

INT 133/87

Décembre 1987

FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

"TRENTI ANS DE COURSE AU CRITERE DE LAWSON

P.J. Paris

TABLE DES MATIERES

TRENTE ANS DE COURSE AU CRITERE DE LAWSON	page	1
Rétrospective : un peu d'histoire	page	2
Débuts des recherches	page	4
Genève ...	page	6
Des prestations hors du commun	page	8
Adoption du tokamak	page	8
Le chauffage auxiliaire	page	10
Injecteurs de neutres	page	11
Les ondes électromagnétiques	page	12
Progrès dans le $n_0\tau_E$	page	13
La recharge du combustible pendant la décharge	page	14
Augmentation des températures	page	14
Les modes de confinement	page	15
Le point en 1987	page	17
ANNEXE I(a)		
Antiquité et états de la matière - définition du plasma	page	20
ANNEXE I(b)		
Energie nucléaire de fission et de fusion	page	23
Les réactions principales de fusion	page	25
ANNEXE II		
Libération de l'énergie de fusion : breakeven, critère de Lawson et condition d'ignition	page	27
ANNEXE III		
Economie et écologie de la fusion	page	29
ANNEXE IV		
Le tokamak TCV (Tokamak à Configuration Variable)	page	33
ANNEXE V		
Développement d'une source d'ondes électromagnétiques à très haute fréquence : le gyrotron	page	36

FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

"TRENTÉ ANS DE COURSE AU CRITERE DE LAWSON"

P.J. Paris

Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association EURATOM - Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
21, Av. des Bains, CH-1007 Lausanne, Switzerland

C'est une recherche de longue haleine qui passe par de grands moments d'espoir et de réussite mais aussi par de grandes périodes de doute. Les problèmes rencontrés ne se résolvent pas aussi vite, et il faut quelquefois plusieurs années - souvent liées d'ailleurs à la construction de nouvelles installations expérimentales - pour les comprendre définitivement et y apporter une solution. Ceux-ci résolus, il se trouve que de nouvelles embûches apparaissent. On ne comprend pas encore très bien le milieu dans lequel on tente de démontrer la faisabilité scientifique de la fusion thermonucléaire contrôlée en laboratoire. Ce milieu, c'est ce qu'on appelle le plasma, état ultime de la matière à très haute température où les atomes sont dissociés en ions et électrons [Annexe I(a)].

Malgré cela, la fusion nucléaire reste l'un des paris les plus audacieux du **XX^{ème}** siècle que les physiciens du plasma tentent de gagner. La **11^{ème} Conférence** Internationale de Physique des Plasmas et de Fusion Contrôlée, organisée par l'IAEA*, qui s'est tenue il y a un an à **Kyoto**, a été l'occasion de faire le point sur l'état actuel des recherches. Il s'est avéré, un peu comme pour le vin, que 1986 a été une année remarquable concernant les résultats glanés par les chercheurs du monde entier. Il faut dire que les grands appareillages de recherche, essentiellement trois (TFTR aux U.S.A., JET en Europe et JT60 au Japon), sont entrés dans leur phase expérimentale et que les "maladies d'enfance" de ceux-ci ont été traitées et voire même guéries. Les spécialistes s'accordent à dire que nous approchons de la réalisation, en laboratoire, du processus physique proche de celui qui

* Agence Internationale de l'Energie Atomique - Vienne - Autriche

fait briller les étoiles. A la fin de la décennie, au début de l'autre, nous aurons pu reproduire dans ces machines sophistiquées, qu'on appelle **tokamaks** (de l'acronyme russe signifiant "courant dans une chambre magnétique torique"), les conditions nécessaires à la nucléosynthèse des atomes légers de manière énergétiquement viable. C'est-à-dire qu'un grand nombre de réactions de fusion devrait avoir lieu pour que l'énergie libérée compense dans un premier temps l'énergie investie pour créer le processus. C'est en gros le critère de Lawson [Annexe II].

La carotte ... une énergie sans problème de combustible; les isotopes de l'hydrogène, utilisés comme réactants, existent en quantité abondante sur la planète. Ceux-ci, dans le cas de la réussite du projet, permettraient de produire sans problème 100 milliards de fois l'énergie totale consommée dans le monde en 1986, ... Faites le compte, aucune autre conversion énergétique employant d'autres combustibles ne peut être confrontée à celle-ci. Mais voilà ça n'est pas aussi simple que cela à réaliser. Pensez c'est en janvier 1957 que le physicien britannique John D. Lawson avait formulé les conditions rigoureuses de viabilité énergétique d'un réacteur thermonucléaire. Cela fait trente ans. [Voir aussi économie et écologie de la fusion, Annexe III].

Rétrospective : un peu d'histoire

Au départ, au début des années cinquante, trois pays avait entrepris des recherches civiles et militaires pour produire le plus vite possible de l'énergie atomique à partir de la fusion des isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium. Côté militaire on sait ce qui s'est passé, les U.S.A. ont réalisé la bombe H en 1951, l'URSS en 1953 et la Grande-Bretagne en 1957. Mais côté civil, c'est-à-dire côté **fusion thermonucléaire contrôlée**, après l'enthousiasme de la première moitié des années 50 où l'on pensait faire vite, l'élan s'est bien brisé devant les difficultés qu'on rencontrait. C'était la déprime.

Dans son livre "Plasma Physics" paru en 1962, Linhart résumait bien la situation qui prévalait en physique des plasmas avant 1950 : "... l'étude des gaz ionisés était considérée comme un joli sujet, plein de petites expériences colorées, mais où il n'y avait pas grand chose à découvrir et la seule vraie justification était l'amusement de ceux qui ont du temps à perdre."

Les gens qui s'intéressaient au plasma étaient d'une part ceux qui développaient des tubes électroniques et d'autre part les astrophysiciens. Parmi les pionniers qui ont marqué la recherche expérimentale on se doit de mentionner Crookes, Langmuir, Tonks et Bennett. **Crookes** (1879), qui étudiait des décharges lumineuses dans les gaz, avait défini le plasma comme étant le quatrième état de la matière. **Langmuir et Tonks** (1920 - 1935) ont sans doute été ceux qui ont révélé le caractère oscillant des plasmas, Langmuir ayant lui-même baptisé le gaz ionisé, aux propriétés bien différentes des gaz neutres, le plasma. Enfin **Bennett** (1934) avait montré qu'en faisant passer un courant longitudinal dans une colonne cylindrique de plasma, celui-ci se comprimait radialement sous l'effet du champ magnétique induit par le courant lui-même. C'est à partir de cette structure linéaire que vont se développer les recherches en fusion dans les années 50 - 60.

Quant aux astrophysiciens qui ont découvert le mécanisme de production d'énergie dans les étoiles, on peut prendre note de quelques travaux. En 1929, **R. d'E. Atkinson et F.G. Houtermans** ont postulé que l'énergie produite dans les étoiles était due à des réactions nucléaires impliquant des éléments légers. En 1939, **Hans Bethe** analysa en détail la production d'énergie dans les étoiles, notamment dans le soleil, à partir du cycle de la fusion nucléaire. Il montra que deux processus principaux entrent en jeu. Tous deux mettent en exergue les réactions de fusion avec des temps de réactivités dus à des chaînes de réactions quelque peu différents suivant la grandeur et la masse des étoiles. Un de ces processus établit que le soleil est le berceau de réactions de fusion où quatre protons soumis à des températures de 15 à 20 millions de degré et à des pressions énormes (10^{11} atmosphères) forment de l'hélium-4 stable. Ce procédé est

excessivement lent et c'est ce qui permettra au soleil de "brûler" son hydrogène pendant des milliards d'années [Annexe I(b)].

Tout ceci combiné au fait que **H.C. Urey** avait découvert le deutérium en 1932 et que **E. Rutherford** avait réalisé en 1934 une expérience de collisions entre des deutérons (noyaux de deutérium). Il avait produit pour la première fois du tritium (l'isotope superlourd de l'hydrogène) par transmutation des éléments, il avait aussi observé des réactions de fusion entre deutérons à très haute énergie. Je vous le dis tout de suite ce procédé n'est pas viable pour un réacteur, l'énergie investie est de plusieurs ordres de grandeurs supérieurs à ce qu'on peut en récupérer.

C'est ainsi qu'en 1942, **Enrico Fermi** à l'occasion d'une visite à l'Université Columbia suggéra à **Edward Teller** la possibilité de développer une grande source d'énergie en "brûlant" du deutérium. L'idée du réacteur à fusion était née.

Débuts des recherches

Mais revenons en 1951, suite à une annonce officielle par le président argentin J. Peron qui déclarait que le physicien allemand Richter avait réussi à réaliser la fusion contrôlée dans le laboratoire situé sur l'île d'Huemul en Argentine*, les physiciens américains entreprirent un programme civil important groupé sous le nom de "Programme Sherwood". C'est ainsi qu'est né le projet "Matterhorn" initié par l'Astrophysicien **L. Spitzer** et qui permit de fonder le célèbre laboratoire de physique des plasmas de Princeton. Aux Etats-Unis diverses installations virent le jour; à Los Alamos (Arizona) des expériences de strictions linéaire ou torique, à Princeton (New Jersey) le stellerator, au Lawrence Livermore Laboratory (California) des machines à miroirs magnétiques. De même en Union Soviétique où l'effort s'intensifiait, **I.E. Tamm** et **A.D. Sakharov** étudièrent la stabilité du plasma dans une enceinte torique immergée dans un champ magnétique. A.D. Sakharov préconisa

* Cette nouvelle fut démentie plus tard.

deux solutions de stabilisation de l'anneau de plasma soit de maintenir au centre de la décharge un conducteur électrique torique (mais le fait de "suspendre" un conducteur mécanique au centre d'une décharge à haute température ne semble pas viable, il serait pulvérisé et refroidirait le plasma) soit, et ceci est techniquement plus faisable, de créer un courant axial directement dans le plasma par la méthode d'induction.

