

Recherches et enjeux en physique des plasmas

Jean-Marcel Rax,
professeur à l'Université Paris XI,
directeur du Laboratoire de physique et technologie des plasmas (LPTP),
École polytechnique

La physique des plasmas

La matière constituant notre environnement proche se présente essentiellement sous forme solide, liquide ou gazeuse. Au-delà de ces trois états, à haute et à basse températures, deux nouveaux types d'états, (1) les "gaz quantiques" et (2) les "gaz ionisés", se distinguent par l'apparition d'une grande diversité de phénomènes physiques nouveaux : (1) à très basse température, les états supraconducteur, superfluide ainsi que les condensats de Bose-Einstein présentent une richesse de comportements associée aux corrélations, à l'échange et à la cohérence quantiques ; (2) à très haute température, la dissociation puis l'ionisation conduisent à la création de populations d'ions et d'électrons libres et ces charges libres induisent un comportement collectif, non-linéaire, chaotique et turbulent.

On appelle "plasma" ou "gaz ionisé" cet état exotique de la matière contenant une fraction significative de charges libres ; l'ensemble des concepts, méthodes et résultats propres à l'étude de cet état de la matière constitue la "physique des plasmas".

La physique des plasmas intègre les connaissances de nombreux autres domaines de la physique, tels que la

physique statistique, la dynamique hamiltonienne, l'électrodynamique relativiste, les physiques atomique, moléculaire et nucléaire ; réciproquement, de nombreux concepts et méthodes, issus de recherches fondamentales en physique des plasmas, ont été intégrés par d'autres disciplines, plus particulièrement en physique non-linéaire, chaos et turbulence et théories des instabilités.

Les plasmas dans l'univers

Les océans, les continents et l'atmosphère ne sont pas des plasmas ; ils se présentent sous formes fluides et solides neutres. La croûte, le manteau et le noyau terrestre sont constitués principalement de fer, d'oxygène, de silicium et de magnésium sous forme solide et liquide. L'atmosphère terrestre est composée essentiellement d'azote et d'oxygène, sous forme gazeuse neutre et, en quantités minimes, de gaz rares. Enfin, pour ce qui concerne les océans, ils sont formés d'eau, contenant, en proportions minimes, des sels minéraux, principalement des halogénures alcalins et alcalinoterreux. Cette analyse rapide de notre environnement proche pourrait laisser croire que la phase plasma est totalement absente à l'état naturel ; au contraire, **les plasmas constituent l'essentiel de l'environnement**

terrestre au-delà de la haute atmosphère. En effet, à l'échelle cosmique, **plus de quatre-vingt dix-neuf pour cent de la matière visible** se présente sous forme ionisée, en phase plasma. La physique de l'environnement terrestre proche relève donc de la mécanique et de la thermique des fluides classiques ; par contre, à partir d'une altitude de l'ordre d'une centaine de kilomètres, le rayonnement ultraviolet du Soleil entretient une structure ionisée dont l'étude relève de la physique des plasmas : l'*ionosphère*. À une telle altitude la densité de particules chargées atteint des valeurs supérieures à plusieurs dizaines de milliers d'électrons et d'ions par centimètre cube ; ces charges libres constituent la population à l'origine des propriétés électromagnétiques et physicochimiques originales de ces couches de la très haute atmosphère. Au-delà de l'ionosphère, c'est-à-dire à partir d'une altitude de l'ordre du millier de kilomètres, s'étend la *magnétosphère* : un plasma magnétisé structuré par le champ magnétique dipolaire terrestre et alimenté en espèces chargées par le vent solaire.

Au-delà de la magnétosphère s'étend l'espace interplanétaire, rempli aussi par un plasma, le vent solaire, issu des couches externes du Soleil ; le Soleil est aussi une sphère de gaz

ionisée structurée en différentes couches. Au-delà du système solaire, les étoiles, quels que soient leurs types, sont essentiellement des sphères de plasma et les espaces interstellaire et intergalactique sont aussi emplis de particules chargées en interaction électromagnétique. En conclusion, bien que notre environnement proche soit formé de matière neutre sous forme liquide, solide et gazeuse, à grande échelle, les plasmas constituent l'essentiel de l'environnement terrestre et la physique des plasmas s'impose comme l'outil de référence pour étudier cet environnement au-delà des couches basses de l'atmosphère. En particulier, les structures et les processus tels que : les aurores boréales, le vent solaire, les queues de comètes, les bras galactiques, les magnétosphères, la couronne solaire, les éruptions solaires, les atmosphères et intérieurs stellaires, l'émission électromagnétique des nébuleuses gazeuses et des pulsars relèvent de la physique des plasmas.

