

JET-P(90)24

K.J. Dietz
and JET Team

Problemes du vide pour le JET

“This document contains JET information in a form not yet suitable for publication. The report has been prepared primarily for discussion and information within the JET Project and the Associations. It must not be quoted in publications or in Abstract Journals. External distribution requires approval from the Publications Officer, JET Joint Undertaking, Abingdon, Oxon, OX14 3EA, UK”.

“Enquiries about Copyright and reproduction should be addressed to the Publications Officer, EFDA, Culham Science Centre, Abingdon, Oxon, OX14 3DB, UK.”

The contents of this preprint and all other JET EFDA Preprints and Conference Papers are available to view online free at www.iop.org/Jet. This site has full search facilities and e-mail alert options. The diagrams contained within the PDFs on this site are hyperlinked from the year 1996 onwards.

Problemes du vide pour le JET

K.J. Dietz
and JET Team*

JET-Joint Undertaking, Culham Science Centre, OX14 3DB, Abingdon, UK

** See Appendix 1*

Preprint of Paper to be submitted for publication in
the Proceedings of The European Conference on Vacuum Technology, Bordeaux

PROBLEMES DU VIDE POUR LE JET

K.J. Dietz

JET Joint Undertaking, Abingdon OX14 3EA, UK

Abstract

JET has a fully metallic, completely welded vacuum vessel which is bakeable up to 500 °C. The internal surface is $\approx 1000 \text{ m}^2$, the volume $\approx 200 \text{ m}^3$, and the installed pumping speed for hydrogen $\approx 8500 \text{ ls}^{-1}$. The base pressure (mainly hydrogen) is typically smaller than $2 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ at the operating temperature of 300 °C. The total pressure for impurities can be as low as $5 \times 10^{-10} \text{ mbar}$ depending on conditioning methods applied and the wall materials used. The operation of JET showed that it was necessary to protect the metallic walls of the vessel against damage by energetic electrons. Initially fine grain, high purity graphite was used, later beryllium layers of a total thickness of about $1 \mu\text{m}$ were evaporated onto the graphite and then massive beryllium was employed as the material in contact with the plasma. In this paper we shortly describe the principle of tokamak experiments, discuss the role of plasma contamination by impurities generated at the walls of the vacuum vessel, the design of the JET vacuum vessel, the wall conditioning techniques employed and the experience gained with the different wall materials.

Introduction

JET (Joint European Torus), est le projet le plus important du programme coordonné de la fusion nucléaire de l'EURATOM [1]. Son objectif consiste à prouver la faisabilité scientifique de la fusion en utilisant un tokamak: un plasma chaud d'isotopes d'hydrogène est confiné par des champs magnétiques dans une chambre à vide de forme toroïdale. Une coupe transversale du JET est indiquée sur la Figure 1. Le plasma est isolé thermiquement des parois par des champs magnétiques: le champ toroïdal qui est produit par une série de bobines toroïdales, les champs auxiliaires qui sont créés par les bobines 2 à 4 (coils 2-4), et le champ poloïdal produit par le courant passant dans le plasma. Ce courant est induit et maintenu par un champ électrique généré par un courant variable dans l'enroulement primaire (bobine 1) du transformateur. Le courant chauffe aussi le plasma par effet Joule et produit un équilibre stable du plasma par son interaction avec les champs magnétiques.

Les principaux paramètres du JET se trouvent dans le tableau 1.

Tableau 1

Grand rayon	(m)	3,0
Petit rayon (m)	(m)	1,2
Elongation		$\leq 1,8$
Champ magnétique toroidal	(T)	3,4
Courant	(MA)	7
Chauffage par injection de neutres	(MA)	20
Chauffage par ondes radiofréquence	(MW)	18

L'isolation thermique du plasma chaud avec l'enceinte à vide n'est pas parfaite et des limiteurs sont installés pour protéger les parois. Les limiteurs en contact avec le plasma sont sujets au bombardement des particules et aux flux thermiques. Pour le JET, ils sont conçus pour résister à des puissances moyennes de 5MWm^2 pendant dix secondes ou à des puissances jusqu'à 40MWm^2 pendant une fraction de seconde.

Le premier objectif du JET consiste à étudier les plasmas dans des conditions approchant celles d'un réacteur thermonucléaire. Pour cela il faut une optimisation de la densité n_i et de la température T_i des ions et du temps de confinement de l'énergie τ_e (le rapport entre l'énergie contenue dans le plasma et la puissance de chauffage). Les températures sont habituellement mesurées en électronvolts, 1 eV correspond environ à 10^4 K. Le produit de fusion $n_i T_i \tau_e$ est une mesure de la qualité du plasma. Pour obtenir l'ignition, - un plasma thermonucléaire est maintenu par sa propre puissance -, une valeur du produit de fusion de $5 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \text{s keV}$ est nécessaire. Par exemple il faut maintenir simultanément des densités de $3 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, des temps de confinement de 1,5 s, et des températures ioniques de 11 keV. Pour une condition de bilan nul (la puissance nécessaire pour chauffer le plasma est équilibrée par la puissance produite par les réactions de fusion), il faut obtenir $10^{21} \text{m}^{-3} \text{s keV}$ pour le produit de fusion. Le JET a été conçu pour atteindre le bilan nul mais non pas l'ignition.