C'est l'idée de base qui a servi à construire des tokamaks. Il se posait une question qui de nos jours encore n'est pas entièrement résolue même si nous avons quelques idées pour contourner ce problème: "Malgré tout il n'est pas clair, en utilisant cette méthode, que le plasma à très haute température ne soit pas détruit lorsque l'induction du courant s'arrête".

L'investissement énergétique pour créer et maintenir le plasma dans un tokamak est important. Le système de transformateur utilisé pour induire le courant dans le plasma à ses limites et c'est pour cela qu'on se retourne actuellement vers la génération de courant par haute fréquence - encore faut-il que l'onde soit appropriée -.

Le programme "tokamak" démarra en 1955 sous la direction de **M.A. Leontovitch** et **L.A. Artsimovich** à l'institut **Kurchatov** de **Moscou**. Le "TMP", qui était en quelque sort le progéniteur (l'ancêtre) du tokamak actuel, avait déjà des dimensions appréciables ($R=0.8\text{m}$; $a=0.13\text{m}$ et $B_T=1.5\text{T}$). Par rapport aux autres expériences il démontrait surtout la possibilité de maintenir dans un état quasi stationnaire une décharge dans un fort champ magnétique. Mais les décharges contenaient une fraction appréciable d'impuretés issues des parois de l'enceinte, en conséquence la température du plasma était peu élevée $\sim 100'000$ °C. C'est d'ailleurs ce défaut qui fit que ce système de confinement ne fut pas accepté plus vite par les chercheurs.

En Grande-Bretagne des groupes dirigés par **Thomson** et **Thonemann** se mirent en quête de la démonstration scientifique de la fusion en relançant le programme de striction linéaire et torique,

selon la filière adoptée par Los Alamos. C'est ainsi qu'en 1952 démarra le projet **Zeta** qui au milieu des années 50 obtint des plasmas dont la température était de l'ordre du million de degré pendant quelques millièmes de secondes. On mesura aussi un flux de neutrons qu'on attribua aux réactions de fusion des particules thermalisées du plasma, malheureusement il n'en était rien, ceux-ci étaient essentiellement dus à des réactions entre des deutérons accélérés par des instabilités engendrées dans le plasma et qui ne pouvaient donc représenter qu'une population de particules très petite par rapport à celles constituant la décharge.

Genève ...

Pour rester anecdotique, en 1955 lors de la première Conférence Internationale des Nations-Unies sur l'Utilisation Pacifique de l'Energie Atomique qui se tenait à Genève et qui était dédiée essentiellement à la fission, le président de la Conférence **H.J. Bhabha** prédit que des méthodes pour rendre la fusion utilisable industriellement seraient découvertes dans les vingt années futures. C'était sans compter des difficultés que rencontraient au fur et à mesure des recherches les physiciens. En avril 1956, Nikita Kroutchev et la délégation soviétique visitèrent les laboratoires de recherche atomique de Harwell en Grande-Bretagne. Au cours de cette visite I.V. Kurchatov donna une conférence sur la "possibilité de créer des réactions thermonucléaires dans une décharge gazeuse". C'est à partir de ces événements que les travaux concernant la recherche en fusion apparurent dans les revues académiques. Ce sont aussi ces événements qui ont permis de dévoiler, lors de la deuxième "Conférence Internationale des Nations-Unies sur l'Utilisation Pacifique de l'Energie Atomique" en 1958 à Genève, l'état des travaux en cours dans les pays industrialisés. Jusqu'alors les recherches étaient classifiées - secrètes -. Artismovitch dira de cette conférence "qu'elle était comme un étalage de nombreuses idées". Cette conférence marque surtout l'ouverture de la coopération et de la compétition internationale en matière de recherches.

Depuis lors se sont succédées régulièrement des conférences internationales ayant comme thème unique la physique des plasmas et la

fusion thermonucléaire contrôlée, celles-ci étant organisées par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. Elles ont contribué non seulement à mettre en commun les résultats, mais aussi à réorienter la recherche.

Pendant une dizaine d'années on assista à un piétinement de la recherche malgré l'ingéniosité des configurations de confinement du plasma proposées par les chercheurs. On était au "purgatoire", comme l'indiquait en 1961, lors de la 1ère Conférence Internationale qui se tenait à Salzburg, M.N. Rosenbluth, un des pontes de la recherche aux Etats-Unis. Quel que soit le système utilisé, le plasma avait un comportement instable. Seule une expérience soviétique proposée par M.S. Ioffe, et dont la particularité était de confiné le plasma dans une zone de champ magnétique minimum (puits magnétiques), ne montrait pas d'activités désordonnées avec de grandes fluctuations de pression. Cette caractéristique fut largement exploitée dans les configurations à miroir. Ce qui déplaça le centre de gravité des expériences qui jusque là restaient axées en majorité dans la filière des "pinch" (striction linéaires ou toriques) - dans lesquels les plasmas existaient pendant un temps très bref, comme un éclair, on pouvait obtenir des températures allant jusqu'à 5'000'000 °C pour les électrons et 500'000 °C pour les ions à des densités de 10^{22}m^{-3} mais seulement pendant quelques centaines de microsecondes; pour des temps encore plus courts (de l'ordre de quelques microsecondes) la température des ions pouvait atteindre 5'000'000°C [Los Alamos - Garching] -. Pour remédier aux difficultés on s'ingénia à trouver de nouvelles configurations, mais c'était pour tomber sur de nouvelles difficultés. Si bien qu'au milieu des années 60, une pléiade de petites expériences firent leur apparition, ce qui rendait la synthèse des résultats extrêmement ardue, l'horizon semblait bouché. Seule la théorie survivait et une meilleure compréhension des instabilités semblait émerger; des méthodes de stabilisation apparaissaient plus clairement. Par contre des instabilités électrostatiques entraient dans la ronde. En 1965, L. Spitzer reconnaissait lui-même "qu'un grand nombre d'obstacles avaient été surmontés, mais que ceux-ci pouvaient bien en masquer de nouveaux qui eux aussi devraient être résolus par la communauté scientifique".

Des prestations hors du commun

Au cours de la 3^{ème} Conférence internationale qui avait lieu à **Novosibirsk en 1968**, les soviétiques annoncèrent les résultats obtenus dans le **tokamak T-3** de l'institut Kurchakov. Le plasma y avait été confiné pendant un temps beaucoup plus long qu'un "temps critique" sur lequel on butait jusqu'alors. D'autre part les **électrons** avaient atteint une température de **10'000'000 °C** et les ions **3'000'000 °C**, ceci pendant quelques millièmes de secondes. La communauté scientifique se montra quelque peu sceptique car la méthode de mesure utilisée pour déterminer la température des électrons était passablement ambiguë. Artsimovitch invita alors une équipe britannique du laboratoire de Culham à venir en URSS avec leur équipement qui passait pour être le plus performant dans la mesure de la température électronique. La technique employée - la diffusion Thomson - montra l'année suivante que les résultats étaient meilleurs que ceux publiés par les soviétiques. Cette collaboration anglo-soviétique donne la preuve de la complémentarité internationale des recherches dans le domaine civil. Mais elle démontre aussi l'apparition de la haute technologie dans le domaine de même qu'une nouvelle technique sophistiquée : le diagnostic du plasma. Les résultats annoncèrent le déclin des expériences "éclair". Il ne restait alors dans la fusion par confinement magnétique hormis les tokamaks que les "stellarators" et les machines à "miroirs magnétiques" qui avait aussi leur qualité, notamment dans le domaine de la stabilité. En 1968 aussi, les expériences utilisant le laser comme moyen de produire des plasmas thermonucléaires firent leur apparition sur la scène.

Adoption du tokamak

Immédiatement après la vérification des bonnes performances de T-3, des programmes de construction de tokamaks se multiplièrent. A Princeton on convertit le stellarator C en un tokamak appelé ST; au laboratoire d'Oak Ridge (U.S.A.), ORMAK fut construit; TFR, à Fontenay-aux-Roses (F); CLEO, à Culham (G.-B.); Pulsator, à Garching (RFA) et JFT II, à JAERI - Tokai Mura - (Japon). Le Japon s'était lancé dans la course en 1958 après la Conférence de Genève. Durant les

années qui suivirent, les progrès allaient être remarquables, tour à tour les expériences dépassaient les prestations de T-3.