Les plasmas dans l'industrie

Au-delà de son intérêt en tant qu'outil de référence pour l'étude des problèmes d'astrophysique et de physique spatiale, la physique des plasmas se situe aussi en amont d'un vaste champ d'applications technologiques. Citons par exemple les domaines de haute technologie que sont la micro-électronique et l'exploration spatiale : **plus de la moitié des opérations de fabrication des processeurs et mémoires sont actuellement effectuées dans des réacteurs plasmas et les propulseurs plasmas sont considérés comme l'option la plus pertinente pour une mission habitée vers Mars.**

Au cours de ces dernières années la pénétration des procédés plasmas dans les processus industriels a augmenté de façon extrêmement rapide ; bien qu'elles ne soient pas encore identifiées en tant que secteur industriel spécifique, les technologies plasmas sont devenues indispensables aussi bien dans des domaines innovants comme les nouveaux matériaux, les

nanotechnologies et la propulsion spatiale, que dans des domaines plus classiques tels que la sidérurgie, l'éclairage ou la chimie.

Enfin, la physique des plasmas est l'outil essentiel pour comprendre les différents systèmes expérimentaux mis en œuvre dans le cadre des programmes de recherche sur la fusion thermonucléaire ; la fusion nucléaire du deutérium et du tritium en phase plasma constituant la seule option, à long terme, pour pallier l'épuisement des ressources en énergie fossile.

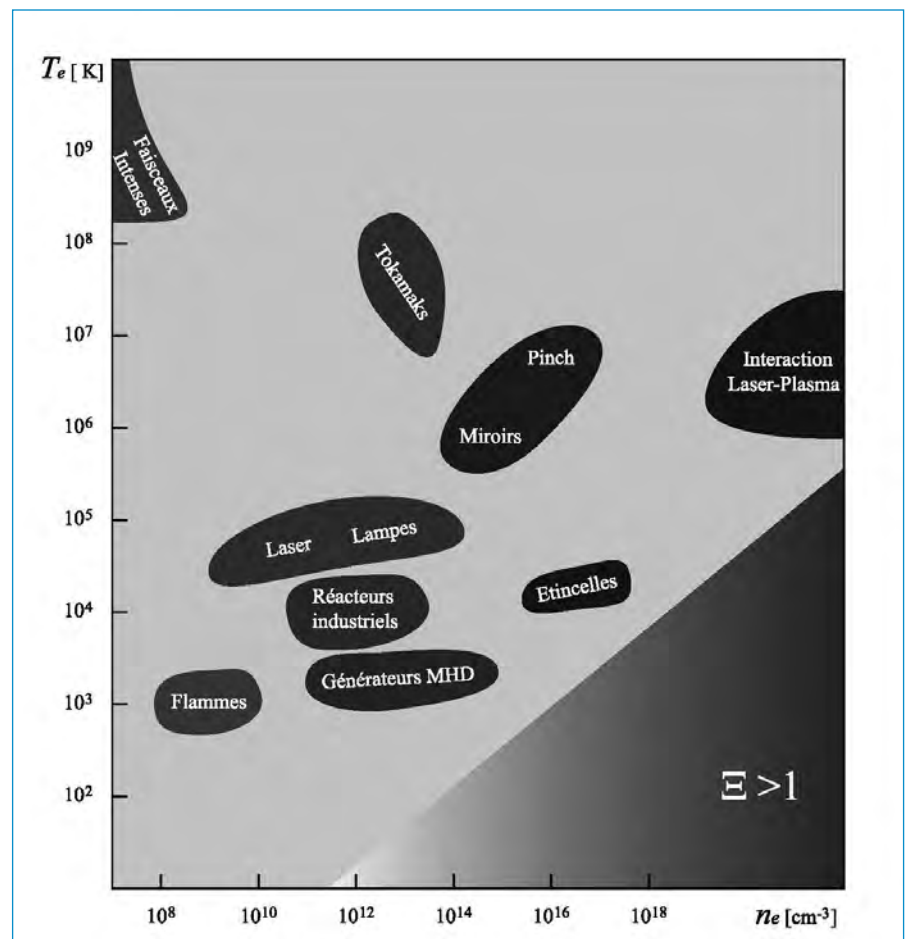
La figure 1 présente quelques valeurs typiques de densités (n) et températures électroniques (T) de ces plasmas thermonucléaires et industriels. Le domaine d'application de la physique des plasmas ne se restreint donc pas à l'étude des structures et processus astrophysiques ; depuis plusieurs dizaines d'années la physique des plasmas est devenue

