivant cette direction. La physique des divertors ne peut être séparée de la technologie des composants qui permettent l'interception des lignes de champs, aussi, le comité recommande le maintien des niveaux de synergie entre le groupe de physique du bord et le groupe en charge des PFC d'une part, et entre ce dernier groupe et le groupe d'ingénierie mécanique d'autre part ; la transversalité entre ces trois groupes ayant donné la mesure d'une remarquable efficacité.

Avant d'aborder l'expérimentation en configuration avec divertor X, l'importante base de données, théoriques et expérimentales, construite dans le cadre du programme de recherches sur le divertor ergodique devrait permettre de conclure sur la pertinence d'un tel mode d'action sur le plasma de bord et une réponse définitive sur l'action d'ergodisation active devrait être formulée au regard des enjeux de la nouvelle phase de développement.

Enfin, le comité recommande que soient réunies les conditions de délimitation des périmètres d'actions des groupes en vue d'entreprendre les modifications qu'entraînera le projet WEST sur l'ensemble des dispositifs en périphérie de plasma (antennes et coupleurs, structure finale d'acquisitions des diagnostics...) ; de par sa mission et ses objectifs le SIPP doit dès à présent entreprendre une réflexion amont sur l'impact de ces modifications.



Intitulé de l'opération : Service Tokamak, Exploitation et Pilotage

Nom du responsable : P. BAYETTI

- **Effectifs de l'équipe ou affectés au projet :**

96 agents travaillent au sein du STEP, 44 ingénieurs de recherches permanents, 44 techniciens permanents et 8 non permanents dont 4 doctorants et 1 post doc.

- **Appréciation sur la qualité scientifique de la production, Appréciation sur le rayonnement, l'attractivité et l'intégration de l'unité de recherche dans son environnement :**

Le Service d'Exploitation et de Pilotage est bien plus qu'un simple service d'exploitation et de pilotage comme le laisserait croire son appellation ; l'expertise et la compétence de ses agents constituent le socle sur lequel nombre de résultats issus des autres services ont été construits et la disponibilité de ses agents est la condition quotidienne de la productivité de l'Institut.

Le nombre des articles co-signés par ses agents et les deux autres services témoigne de ce rôle essentiel au sein de l'Institut.

Le STEP, au-delà de son expertise dans les domaines de la technologie et de l'opération, a su développer des compétences d'interface en physique, en particulier dans le domaine de la simulation MHD et des scénarios. Cette démarche volontariste de dialogue avec les physiciens constitue une garantie d'efficacité de l'ensemble des activités de l'Institut.

Au-delà du pilotage, les recherches au sein du STEP sont orientées vers les aspects d'automatique, de contrôle-commande, d'acquisition et traitement des données de diagnostics, mais aussi vers la maintenance et le développement des bobines supraconductrices, des systèmes de pompage et la préparation de l'enceinte. L'audition des présentations des groupes : Groupe Pilotage, Asservissement et Scénarios (GPAS), Groupe Assemblage, Réfrigération et Vide (GARV), Groupe Informatique, Contrôle-Commande et Acquisition (GICA) et Groupe Cryomagnétisme (GCRY) a permis au comité d'apprécier leur professionnalisme ainsi que la qualité remarquable de la culture scientifique technique commune partagée par les agents du STEP.

Les spécificités de ce service ont amené le comité à modifier la grille de lecture de l'activité utilisée pour les deux services précédents. Nous proposerons d'abord une analyse des missions et de leur impact par groupe.

Dix neuf permanents travaillent au sein du groupe Groupe Assemblage, Réfrigération et Vide. Ses activités concernent les systèmes de pompage et de vide, de refroidissement et de détection de fuites. Elles incluent les missions de maintenance et de développement, d'intervention sur le tokamak (assemblage de dispositif dont de nouvelles antennes de chauffage ; remplacement de tuiles pour inventaire en deutérium) et de recherche et développement dans le domaine des composants (programme CIEL), de l'inspection (robot pour ITER), des localisations de fuites (ITER, DEMO).

Le groupe joue ainsi un rôle clef dans la disponibilité et la performance de la machine ainsi que dans ses programmes de développement (CIEL, CIMES, WEST). Ses compétences s'avèrent notamment requises pour répondre aux problématiques d'ITER en terme de retour d'expérience et de mise au point de systèmes dédiés dans des contextes plus sévères (champ magnétiques permanents, robotisation requise).