En 1971, dans le nouveau tokamak de Kurchatov, T-4, des électrons atteignaient 20'000'000 °C et les ions 600'000 °C, ceci pendant plus de 10 millièmes de secondes. Les résultats obtenus sur ST à Princeton étaient identiques. Toujours à Kurchatov T-6, construit avec un "tore dodu", c'est-à-dire en petit rapport d'aspect (R/a), abordait déjà le problème de la stabilité idéale en adoptant une coque, c'est aussi dans cette installation que fut étudiée en détail l'instabilité de disruption. La décharge devient tellement instable que le plasma se libère de sa cage magnétique et va violemment heurter le tore. Cette instabilité violente peut même endommager les parois de l'enceinte. Une analyse systématique de la viabilité du plasma (courant-densité) a été entreprise en 76 - 79 à Culham par J. Hugill. On a constaté une fenêtre d'opération, liée au courant de la décharge fonction d'une densité maximale, qui s'agrandit lorsqu'on utilise des injections de neutres, méthode qui permet aussi d'augmenter le courant et de diminuer les performances (V.s.) du transformateur d'induction. Une autre étude, aboutissant empiriquement à une loi d'échelle, avait été effectuée par Murakami à Oak Ridge (1976).

Le programme portant sur les plasmas produits par des faisceaux d'électrons et des faisceaux lasers s'intensifiait, malgré la mauvaise balance énergétique de ce procédé.

Mais, c'est en 1974 que de nouvelles tentatives furent amorcées. Dans un tokamak, le courant fournissant l'énergie de chauffage des particules, n'est pas suffisant lorsque celles-ci ont atteint une certaine température (20 à 30 millions de °C). Car une des propriétés particulières du plasma réside dans le fait qu'à haute température il devient excellent conducteur électrique (20 fois meilleur que le cuivre à température ambiante), le chauffage par effet Joule perd de son efficacité. C'est ce qui faisait qu'à partir d'un certain courant, la température électronique sur TFR ne dépassait pas 25'000'000 °C, ceci se vérifiait aussi sur ST. On avait alors cru que le plasma était "pollué" par des impuretés issues des parois de l'enceinte et que

celles-ci atteignaient le centre de la décharge refroidissant alors les électrons. Des essais furent effectués sur ST, TFR et ORMAK sans pouvoir démontrer une concentration significativement élevée au centre de la décharge.

Le chauffage auxiliaire

Il fallait donc trouver d'autres méthodes pour chauffer. Un nouveau type d'expériences débuta alors : chercher le meilleur moyen pour chauffer jusqu'au 100'000'000 °C nécessaires! Trois schémas différents de **chauffage auxiliaire** - en plus du chauffage associé au courant - sont utilisés avec des taux de réussites variés.

- le premier consiste à **injecter** dans le plasma des **particules neutres très énergétiques**, qui chauffent celui-ci par collisions. Pourquoi neutres ? Parce qu'il faut pénétrer dans le champ magnétique qui confine le plasma. Des particules électriquement chargées seraient défléchies et ne parviendraient pas jusqu'au centre du plasma.

- le deuxième utilise la propriété qu'ont les **ondes électromagnétiques**, à travers diverses résonances, de se coupler au plasma. L'énergie contenue dans les ondes est absorbée par les particules du plasma. Un peu comme dans un four à microondes, les aliments sont chauffés par l'énergie que l'onde dépose dans ceux-ci. Suivant le type de fréquence utilisée, cette méthode porte différents noms.

- enfin le dernier schéma fait intervenir des propriétés thermodynamiques : la **compression adiabatique**. En comprimant le plasma dans un volume donc plus restreint, on augmente à la fois sa densité et sa température. Par analogie, si l'on obture l'embout d'une pompe à vélo et qu'on actionne le mécanisme, on comprimera l'air contenu dans la partie hermétique et on produira de la chaleur. C'est ce qu'a démontré en 1974, le tokamak ATC à Princeton, la densité passait de 10^{19}m^{-3} à 10^{20}m^{-3} et la température des ions de 1'000'000 °C à 6'000'000 °C. Ce procédé

faisant intervenir trop d'énergie magnétique - coûteuse - avait été momentanément abandonnée en occident; l'URSS maintenait un programme dans cette méthode (TUMAN 2A). Un regain d'intérêt s'est manifesté aux USA, et on l'utilise sur TFTR.

Nous nous attarderons au développement des deux premières méthodes, car ce sont ces chauffages complémentaires qui marqueront les progrès obtenus au cours de cette dernière décennie.

Injecteurs de neutres

Les expériences portant sur l'injection de neutres ont débuté aux Etats-Unis sur le tokamak **ORMAK** (Oak Ridge, USA). Elles ont été rapidement suivies par des travaux sur CLEO (G.-B.), TFR (France) et ATC. En 1974, l'équipe d'Oak Ridge mettait en évidence une augmentation de la **température ionique** du plasma (avec 400 kW de puissance du faisceau de neutres, la température passait de 2'000'000 °C à 6'000'000 °C). L'influence de l'injection de neutres sur le temps de confinement de l'énergie ne pouvait alors pas être détectée, la puissance utilisée étant alors faible.

Malheureusement on se rendra compte plus tard du fait que quel que soit le chauffage auxiliaire utilisé, le temps de confinement de l'énergie contenue dans le plasma se détériore. C'est pourtant grâce à cette méthode que les plus hautes températures seront obtenues dans les tokamaks. Le développement des injecteurs de particules neutres est toujours d'actualité. Au début des années 70, on disposait de faisceaux dont l'énergie était de l'ordre 10 keV pendant un temps très bref ~0.5s (puissance maximale ~qq 100 kW), alors qu'aujourd'hui on produit des faisceaux dont l'énergie est supérieure à 150 keV pendant une période de l'ordre de 30s et la puissance maximale des **injecteurs multiples voisine 10MW**. Pour qu'un faisceau de neutres pénètre bien dans le plasma de fusion il faut que l'énergie soit élevée (100 à 200 keV), à ce niveau l'efficacité (liée à la neutralisation des ions) de l'injecteur de neutres décroît rapidement lorsqu'on part d'un faisceau initial d'ions positifs neutralisés, l'efficacité serait supérieure si l'on avait à neutraliser un faisceau d'ions négatifs.

Les spécialistes de ce domaine consacrent leurs efforts au développement de tels injecteurs.

Les ondes électromagnétiques

L'utilisation d'ondes électromagnétiques appropriées au chauffage spécifique des différentes particules contenues dans le plasma a été entreprise dans les années 60 en URSS et aux USA sur les tokamaks, les stellerators et les machines à miroir. La compréhension des mécanismes de chauffage et de pénétration des ondes dans le plasma sont encore malgré tout des sujets actuels de recherche. Une étude expérimentale systématique a montré récemment que pratiquement toutes les ondes (ion cyclotron, électron cyclotron, hybride inférieure, ondes d'Alfvén ...) possèdent des qualités quant au chauffage des particules du plasma. Cependant l'application est souvent accompagnée d'une augmentation d'impuretés. On note aussi une dégradation dans le temps de confinement de l'énergie.

Dans les années 70 et 80, les **ondes cyclotroniques ioniques** ont été employées sur une large échelle (TFR, ST, PLT, Alcator C, Uragan 3, T-10, FT2M) les prestations obtenues ont contribué à leur choix sur les expériences JET et JT60.

L'**onde hybride inférieure**, choisie initialement pour chauffer le plasma est maintenant opérée pour **générer du courant non inductif** dans le plasma. La première expérience de ce type a été réalisée en 1980 sur Versator au MIT (USA). Celle-ci fut suivie en 1982 d'une autre démonstration toujours au MIT sur Alcator C avec 1MW de puissance, une onde à 4.6 GHz avait pu générer un courant de 230 kA dans le plasma. La même année, sur PLT à Princeton, un courant de 450 kA était engendré dans le plasma à l'aide de la même méthode; à Grenoble également, les essais étaient concluants sur Petula. La méthode se généralisa. Actuellement le record est tenu par **JT60** qui en 1986 a généré plus de **1 MA avec 2 MW** de puissance. Un inconvénient dans cette méthode réside dans le fait que l'efficacité décroît lorsque la densité augmente, et au-delà d'une densité critique, ça ne marche plus. On pense aussi pouvoir exploiter la génération de courant non

inductif par l'emploi d'ondes cyclotroniques électroniques à très haute fréquence (>100 GHz), mais jusqu'à présent, il n'y a pas eu de démonstration expérimentale claire. Ces ondes peuvent être utilisées aussi pour chauffer efficacement les électrons du plasma. Le couplage des ondes au plasma est excellent et a permis en 1984 de presque tripler la température électronique dans le tokamak T-10 (de 1,4 keV à 3,8 keV avec seulement 0.9 MW). Il semble aussi que la méthode perturbe moins le plasma que les autres. Cette technique peut être aussi employée dans le contrôle du profil de la température des électrons, ce qui aurait pour effet d'influencer la distribution de courant et la stabilité du plasma. Actuellement il faut développer les tubes de puissance à ces hautes fréquences - les gyrotrons - pour pouvoir employer cette méthode sur les grands tokamaks. C'est le cas à Lausanne (CRPP-EPFL) où un projet important de développement d'un gyrotron de 120 GHz et de 200 kWatts est en phase de construction. Ce projet, réalisé en collaboration avec l'industrie Suisse (BBC), fait partie de l'effort européen de disposer rapidement de telles sources à hyperfréquences.