indispensable dans de nombreuses industries ; elle constitue une branche extrêmement active et innovante de la physique appliquée. Les activités industrielles peuvent être classifiées suivant différents schémas ; du point de vue de la physique appliquée, il est intéressant de considérer trois grands types d'activités et de distinguer respectivement : (1) le traitement de l'information, (2) le traitement de l'énergie, (3) le traitement des matériaux.

Les technologies des plasmas sont au cœur des techniques de pointe mises en œuvre dans ces trois secteurs ; quelques exemples permettent de mesurer l'impact et le potentiel des procédés plasmas dans ces trois domaines.

Les technologies modernes de traitement de l'information utilisent en effet des composants électroniques miniaturisés tels que les micropro-

FIGURE 1



cesseurs et les mémoires. Ces composants ne peuvent être fabriqués que dans des réacteurs à plasma car la gravure de millions de motifs, possédant des détails de dimensions inférieures au millième de millimètre, est impossible avec les procédés mécaniques ou chimiques usuels, mais devient possible avec les flux d'ions énergétiques issus de la zone périphérique des décharges plasmas radiofréquence. Ainsi, les réacteurs plasmas radiofréquence, conçus pour maîtriser et optimiser ces flux d'ions, permettent les opérations de gravure et de dépôt sur les substrats de silicium et sont les outils essentiels des chaînes de fabrication des industries microélectroniques.

L'activité des sociétés industrielles modernes nécessite entre un et quelques gigawatts de puissance électrique par million d'habitants ; aussi, la consommation mondiale annuelle en énergie atteint désormais un niveau de l'ordre de 10^{20} joules. Compte tenu des contraintes écologiques et de l'épuisement des ressources fossiles conventionnelles, pour maintenir un tel niveau de production, la fusion de noyaux légers de deutérium et tritium, suivant la réaction : un deutérium plus un tritium donnent une particule alpha plus un neutron, dans des réacteurs à fusion thermonucléaire contrôlée, est la seule option, à long terme, validant physiquement les schémas de développement envisagés pour les sociétés postindustrielles.

En effet, **un système thermonucléaire (1) ne produit pas de dioxyde de carbone, (2) génère des déchets radioactifs de faible activité et (3) ne présente aucun risque d'emballement** ; le deutérium se trouve en quantité inépuisable dans l'eau et le tritium peut être produit dans la couverture du réacteur en utilisant les réactions du flux neutronique, issu de la réaction de combustion thermonucléaire, avec une couverture en lithium. Le lithium se trouve aussi en quantité abondante dans la croûte terrestre. Compte tenu des pertes radiatives et diffusives, les réactions thermonucléaires ne peuvent

s'auto-entretenir en régime de combustion exothermique qu'à partir d'une température de l'ordre d'une centaine de millions de degrés ; à de telles températures la matière est totalement ionisée et la problématique de la production d'énergie par fusion nucléaire se réduit donc aux problèmes complexes du chauffage et du confinement des plasmas.

La solution de ces problèmes, jusqu'à présent non résolus, implique la compréhension et la maîtrise des instabilités et de la turbulence dans les plasmas thermonucléaires, qui constituent les objectifs majeurs des programmes de recherches en physique des plasmas thermonucléaires.