La qualité des travaux se mesure au taux de disponibilité du tokamak (plus de 87%), aux expertises sollicitées (refroidissements sur ASDEX et TITAN) et aux nombreuses participations aux programmes internationaux.

Dix huit permanents travaillent au sein du groupe Groupe Pilotage Asservissements et Scénarios. Ses missions concernent le pilotage du tokamak, de ses dispositifs d'injection et de plusieurs systèmes de mesure et détection. Il constitue donc un élément essentiel de l'organisation opérationnelle du tokamak.

Ses missions l'ont conduit à développer des modèles de scénarios opérationnels d'exploitation du tokamak et de son plasma ainsi que de contrôle de l'état obtenu par boucle entre diagnostics, contrôle et actuateurs. Pour cela, des reconstructions en temps réel de la configuration du plasma sont effectuées. Le groupe a également en charge



plusieurs systèmes de mesures magnétiques ou électromagnétiques et a développé un diagnostic optique pour imagerie rapide.

Plusieurs de ses études revêtent une importance certaine au regard du programme ITER : le contrôle en boucle fermée des instabilités MHD, une méthode de reconditionnement des parois en présence de champ magnétique, le développement de diagnostics magnétiques pour ITER.

Le groupe a produit 180 publications (revues et actes) et piloté plus de mille pulses de plasma par an. Il développe de nombreuses collaborations nationales et internationales et participe à plusieurs programmes internationaux.

Vingt trois permanents travaillent au sein du groupe Groupe Informatique Contrôle-commande et Acquisition. Ce groupe a en charge la maintenance et le développement de l'ensemble des ressources informatiques, depuis les composants jusqu'aux systèmes et aux utilisateurs et depuis l'acquisition et le contrôle jusqu'au traitement et la simulation. Il gère ainsi, outre des chaînes d'acquisitions complexes, un ensemble de 530 PC, 16 serveurs, 3 réseaux et 3 clusters, nécessitant des développements et reconfigurations régulières. Dans ce contexte, il a élaboré un système de collecte de données général et développe des diagrammes simplifiés d'information et de procédure aux utilisateurs.

Les missions du groupe sont donc liées à la fois au fonctionnement et à l'exploitation de la machine et aux activités quotidiennes des membres de l'IRFM. A ce titre, le fort taux de disponibilité des différents sous-systèmes constitue un indicateur élevé d'efficacité.

Dans le cadre de la communauté de la fusion, ce groupe développe un programme de collaboration visant à combiner des codes hétérogènes avec différentes interfaces et langages (ISIP : Infrastructure et Software Intégration Project). Il participe par ailleurs pleinement à un programme européen d'infrastructures dédiées aux simulations (EUFORIA).

Vingt permanents travaillent au sein du groupe Groupe Cryomagnétisme. Il assure l'ensemble des opérations de maintenance et des activités de recherche dans les domaines des bobines supraconductrices. Il participe à la fourniture de 9 bobines pour JT-60SA dans le cadre de l'approche élargie (BA) et ses compétences sont aussi sollicitées dans le cadre du projet ITER.

La construction et la maintenance sur 25 ans du système cryomagnétique du premier tokamak supra conducteur au monde est à mettre au crédit de ce groupe et l'expérience ainsi accumulée est unique au monde. Elle a été précieuse pour le LHC qui utilise la même technologie cryogénique originale : l'hélium superfluide à pression atmosphérique. L'expérience du groupe sur les grands aimants supraconducteurs est remarquable aussi bien du point de vue des réalisations que de la compréhension des phénomènes (stabilité, pertes AC...).

L'expérience ainsi accumulée est valorisée dans le cadre de collaborations et contrats, en particulier pour le support à la machine japonaise JT-60SA en collaboration interne au CEA avec l'IRFU ; pour les tests sur l'installation SULTAN des supraconducteurs niobum-étain du circuit toroidal et des supraconducteurs niobum-titane du circuit poloïdal. Au delà de la conception et de la validation de systèmes supraconducteurs, le GC assure, au quotidien, la maintenance et le suivi de l'installation cryomagnétique TS.

La création du master national Sciences de la Fusion, a offert à ce groupe l'opportunité de développer un enseignement de Cryomagnétisme au niveau national et le comité encourage l'amplification de cet effort de valorisation par l'enseignement de l'expertise française en supraconductibilité industrielle.

