Présentation à l'Académie
des sciences
par Édouard Brézin

Membre de l'Académie des sciences

– 6 juin 2006 –

Pendant la quinzaine d'années qui a précédé la décision de construire Iter à Cadarache, le projet a rencontré des oppositions de deux ordres bien différents :

- certains, jugeant que l'urgence des problèmes liés à l'épuisement des ressources possibles et à l'émission des gaz à effet de serre ne permettait pas d'attendre les dizaines d'années encore nécessaires avant de disposer de la fusion contrôlée. Ils remettaient en cause l'utilisation de moyens significatifs destinés à fusion plutôt qu'à la fission, ou à d'autres recherches concernant l'énergie. Certes, retarder les recherches sur la fusion aurait encore allongé l'échelle de temps, mais elle est si longue, et l'importance des réacteurs utilisant la fission, notamment avec des neutrons rapides, tant pour tirer parti de l'isotope 238 de l'uranium que pour incinérer les déchets de la fission, est si grande pour les 50 ans à venir au moins, que beaucoup trouvaient prudent de commencer avec la génération IV et ses neutrons rapides.

La critique s'adressait donc aux choix de priorité ;

- d'autres s'irritaient de discours sur la fusion qui la présentaient comme propre et indéfinie, avant même que les études permettant d'entrevoir s'il en était bien ainsi, soient entreprises. Le scepticisme l'emportait alors, renforcé par les dizaines d'années pendant lesquelles le contrôle de la fusion avait été présenté comme imminent.

Nous sommes aujourd'hui dans une perspective bien différente. La décision de construire Iter a été prise ; le choix du site, incontestablement lié à la qualité des équipes françaises, va faire jouer aux scientifiques de notre pays un rôle tout à fait éminent. Le seul problème d'actualité est donc bien de définir la meilleure stratégie possible pour que toutes les expériences indispensables avant d'entreprendre la construction de la machine suivante, baptisée Demo, mais très loin encore d'être bien définie, soient entreprises.

C'est là la perspective dans laquelle s'est placé le rapport de l'Académie qui vous est présenté. Nos collègues ont donc cherché avec lucidité et ouverture d'esprit, à déterminer les questions auxquelles il était indispensable de répondre avant d'envisager Demo, et de pouvoir affirmer que la filière de confinement magnétique d'un plasma pourrait aboutir, un jour, à produire de l'énergie dans de bonnes conditions de sécurité.

Le rapport analyse également le Laser Mégajoule (LMJ) en construction près de Bordeaux. Il s'agit là d'un projet bien différent. Le principe physique est ici de réaliser la fusion d'un mélange deuterium-tritium contenu dans une toute petite capsule, à l'aide d'une compression induite indirectement, par un laser de très grande puissance. Il s'agit là d'un projet national, et non comme Iter

d'un consortium mondial, projet parallèle à celui qui est entrepris aux États-Unis et, dans ces deux pays, l'initiative de la réalisation vient du monde militaire – en France de la Direction des Applications Militaires du CEA. Il s'agit donc au départ d'une machine destinée à la mesure des paramètres relatifs à la confection des armes, mais affichant la volonté de servir également la science civile, et éventuellement d'étudier des mécanismes de production d'énergie.

Nous analyserons donc séparément ces deux parties du rapport. Celui-ci comporte trois grandes parties distinctes, dont deux vous sont présentées aujourd'hui. Permettez-moi d'abord de résumer à grands traits ce que l'on y trouve.

La partie « Analyse et recommandations » comprend un résumé synthétique, qui a été distribué à tous nos membres, dans lequel les recherches à entreprendre sur *Iter*, les incertitudes que cette machine devra lever avant d'envisager la suite, sont clairement explicitées. Cette partie examine également comment nous devons nous organiser en France, et dans le contexte international, pour être à même de contribuer efficacement à ce domaine de science et de technologie. La rédaction résulte d'un travail collectif de l'ensemble du comité qui a soigneusement pesé toutes les phrases, tant le sujet est délicat.