Progrès dans le $n_0\tau_E$

Parmi les progrès remarquables accomplis au cours de ces dernières années citons notamment les records du $N_0\tau_E$ réalisés sur Alcator A et Alcator C. En 1975 et en 1978 Alcator A avait obtenu respectivement $n_0\tau_E=1\cdot 10^{18}\text{m}^{-3}\text{s}$ et $n_0\tau_E=3\cdot 10^{19}\text{m}^{-3}\text{s}$. En 1983, Alcator C avait même dépassé le critère du breakeven $n_0\tau_E=8\cdot 10^{19}\text{m}^{-3}\text{s}$. Ce dernier résultat avait été atteint grâce à la recharge de "combustible" dans le plasma par une technique développée à Oak Ridge : l'injection de glaçons d'hydrogène. Cependant si le temps de confinement τ_E et la densité n_0 augmentaient, les températures ioniques et électroniques chutaient brutalement, puis recouvraient leur niveau en 15 à 40 millisecondes; la température des ions dépassant même la valeur avant injection. [T_e au centre de la décharge chutait de 17'000'000°C à 10'000'000°C, T_i au centre tombait de 13'000'000°C à 10'000'000°C, et 40 millisecondes après l'injection s'élevait à 15'000'000°C, la relaxation s'établissant en ~100 millisecondes.]

La recharge du combustible pendant la décharge

Les injecteurs de glaçons d'hydrogène ou de deutérium ont été employés pour la première fois en 1977 sur ORMAK à Oak Ridge pour approvisionner un plasma existant en combustible. L'utilisation d'un tel procédé pour augmenter la densité du plasma ou le recharger en hydrogène avait été proposé en 1954 par L. Spitzer. Jusqu'alors on pourvoyait à cela en injectant des "bouffées" de gaz à l'aide de vanes piézoélectriques rapides. Cette technique avait un désavantage, celui d'alimenter le plasma par le bord et de refroidir la périphérie, modifiant ainsi le profil de température et de densité. Les glaçons fortement accélérés ont une grande vitesse à l'entrée du tore, ce qui leur permet d'atteindre le centre du plasma - où l'on désire conserver les plus hautes densités et températures. En 1977 des glaçons sphériques de 70 μm étaient lancés à $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, en 1980 - 81 la technologie permettait d'injecter des glaçons de 1 à 6 mm de diamètre à $1'000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, actuellement on atteint des vitesses de $2'600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ notamment pour les injecteurs employés sur les grandes installations, autrement le glaçon ne pénètre pas jusqu'au centre. Pour JET on aimerait que les glaçons de 6 mm atteignent une vitesse de $5'000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $10'000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, alors les accélérations de l'ordre de $10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ devront être nécessaires. Le Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble a rejoint le laboratoire d'Oak Ridge dans le développement d'une telle technique : ces "pistolets" pneumatiques à "barillets" que sont des injecteurs de glaçons devront pouvoir fournir plusieurs glaçons par seconde pour maintenir la densité au centre constante.

Augmentation des températures

Ajoutons encore à ces prouesses technologiques que les températures ioniques atteintes sur les tokamaks PLT et PDX en 1980 étaient de l'ordre de $80'000'000 \text{ }^\circ\text{C}$ avec des densités moyennes de 3 à $4 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ - le chauffage additionnel était réalisé par injection de neutres énergétiques (40KeV-D⁰).

Les modes de confinement

Un autre effet, non prévu par la théorie a été découvert en février 1982 sur l'expérience ASDEX (Garching - RFA). Cette expérience possède la particularité d'avoir une singularité magnétique liée à son diaphragme magnétique - ce système a été l'objet d'étude sur d'autres tokamaks Doublet III (G.A., U.S.A.) DITE (G.-B.), PDX (U.S.A.), ...-. Au cours d'une décharge (avec en plus injection de neutres) on a remarqué qu'au delà d'une certaine puissance minimum de chauffage, il existait deux régimes de **qualité de confinement** : L (comme dans tous les tokamaks à limiteur - diaphragme métallique, et qui reflète une mauvaise qualité de confinement) et H (haute qualité de confinement). Pendant une certaine période on ne savait pas trop comment interagir sur le choix que faisait le plasma dans cette bifurcation L et H. Il semble que récemment la réussite d'enclencher la qualité H est pratiquement assurée sur les tokamaks à écorceur magnétique. C'est aussi ce qu'ont démontré D III et PDX. Grâce à cette méthode, il semble que la température électronique au bord du plasma décroît très rapidement et que les instabilités localisées à la surface sont réduites. En bref, l'isolation thermique à la périphérie du plasma est meilleure. Récemment JET a entrepris de changer la configuration magnétique à l'intérieur de l'enceinte, et c'est ainsi qu'en 1986, les premières décharges H ont été obtenues, conduisant à une moindre dégradation de confinement lors du chauffage additionnel.

Il apparaît alors que certaines méthodes de chauffage par ondes, pour lesquelles on choisira la zone de résonance à l'intérieur ou à la périphérie du plasma, permettront aussi d'accéder à des régime "quasi-H" de confinement. Les ondes d'Alfvén, étudiées sur le tokamak TCA de Lausanne comme chauffage additionnel, pourraient aussi bien servir à cela.

Ceci nous amène tout naturellement à analyser brièvement les résultats annoncés à la conférence de Kyoto.

La Conférence au pays du Soleil levant : l'été chaud de Princeton, l'automne pas tiède de JET (1986)

Les résultats obtenus sur **JET** au cours de l'année 86 méritent d'être mentionnés. Pendant la phase ohmique, le **courant plasma** a été de **5.1 MA** au maximum; mais c'est avec seulement $I_p=3\text{MA}$ ($B_T=3.4\text{Tesla}$) que le temps de confinement de l'énergie τ_E a atteint le maximum de **0.8 secondes** (record mondial absolu aussi). Les valeurs des températures ioniques et électrons étant alors de 3keV^* et de 4keV pour une densité moyenne de $4 \cdot 10^{19}\text{m}^{-3}$.

Grâce au chauffage additionnel, les températures ont pu être améliorées. Pour le chauffage haute fréquence (RF) - ondes cyclootroniques ioniques -, trois antennes ont été installées depuis le début de 1986. Les fréquences utilisées de 25 à 50 MHz permettent de chauffer le plasma à travers les fréquences de **résonances des particules minoritaires H^+ et $^3\text{He}^{++}$** ajoutées en faible proportion ($\sim 10\%$) au plasma de deutérium. Ainsi avec une puissance couplée de **7MW**, la température maximale des **électrons** au centre de la décharge était de **7.5keV**.

La seconde méthode utilisée, comme chauffage additionnel, est l'injection de particules neutres énergétiques. Un injecteur à sources multiples a été rendu opérationnel au début 86, il a permis d'injecter jusqu'à 6MW d'atomes H^0 à 80keV ou encore 9MW d'atomes D^0 à 80keV. Avec cette méthode, la température maximum atteignable dans le plasma dépend de la densité du plasma. De moyennes à hautes densités du plasma les ions ont été chauffés jusqu'à 6.5keV et les électrons jusqu'à 4.8keV (avec 5.5MW de faisceaux neutres). **Dans des décharges à basses densités, des températures ioniques extrêmes jusqu'à 14keV ont été atteintes.**

Ces résultats rejoignent presque ceux obtenus sur **TFTR** (Princeton) en été 1986. Des décharges, en juillet 86 avait produit des **températures ioniques de 20keV** dans des plasmas de basse densité,

* $1\text{keV} \approx 11'000'000\text{C}$

le $n\tau_E$ était de $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$. Ces expériences ont été réalisées avec des faisceaux de deutérium atomique, et le plasma était très ténu, ce qui a abouti à "produire" ce plasma de 20keV grâce aux ions décélérés issus du faisceau seul. Avec ces températures, et en ayant utilisé des décharges D-T, la puissance issue du plasma aurait été égale au quart de la puissance fournie. Dans d'autres conditions TFTR avait atteint en début 86 un record dans $n\tau_E$ relatif au breakeven; des décharges où les ions avaient 1.2keV avaient démontré un $n\tau_E \sim 1.5 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ ce qui dépassait le seuil du critère de Lawson. Quelques éléments nous permettent de penser qu'un auto-courant créé par le plasma lui-même (dû éventuellement à des particules rapides piégées dans des orbites très particulières) aurait été généré. Ceci, prévu par la théorie, permettrait d'économiser sur le transformateur ohmique.

Enfin deux derniers résultats qui pourraient avoir des conséquences positives sur les futures recherches ont été acquis sur l'expérience **JT60 en 1986**. D'une part un courant de $\sim 1.7\text{MA}$ a été généré par des méthodes non inductives, utilisant la **fréquence hybride inférieure (2GHz - 2MW)**; d'autre part l'utilisation d'un **limiteur magnétique (divertor)** a permis de **réduire la puissance rayonnée par le plasma d'un facteur 10**, signe que les impuretés produites à la périphérie du plasma pénètrent moins dans celui-ci et qu'en plus elles sont en grande partie éliminées par cet écorceur magnétique.