La production d'oxyde d'azote, d'acétylène et de carbure de calcium, par synthèse en phase plasma, dès le début du vingtième siècle, marque le début des premières applications industrielles des plasmas dans le domaine de la synthèse et du traitement des matériaux. Les propriétés de hautes températures des plasmas d'arc de puissance sont utilisées en sidérurgie pour améliorer ou remplacer les procédés conventionnels des hauts fourneaux. Ces mêmes décharges plasmas en régime d'arc, mais à plus faible puissance, constituent les éléments actifs des systèmes de découpe et de soudure dans les ateliers de mécanique en amont des industries nucléaire, aéronautique et spatiale. Les plasmas permettent aussi la production de films de diamant ou de couches minces de silicium ; enfin la phase plasma offre une voie unique pour la synthèse de matériaux ultradurs n'existant pas à l'état naturel tels que le nitrure de carbone. Les réacteurs à plasma, parfois appelés générateurs à plasma ou sources plasmas, sont des dispositifs permettant la production de plasma afin d'utiliser (1) la population électronique pour amorcer et entretenir une réactivité chimique en volume, généralement dans des conditions de non-équilibre thermodynamique et (2) le flux d'ions en périphérie du plasma, dans la zone dite de gaines, afin de traiter des matériaux.

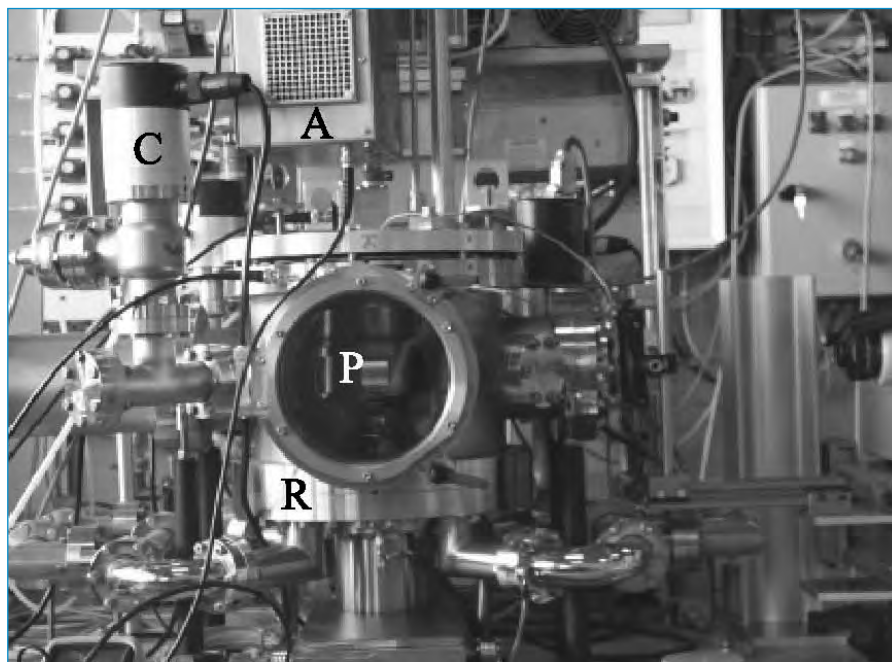
Les réacteurs pour la microélectronique

Les réacteurs radiofréquence, malgré l'apparente simplicité de leur structure, sont des objets au comportement complexe qui présentent une grande diversité de régimes de fonctionnement et sont sujets à de nombreuses instabilités. La figure 2 présente la vue extérieure du réacteur capacitif du Laboratoire de physique et technologie des plasmas de l'École polytechnique ; un champ électromagnétique radiofréquence (13,56 MHz) entretient le plasma (P). Le système complet est composé de quatre éléments : le système de pompage et de contrôle des gaz neutres (C), le générateur RF et le système d'adaptation d'impédance (A), l'ensemble des diagnostics de la phase plasma et de la phase neutre et enfin la structure de couplage et la chambre à plasma (R).

À basse pression, au voisinage de quelques millitorrs, dans ces structures radiofréquences, les collisions sont insuffisantes pour expliquer l'absorption du champ électromagnétique par les électrons ; un deuxième mécanisme de transfert d'énergie du champ vers la population électronique entre en jeu : le chauffage stochastique. Du point de vue du physicien, ce mécanisme est essentiellement un régime de couplage champ-particule en régime chaotique ; on voit donc que **les réacteurs plasmas RF, comme de nombreux systèmes de haute technologie, sont le lieu privilégié de rencontre entre la physique appliquée et la physique fondamentale**. Le chauffage stochastique, les instabilités, les transitions entre régimes dans les réacteurs radiofréquences sont autant de sujets de recherches qui nécessitent la mise en œuvre de l'ensemble des méthodes et outils théoriques et expérimentaux de la physique des plasmas.