Le deuxième objectif de JET est de minimiser les influx d'impuretés pour des plasmas qui approchent les conditions d'un réacteur. Cet objectif peut être réalisé par la sélection de matériaux de paroi convenables, des procédures de conditionnement des parois, l'optimisation de configurations de plasma et de programmes de contrôle de particules [2].

Le troisième objectif du JET consiste à augmenter les températures du plasma par des méthodes différentes de chauffage: ohmique, injection de neutres [3] et par absorption d'ondes de radiofréquence [4].

Le quatrième objectif du JET est d'étudier le chauffage du plasma par les particules- α qui sont produites par les réactions de fusion entre le deutérium et le tritium.

Pour juger les performances du JET, la valeur du produit de fusion nécessaire au bilan nul ($10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$) doit être comparée avec celle obtenue à présent ($8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$) avec l'introduction du béryllium comme matériau de paroi. Il ne reste à gagner qu'un petit facteur afin d'équilibrer la puissance de chauffage avec celle des réactions de fusion.

Il existe d'autres tokamaks en fonctionnement en Europe. TORE SUPRA [5] est le plus important après le JET. Il se trouve à Cadarache et ses objectifs consistent à étudier des durées d'impulsion longues.

Rôle des impuretés

Le champ magnétique dans un tokamak empêche tout contact direct des plasmas chauds avec les parois. L'isolation n'est cependant pas parfaite: les rayonnements et les particules s'échappant du plasma cependant interagissent avec les parois et les limiteurs. Par plusieurs processus [6] des impuretés sont émises et peuvent pénétrer le plasma. Elles contribuent aux pertes par rayonnement et par conséquent diminuent l'énergie contenue dans le plasma, limitent la densité maximum et finalement diluent le carburant et réduisent donc le taux de réactions nucléaires. Pour ces processus les impuretés avec un numéro atomique élevé sont plus néfastes que celles ayant un numéro atomique bas. Pour un réacteur ayant un plasma thermique avec une température centrale ionique de 10 keV, la concentrations maximum d'impuretés doit être moins de 10^{-1} pour le carbon et moins de 2.5×10^{-3} pour le fer [7].

Le gaz utilisé pour des décharges du JET est principalement le deutérium. Avant le commencement d'une décharge, en présence des champs magnétiques, le tore sous vide est rempli avec du deutérium jusqu'à une pression d'environ $1,5 \times 10^{-4} \text{ mbar}$. Les pressions résiduelles d'impuretés (CO , CH_4 , C_2H_4) sont de l'ordre de 10^{-9} mbar . Le plasma est ensuite produit en appliquant une tension à la bobine 1 (voir Figure 1). Pendant la durée de la décharge, normalement 10 s, les impuretés peuvent s'accumuler dans le plasma. Pour atteindre une concentration d'impuretés de 3% ($\approx 100 \text{ m}^3$ de volume de plasma avec une densité de $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, et une surface de la chambre à vide de 1000 m^2) il suffit de relâcher des particules des parois équivalent à moins de 1% d'une monocouche.

Certains mécanismes de production d'impuretés sont inhérents aux tokamaks, à savoir le sputtering des atomes de surface par des ions et neutres énergétiques ou la formation des produits gazeux par réactions chimiques entre l'hydrogène et le graphite dans la chambre à vide. D'autres sources d'impuretés comme des fuites et la contamination de la paroi peuvent être minimisées par

l'application de techniques d'ultra vide, le choix des matériaux et l'utilisation de procédures de conditionnement des parois.

La chambre à vide du JET

La chambre à vide est métallique et ses différents éléments sont soudés [8]. Sa coupe transversale est en forme de D avec un diamètre intérieur vertical de 4.2m et horizontal de 2,6 m. Le grand rayon du tore est 3 m. La chambre possède une double paroi et se compose de secteurs rigides et de sections en soufflets. La chambre peut être chauffée jusqu'à une température de 500 °C par une combinaison de circulation de gaz chaud et de chauffage électrique . Sa construction est conforme aux normes Ultra Vide et son taux de fuites est plus petit que 5×10^{-7} mbarls⁻¹. Le pompage est effectué par des pompes turbomoléculaires [9]. Les parois de la chambre à vide sont maintenues à environ 300 °C pendant les expériences. Le tableau 2 donne les principales caractéristiques de l'enceinte à vide de JET.