Le point en 1987

Au début 1987, des arrêts dûs à l'installation de nouvelles sources de chauffage complémentaire ont été prévus sur les deux grandes expériences, ce qui a ralenti en quelque sorte les campagnes expérimentales. Notamment TFTR a reçu de nouveaux injecteurs de neutres dont la puissance produite a été de l'ordre de 25MW pendant 2s (faisceaux de D^0 à 120keV). Ceux-ci ont été développés au Lawrence Berkeley Laboratory. Par ailleurs, 4MW de chauffage ICRH ont été installés.

Mentionnons que sur TFTR, les expériences utilisant 4 injecteurs de neutres (3 co - 1 anti) ont été maintenues. C'est ainsi que des limites de fonctionnement, dans le cas des "super-tirs" (basse

densité, haute puissance des particules neutres), ont été éclaircies : on peut maintenir les "super-tirs", à courant de plasma constant, jusqu'à une certaine puissance des injections de particules neutres. ($I_p=0.8MA$, $P_{NBI}=10MW$; $I_p=1MA$, $P_{NBI}=30MW$). Ainsi des températures $T_i=30keV$ on pu être obtenues.

Quant à JET, l'installation d'un second injecteur permettant ainsi d'augmenter la puissance installée jusqu'à 10MW (pour H^0 à 80keV ou D^0 à 160keV) ou 20MW (pour D^0 à 80keV). En 1988, la puissance RF sera progressivement augmentée jusqu'à un total de 32MW pendant 20s.

Le courant de plasma a été augmenté jusqu'à 6MA au début de l'hiver 87 il est prévu de le porter à 7MA (décharge avec limiteur). Il est envisagé d'accéder a un courant de 4MA avec un écorceur magnétique (points X : diverteur magnétique singulier ou double). Il a été aussi planifié de générer du courant par onde hybride inférieure, comme dans JT60.

Tout ceci afin d'obtenir un produit $n_i T_i \tau_E$ significatif pour réaliser la puissance de manière intéressante. La **meilleure valeur atteinte par JET est jusqu'à présent de $n_i T_i \tau_E = 2 \cdot 10^{20} m^{-3} keV \cdot s$** qui doit être comparée à $7 \cdot 10^{20}$ pour obtenir une fraction importante de chauffage dû aux particules α (Hélium) (condition de breakeven). Cette valeur peut encore être comparée à $3 \cdot 10^{21}$ qui devrait permettre à JET d'atteindre l'auto-entretien par les particules α du plasma thermonucléaire sans apport d'énergie externe (condition d'ignition).

De hautes températures ont aussi été obtenue sur JT60, avec 20MW d'injection de neutres, la température des ions a été de 11keV (dans des décharges avec limiteurs) et de 6keV (avec diverteur magnétique).

De grands travaux sont prévus sur JT60 notamment le changement de la chambre à vide, l'écorceur magnétique latéral n'était pas disposé convenablement (en haut ou en bas de la chambre à vide semble être la position idéale). En même temps, il est prévu d'augmenter le courant du plasma jusqu'à 7MA (décharge avec limiteur) et 6MA (diverteur magnétique). Ceci repoussera la reprise des activités expérimentales à 1990.

Enfin quelques résultats laissent à penser que nous aurons bientôt des explications en ce qui concerne les modes de bon confinement du plasma et de moindre dégradation du temps de confinement. En effet, on a montré l'existence, sur JFT2M, de modes H avec des décharges utilisant des limiteurs placés dans la zone de fort champ magnétique - configuration dont les résultats sont comparables avec des décharges produites, sur la même expérience avec un diverteur magnétique singulier -. Sur ASDEX et Doublet IIID, des expériences récentes ont fait état de conservation du temps de confinement (τ_E) en mode de fonctionnement H alors que la puissance totale investie (ohmique et injection de neutres) était de plusieurs Mégawatts.

Annexe I(a)

Antiquité et états de la matière - Définition du plasma

Depuis l'Antiquité les hommes ont eu l'ambition de recréer ce que la nature ou les dieux leur avaient légué. Dans la mythologie grecque, Prométhée, qui après avoir bafoué Zeus en lui offrant la graisse et les os d'un boeuf qu'il avait partagé entre les hommes et les dieux, récidiva en dérobant le feu des dieux pour le distribuer aux hommes. Depuis lors l'homme banni de la tale céleste ne cessa de rivaliser avec l'Olympe en cherchant avec quelque réussite à prouver son existence à travers de grandes réalisations ... Restons positif ..., il a aussi su se montrer égal dans la colère au courroux démonstratif des dieux. L'"effet Pandora" laissa des traces.

Dans l'antiquité riche en affrontements homme - dieu, **Empedocle** (490 - 424 av. J.-C.) suggéra que la matière était constituée de quatre états bien distincts : la terre, l'eau, le vent et le feu. Cette thorie, reprise bien après par **Aristote** (384 - 322 av. J.-C.), rencontra des contradicteurs, notamment dans la personne de **Leucippe** (V^{ème} - IV^{ème} s. av. J.-C.) et de son disciple **Démocrite** (460 - 370 av. J.-C.) qui dans sa "Grande Cosmologie" estimait que la matière était composée de tous petits éléments identiques entre eux et indivisibles (insécables = racine même du mot atome) : les atomes. Le temps leur a en grande partie donné raison car pour briser les atomes (les nucléons) comme on le fait actuellement dans les grans accélérateurs il faut utiliser des énergies considérables. Au fur et à mesure que l'énergie des accélérateurs croît, on pourra peut être découvrir de nouveaux éléments qui élargiront les bases de la pyramide des particules élémentaires qui de près ou de loin (mais toujours dans les "pouillèmes" de secondes) auront appartenu à l'explosion originelle. Grâce à ces accélérateurs, "bistouris" de la matière, en plein développement nous nous accorderons à penser comme **Nietsche** "Ceux-là seuls qui détiennent les clefs de l'avenir sont à même de déchiffrer les mystères du passé".

On connaît l'existence d'une centaine d'atomes stables qu'on représente familièrement par un noyau (contenant protons et neutrons), plus ou moins gros, autour duquel gravitent des électrons à très grande vitesse.

Il n'empêche qu'Empedocle et Aristote avaient aussi vu juste, mais à un autre niveau de la "pyramide" de la complexité. On parle aujourd'hui des quatre états fondamentaux de la matière : le solide, le liquide, le gaz et le plasma. Ces états sont définis suivant des conditions thermodynamiques caractérisés par la température et la pression. L'état plasma constitue l'état ultime de la matière lorsqu'on élève sa température à densité constante. Si on chauffe un gaz, l'énergie cinétique des molécules croît avec la température et les chocs entre les molécules ont pour conséquence de dissocier celles-ci en atomes. [Par définition la **température est une mesure de l'agitation constante et désordonnée** des molécules ou des atomes, plus généralement des particules constituant le milieu analysé. Dans nos appartements les molécules d'azote et d'oxygène de l'air ambiant se déplacent à des vitesses de 300 à 400 m/s. Cette vitesse croît comme la racine de la température.]

Mais continuons à chauffer notre gaz ... Lorsque la température atteint une dizaine de milliers de degrés, les chocs deviennent de plus en plus violents et les énergies sont telles que les électrons sont éjectés de leur orbite de giration qu'ils accomplissent autour des noyaux. **Le mélange, en fonction de la densité des particules chargées, qui apparaît, a des propriétés différentes de celle des gaz, notamment des propriétés électriques et électromagnétiques.** On dira de ce mélange d'ions et d'électrons que **c'est un plasma.** Dans les flammes à très haute température il apparaît en faible proportion du gaz ionisés, les Anciens avaient donc raison de dire que le feu représentait un 4ème état de la matière. "Si un mystère nous dépasse, feignons d'en être les auteurs" (Jean Cocteau).

On rencontre le plasma dans les étoiles, dans certaines couches de l'atmosphère telles que la magnétosphère et l'ionosphère (qui permet de communications radio à longue distance), dans l'espace

interplanétaire et interstellaire. Plus près de nous, il y a du plasma dans les tubes fluorescents (les tubes néons), dans les arcs électriques et les éclairs atmosphériques, dans les aurores boréales.

CRPP / Lausanne, janvier 1987

Annexe I(b)

Energie nucléaire de fission et de fusion

Il existe deux types de réactions nucléaires permettant de libérer une grande quantité d'énergie : la fission, actuellement utilisée dans les réacteurs nucléaires conventionnels, et la fusion.

La fission utilise des éléments lourds, tels que l'uranium 235, qui éclatent sous l'impact d'un neutron dont l'énergie maximalise la probabilité de réaction de fission. D'une part, les sous-produits de réactions emportent avec eux des énergies cinétiques récupérables par le fluide caloporteur - permettant le transport de l'énergie vers l'échangeur - et d'autre part, les neutrons issus des réactions maintiennent la réaction en chaîne.

La fusion thermonucléaire, quant à elle, utilise des noyaux d'éléments légers qui, en s'amalgamant, produisent des noyaux plus lourds. Ces réactions nucléaires de synthèse sont extrêmement rares aux températures ordinaires. Pour atteindre les seuils de rentabilité énergétique, il faut que les noyaux soient chauffés à des températures supérieures à 100 millions de degrés centigrades. Par ailleurs, un nombre suffisant de ces particules est nécessaire à l'entretien de réactions capables de maintenir le combustible à ces hautes températures.