La physicochimie des plasmas et plus particulièrement la compréhension et la maîtrise des cinétiques des espèces actives participant au processus de dépôt et de gravure constituent un deuxième sujet de recherches

FIGURE 2



toroïdal créé par le système de bobines distribuées autour du tore de plasma. Le résultat est donc une structure de champs complexes où les lignes de champ sont des hélices s'appuyant sur des tores emboîtés. La configuration Tokamak offre ainsi un exemple de champs complexes où les différentes dérives sont compensées et le confinement orbital assuré. Afin d'assurer la stabilité du tore de plasma des bobinages verticaux sont aussi nécessaires.

Le confinement orbital est une condition nécessaire, mais ne constitue pas une condition suffisante pour assurer un bon confinement global du plasma ; en effet, le plasma génère des champs électrique et magnétique qui ont tendance à détruire le confinement. Ainsi, le tore de plasma d'une configuration Tokamak doit être contrôlé en permanence, car il est l'objet de nombreuses instabilités et d'une intense activité turbulente résultant de couplages non-linéaires entre les champs et les particules.

La figure 3 présente une vue du Tokamak du Laboratoire de physique et technologie des plasmas. Les bobines générant les champs toroidal (B) et vertical sont visibles, ainsi que la chambre à plasma (T) et un ensemble de systèmes de contrôle (C), de chauffage (M) et de diagnostic qui complètent ce dispositif expérimental. Dans le domaine de la physique des Tokamaks, il est d'usage de distinguer les grandes machines dont les performances s'approchent des performances d'un réacteur et dont les équipes regroupent plusieurs centaines de physiciens et ingénieurs, des petites machines telles que celle de la figure 3.

Les performances des grands Tokamaks les placent loin devant tous les autres types de machines et de procédés qui ont été proposés jusqu'à présent pour amorcer et entretenir une combustion thermonucléaire. Ce succès fait des Tokamaks un sujet de recherche particulièrement actif, et de grands Tokamaks, dédiés aux études de physique des plasmas thermonu-

extrêmement actif, compte tenu de l'impact direct de ces études sur les procédés et opérations de fabrication des composants microélectroniques. Les réacteurs radiofréquences pour la gravure, le dépôt et l'implantation ionique génèrent des plasmas dont la fonction ultime relève du traitement des matériaux ; le traitement de l'énergie est aussi un vaste champ d'applications des technologies plasmas, que nous précisons dans la suite.

Les réacteurs thermonucléaires

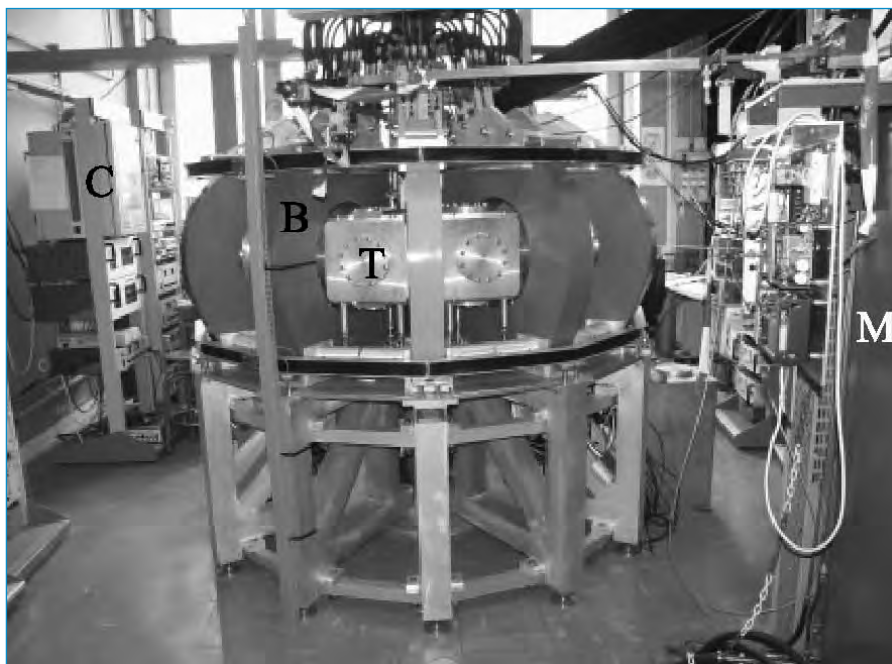
Que ce soit pour la production d'énergie dans les systèmes thermonucléaires Tokamaks, ou pour la propulsion des systèmes spatiaux avancés, le potentiel des technologies plasmas permet d'envisager des modes de fonctionnement et des performances inaccessibles aux technologies actuelles ; les plasmas offrent ainsi la possibilité de développer de nouvelles technologies innovantes, basées sur des principes physiques originaux.