Tableau 2

Poids	(MN)	1.2
Volume	(m ⁻³)	200
Surface projetée	(m ⁻²)	1000
Taux de fuite	(mbarls ⁻¹)	<5x10 ⁻⁷
Vitesse de pompage	(ls ⁻¹ pour l'hydrogène)	8600
Pression de base à 300°C	(mbar N ₂ -équivalent)	2x10 ⁻⁷
Pression de base à 20°C	(mbar N ₂ -équivalent)	2x10 ⁻⁹
Température de fonctionnement	(°C)	300

Le graphite comme matériau de première paroi

Le JET a commencé à fonctionner avec des parois métalliques. Le matériau faisant face au plasma était du Nicrofer 7216 LC (équivalent à l'Inconel 600), seuls les limiteurs d'une surface d'environ 1.2 m² étaient en graphite. Le graphite utilisé avait un grain fin ($\approx 5 \mu\text{m}$), une haute pureté (niveau d'impureté environ 20 ppm) et une porosité de 17 à 20%. Après une courte période de fonctionnement, le graphite était devenu une source d'impuretés métalliques

pour le plasma. Ces métaux provenaient des protections métalliques de la paroi interne qui fondaient sur l'impact des électrons de haute énergie (30 à 50 MeV). Des gouttelettes et de la vapeur métallique se déposaient alors sur les limiteurs. A partir de là, les impuretés métalliques pénétraient le plasma pendant des décharges suivantes [10].

Des tuiles en graphite à grain fin d'une épaisseur de 20mm furent installées sur la paroi interne de la chambre en tant que protection et recouvrant une surface de 20 m² environ. A cause de la faible densité du graphite la profondeur de pénétration des électrons est maintenant de 10 cm, leur déposition d'énergie ne se produit plus en surface mais dans le volume. Les électrons arrivent avec une incidence presque tangentielle au graphite et par conséquent n'interagissent pratiquement pas avec les parois métalliques situées derrière. La première expérience avec une protection de la paroi en graphite fut très concluante, et on installa donc en graphite quarante anneaux dans la direction poloïdale, des limiteurs toroïdaux de ceinture et des protections pour les antennes de radiofréquence. Une vue de l'intérieur du JET illustrant tous ces composants se trouve sur la Figure 2. Plus de 50% de la surface interne est maintenant recouverte de tuiles en graphite, le volume total est d'environ 3 m³ et son poids est approximativement six tonnes . En outre, toutes les surfaces intérieures sont carbonisées [11] avec des épaisseurs de plusieurs μm . Ceci fut effectué initialement par des campagnes de carbonisation prévues et se produisit ultérieurement comme la conséquence des décharges de plasma dans une chambre entièrement en graphite.

Le béryllium comme matériau de première paroi

La dilution du plasma du JET par les impuretés légères (oxygène et carbone) et l'absence d'un procédé correct de contrôle de la densité de deutérium furent les causes principales des limitations des performances durant l'utilisation du graphite en tant que limiteur et matériau de paroi. L'usage du béryllium était une autre possibilité. Le béryllium en tant que matériau de paroi pour JET fut proposé dès 1975 [1]. Depuis le début du fonctionnement de la machine en 1983, des études furent démarrées pour évaluer sa valeur comme alternative au graphite [12-16]. Il fut établi que le béryllium est un matériau convenant bien aux limiteurs il facilite le conditionnement de la machine, il réduit la teneur en oxygène dans le plasma par gettering, et permet d'atteindre des densités de plasma plus élevées [17,18].

Sur le plan opérationnel, l'introduction du béryllium se divisait en deux parties [19]: tout d'abord l'évaporation de couches minces ($\approx 100 \text{ \AA}$) de béryllium sur le graphite, puis le remplacement du limiteur en graphite par un limiteur en béryllium.

Conditionnement des parois et comportement des impuretés

Après un accès prolongé du personnel à l'intérieur, la chambre est tout d'abord rincée avec un détergent (RBS 350) puis avec de l'eau déminéralisée et finalement séchée pendant 24 heures sous vide à une température de 350 °C. Ensuite, on procède à une décharge lumineuse en hydrogène (deutérium) assistée par radiofréquence [20] pendant environ 70 heures. Le fonctionnement en plasma peut alors commencer. La décharge lumineuse fonctionne normalement à 10^{-3} mbar à des densités de courant allant jusqu'à $1 \mu\text{Acm}^2$, avec une chute de cathode de 300 Volts et une température de la chambre de ≈ 300 °C. Initialement, avec seulement une quantité négligeable de graphite, les concentrations typiques d'impuretés dans le plasma après ces procédures étaient de 2-3% de carbone et de 0,5-1% d'oxygène. Pour comparaison, une procédure de nettoyage type tokamak [9] fut employée. Dans ce cas, des décharges tokamak de faible puissance et à haute répétition en deutérium furent effectuées avec essentiellement les mêmes résultats.

Les techniques de nettoyage employant de l'hydrogène (deutérium) éliminent les constituants ou contaminants de surface, à savoir l'oxygène ou le carbone par réactions chimiques avec les atomes ou les ions d'hydrogène produits dans la décharge de nettoyage [10]. L'oxygène et le carbone sont généralement éliminés sous forme d'eau et de méthane mais aussi d'oxydes de carbone. Pour une élimination efficace de l'eau il est nécessaire que la température de la paroi dépasse 150 °C pour augmenter le taux de réaction et qu'il reste en dessous de 400 °C pour minimiser la réoxydation par la vapeur d'eau produite [21].