Dans le contexte de la construction d'ITER et de plusieurs machines asiatiques la France apparaît comme le lieu idéal de formation des spécialistes en cryomagnétisme.

Les auditions et discussions ont convaincu le comité de la très bonne articulation des activités de ces quatre groupes et de l'excellente transversalité des échanges.

La qualité et la pérennité des activités contractuelles sont garanties par l'expérience, unique au niveau mondial, de l'opération d'un tokamak supra conducteur sur une durée de 25 ans. Cette expertise technologique constitue le point fort majeur du service.



Le risque identifié par le comité serait une dispersion trop généreuse de savoir faire techniques uniques dans le domaine de la technologie fusion, dans le cadre de collaborations dissymétriques, et l'Institut doit veiller à la systématisation d'une contractualisation exigeante pour toutes les collaborations.

- **Appréciation sur le projet :**
 - Existence, pertinence et faisabilité d'un projet scientifique à moyen ou long terme :

Le projet du STEP s'inscrit dans celui de l'IRFM aux niveaux des quatre axes stratégiques ST1, ST2, ST3 et ST4. Il est clair que l'apport à l'approche élargie, en termes de cryomagnétisme, dans le cadre de l'axe ST1, sera déterminant pour le positionnement global de l'Institut au sein de cette approche élargie.

Le périmètre des interventions pour la conception et la réalisation du divertor tungstène n'est pas encore complètement identifié mais le STEP en sera l'un des acteurs majeurs, offrant ainsi, plus qu'un projet, un enjeu à la hauteur de ses savoir-faire.

Enfin, la participation à une initiative de conception numérique d'un réacteur commercial trouvera au sein du STEP un environnement adapté à la double culture scientifique et technique que nécessite cette entreprise. Le comité considère que les projets à long et moyen termes du STEP sont pertinents et réalistes.

- **Conclusion :**
 - **Recommandations :**

Le comité recommande au STEP de se préparer à jouer un rôle majeur, voire porteur, pour les deux projets à long terme de l'Institut que constituent (i) une initiative de conception d'un réacteur intégrant les contraintes commerciales et industrielles et (ii) la modification des conditions d'extraction de la puissance à travers le passage d'un système à limiteur vers un divertor tungstène, permettant ainsi d'offrir à TS la possibilité de fonctionner avec un point X et à ITER de minimiser les risques associés à un programme trop innovant et sans base de données provenant de retours d'expériences.

La partage et la valorisation des connaissances dans les domaines de hautes technologies étant appelés à entrer dans une phase nouvelle de par la compétition au niveau mondial autour de l'offre de formation en enseignement supérieur, le comité recommande aux agents du STEP d'amplifier le remarquable effort de formation qu'il ont initié dans le cadre du master national fusion et de développer des enseignements en phase avec les savoir-faire technologiques dont ils sont dépositaires. La richesse du tissu académique de la région PACA (IUT, Université et Ecoles) et le support de l'INSTN offrent les conditions adéquates pour un tel développement.

5 • Annexe A – Summary of the Report: Analysis, Appreciation and Recommendations

Fusion research has a long and bright history in France with TFR being the most relevant and the best diagnosed tokamak in the European fusion programme in the seventies. The consequence of this unique position was that French Atomic Authority (CEA) could design a challenging and forward-looking device, Tore Supra (TS), on the basis of good tokamak understanding owing to the superb diagnostics of TFR. TFR key staff played also a decisive role in the design, construction and operation of JET as well as in the design of ITER. The ITER site Cadarache is another proof of the international appreciation of the French fusion programme.

Tore Supra, being equipped with superconducting coils, tackled one of the most critical issues on the way to a fusion reactor based on the tokamak concept: steady-state operation. The problem thereby is that the tokamak is intrinsically pulsed and current drive by external means is necessary for steady-state operation. Consequently, TS is equipped with various high power waves heating and current drive systems. For the last decades, TS was the only tokamak with steady-state capabilities. This is still correct for Europe whereas this



issue is pursued now by others national fusion programmes with EAST in China, KSTAR in Korea, SST-1 in India, LHD stellarator in Japan and, in the future, with W7-X in Europe and JT-60SA in Japan.

The TS steady-state programme has a strong technology component; besides the safe operation and surveillance of a large super conducting magnet system, it is the technology to heat and fuel the plasma for long pulses and, most critically, to exhaust the plasma power safely onto appropriate target structures. In the frame of the TS programme and in cooperation with industry, long-pulse heating systems have been developed based on ion-cyclotron and lower-hybrid heating schemes.