Les Tokamaks sont des configurations magnétiques utilisées pour confiner et chauffer des plasmas en régime thermonucléaire ; en effet, la température d'amorçage et d'entre-

tien d'une combustion thermonucléaire étant de l'ordre d'une centaine de millions de kelvins, il n'existe aucun matériau pouvant supporter de telles températures. Il est donc nécessaire d'utiliser le principe du confinement magnétique : le mouvement d'une particule chargée interagissant avec un champ magnétique statique est la combinaison d'une rotation autour des lignes de champ et d'une translation le long des lignes de champ ; ce comportement des systèmes de charges est à la base du principe du confinement magnétique : si les lignes de champ sont fermées ou restent dans un volume fini, comme c'est le cas dans la configuration Tokamak, alors les particules restent confinées dans ce volume fini.

La réalité est plus complexe pour les configurations de type Tokamak car, en repliant des lignes de champ magnétique, se créent nécessairement des inhomogénéités qui engendrent des dérives perpendiculaires aux lignes de champ ; il faut donc compenser ces dérives afin d'assurer un confinement orbital. Pour cela, un champ, dit poloidal, généré par un courant traversant l'anneau de plasma (quelques millions d'ampères dans un réacteur) est superposé au champ

FIGURE 3



clés, ont ainsi été construits depuis plus de vingt ans : Tore Supra en France (TS, CEA Cadarache), JET en Angleterre (Euratom), TFTR puis MSTX aux États-Unis (DoE Princeton), JT60 au Japon et bien d'autres.

Le projet mondial ITER doit permettre l'accès à la combustion thermonucléaire dans une configuration magnétique de type Tokamak dans les prochaines décennies. **Les performances obtenues ces dernières années en termes de confinement, chauffage et contrôle des plasmas thermonucléaires dans ces grands Tokamaks traduisent des avancées remarquables et l'extrapolation des lois d'échelles, issues des bases de données accumulées ces vingt dernières années, permet d'envisager avec confiance l'accès à l'ignition et l'entretien d'une combustion thermonucléaire dans le réacteur ITER.**

Cependant, le programme Tokamak se heurte actuellement à quatre grands problèmes qui constituent de solides verrous physiques et technologiques. Ces quatre questions clés, scientifiques et techniques concernent : (1) la compréhension et le contrôle de l'interaction plasma-paroi, (2) la

compréhension et le contrôle de la turbulence, (3) la génération et le contrôle du courant en régime continu, (4) la maîtrise de la dynamique des populations suprathériques en régime thermonucléaire.

Elles conditionnent la mise au point d'un réacteur techniquement fiable et économiquement viable. En effet, dans un réacteur Tokamak en régime de combustion continue :

- 1) 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,
- 2) 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,
- 3) 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,
- 4) la population de particules alpha d'origine thermonucléaire et les ions suprathériques doivent être confinés, diagnostiqués et contrôlés afin d'assurer une combustion et un pilotage efficaces.

La conception d'un réacteur thermonucléaire qui soit à la fois techniquement fiable et économiquement viable passe donc par l'étude approfondie des processus d'interaction plasma-paroi et des mécanismes de turbulence, ainsi que par l'identification de nouveaux procédés de diagnostic et de contrôle de la turbulence, du courant et des populations suprathériques à l'origine de la réactivité thermonucléaire. C'est l'achèvement de ce vaste programme de physique, fondamentale et appliquée, qui constitue l'objectif du projet ITER, basé sur les développements complémentaires de ses précurseurs. **n**