Au cours de la phase initiale de l'opération du JET la concentration de métal dans le plasma apparaît être excessivement élevée. Par conséquent, un dépôt de graphite fut déposé par une décharge lumineuse d'un mélange de deutérium et méthane (carbonisation) et le métal fut couvert de films de carbone [11, 22] d'environ $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur. On a trouvé que les concentrations de métal dans le plasma pouvaient être réduites à des valeurs de 10^{-4} sans augmenter la teneur en carbone. Cette méthode de conditionnement doit être répétée fréquemment du fait que les décharges de tokamak à haute puissance enlèvent les couches protectrices de carbone.

Avec l'introduction de la carbonisation et avec des quantités accrues de graphite massif dans la chambre le conditionnement par décharge lumineuse en hydrogène (deutérium) devint moins efficace et l'oxygène dans le plasma atteignit 1-2%. L'analyse des gaz résiduels pendant le conditionnement indiqua que l'eau ou les oxydes de carbone n'étaient plus principalement présents dans les produits de réaction qui se composaient essentiellement d'hydrocarbures (acétylène $\approx 50\%$, méthane $\approx 30\%$, éthylène balance). Les décharges lumineuses en hélium améliorèrent légèrement la situation, mais le meilleur conditionnement était donné par les décharges tokamak en hélium. Ces décharges pouvaient finalement réduire les niveaux d'oxygène à 0,2-0,5% dans les décharges suivantes en deutérium, valeurs semblables à celles réalisées avec une chambre métallique.

Durant l'opération avec béryllium, le conditionnement des parois après une ouverture de la chambre consista à environ 70 heures de décharge lumineuse en hydrogène à des températures de parois de 300 °C, suivi par 24 heures de décharge lumineuse en hélium. Dès que les pressions partielles d'impuretés de H₂O, CH₄ et C₂H₄ sont de l'ordre de 10⁻⁸ mbar, l'évaporation de béryllium [19] est effectuée pendant environ une heure, avec pour résultat une couche d'une épaisseur moyenne de 100 Å. La teneur en oxygène dans le plasma est réduite par au moins un facteur de dix, avec des niveaux typiques de 0,05-0,2%. Ces niveaux inférieurs demeurent durant des dizaines de décharges. Le carbone est toujours l'impureté dominante, mais l'influx de carbone est diminué par un facteur 2 à 3. Ce comportement se maintient même après érosion de la couche de béryllium après quelques décharges.

La contamination par le carbone devient négligeable dès que le limiteur de graphite est échangé contre le béryllium. Le béryllium devient alors l'impureté principale.

Performances sous vide

Avec une porosité de 15 à 20% et une surface réelle de 0,3 m² par gramme de graphite [11] la surface de JET est accrue par un facteur de 1000 par comparaison avec la surface projetée. Etant donné les taux de dégazage connus [23] il aurait pu être difficile d'obtenir les pressions de base inférieures à 10⁻⁷ mbar. Ces pressions très basses ont cependant pu être obtenues par une combinaison d'étuvage et de nettoyage par décharge lumineuse.

Les pressions de base obtenues avec le graphite paraissent être inférieures à celles obtenues avec la chambre métallique. D'autres analyses détaillées indiquent que les pressions partielles d'impuretés, résultant essentiellement d'hydrocarbures, sont au moins de deux ordres de grandeur supérieures à celles obtenues avant l'introduction du graphite. Pour obtenir des pressions de base de l'ordre de 10⁻⁷ mbar le taux de fuite total doit être contrôlé plus strictement qu'avec une chambre métallique à des valeurs inférieures à 10⁻⁷ mbar.l⁻¹. Une omission de ce contrôle résulte en une augmentation des pressions partielles des hydrocarbures et des oxydes de carbone.

Le modèle suivant explique ce comportement. L'oxygène pénétrant dans la chambre par des fuites est adsorbé à la surface du graphite. Il forme de l'eau avec l'hydrogène (deutérium) implanté dans la surface pendant les décharges de tokamak. L'eau réagit alors avec le graphite chaud et forme des oxydes de carbone et des hydrocarbures qui sont relâchés de la surface. Ce modèle est démontré par le fait qu'avec des parois en graphite une fuite d'air ne produit aucune augmentation de l'oxygène ni de la pression partielle d'eau. Les seuls signes de fuites sont des pressions partielles accrues des hydrocarbures et des oxydes de carbone.

Pour les parois en Nicrofer il n'y a également aucune augmentation de la pression partielle d'oxygène après l'introduction d'oxygène par une fuite, mais la pression partielle de l'eau augmente immédiatement. Après le conditionnement et l'opération du tokamak les parois sont désoxydées et pompent l'oxygène jusqu'à saturation. L'eau formée par les réactions avec l'hydrogène près de la surface [20,21] est relâchée.