Les chapitres exposent en termes clairs, sans qu'il soit nécessaire de connaître la physique nucléaire, ou celle des plasmas chauds, les questions scientifiques liées aux deux filières, confinement magnétique et confinement inertiel.

Les divers chapitres sont là, signés par leurs auteurs. Ils exposent les principes des *tokamaks* dans lesquels on réalise le confinement magnétique, de la méthode du confinement inertiel par laser, les difficultés de la magnétohydrodynamique qui régit les plasmas chauds confinés par un champ magnétique ainsi que leurs instabilités qu'*Iter* devra explorer. Le chapitre consacré à l'interaction entre lasers de très haute puissance (on parle de *petawatts*, 1PW : 10^{15} watts) explore à la fois l'irradiation directe du microballon prévue dans le LMJ et les schémas envisagés pour le futur allumage rapide du mélange DT en découplant la compression du microballon de l'inflammation du DT. Le chapitre suivant est consacré au flux d'énergie, pertes d'énergie par conduction donnant lieu à un dépôt de puissance localisé dans le *divertor* et pertes par rayonnement qui devront atteindre dans *Iter* 75 % de la puissance, pour limiter la puissance déposée sur le *divertor* à un niveau tolérable. Le chapitre consacré à la simulation numérique est d'une importance extrême. Il est clair que la modélisation de la MHD dans un régime fortement non linéaire, du transport turbulent de l'interaction plasma-paroi, dans une large gamme d'échelles spatiotemporelles est un défi considérable, tant pour les hommes que pour les calculateurs dont les puissances devront se situer dans le multiteraflops. Un chapitre est consacré à l'un des problèmes majeurs de la filière par confinement magnétique qui est celle

du divertor auquel les lignes de champ magnétique amènent les particules chargées qui vont y déposer leur énergie. La maîtrise de l'interaction plasma-paroi est l'un des enjeux principaux d'Iter.

Le chapitre suivant examine l'interaction du plasma contenu dans Iter, avec les matériaux de structure qui l'entourent. La production des neutrons de 14 MeV par fusion, produit dans ces matériaux de l'hydrogène et de l'hélium par l'effet des réactions nucléaires et il sera essentiel de vérifier pour l'avenir la tenue des matériaux sous l'effet de l'irradiation (et en particulier de la production d'hélium). Nous y reviendrons plus loin.

Enfin, un dernier chapitre examine les questions de sécurité, et affirme que l'emballement de la réaction de combustion n'est pas possible et que ces réacteurs ne produisent qu'une petite quantité de déchets radioactifs à vie longue.

Les annexes, qui ne seront pas publiées sous forme papier, mais seront disponibles sous forme électronique pour qui voudrait en prendre connaissance, sont une vaste bibliographie destinée à éclairer le contenu des chapitres.

J'en viens maintenant à l'analyse du rapport. Les auteurs ont fait un travail approfondi et lucide. Contrairement à trop d'ouvrages et d'articles qui masquent les difficultés qui sont encore devant nous, et vendent l'énergie propre et indéfinie du Soleil comme si c'était une certitude, les étapes à franchir sont ici indiquées clairement et sans forfanterie.

1 | Le confinement magnétique

Le premier défi d'Iter sera de tester le chauffage du plasma par les noyaux d'hélium produits dans la réaction de fusion, qui était négligeable dans les machines antérieures (Jet ou Tore-Supra). L'objectif est d'atteindre un régime où la puissance injectée ne représentera que la moitié de celle fournie par les noyaux d'hélium résultant de la fusion. L'ambition est de réaliser ce régime pendant 400 secondes, condition indispensable avant de passer au réacteur électrogène du futur qui fonctionnera en régime permanent. Dans cette future machine, baptisée Demo, le tritium ne sera pas injecté de l'extérieur mais régénéré par l'effet des neutrons réagissant sur des noyaux de lithium contenus dans une couverture circulante, Iter devra donc allonger les durées et les pressions du plasma pour valider le concept de confinement magnétique.