Dans les **étoiles**, les réactions de fusion s'effectuent à des températures plus basses, de l'ordre de dix millions de degrés (~15'000'000 °C au centre du soleil), mais à des pressions considérables (au centre du soleil 10^{11} atmosphères, la densité est alors voisine de 10^{26} particules/cm³) : ce sont les mécanismes d'effondrement gravitationnel qui fournissent la chaleur requise, le confinement est réalisé par l'équilibre entre la pression de radiation produite et le champ de gravitation.

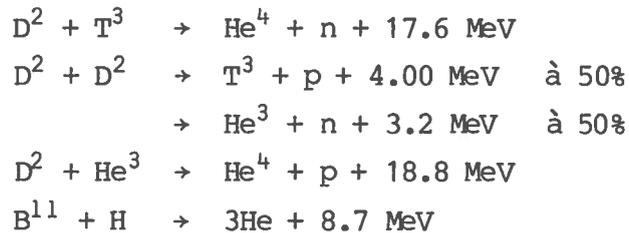
Il existe deux types principaux de réactions : la chaîne proton - protons (p-p) et le cycle CNO. Le temps moyen qu'attend un proton pour subir une réaction est environ de 7 milliards d'années, il est de 1 seconde pour le deutérium et de 150'000 ans pour l'hélium-3. Ces trois constituants appartiennent à la chaîne de réaction p-p la plus probable dans le processus énergétique du soleil. C'est la lenteur de tel processus qui permet aux réacteurs stellaires comme le soleil, de "brûler" pendant plusieurs milliards d'années. Il n'est guère possible de reproduire en laboratoire ces réactions extrêmement lentes à notre échelle et dont nous ne pouvons satisfaire les contraintes physiques. Cependant il existe des réactions utilisant des isotopes de l'hydrogène, le deutérium (D) et le tritium (T), qui semblent être, en principe, plus faciles à réaliser en laboratoire.

Le deutérium est un élément présent dans l'eau à raison de **0.034g/litre**. Il est isolé par centrifugation et par électrolyse. Les **réserves** de deutérium contenues dans les mers et les océans sont évaluées au total à $5 \cdot 10^{13}$ tonnes, une quantité qui permettrait de produire **100 milliards de fois l'énergie consommée** dans le monde en 1986.

Le tritium n'existe pas à l'état naturel, il doit être produit artificiellement à **partir du lithium**. Les réserves mondiales de lithium contenues dans l'écorce terrestre sont actuellement estimées à 10^8 tonnes et à 10^{11} tonnes dans l'océan, ce qui permettrait d'exploiter la réaction de fusion D-T pendant plusieurs millions d'années.

La nucléo-synthèse deutérium-tritium, libérant un noyau d'hélium et un neutron, produit 94'000kWh par gramme de combustible, comparativement dix millions de fois plus qu'un gramme de pétrole. Tout ceci explique l'intérêt d'une telle source d'énergie. Malheureusement, ce pari énergétique de cette fin de siècle comporte des difficultés dans sa démonstration et sa réalisation qui sont à la mesure des avantages qu'on peut en tirer.

Les réactions principales de fusion



Le tritium est un élément radioactif dont le temps de décroissance caractéristique (demi-vie) est de 12.3 ans. C'est un émetteur β , qui permet aussi d'obtenir l'isotope He^3 ,



Ce sont des réactions de fission du lithium qui permettent d'obtenir le tritium. L'isotope Li^6 donne lieu à une réaction exothermique qui, en cas de régénération du tritium dans le "manteau du réacteur" permettrait d'augmenter l'énergie récupérée,



L'isotope Li^7 , quant à lui, donne lieu à une réaction endothermique dont le neutron secondaire produit augmente le rapport de régénération du tritium, son énergie étant suffisante,



Il existe 7.4% de Li^6 contenu dans le lithium naturel. Si une fraction supérieure de Li^6 était nécessaire, l'enrichissement est relativement peu coûteux.

Si la réaction D-T semble être manifestement la plus réalisable actuellement, les réactions suivantes sont envisageables, quoiqu'elles nécessitent des conditions de température plus élevées :

- D-D, dont les réserves de combustible sont plus grandes,

- D-He³, où le He³ inexistant à l'état naturel peut être produit par la désintégration du tritium, ou par la réaction D-D,
- H-B¹¹, qui ne produit pas de neutrons.

CRPP / Lausanne, janvier 1987

Annexe II

**Libération de l'énergie de fusion : breakeven, critère
de Lawson et condition d'ignition**

Les sections efficaces de réactions font apparaître une probabilité maximale lorsque les noyaux sont à températures très élevées. L'agitation thermique des atomes est alors telle que ceux-ci éclatent et forment un mélange d'ions et électrons, c'est-à-dire un plasma dont une des propriétés est de réagir aux champs électriques et magnétiques. Cette caractéristique est utilisée dans la réalisation de la fusion magnétique (lente).

Il n'est évidemment pas possible de maintenir un plasma à une température de 100 millions de degrés en contact avec une paroi matérielle, il faut le contenir et l'isoler thermiquement : c'est le problème de l'isolation ou encore du confinement de l'énergie. La qualité de cette isolation peut être comparée, par analogie, à celle d'une bouteille thermos : plus longtemps le liquide contenu dans celle-ci restera à sa température initiale, meilleure sera l'efficacité de l'isolation. De plus, les particules devant être maintenues à ces hautes températures, il faut compenser les pertes énergétiques dues aux rayonnements ou à la convection.

De façon simple, pour un plasma ne contenant que les combustibles deutérium et tritium (sans tenir compte des impuretés), on peut résumer les conditions viables de l'énergie de fusion sous trois formes. L'objectif initial le plus évident est que l'énergie produite par les réactions de fusion soit au moins égale à celle investie. Cette formulation aboutit à la première relation de **breakeven**, pour cela il faut que $n_0 \tau_E > 7 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ pour un mélange D-T (50% - 50%) à une température de 100'000'000 °C.

Une deuxième relation, connue sous l'appellation "**Critère de Lawson**" tient compte des conditions d'opération d'un réacteur à fusion. John D. Lawson fut le premier à reconnaître l'importance du

confinement énergétique du plasma - traduit dans la valeur $n_0\tau_E$ -. Il a considéré pour le maintien d'un mélange D-T à 100'000'000 °C, récupérer une partie de l'énergie issue des réactions de fusion, la convertir ($\eta \approx 0.33$) et finalement la restituer au plasma pour compenser toutes les pertes notamment celles dues au rayonnement de freinage des particules à haute énergie. La relation est alors plus difficile à réaliser que la première, il faut que $n_0\tau_E > 1.4 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$.

Enfin il existe une troisième condition encore plus sévère pour qu'un plasma thermonucléaire continue de "brûler" sans apport d'énergie extérieure : la condition d'**ignition** (ou auto-entretien). Elle sous-entend que l'énergie des particules α (hélium) issues des réactions de fusion compense toutes les fuites d'énergie et contribue au maintien des conditions de réaction de fusion. Ce critère est plus difficile à satisfaire : $n_0\tau_E > 2 \cdot 10^{20}$ particules (à 100 millions de degrés) par $\text{m}^3 \cdot \text{s}$.

Ces critères doivent être reconsidérés dans le cas d'un plasma contenant des impuretés; le rayonnement de freinage devenant alors très élevé, le seuil énergétique viable des réactions est repoussé. Voire même si les impuretés représentent une fraction allant de 0.1 à 2 % selon les atomes du plasma, ce seuil ne serait pas atteint.

Annexe III

Economie et ecologie de la fusion

Une centrale de 1'000 MWe consommerait 300 Kg de lithium et 90 Kg de deutérium par an. A titre de comparaison ceci équivaldrait à brûler 2 millions de tonnes de pétrole ou 3,6 millions de tonnes de charbon. Dans le cycle D-T, ceci équivaut à dire qu'une centrale de 1'000 MWe consommerait en 24 heures une quantité de deutérium contenue dans 7 m³ d'eau. Dans ce cycle, le lac Léman pourrait fournir suffisamment de deutérium pour 10 réacteurs pendant plus d'un million d'années. Au coût actuel, la part du combustible intervenant dans le prix du kWh serait négligeable dans la facturation au public. Actuellement le prix du lithium est voisin de 100 \$/Kg et celui du deutérium de 1'500 \$/Kg. Dans l'avenir, le combustible existant en grande quantité, ce sont la manutention et le traitement qui interviendront dans le prix de revient du combustible. Il est clair qu'au stade actuel de nos connaissances, il ne peut être envisagé sérieusement de chiffrer le coût d'une centrale à fusion.

En ce qui concerne l'impact écologique des réacteurs à fusion, la **situation semble plus favorable** que celle des réacteurs à fission. Par la physique même, il n'existe pas au niveau des réactions de déchets radioactifs. Le tritium (seul élément radioactif des réactions) est brûlé avec le deutérium pour produire de l'hélium et neutrons. Les neutrons produits ne peuvent pas réagir dans le mélange D-T. Il n'y a donc pas de possibilité de réaction en chaîne comme dans le cas des réacteurs à fission. Donc, à ce niveau, le problème n'existe pas.