Most critical is the issue of power exhaust. In a complex, but successful R&D programme, compound target plates have been developed with industry on the basis of technologies, which form now the basis for the divertor target plates of ITER and the steady-state stellarator W7-X under construction in Germany.

The module unit for these high-power components, capable of exhausting 10 MW/m² under steady-state conditions and about 50-100% more for transients is a compound structure, which ensures the mechanical stability, the safe module cooling and a textured graphite surface which cannot melt.

The bonding technique of graphite onto the copper target is the most complex part in the development. In the frame of this programme, IRFM gained as unique selling point unmatched expertise in all aspects of long-pulse, steady-state technology and tokamak plasma handling.

Moreover, in cooperation with alternative concepts, e.g. the divertor tokamaks JET and ASDEX upgrade, excellent modelling routines have been developed, which will also play a major role in the future cooperation with ITER and in the frame of the so-called numerical tokamak programme. A complementary field of excellence and recognition at IRFM is plasma theory in the field of tokamak stability and turbulence.

When the concept decisions on Tore Supra were taken in the 70ties, the most reliable and widely investigated tokamak configuration was one with circular cross-section. The target material of choice was graphite, as described above because it turned out to allow the best plasma performance and to pose the least problems during stable operation or in safely handling unstable processes.

A major result of the world-wide studies on plasma-wall interaction is the concern, however, about the qualification of graphite surfaces in fusion power plants with DT operation because of the tritium inventory accumulated inside the graphite due to the specific erosion and re-deposition mechanisms.

The studies on TS played a decisive role because the long-pulse capability of the device makes it specifically relevant for such investigations. Though graphite is still the material of choice for many fusion devices, refractory or light metal walls are under intense investigation in devices programmatically close to ITER. Both classes, low Z-materials like beryllium on JET and high-Z material like tungsten on ASDEX-upgrade are tested.

Another crucial development over the last decades was the transition from limiting the plasma by material targets to the divertor concept with magnetic limitation. This concept, not realised on Tore Supra because it matured after the major TS design decisions have been taken, is realised in all major tokamaks now. The considerations for ITER to safely handle the plasma-wall interaction are based on the divertor concept and a two-staged material programme starting with a material mix of beryllium, graphite and tungsten for the first divertor and the complete coverage with solid tungsten bricks as a second step in case this choice fulfils all requirements as presently expected.

With the WEST project to be discussed further down, IRFM upgrades TS allowing to address these issues and generally enhancing the relevance of its unique steady-state programme.

IRFM, with TS in the core of its programme, has a bright near-term future. The CIMES programme comes to fruition now and Tore Supra is equipped with modern high-power radio-frequencies and micro-waves heating systems. This allows tackling highly relevant and urgent issues for ITER in the field of ions heating and core current drive along with the clarification of the use of the so-called off-axis current drive capability of lower hybrid waves.

Recent studies have clearly shown the risks for ITER in reaching its second goal, $Q = 5$, for long-pulse operation. Though the use of lower hybrid waves is not an approved heating and current drive systems on ITER



yet, it is clear that a critical assessment of this position has to be carried out in near future. It is possibly TS which will provide the most critical data for this clarification process.

The participation of IRFM in the share of equipment procurement for ITER that has been allotted to Europe is made difficult by the process that F4E is currently using to call for tenders. Even though specifications for pieces of equipment are known, the current process of highly segmented calls for tenders does not allow for medium term planning, for sufficient continuity in work packages allotment, and for research and industrial organisation to develop and negotiate participation strategies. Furthermore it jeopardises some of IRFM assets in the bidding process while giving few opportunities to highlight combined skills such as "integration of systems and diagnostics", "cryogenic systems and superconducting magnets", diverse "heating modes and associated technologies", "technology and integration of plasma facing components"... In addition, IRFM's SWOT analysis emphasises needs for improving relations with industry.

The medium-term prospects for IRFM are determined by ITER and, again, are excellent. IRFM as the host and neighbour of ITER will play a specific role which goes beyond that of the other partners. IRFM is preparing itself for this key role by considering several unique infra-structure installations of value for ITER.

The panel recommends to systemise this clarification process even more and specifically to agree with ITER over the next years, which installations are of need. It is too early to argue now that every diagnostics foreseen for ITER will first have to pass a clearing process by being safely and robustly operated in Tore Supra. But it could well also be that each diagnostic has to demonstrate its specified capability on Tore Supra including the data acquisition system before it is mounted onto ITER.