Le rapport est fort explicite sur les difficultés à surmonter avant que l'on puisse affirmer que la voie explorée avec Iter conduira à une technologie effectivement

utilisable pour produire de l'énergie. En revanche, il explore avec soins les diverses questions à résoudre avant de pouvoir affirmer que la route est dégagée.

Deux interrogations subsistent, liées sans doute à l'inexpérience du rapporteur en ces domaines.

1. Le rapport fait état de lois d'échelle phénoménologiques, dont la base n'est pas évoquée. Je les crois empiriques, alors que la non-linéarité de ces plasmas chauds est forte. Le lecteur que je suis aurait souhaité voir ces lois mises en perspective. Je souhaiterais pour ma part que les compléments de la troisième partie à venir abordent ce point.
2. Autre interrogation du rapporteur, sur la radioactivité induite dans les éléments du réacteur sous l'effet des neutrons. Les auteurs montrent bien que les déchets à vie longue, c'est-à-dire supérieurs à cent ou deux cents ans, peuvent être minimisés par le choix de matériaux adéquats. Mais, comme notre confrère Dautray l'a souvent expliqué, ce sont les radioéléments de courte durée de vie, parce qu'ils sont très actifs, qui présentent les dangers les plus grands en cas d'imprévu (les malheureux enfants victimes de Tchernobyl ont été principalement irradiés par l'iode 131 et accessoirement l'iode 133, tous deux à vie courte). Là encore, je souhaiterais que les textes à venir sur le site nous donnent quelques éléments sur les études concernant le choix de ces matériaux adéquats quant à la nature des déchets.

Je voudrais aborder maintenant trois points qui me paraissent importants à souligner dans la perspective de ce rapport.

A) Les matériaux

De manière générale, le problème des matériaux, paraît ici un peu minoré. Rappelons-nous combien il a fallu d'années pour maîtriser les problèmes de matériaux dans les cuves des réacteurs de fission, à cause des défauts créés par l'irradiation. N'oublions pas que les nombreux incidents de Superphénix, qui ont conduit à son arrêt pendant plusieurs années, avant la fermeture définitive, étaient liés aux matériaux, aux fuites de sodium dues à des aciers mal étudiés au préalable. Le chapitre 8 discute très clairement, parmi les problèmes de matériaux, celui lié à la production inévitable d'hélium, sous l'effet de neutrons émis par la fusion. Cet hélium insoluble va donc précipiter et il est indispensable de dominer ce phénomène pour éviter les fuites (de tritium par exemple). Cela est clairement expliqué dans le rapport, mais il insiste à ce propos sur l'importance de la modélisation numérique et de diverses méthodes de simulation. Certes,

je les crois importantes, mais j'aurais beaucoup plus insisté pour ma part sur l'importance du projet IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) qui, dans le cadre de l'accord Iter, doit être réalisé au Japon. Ce sera là la première source disponible de neutrons de 14 MeV, et nous aurons là enfin les études de matériaux indispensables pour la suite. Ce projet est à peine évoqué dans le grand chapitre qui reprend les conclusions d'ensemble, *alors qu'il me semble primordial de considérer que Iter et IFMIF sont deux expériences complémentaires qui doivent être réalisées préalablement à toute poursuite de la recherche sur la fusion par confinement magnétique et que la France et l'Europe devraient donc participer à l'ensemble de l'effort, aux études expérimentales des matériaux aussi bien qu'à Iter.*

Les auteurs du rapport affirment bien que la compréhension de ces problèmes sera primordiale avant d'envisager Demo, mais que les brèves bouffées de fusion expérimentées dans Iter, ne devraient pas conduire à des problèmes préoccupants du point de vue de la production d'hélium dans Iter. Nous ne pouvons là que faire confiance à leur expertise, mais l'expérimentation avec IFMIF sera là primordiale.