Les neutrons thermonucléaires servent à la **régénération du tritium** dans le manteau du réacteur. Là, commencent les problèmes. Ces neutrons doivent être thermalisés (décélérés) pour réagir avec le lithium et former du tritium; il faut contrôler la production du tritium. La **première paroi** du réacteur sera soumise à un bombardement neutronique intense; pour laisser les neutrons passer dans le manteau il faudra choisir un matériau transparent à ceux-ci de façon à ce

qu'il absorbe le moins possible. Il est nécessaire que l'enceinte soit donc constituée de matériaux ayant une demi-vie radioactive courte car ce sera le déchet radioactif le plus important qu'il faudra traiter et stocker. Cette paroi devra aussi être changée pendant la vie du réacteur, il faut donc penser à sa manipulation. Dans les grandes installations, telles que JET et TFTR, qui devront dans leur phase finale, recevoir du deutérium et du tritium, des développements en cours permettront d'employer des **moyens robotiques télémanipulables** pour effectuer des travaux simples dans l'enceinte activée par les neutrons "thermonucléaires". La halle du tokamak JET est d'ailleurs conçue de manière totalement étanche aux radiations émises par la structure expérimentale. Un choix judicieux des matériaux devrait nous tirer d'affaire - nous avons encore 20 à 30 ans avant d'en arriver à la construction des réacteurs; ceci devrait être suffisant pour trouver des matériaux adéquats -. Les études technologiques ont reçu récemment davantage d'attention au niveau mondial. **Dans le cadre européen**, depuis 1983, avec la naissance du projet NET des contrats ont été conclus entre l'Euratom (maître d'oeuvre de NET) et un grand nombre de laboratoires universitaires et d'entreprises privées, pour aboutir à une étude des matériaux susceptibles d'être intégrés dans la fabrication d'un réacteur. La recherche en fusion est devenue un facteur important dans le **développement technologique**, comme l'était la recherche spatiale dans les années 60.

D'autres dangers potentiels ne sont pas à ignorer. Le tritium a la facilité de diffuser à travers des parois chauffées; au contact de l'eau il forme de l'eau tritiée difficile à séparer de l'eau ordinaire. Du point de **vue biologique** l'eau tritiée est éliminée assez rapidement par le corps (une dizaine de jours, il n'y a pas fixation d'éléments légers). Une étude exhaustive portant sur les dangers du tritium a été réalisée pour le Conseil de l'Europe. Celle-ci, en cours de publication, semble donner au tritium moins de pouvoirs nocifs qu'on avait tendance à lui accorder, mais un règlement draconien en ce qui concerne sa quantité sur le site du réacteur reste applicable. Un autre possibilité réside dans l'incendie de lithium (contenu dans le manteau), comparable à un incendie de sodium, c'est une conséquence grave qui peut déclencher des explosions (hydrogène par exemple). Un

tel incendie peut oxyder le tritium et le rendre ainsi moins inoffensif. Il peut aussi transformer des produits radioactifs en composés volatils. Ce danger est suffisamment grave pour examiner l'utilisation de composés stables du lithium. Le **manteau du réacteur** devrait être le site de fabrication du tritium qui sera injecté dans l'enceinte du réacteur, le taux de régénération du tritium devrait être compris entre 1.05 et 1.6. Le lithium contenu dans le "manteau" pourrait être sous forme composée (liquide ou solide (céramique)) avec de l'oxyde de silicium, avec du Beryllium ou encore avec du plomb. Il ne sera alors pratiquement pas inflammable.

Enfin des matériaux spéciaux devront servir d'écran entre le manteau et les aimants **supraconducteurs** produisant les champs magnétiques afin que ceux-ci ne soient pas affectés par les radiations. Un réacteur à fusion, dans sa version à confinement magnétique sera extrêmement complexe il suffit pour cela de se représenter la coupe de celui-ci : au centre du plasma ~ 100 à $200'000'000^{\circ}\text{C}$, la première paroi et le manteau à quelques centaines de degré où devrait être recueillie l'énergie par double circuit fermé dirigé vers un déchargeur, et enfin des aimants supraconducteurs (ou non) refroidis à l'hélium liquide ($\sim -270^{\circ}\text{C}$).

Il existe cependant des points positifs. Alors que dans les centrales à fission les dangers d'explosion ne sont pas exclus (réactions en chaîne non contrôlées), dans un réacteur à fusion, l'énergie emmagasinée dans le plasma par unité de volume et de temps est si faible que même en l'absence de contrôle, aucun point chaud ne serait à craindre. Le plasma se refroidirait au contact de la paroi (même s'il y avait en partie ablation superficielle de celle-ci) et la réaction s'éteindrait. Dans un réacteur à fission, il subsiste même après contrôle des réactions de fission de l' $\text{U}235$, un fort dégagement de chaleur dû aux produits de fission (inertie nucléaire) en cas de panne des circuits de refroidissement on peut aboutir à des développement grave (Three Miles Island, Tchernobyl).

L'étude réalisée par la Commission des Communautés Européennes pour le compte du Parlement Européen (Nov. 86) fait ressortir qu'en

cas d'accident majeur où une quantité de tritium (200 gr max.) serait relachée dans l'atmosphère, les niveaux de radiation seraient faibles et ne nécessiteraient pas l'évacuation de la population vivant proche de la centrale. Il n'y aurait pas d'effets nuisibles sur cette même population.

Actuellement on ne sait pas déclencher une bombe H sans l'allumette de la bombe à fission. Donc si l'on soustrayait du tritium et du deutérium d'une centrale on ne pourrait s'en servir comme arme nucléaire. D'autre part ceci est inévitable pour le tritium qui est produit et utilisé directement dans le réacteur. Il n'est pas question de le stocker en grande quantité, il est seulement nécessaire d'avoir une petite quantité pour initier la mise en marche du réacteur. Dans le cas de la fusion lente, on sait qu'elle n'est d'aucun intérêt pour les constructions de bombes (**prolifération d'armements nucléaires : nulle**).

Du point de vue politique, un énorme avantage de la fusion est l'indépendance énergétique. La mise en service de la réaction D-D diminuerait les inconvénients dus au lithium et au tritium et ferait de la fusion une source d'énergie idéale.

CRPP / Lausanne, janvier 1987

Annexe IV

LE TOKAMAK T.C.V. (TOKAMAK A CONFIGURATION VARIABLE)

Le CRPP a acquis au cours de ces dernières années une expertise dans le fonctionnement et l'utilisation des tokamaks en tant qu'installation de recherche vouée au domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée. Le tokamak TCA, construit pour étudier le chauffage auxiliaire (par ondes d'Alfvén) à celui produit par le courant circulant dans la décharge torique (effet Joule), avait été rendu opérationnel en 1980. Les résultats obtenus ont été comparables à ceux des autres méthodes de chauffage HF. Mentionnons qu'il est nécessaire d'utiliser une méthode complémentaire au chauffage ohmique pour porter les particules du plasma aux 100'000'000 °C nécessaires à ce que des réactions de fusion aient lieu en grand nombre. La raison en est que le plasma à haute température devient bon conducteur électrique, l'effet Joule perd alors toute son efficacité.

Par ailleurs, le groupe théorique du CRPP s'est spécialisé entre autre, dans l'étude des problèmes de la stabilité et de l'équilibre du plasma d'un tokamak. Il a trouvé, en introduisant dans ses codes numériques les caractéristiques et les résultats de diverses installations mondiales, une loi d'échelle semi-empirique qui permet d'exprimer la pression maximale d'un plasma pouvant être confiné dans une configuration tokamak.

Fort de ces expériences et des études entreprises ces dernières années concernant les projets INTOR et NET, prévus dans l'étape post-JET, le CRPP a décidé de s'attaquer à un certain nombre de problèmes importants qui rentrent dans ses compétences et qui devront être résolus avant qu'un projet crédible de réacteur (type tokamak) puisse être construit.

Avec la production du champ magnétique d'un tokamak, tel qu'on le réalise actuellement, la limite de pression du plasma est trop basse pour assurer que ce genre d'installations puisse servir de modèle à un

réacteur viable. Dans l'état actuel de nos connaissances, deux chemins devraient permettre d'augmenter cette limite de pression : soit trouver un moyen pour atteindre la deuxième région de stabilité dont l'existence est annoncée par les théoriciens mais qui n'est pas encore trouvée expérimentalement, soit augmenter le courant maximum de la décharge. A faible élongation, au moins, la pression limite est proportionnelle au courant.

D'après les lois d'échelles empiriques connues, cette augmentation de courant est possible en allongeant la section du plasma selon l'axe du tore; voie choisie dans le projet TCV. Nous nous proposons d'étendre substantiellement le domaine des valeurs des élongations déjà atteint dans un tokamak avec les buts suivants :

- Etudier les scénarios de création des plasmas allongés;
- Etudier la possibilité de maintenir la stabilité positionnelle et optimiser le système de contrôle;
- Etudier la dépendance du courant maximum avec l'élongation;
- Etudier les lois d'échelles du temps de confinement et de la limite de densité aux grandes élongations (>2);
- Etudier le régime stationnaire vers lequel tend le plasma à grande élongation;
- Etudier la dépendance de la limite de pression avec le courant.