Pour les parois recouvertes d'une fine couche de béryllium, le gaz résiduel même à 300 °C se compose principalement d'hydrogène et de ses isotopes aux pressions de $2-6 \times 10^{-8}$ mbar, les pressions partielles d'impuretés sont de l'ordre de 10^{-11} mbar. L'oxygène pénétrant dans la chambre forme de l'oxyde de béryllium qui ne réagit guère avec l'hydrogène. Ainsi pendant l'opération du JET la concentration d'oxygène dans le plasma devient négligeable.

Pompage par les parois et rétention de l'hydrogène

Les parois de graphite pompent l'hydrogène pendant les décharges [24, 25]. Pendant quelques secondes le taux de pompage peut être de l'ordre de 10^{21} particules par seconde, et même plus, particulièrement après le conditionnement des parois avec de l'hélium. Cette technique de conditionnement est très fastidieuse et d'un effet de courte durée une fois achevée.

Les explications possibles de ce pompage résident dans l'un ou l'autre de ces mécanismes: codéposition de l'hydrogène avec du carbone; piégeage de l'hydrogène pendant et dégazage après des décharges; diffusion de l'hydrogène à l'intérieur du graphite; d'autres effets apparentés à la porosité du graphite.

Avec le béryllium le pompage de la paroi peut être supérieur d'un ordre de grandeur à celui du graphite [26]. Le mécanisme paraît être le pompage des atomes d'hydrogène par les parois métalliques [27]. Avec des surfaces en béryllium il est désormais possible pour la première fois de contrôler la densité du plasma de telle façon qu'en commençant à une valeur de 10^{20} m^{-3} la densité peut être réduite à 10^{19} m^{-3} en une seconde.

Des mesures de bilan des gaz ont été effectuées, pour l'opération avec des parois en graphite et en béryllium. Ces mesures furent motivées par le problème de la quantité de tritium stockée dans les parois au cours de la phase pendant laquelle un mélange deutérium tritium sera utilisé. Un système de diagnostic [28] a été installé récemment et nous a permis de comparer les quantités de gaz introduites dans la chambre durant les décharges avec les quantités relâchées après les décharges.

Pour le graphite, 50-60% du gaz introduit est retenu dans la chambre à vide, pour les parois en béryllium seulement 10-20%. Le nombre de particules retenues est cependant identique pour les deux matériaux parce qu'avec le pompage supérieur du béryllium il faut introduire plus de gaz pour la même

densité du plasma [29]. On peut maintenant calculer que pour 100 décharges à haute densité pendant l'opération DT de JET, on injectera environ 7.5 g de tritium dont 3 g pourront être retenus dans les parois. Cela ne pose pas de problème de sécurité.

Résumé

Dans le JET environ six tonnes de graphite de haute pureté et à grain fin ont été introduites dans la chambre à vide sous forme de tuiles de 20mm d'épaisseur. Elles recouvrent environ 50% de la surface interne. Le reste de la chambre est carbonisé.

Même avec ces vastes quantités de graphite à l'intérieur de la chambre Ultra Vide il est possible de réaliser des pressions partielles d'impuretés de l'ordre de 10^{-9} mbar à 300 °C. Le contrôle des taux de fuites et de la température des parois et de l'usage extensif des techniques de conditionnement sont nécessaires pour achever ce résultat.

Dans une machine entièrement en carbone les impuretés de numéro atomique faible sous forme de carbone et d'oxygène dominent le comportement des impuretés dans plasma. La source d'oxygène paraît être apparentée à la porosité interne du graphite d'autant que la contamination du plasma par l'oxygène augmente avec une quantité accrue de graphite dans la chambre.

L'évaporation du béryllium à l'intérieur de JET et l'usage des limiteurs de béryllium ont considérablement changé le comportement de la machine et les performances du plasma. La suppression des disruptions fut rapide et le contrôle de densité fut facilement réalisé. On put augmenter considérablement l'espace opérationnel concernant la teneur des impuretés, la densité et la température ionique. La dilution du plasma a été considérablement réduite et par conséquent le paramètre de confinement a augmenté jusqu'à la valeur record de $8-9 \times 10^{20}$ m³keV s.

Remerciements

L'auteur remercie J. Orchard, T. Winkel et E. Usselman pour les discussions utiles et les données de l'analyse des gaz résiduels. L'assistance et les contributions de tous les autres membres du projet sont aussi reçues avec gratitude.