Pour conclure sur ce point, je crois qu'il existe en France, au CEA, au CNRS, dans les universités une communauté, peut-être un peu dispersée aujourd'hui, s'intéressant aux matériaux. Un Colloque consacré aux « matériaux de la fusion », rassemblant physiciens, modélisateurs, numériciens et mathématiciens travaillant sur ces thèmes me semblerait le bienvenu, et je souhaite que l'Académie des sciences en prenne l'initiative.

B) La modélisation et la simulation du plasma turbulent

De première importance, elle devrait, elle aussi, faire l'objet d'une organisation nationale et européenne, tant les enjeux sont importants et difficiles. Les équipes universitaires-CNRS et celles du CEA devraient organiser la communauté dans ce domaine.

C) La régénération du tritium

La machine du futur devra donc régénérer son tritium grâce aux réactions nucléaires produites par des neutrons venant irradier une couverture circulante contenant du lithium. Plusieurs types de couvertures circulantes sont à l'étude, beaucoup aux États-Unis, mais également en Europe avec des rôles qui vont d'un bouclier neutronique à la régénération. Dans une deuxième phase, que l'on peut situer vers 2015-2018, Iter devrait conduire des expériences où des

modules contenant du lithium permettraient d'étudier cette régénération neutronique. Le bilan global des neutrons dans cette technique n'est pas abordé dans le rapport et il serait utile d'organiser une présentation par un expert à l'Académie, de l'état des réflexions à ce sujet.

Conclusion

Le rapport a su bien situer les enjeux, les verrous scientifiques actuels, les questions à résoudre dans la perspective de disposer un jour de réacteurs à fusion par confinement magnétique. Il faut sans doute insister *in fine* sur le fait que, si ces recherches débouchent vers un réacteur de fusion, il faudra encore beaucoup de décennies. Se souvenir également que la fission par neutrons rapides, nécessaire pour l'utilisation de l'abondant uranium 238 et pour la gestion des déchets de la filière EPR, ne confère aucun caractère d'urgence réelle aux recherches sur la fusion. Certes il est indispensable que le monde explore cette possibilité qui, avérée, pourrait modifier complètement les questions énergétiques actuelles. Mais il faut se garder d'imaginer que la technologie de la fin du siècle sera semblable à la nôtre. Dans ces conditions, il faut poursuivre absolument les recherches fondamentales sur la fusion, les études sur d'autres procédés, tels les *stellarators*, ou les machines à plasmas de plus petites dimensions, sans se restreindre à une seule voie, prématurément identifiée comme la seule possible.

2 | Le confinement inertiel

La partie du rapport consacrée au confinement inertiel est, comme il se doit, moins développée. En effet rappelons que le programme LMJ, comme son homologue américain, est entrepris depuis que l'interdiction des essais nucléaires, impose de n'utiliser que la seule simulation dans la conception des armes nucléaires. Le procédé LMJ consiste à réaliser l'implosion d'une petite capsule de mélange DT, par ablation laser d'une coque externe qui, éjectant de la matière, comprimera par réaction le DT. Une première ligne d'intégration laser, la LIL, composée de huit faisceaux délivre 40 kJ dans l'UV en une dizaine de nanosecondes (un laser petawatt (10^{15} watts) devrait être construit sur cette même LIL). Cette LIL a permis de mettre à l'épreuve les concepts et les matériaux. Le LMJ final est prévu pour 240 faisceaux laser : réalisation attendue pour 2010.

Même si le domaine du confinement inertiel a connu des développements récents nombreux, on est loin encore d'imaginer le schéma de principe d'un

réacteur destiné à produire de l'énergie ; il n'existe en tout cas aucune étude en France à ce sujet.

Le rapport souligne la nécessité d'ouvrir les installations LIL et LMJ futur à la communauté scientifique civile, malgré le volet défense du projet. En effet, de nouvelles idées d'allumage rapide, ou allumage latéral, sont aujourd'hui proposées avec des lasers d'impulsions ultracourtes, la technologie est récente. Nos collègues du Rutherford Lab. ont proposé un projet européen en ce sens, et il est important, comme le souligne fort justement le rapport, que nous puissions convaincre nos collègues européens, de la volonté française d'ouvrir ses installations à la science indépendante des activités de défense.