Ce projet a démarré dès 1984 mais a connu des développements théoriques importants en 1985. Les études de faisabilité technique ont été effectuées en 1986. Les résultats de celles-ci ont été présentés à un comité d'experts nommés par l'Euratom et ont permis d'obtenir en octobre dernier le support préférentiel pour ce projet. Ceci se traduit par une prise en charge de 45% du budget par l'EURATOM. Le budget total est estimé à 20.5 millions de Francs Suisse. En décembre dernier le projet, inclus dans le message des Ecoles Polytechniques aux Chambres Fédérales, a été approuvé. Les bâtiments qui recevront l'installation expérimentale et les alimentations annexes sont en cours d'études au bureau des Constructions Fédérales et seront implantés sur le site de l'EPFL à Ecublens.

Le TCV tel qu'il apparaît aujourd'hui est un tokamak avec une chambre de décharge toroïdale de section rectangulaire dont le rayon moyen est de 87 cm, la largeur de 56 cm et la hauteur de 154 cm. Cette chambre est entourée par une bobine démontable composée de 16 sections de 6 spires chacune et qui produit un champ magnétique toroïdal de 1.5 Tesla sur le rayon moyen du tore. 16 bobines pouvant être alimentées séparément et réparties sur les faces externes et internes de la chambre de décharges servant à créer des champs magnétiques qui définissent la forme du plasma et le maintiennent en équilibre. Une grande variété de forme de section du plasma peut être produite et maintenue dans la chambre de décharges avec cet ensemble de bobines. Les formes vont de celles de l'hyppodrome (race track) à celles de D ou de haricots ou même de formes plus exotiques comme le S, le doublet ou le triplet avec ou sans diverteur. L'élongation de toutes ces formes peut être variée continûment à partir du cercle jusqu'à ce qu'elles occupent toute la chambre de décharge.

L'expérimentation sur les plasmas de grande élongation nous fera sans doute découvrir une physique beaucoup plus riche que ne l'annonce l'extrapolation brutale des lois d'échelles connues.

Annexe V

**Développement d'une source d'ondes électromagnétiques à
très haute fréquence : le gyrotron**

Parmi les méthodes de chauffage du plasma, l'absorption d'énergie par les électrons d'une onde électromagnétique à la fréquence cyclotronique électronique apparaît être actuellement comme l'une des méthodes les plus efficaces. Si par le passé, cette méthode de chauffage n'a pas été explorée d'une manière approfondie, c'est essentiellement par manque de source à la bonne fréquence (60 à 150 GHz) et par manque de puissance (200 kW à plusieurs mégawatts). C'est pourquoi les principaux pays et organismes engagés dans le programme de fusion thermonucléaire ont décidé qu'un effort important devrait être fait dans le développement de ces nouvelles sources appelées les gyrotrons.

Dans un oscillateur microonde de type conventionnel, la fréquence de l'onde est déterminée par les dimensions du résonateur. De nombreux problèmes technologiques surgissent lorsque les fréquences augmentent, les longueurs d'onde devenant petites. Les résonateurs sont alors de faible dimension. Aussi est-il exclu, pour des raisons de pertes ohmiques dans les parois, d'atteindre de haute densité d'énergie dans le résonateur et par conséquent, d'obtenir de haute puissance de sortie.

La situation est différente dans un gyrotron, la fréquence de l'onde ne dépend pas des dimensions du résonateur, mais de l'intensité du champ magnétique qui guide le faisceau d'électrons relativistes dont l'énergie sera convertie en ondes électromagnétiques. Le résonateur peut être alors de plus grande taille et on peut obtenir des puissances de sortie élevées. On trouve sur le marché des gyrotrons à 70 GHz avec une puissance continue de 200 kW, mais les machines à fusion requièrent des fréquences de 120 à 150 GHz avec des puissances de l'ordre du mégawatt. Pour cela, de nombreux développements tant physiques que technologiques sont nécessaires - le meilleur résultat actuel a été obtenu par le Naval Research Laboratory (USA) à la fréquence de 110 GHz, avec une puissance de 80 kW pendant 1 μ s -.

Intégré dans le programme de l'Euratom, le CRPP, en collaboration avec le Laboratoire d'Electromagnétique et d'Acoustique de l'EPFL (LEMA) et la division des tubes électroniques EKR de la firme Brown Boveri & Cie (Baden), a entrepris le développement d'un gyrotron de haute fréquence (120 - : - 150 GHz, $\lambda = 2.5$ mm) utilisant un concept analogue à celui d'un laser. Dans cette approche, l'interaction entre le faisceau d'électrons relativistes et l'onde électromagnétique, interaction au cours de laquelle l'énergie de faisceau d'électrons est délivrée à l'onde, a lieu dans un résonateur quasi-optique formé de deux miroirs. Cette approche offre des avantages certains à haute fréquence où les longueurs d'ondes deviennent de plus en plus courtes et où les concepts utilisés en optique sont valables, d'où l'appellation de quasi-optique.

De façon schématique, le gyrotron se compose de trois éléments principaux : un canon à électrons relativistes, un résonateur quasi-optique et les bobines supraconductrices générant le champ magnétique. Le canon à électrons produit un faisceau annulaire de très petite dimension (diamètre 4 mm, épaisseur de l'anneau $\sim 0,2$ mm); l'énergie transportée par le faisceau est de 700 kW. L'intensité de champ magnétique est d'environ 50 kGauss et le profil de celui-ci est bien déterminé. Le faisceau d'électrons est ainsi bien guidé jusqu'au résonateur, formé de deux miroirs, où il cède une fraction (jusqu'à 40%) de son énergie à l'onde électromagnétique. Ensuite le faisceau est défléchi sur des parois refroidies à l'extrémité de l'enceinte.

En 1985 et 1986 un important effort théorique et expérimental a été fait dans le domaine des résonateurs quasi-optiques. Les pertes par diffraction et le couplage de l'énergie hors du résonateur ont été étudiées par simulation numérique et les résultats confrontés à l'expérience. Le bon accord théorie - expérience a permis de déterminer les paramètres des divers résonateurs qui seront installés dans le gyrotron. Comme dans tout système résonant qui ne fonctionne pas au mode fondamental, le problème de la compétition des modes est crucial dans un gyrotron. Un système de miroirs pour des résonateurs quasi-optiques permet une sélection en fréquence.

Des simulations numériques, où l'évolution et la compétition entre les divers modes sont suivies dans le temps, ont permis de vérifier qu'un seul mode est excité dans un résonateur muni de tels miroirs.

La réalisation du projet de développement du gyrotron quasi-optique nécessite une infrastructure importante ainsi qu'une installation expérimentale de grande dimension. Un stand d'essai, qui permettra de tester diverses configurations du résonateur et ainsi d'approfondir les connaissances physiques du système, est en cours d'installation sur le site d'Ecublens. Des installations annexes sont nécessaires notamment une alimentation régulée (1MW à 100 kV) et une importante unité cryogénique de liquéfaction avec une infrastructure de distribution de fluides.

JET (Culham-GB-Europe)
 $I_p = 3.8$ (4.8) MA
 $B_\phi = 2.7$ (3.4) T

I_p = courant circulant dans l'anneau de plasma
 en millions d'ampère

B_ϕ = champ magnétique torique en Tesla
 (1 T = 10000 Gauss)

R_o = grand rayon du tore en mètre

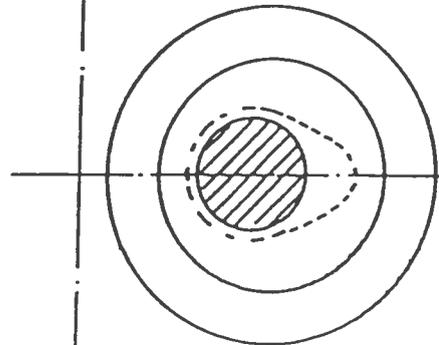
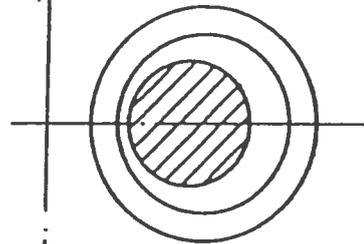
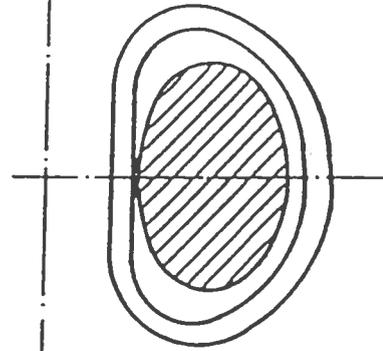
a = petit rayon du tore

b = petit rayon ou hauteur (si section non circulaire)
 du tore

TFTR (Princeton-USA)
 $I_p = 2.5$ MA
 $B_\phi = 5.2$ T

JT-60 (Tokai Mura-Japon)
 $I_p = 2.7$ MA
 $B_\phi = 4.5$ T

0 1 2 3 (m)



Nom	Pays	I_p (MA)	R_o (m)	a (m) (a x b)	B_T (T)
JET	Europe	2.6 (4.8)	2.96	1.25 x 2.10	2.77 (3.45)
JT-60	Japon	3	3	1	5.0
TFTR	USA	2.5	2.48	0.85	5.2
D-III	USA	2.5	1.4	0.45 x 1.50	2.6
T-15	URSS	1.4	2.4	0.7	3.5 (supraconducteur)
Tore Supra	France	1.7	2.25	0.7	9 (supraconducteur)