Références

- [1] P.H. Rebut et al, EUR-JET-R5
- [2] The JET Project, JET-R(89)16
- [3] A. Goede et al, Proc 14th SOFT (1986),1139
- [4] J. Jaquinot et al, Phil Trans R Soc Lond A 322, 95-107 (1987), 95
- [5] Equipe Tore Supra, Proc Plasma Phys Contr Nucl Fusion Research 1988, Nucl Fusion Suppl 1 (199), 9
- [6] G.M.McCracken et al, Nucl Fusion 19, (1979),889
- [7] R.W.Jensen et al, Nucl Sci Engr 65, (1978),282
- [8] G.Duesing et al, J Vac Sci Technol A3(3), (1985),1151
- [9] E.Usselmann et al, Proc 13th Symp Fusion Techn (1984), 105
- [10] K.J.Dietz et al, "Wall protection in JET" in Tokamak Start-up, H.Knoepfel Ed., Plenum Press, NewYork and London 1987
- [11] J.Winter, J Vac Sci Techn A5(4) (1987), 2286
- [12] P.K.Mioduszewski et al, Nucl Fusion 26(1986),171
- [13] Hackmann et al, Nucl Fusion 24(1984),640
- [14] M.Bessenrodt-Weberpals et al, J Nucl Mat 162&164 (1989),435
- [15] Bohdansky et al, IPP-JET No.31, 1985
- [16] W.Möller et al, IPP-JET No.26 1986
- [17] P.H.Rebut et al, JET-R (85)03
- [18] M.Hugon et al, JET-R (89)14
- [19] K.J.Dietz et al, JET-P(89)79, 23
- [20] K.J.Dietz, Proc 9th Int Vac Congress ASEVA A (1983),706
- [21] F.W.Waelbroek et al, ibid, 693
- [22] P Coad et al, J.Nucl Mat 145&147(1987),747
- [23] W.L. Hsu et al, J.Vac Sci Techn A5(4) (1987),2768
- [24] K.Sonnenberg et al, Proc 14th Symp Fusion Technol 1 (1986),27
- [25] J.Ehrenberg et al, J Nucl Mat 162&164(1989)
- [26] J.Ehrenberg et al, JET-P(89)80,113
- [27] M.A.Pick et al, J.Nucl.Mat. 131 (1985) 208
- [28] E.Usselmann et al, Proc 11th Int Vac Congress, Cologne October 1989
- [29] R.Sartori et al, Proc 9th Int Conf Plasma-Surface Interactions Bournemouth, May 1990, in publication

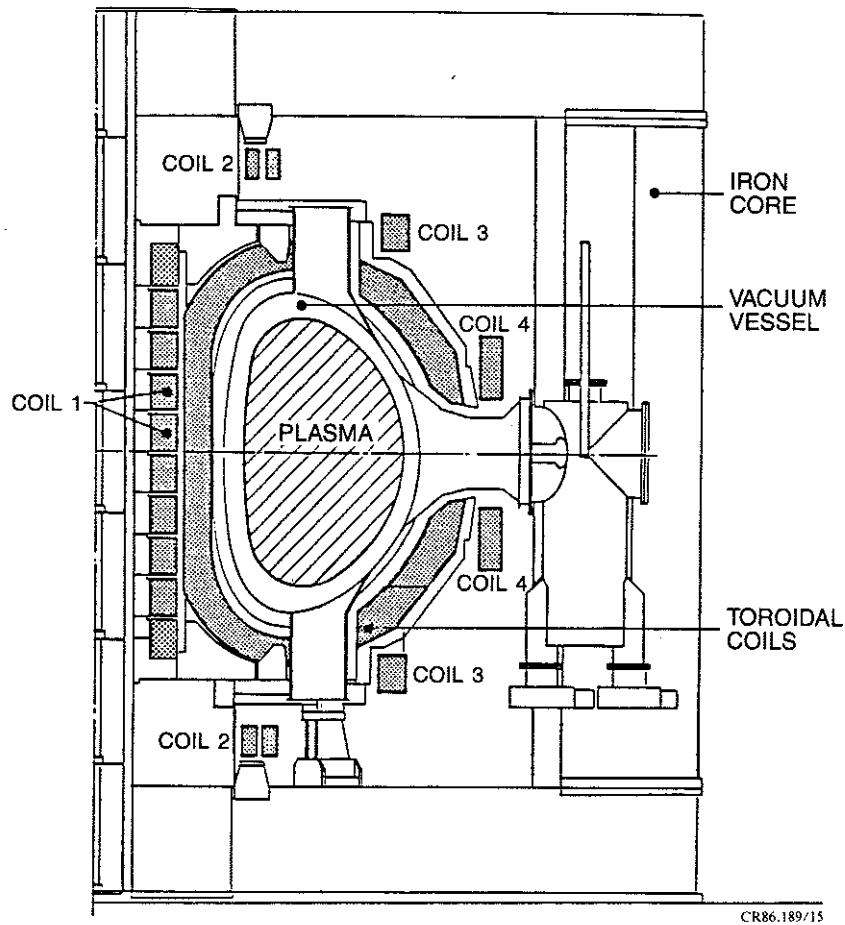


Figure 1: Coupe transversale de JET montrant le circuit magnétique et la chambre à vide