Conclusion

Le rapport présente *in fine* des propositions d'organisation scientifique afin de répondre convenablement aux deux grands défis évoqués. C'est ainsi qu'il montre la nécessité de former et recruter 250 à 300 ingénieurs et physiciens dans le domaine des plasmas chauds. Le rapport met également l'accent sur le retard européen en matière de simulation, et modélisation pour la fusion en regard des États-Unis et du Japon. Bien entendu, à côté des hommes, il faut des moyens de calcul considérables. Il faut donc modéliser à la fois le plasma turbulent et instable, aussi bien que les matériaux résistant aux neutrons rapides. L'ouverture prévue du LMJ aux équipes civiles devrait permettre à terme la constitution d'une communauté « fusion » regroupant les deux modes du confinement.

Les quelques remarques ou interrogations émises ci-dessus ne doivent certainement pas masquer l'appréciation très positive portée à ce rapport. Sa volonté d'exposer les espoirs, sans masquer les incertitudes, la revue des questions diverses, complexes et multiples, auxquelles il faudra répondre, en font un document tout à fait unique qui répond pleinement à la vocation de l'Académie des sciences. Je remercie vivement tous les auteurs de ce rapport pour le travail remarquable qu'ils ont fourni.

INTERVENTION DE CLAUDE ALLÈGRE

Membre de l'Académie des sciences

Ce rapport pose un problème de fond : l'Académie doit-elle se cantonner dans le traitement des problèmes techniques ? Ou bien s'autorise-t-elle également à parler de la politique scientifique de la France et à donner un éclairage sur les conséquences que peut avoir un tel projet sur le budget de la recherche ?

Nous sommes dans une situation de sous-financement de la recherche, que j'estime à peu près à un facteur 2 par rapport à ce qui serait souhaitable sur le secteur recherche-université. Les salaires sont trop bas. Les jeunes les plus brillants quittent le pays faute de moyens de travail, et nous nous lançons dans un projet extraordinairement risqué et futuriste, de plus dans une situation budgétaire globale elle-même très difficile.

La situation de la science française est dramatique alors que sa qualité est restée bonne. Au CEA, la recherche fondamentale est périodiquement menacée, et la recherche sur les réacteurs de quatrième génération a été réduite faute d'argent. D'autre part, l'ITER va assécher les crédits scientifiques de la région Paca, au bénéfice de la construction de routes, avec une création d'emplois estimée au maximum à 2000.

L'Académie peut parfaitement sérier les questions à l'intérieur de ses rapports : elle peut à la fois faire une analyse scientifique – et, de ce point de vue-là, indiquer que ce document est très bon, objectif et équilibré et scientifiquement interrogatif sur sa faisabilité –, tout en joignant un texte qui comporterait une mise en garde financière visant à protéger le financement de la recherche de notre pays. Ainsi, personne ne pourrait utiliser ce rapport pour dire que le projet ITER a été approuvé sans réserve par l'Académie des sciences.

Il n'y a pas de dissociation entre l'intérêt scientifique et la faisabilité d'un investissement lourd et les conséquences qu'il aura sur l'ensemble du financement de la Recherche.

INTERVENTION D'ÉDOUARD BRÉZIN

Membre de l'Académie des sciences

Nous ne sommes plus dans la perspective du débat sur l'opportunité de ce choix, qui a été fait, il faut le rappeler, dans le cadre d'un consortium mondial auquel participait Euratom, au sein duquel la France n'est qu'une partie-prenante. Les décisions ont été prises, et ce rapport a donc pour objet l'examen des problèmes à résoudre et l'explicitation des obstacles à franchir avant de pouvoir déclarer que cette technologie sera utilisable pour produire de l'énergie. Certes, la France a ensuite insisté pour le choix du site, mais, sur ce point, les opinions ont été contrastées et le débat a eu lieu.