The panel strongly supports the longer-term programme of IRFM to strengthen the fusion power plant studies. IRFM is well prepared thanks to the traditional orientation toward technological topics and to the close relation to ITER. In addition, France is the only European country with an excellent background in nuclear engineering both in research and in industry. This unique situation gives IRFM an exceptional chance but also a specific responsibility to develop the fusion power plant studies within the EU fusion programme and to serve as liaison to the available resources of the French fission world leadership.

For IRFM to take benefit from the experience gained on long pulse tokamak physics and technology, and for it to also remain influential on ITER experimental program and in future physics and technology developments for Fusion, it is essential to preserve a French-European effort in these areas that is distinct from solely supporting ITER experimental needs.

A further excellent option for IRFM is the potential of the Broader Approach. The high-power computer facilities to be realised in this frame will foster the excellent theory and modelling work and will allow the institute to continue its leading role in the frame of tokamak modelling and the development of the basis for the "numerical tokamak". From the possible realisation of the material test installation IFMIF, the material programme of IRFM and its collaboration partners will tremendously benefit. Finally, from about 2017 on, with the super conducting tokamak JT-60 SA an ITER satellite device will be available for cooperation.

The panel also recommends to not only develop long-pulse discharges but to also develop and demonstrate the optimal and economic use of long pulses for specific scientific programmes. A critical issue is the problem of impurity accumulation in programmatically relevant high-density, high-beta plasmas. The corresponding programmes should be further expanded.

In order to preserve IRFM position as a vital component of the European research program on Fusion, it is important to keep TS in operation together with demonstration platforms of other nature (technology test benches...) for conducting well targeted combined physics and technology demonstrations of value for both ITER and the next steps.

In this respect, the capability of TS to sustain long pulse operation is expected to be an asset for conducting ITER-relevant experiments. Additional reflections on smart experimental programs in this direction are encouraged to emphasise the value of TS to support ITER continuing operation.

The proposed WEST project allows replacing the material limiter of Tore Supra by a separatrix and foresees the implementation of a divertor. This necessitates, however, a major hardware change, the installation of a pair of divertor coils, divertor structures and, because the plasma will be elliptically shaped,



passive stabilisation rings. The ion cyclotrons heating antenna and lower hybrid antenna have to be matched to the new plasma location and the new plasma shape. In this new configuration Tore Supra with WEST would come close to the ITER shape parameters and would strongly update its relevance. The remaining deviations, e.g. the rather open geometry of the divertor, or the larger aspect ratio have been discussed by the panel, and no undue drawback was seen therein.

WEST was introduced by IRFM as another step to prepare its infrastructure for ITER. WEST is motivated by the technical possibility to critically test the technology of solid tungsten target plates as foreseen for the second ITER divertor. It is clear from the previous target development in the frame of the CIEL project that an extensive and pointed R&D programme has to precede the series production of such tiles for ITER. This argumentation has been fully accepted by the panel; the panel recommends, however, justifying the needs for WEST on a broader basis of argumentation. With WEST, the EU fusion programme will maintain its only super conducting device capable of steady-state operation upgraded, however, to expanded ITER relevance.

This would provide the European fusion programme with an ITER satellite tokamak. TS with WEST would be a cost-effective solution for this need if the basic infrastructure allows further operation over 10-15 years. Thus, the EU fusion programme can timely contribute to the above mentioned technology needs of W-targets. But beyond this, steady-state scenarios in the frame of the ITER $Q = 5$, steady-state programme (Scenario-4) can be developed well on time.

At the world level, such a programme would complement the studies done and foreseen in the frame of the Asian programme and allow Europe to independently scrutinise the results of others, which may have a strong influence on the path of ITER.

It should be mentioned here, that specifically the ITER Scenario-4 programme is not well defined because there is a severe lack of tokamaks capable of steady-state operation.

IRFM is the perfect place to fill this strategic gap with its demonstrated capability in the fields of steady-state plasma operation, exhaust technology and wave heating and current drive.

This programme requires operation in the H-mode, not possible in the present TS limiter configuration. The panel confirms the expectations of the IRFM, that the H-mode should be accessible in WEST with the available heating power. ITER will benefit strongly from a clarification of future steady-state operation being based on proven scenarios and modelling to assess the prospects and expected discharge quality in ITER. On this basis, the panel strongly supports the WEST project.