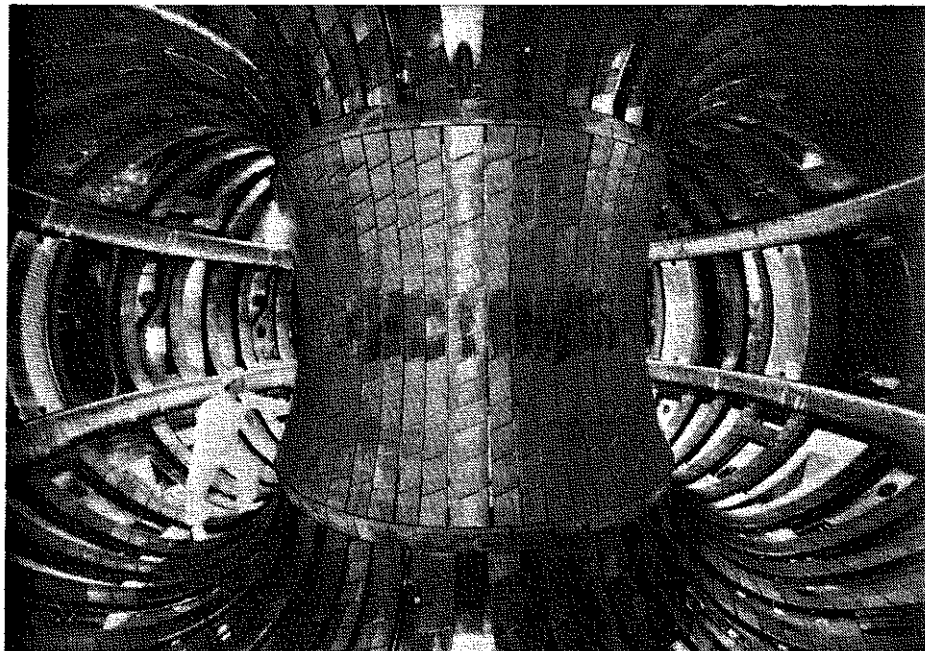


Figure 2: Intérieur de la chambre à vide

APPENDIX 1.

THE JET TEAM

JET Joint Undertaking, Abingdon, Oxon, OX14 3EA, U.K.

J. M. Adams¹, F. Alladio⁴, H. Altmann, R. J. Anderson, G. Appuzzese, W. Bailey, B. Balet, D. V. Bartlett, L. R. Baylor²⁴, K. Behringer, A. C. Bell, P. Bertoldi, E. Bertolini, V. Bhatnagar, R. J. Bickerton, A. Boileau³, T. Bonicelli, S. J. Booth, G. Bosia, M. Botman, D. Boyd³¹, H. Brelen, H. Brinkschulte, M. Brusati, T. Budd, M. Bures, T. Businaro⁴, H. Buttgerit, D. Cacaut, C. Caldwell-Nichols, D. J. Campbell, P. Card, J. Carwardine, G. Celentano, P. Chabert²⁷, C. D. Challis, A. Cheetham, J. Christiansen, C. Christodoulopoulos, P. Chuilon, R. Claesen, S. Clement³⁰, J. P. Coad, P. Colestock⁶, S. Conroy¹³, M. Cooke, S. Cooper, J. G. Cordey, W. Core, S. Corti, A. E. Costley, G. Cottrell, M. Cox⁷, P. Cripwell¹³, F. Crisanti⁴, D. Cross, H. de Blank¹⁶, J. de Haas¹⁶, L. de Kock, E. Deksnis, G. B. Denne, G. Deschamps, G. Devillars, K. J. Dietz, J. Dobbing, S. E. Dorling, P. G. Doyle, D. F. Düchs, H. Duquenoy, A. Edwards, J. Ehrenberg¹⁴, T. Elevant¹², W. Engelhardt, S. K. Erents⁷, L. G. Eriksson⁵, M. Evrard², H. Falter, D. Flory, M. Forrest⁷, C. Froger, K. Fullard, M. Gadeberg¹¹, A. Galetsas, R. Galvao⁸, A. Gibson, R. D. Gill, A. Gondhalekar, C. Gordon, G. Gorini, C. Gormezano, N. A. Gottardi, C. Gowers, B. J. Green, F. S. Grigh, M. Gryzinski²⁶, R. Haange, G. Hammett⁶, W. Han⁹, C. J. Hancock, P. J. Harbour, N. C. Hawkes⁷, P. Haynes⁷, T. Hellsten, J. L. Hemmerich, R. Hemsworth, R. F. Herzog, K. Hirsch¹⁴, J. Hoekzema, W. A. Houlberg²⁴, J. How, M. Huart, A. Hubbard, T. P. Hughes³², M. Hugon, M. Huguet, J. Jacquinet, O. N. Jarvis, T. C. Jernigan²⁴, E. Joffrin, E. M. Jones, L. P. D. F. Jones, T. T. C. Jones, J. Källne, A. Kaye, B. E. Keen, M. Keilhacker, G. J. Kelly, A. Khare¹⁵, S. Knowlton, A. Konstantellos, M. Kovanen²¹, P. Kupschus, P. Lallia, J. R. Last, L. Lauro-Taroni, M. Laux³³, K. Lawson⁷, E. Lazzaro, M. Lennholm, X. Litaudon, P. Lomas, M. Lorentz-Gottardi², C. Lowry, G. Magyar, D. Maisonnier, M. Malacarne, V. Marchese, P. Massmann, L. McCarthy²⁸, G. McCracken⁷, P. Mendonca, P. Meriguet, P. Micozzi⁴, S. F. Mills, P. Millward, S. L. Milora²⁴, A. Moissonnier, P. L. Mondino, D. Moreau¹⁷, P. Morgan, H. Morsi¹⁴, G. Murphy, M. F. Nave, M. Newman, L. Nickesson, P. Nielsen, P. Noll, W. Obert, D. O'Brien, J. O'Rourke, M. G. Pacco-Düchs, M. Pain, S. Papastergiou, D. Pasini²⁰, M. Paume²⁷, N. Peacock⁷, D. Pearson¹³, F. Pegoraro, M. Pick, S. Pitcher⁷, J. Plancoulaine, J-P. Poffé, F. Porcelli, R. Prentice, T. Raimondi, J. Ramette¹⁷, J. M. Rax²⁷, C. Raymond, P-H. Rebut, J. Removille, F. Rimini, D. Robinson⁷, A. Rolfe, R. T. Ross, L. Rossi, G. Rupprecht¹⁴, R. Rushton, P. Rutter, H. C. Sack, G. Sadler, N. Salmon¹³, H. Salzmann¹⁴, A. Santagiustina, D. Schissel²⁵, P. H. Schild, M. Schmid, G. Schmidt⁶, R. L. Shaw, A. Sibley, R. Simonini, J. Sips¹⁶, P. Smeulders, J. Snipes, S. Sommers, L. Sonnerup, K. Sonnenberg, M. Stamp, P. Stangeby¹⁹, D. Start, C. A. Steed, D. Stork, P. E. Stott, T. E. Stringer, D. Stubberfield, T. Sugie¹⁸, D. Summers, H. Summers²⁰, J. Taboda-Duarte²², J. Tagle³⁰, H. Tamnen, A. Tanga, A. Taroni, C. Tebaldi²³, A. Tesini, P. R. Thomas, E. Thompson, K. Thomsen¹¹, P. Trevalion, M. Tschudin, B. Tubbing, K. Uchino²⁹, E. Usselmann, H. van der Beken, M. von Hellermann, T. Wade, C. Walker, B. A. Wallander, M. Walravens, K. Walter, D. Ward, M. L. Watkins, J. Wesson, D. H. Wheeler, J. Wilks, U. Willen¹², D. Wilson, T. Winkel, C. Woodward, M. Wykes, I. D. Young, L. Zannelli, M. Zarnstorff⁶, D. Zsche¹⁴, J. W. Zwart.