L'objet du rapport était de procéder à une analyse scientifique. L'ensemble des coûts de l'opération est public et connu : on n'a donc pas besoin de l'Académie pour en prendre connaissance.

Toutefois, on peut rappeler que ces recherches sur la fusion reposent sur l'ensemble de notre compréhension de la physique, qu'il ne faut donc pas sous-estimer.

D'autre part, le Laser Mégajoule est financé par des crédits de la Défense et il ne peut donc pas être comptabilisé dans l'effort de R&D civil.

Enfin, l'urgence des problèmes de changement climatique implique des mesures immédiates, alors que la fusion ne sera au mieux disponible que dans un terme lointain. Ces recherches ne peuvent donc servir « d'alibi environnement ».

INTERVENTION DE ROBERT DAUTRAY

Membre de l'Académie des sciences

Je souhaite apporter quelques éléments scientifiques sur le sujet du rapport.

1 - Andreï Sakharov prend le train en juin 1949 (toute l'équipe soviétique de la bombe nucléaire était occupée à la préparation matérielle du premier essai de bombe A prévu le 23 août 1949 par Kurchatov) pour rejoindre pour la première fois le centre nucléaire de conception et de calcul des armes situé à Arzamas-16 (ancien couvent Sarov).

Toute la communauté scientifique russe concernée était sous pression pour participer à la mise au point d'un armement thermonucléaire ensuite.

Par ailleurs, un sergent télégraphiste, Oleg Aleksandrovitch Lavrent'ev, âgé de 23 ans, membre d'une division d'artillerie basée dans l'île de Sakhaline, avait envoyé à Staline plusieurs lettres proposant des éléments pour faire une bombe thermonucléaire et aussi une lettre pour faire une machine de fusion thermonucléaire contrôlée. Cette lettre, en particulier, fut envoyée au Comité central du Parti communiste, qui la transmettra à Bériia, patron de tout le nucléaire. Les neutrons produits par la fusion thermonucléaire pouvaient, selon l'avis de l'auteur, permettre de fabriquer du plutonium. Bériia la fit envoyer au centre de Arzamas-16, où on la passa à Andreï Sakharov.

Celui-ci, étudiant le dispositif torique confiné par un champ électrique, conçu par Lavrent'ev, vit, comme tout physicien de métier, que le plasma étant un bon conducteur électrique. Il fallait confiner avec des champs magnétiques. **Pendant la guerre**, à la fin de ses études à Moscou et de son affectation à Ashkhabad, capitale du Turkménistan, Sakharov avait été affecté pendant deux ans à une usine de munitions, l'usine Ulyanovsk. Il y avait introduit le **contrôle des caractéristiques** des très grandes séries de munitions fabriquées, **par un champ magnétique**. Sakharov reprit donc l'étude du tore en utilisant des champs magnétiques pour confiner le plasma. Ce fut, au centre d'Arzamas, le premier problème de physique théorique qu'on lui posa. Sakharov en discuta avec Igor Tamm (que Sakharov avait rencontré pour la première fois en 1945. Sakharov devint l'étudiant de Tamm), dont l'ouvrage, *La théorie de l'électricité*, était le meilleur disponible en Union Soviétique pour ce sujet. Tamm arriva de Moscou en août 1950. L'intérêt du dispositif, appelé successivement « Réacteur Toroïdal

Thermonucléaire », puis « Réacteur Magnétique Thermonucléaire », puis « Tokamak », résidait dans le fait que c'est le meilleur moyen de produire des neutrons par unité d'énergie nucléaire, donc aussi de produire du plutonium. Sakharov et Tamm croyaient, en 1950, que le dispositif fonctionnerait d'une manière opérationnelle au bout de 10 à 15 ans. Une des conséquences paradoxales de ce succès et de l'intérêt pour l'armement nucléaire fut (dans l'écrasante importance du secret en URSS) que Oleg Lavrent'ev, fut écarté de tout cela. Il en a fait le récit après l'ouverture de la Russie, notamment en 1994, auprès de l'American Institute of Physics.