The funding of WEST is not yet ensured. It might be a severe problem to find external funding from interested Associations facing the losses of the EURATOM support for the Association programme due to the European funds for ITER.

On the other hand, the maintenance of TS beyond e.g. the completion of the CIMES programme and eventually the realisation of the WEST upgrade is of high importance for the EU fusion programme. Whereas the boundary conditions for a successful $Q = 10$ programme of ITER are basically set and the necessary equipment and the basic scenarios are defined, the $Q = 5$, steady-state programme is unclear, even without neutral beam heating, TS with WEST may be the most relevant tokamak to contribute to this ITER objective.

The present technology in Tore Supra is quite fabulous, it will be even more fabulous if the tungsten divertor (WEST) upgrade is made. However, even without the upgrade, Tore Supra is positioned to conduct a unique and creative program of scientific experiments, particularly those involving steady state wave heating and current drive, that, at the very least, can anticipate eventual needs of ITER in waves technology and at the very most might bring new and unanticipated scientific directions to the world program in fusion.

The panel recommends to build on the European "Integrated Modelling Task Force" to remain at the forefront of plasma science and contribute to further tokamak design studies. In particular, it is recommended to take benefit from this integrated modelling activity to identify well targeted experiments in TS as a means to contribute to the ITER experimental program and beyond.

It is recommended to keep IRFM organisation with three departments and missions combining theory, experiments and technology in each of the departments. However, skills and expertise need to be adjusted within each department to best comply with the updated positioning of IRFM with respect to ITER and European



Program for Fusion. IRFM Scientific Council is encouraged to play a stronger role in advising on the positioning of IRFM with respect to ITER and the European Fusion Program. It is also invited to advise on how to better focus IRFM activities in each of the four selected strategic areas and on strengthening cooperation with other European or international laboratories.

Notation

Intitulé UR / équipe	C1	C2	C3	C4	Note globale
Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM)	A+	A+	A+	A+	A+

C1 - Qualité scientifique et production

C2 - Rayonnement et attractivité, intégration dans l'environnement

C3 - Gouvernance et vie du laboratoire

C4 - Stratégie et projet scientifique

Statistiques de notes globales par domaines scientifiques

(État au 06/05/2011)

Sciences et Technologies

Note globale	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	Total
A+	6	9	12	8	12	11	58
A	11	17	7	19	11	20	85
B	5	5	4	10	17	8	49
C	2	1	2				5
Total	24	32	25	37	40	39	197
A+	25,0%	28,1%	48,0%	21,6%	30,0%	28,2%	29,4%
A	45,8%	53,1%	28,0%	51,4%	27,5%	51,3%	43,1%
B	20,8%	15,6%	16,0%	27,0%	42,5%	20,5%	24,9%
C	8,3%	3,1%	8,0%				2,5%
Total	100,0%						

Intitulés des domaines scientifiques

Sciences et Technologies

ST1 - Mathématiques

ST2 - Physique

ST3 - Sciences de la terre et de l'univers

ST4 - Chimie

ST5 - Sciences pour l'ingénieur

ST6 - Sciences et technologies de l'information et de la communication



Monsieur Pierre Glorieux
Directeur de la section des Unités de recherche

AERES
20 rue Vivienne
75002 Paris

Saclay, le 30 Août 2011

N/Ref: DSM/DIR/2011-0821/PRC/CPe

Objet : Observations de la Direction des Sciences de la Matière du CEA sur le rapport d'évaluation de l'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM)

Monsieur le Directeur,

J'ai examiné le rapport préliminaire d'évaluation de l'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM).

Je tiens tout d'abord à remercier l'AERES et le Comité d'évaluation pour le travail accompli et pour la qualité du rapport.

J'apprécie l'analyse effectuée et l'évaluation très positive du Comité. Je prends bonne note des recommandations et je peux vous assurer que je prêterai la plus grande attention à la mise en œuvre des actions qui permettront de les suivre le mieux possible. En particulier le projet WEST, pour lequel le Comité exprime son soutien, nécessitera une forte mobilisation de l'IRFM pour l'obtention de financements externes dans le cadre de collaborations avec des partenaires industriels ou internationaux.

Veuillez agréer, Monsieur le Directeur, l'expression de mes cordiales salutations.

Yves Caristan
Directeur des Sciences de la Matière