PERMANENT ADDRESS

1. UKAEA, Harwell, Oxon. UK.
2. EUR-EB Association, LPP-ERM/KMS, B-1040 Brussels, Belgium.
3. Institute National des Recherches Scientifique, Quebec, Canada.
4. ENEA-CENTRO Di Frascati, I-00044 Frascati, Roma, Italy.
5. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
6. Princeton Plasma Physics Laboratory, New Jersey, USA.
7. UKAEA Culham Laboratory, Abingdon, Oxon. UK.
8. Plasma Physics Laboratory, Space Research Institute, Sao José dos Campos, Brazil.
9. Institute of Mathematics, University of Oxford, UK.
10. CRPP/EPFL, 21 Avenue des Bains, CH-1007 Lausanne, Switzerland.
11. Risø National Laboratory, DK-4000 Roskilde, Denmark.
12. Swedish Energy Research Commission, S-10072 Stockholm, Sweden.
13. Imperial College of Science and Technology, University of London, UK.
14. Max Planck Institut für Plasmaphysik, D-8046 Garching bei München, FRG.
15. Institute for Plasma Research, Gandhinagar Bhat Gujrat, India.
16. FOM Instituut voor Plasmafysica, 3430 Be Nieuwegein, The Netherlands.
17. Commissariat à l'Énergie Atomique, F-92260 Fontenay-aux-Roses, France.
18. JAERI, Tokai Research Establishment, Tokai-Mura, Naka-Gun, Japan.
19. Institute for Aerospace Studies, University of Toronto, Downsview, Ontario, Canada.
20. University of Strathclyde, Glasgow, G4 ONG, U.K.
21. Nuclear Engineering Laboratory, Lapeenranta University, Finland.
22. JNICT, Lisboa, Portugal.
23. Department of Mathematics, University of Bologna, Italy.
24. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
25. G.A. Technologies, San Diego, California, USA.
26. Institute for Nuclear Studies, Swierk, Poland.
27. Commissariat à l'Énergie Atomique, Cadarache, France.
28. School of Physical Sciences, Flinders University of South Australia, South Australia 5042.
29. Kyushi University, Kasagu Fukuoka, Japan.
30. Centro de Investigaciones Energeticas Medioambientales y Tecnológicas, Spain.
31. University of Maryland, College Park, Maryland, USA.
32. University of Essex, Colchester, UK.
33. Akademie de Wissenschaften, Berlin, DDR.