2 - Un de nos confrères a demandé pourquoi, au lieu de la réaction nucléaire D+T, qui oblige à régénérer le tritium, ne pas utiliser la réaction nucléaire (d'ailleurs, il y en a deux) D+D ? La réponse comporte plusieurs volets qui jouent tous dans le même sens. Le plus important est le taux de la réaction thermonucléaire, noté « σv » [m^3s^{-1}], de D+T, à 10 keV, ce qui est prévu pour Iter et sa suite éventuelle de réacteurs de fusion ; cela entraîne une pression du champ magnétique extérieur nécessaire pour contenir la pression du plasma qui est ce qu'on sait faire de plus élevé dans le système technique actuel. Pour la réaction D+D, il faudrait une température environ 400 keV, entraînant une pression du champ magnétique extérieur nécessaire hors de portée de tout champ magnétique artificiel. De plus, à ces températures, les très grandes fuites de rayonnement électromagnétique interdisent, avec le fonctionnement des Tokomak tout fonctionnement des réactions nucléaires D+D, en continu.

3 - On peut se demander pourquoi ces machines Tokomak sont si gigantesques et ne produisent pas plus d'énergie que les réacteurs REP actuels. C'est que l'ordre de grandeur de la puissance par unité de volume du tore, à cause des considérations physiques, est de l'ordre de 1 kW/dm^3 . Dans un réacteur à fission, cette densité de puissance est de l'ordre de la centaine de kW/dm^3 , seulement limitée par l'extraction de la chaleur produite, par un fluide refroidisseur. Dans un surgénérateur à fission, on est obligé de viser un peu moins d'un MW/dm^3 , car on a investi beaucoup de matière fissile par dm^3 , donc beaucoup d'argent. C'est pour cela qu'on a employé dès le début des métaux liquides pour extraire la chaleur.

4 - On a parlé de MHD et de physique des plasmas dans ce rapport à propos de la fusion thermonucléaire. La frontière entre les deux modèles physique est la suivante. Quand le libre parcours moyen des électrons et des ions est petit par rapport aux dimensions du système, le plasma se comporte comme un fluide. Ainsi, sur la surface du Soleil, le libre parcours de collisions électron-électron est de l'ordre du cm. Dans la boule thermonucléaire du Soleil, ce libre parcours d'un électron est de l'ordre de 10^{-8} cm . Ces milieux se comportent comme des fluides, dans les champs magnétiques du Soleil. Ces milieux peuvent donc être traités comme de la magnétohydrodynamique (MHD).

Au contraire, dans les machines types *Iter*, les libres parcours des particules chargées vont d'une dizaine de mètres à des milliers de mètres. Ils doivent donc s'enrouler autour des champs circulaires du tore. Ce sont des phénomènes de physique des plasmas. Mais, on retrouve la MHD dans les barrières qui seraient placées éventuellement autour du tore pour récupérer les neutrons, régénérer le tritium et évacuer la majeure partie de la puissance, notamment les 14 MeV des neutrons.

5 - Si on compare le flux de neutrons arrivant sur la paroi extérieure du milieu des réactions nucléaires, il a, par MeV d'énergie produit, de l'ordre de la centaine de fois plus de neutrons et ceux-ci sont de 14 MeV. D'où l'importance des problèmes de matériaux sur cette paroi extérieure.

6 - Enfin, les échelles de temps des phénomènes à prendre en compte pour maîtriser le processus thermonucléaire contrôlé vont de 10^{-11} seconde pour les chauffages des électrons par les champs électromagnétiques, jusqu'à 10^4 secondes pour atteindre des états quasi permanents entre le plasma confiné et la paroi. Les phénomènes à simuler par des modèles mathématiques et numériques parcourent 15 décades en temps.