

Fusion thermonucléaire contrôlée : concept d'un réacteur, son impact sur l'environnement

Autor(en): **Paris, P. J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **79 (1988)**

Heft 22

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904111>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Fusion thermonucléaire contrôlée – concept d'un réacteur, son impact sur l'environnement

P.J. Paris

Des progrès considérables ont été réalisés au cours de ces dernières années dans le domaine de la fusion. L'article les présente brièvement et traite également les aspects écologiques de cette nouvelle technologie.

Auf dem Gebiet der Fusion wurden in den letzten Jahren beträchtliche Fortschritte erzielt. Der Beitrag fasst diese zusammen und geht auch auf die Umweltschutzaspekte dieser neuen Technologie ein.

1. Introduction

Les derniers résultats obtenus sur les installations de recherches en fusion thermonucléaire contrôlée laissent prévoir dans un proche avenir la démonstration du breakeven (l'énergie issue des réactions de fusion égale alors celle investie dans le plasma). Une grande étape a été franchie au cours de ces cinq dernières années notamment avec la mise en exploitation des grands tokamaks tels que JET (Communauté Européenne), TFTR (USA), JT 60 (Japon), DIII Big Dee (USA). Les performances obtenues, lorsqu'on se place dans le diagramme de bilan des réactions, méritent qu'on s'attarde quelque peu sur la technologie de fusion dite intra-cavité, celle du plasma. Même si les problèmes rencontrés dans l'étude des plasmas thermonucléaires n'ont tous trouvé de solution, les caractéristiques des plasmas confinés dans ces machines, densité, température et temps de confinement énergétique, ont été considérablement améliorés.

L'étude des lois d'échelle des paramètres du plasma et des installations devrait aboutir à la conception de nouvelles installations – voire même à la réalisation d'un projet mondial, si le programme ITER se concrétise – dans lesquelles non seulement le critère de Lawson serait atteint mais aussi l'ignition (auto-entretien des réactions de fusion par les noyaux d'hélium issus eux-mêmes des réactions de fusion antécédentes, sans aucune contribution des méthodes de chauffage additionnel).

Il faut rendre justice aux autres installations de recherches qui, tout en étant plus modestes dans leurs dimensions et dans leurs performances, ont pu répondre à un certain nombre de problèmes plus spécifiques tels que: l'étude de l'efficacité des méthodes de

chauffage additionnel du plasma des tokamaks, l'étude de l'interaction plasma-paroi, la découverte de mode reproductif de haut confinement énergétique du plasma, la recharge en combustible par jets de gaz et par injection à haute vitesse de glaçons d'hydrogène et de deutérium, la génération de courant de manière non inductive à l'aide d'ondes dont la résonance avec les particules du plasma entraîne la formation d'un courant... autant de thèmes qui devraient faciliter la compréhension des mécanismes ayant lieu dans les plasmas.

L'autre volet de la technologie de fusion, celle dite extra-cavité, qui touche plus directement les autres constituants d'un réacteur, a fait l'objet d'études importantes, à travers divers projets conceptuels de réacteurs, notamment aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne au cours de ces quinze dernières années.

Depuis 1983, la Communauté Européenne a renforcé, avec l'avènement du programme NET, cet aspect de la recherche technologique et technique, domaine très ponctuel, et jusqu'alors en Europe souvent réservé à certains laboratoires nationaux dans lesquels étaient effectués des travaux liés à la fission nucléaire.

Due à cette nouvelle impulsion, des entreprises du secteur privé sont venues soutenir l'effort public, elles participent ainsi au développement de technologies recouvrant des domaines aussi vastes et dispersés que les bobinages supraconducteurs, la cryogénie, les générateurs hyperfréquences pour le chauffage auxiliaire du plasma, les injecteurs de glaçons de deutérium, la télémanipulation dans l'enceinte du plasma et autour du réacteur, la régénération et la manipulation du tritium, l'extraction hors de l'enceinte des réactions des «cendres refroidies» et des impuretés, la récupération de la

Adresse de l'auteur

Pierre Jean Paris, Ingénieur physicien, Centre de recherches en physique des plasmas, Association Euratom – Confédération suisse, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, av. des Bains 21, 1007 Lausanne.

chaleur, l'étude de matériaux à faible activation entrant dans la composition de la structure du réacteur, la sécurité et l'impact sur l'environnement... Des retombées technologiques et économiques importantes peuvent être attendues à moyen et à long terme.

2. Energie de fusion et bilan des réactions

A l'inverse de la fission nucléaire qui utilise la scission des éléments lourds tels que l'uranium 235, la fusion emploie des réactions de synthèse des éléments légers. Dans les deux cas, la libération d'énergie est due au défaut de masse existant entre produits initiaux des réactions et produits finaux. Les sous-produits emportant avec eux des énergies cinétiques récupérables par le fluide caloporteur dans le cas de la fission, par un manteau de couche fertile pour la régénération du tritium complété par un fluide caloporteur dans le cas de la fusion. Egalement dans les deux cas, ce sont des «cendres» des réactions qui maintiendront les réactions futures. Alors que les neutrons issus de la fission assurent la réaction en chaîne, le confinement des noyaux chauds d'hélium devrait maintenir l'ignition des réactions de fusion D-T. Comme nous le constatons, il existe certaines analogies entre ces deux processus, mais la ressemblance s'arrête là.

Les réactions nucléaires de synthèse sont extrêmement rares aux températures ordinaires; pour atteindre des seuils de rentabilité énergétique, il faut que les noyaux soient chauffés à des températures supérieures à 100 millions de degrés Kelvin. D'autre part, un nombre suffisant de ces particules doit entretenir ces réactions.

Dans les étoiles, les réactions de fusion s'effectuent à des températures plus basses, de l'ordre de 10 millions °K (au centre du soleil 15 millions °K), mais à des pressions considérables (au centre du soleil, 10^{11} atmosphères; la densité est de l'ordre de 10^{32} particules/m³). 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-proton (p-p) et le cycle CNO. Le temps moyen qu'attend un proton pour subir une réaction est d'environ 7 milliards d'années, il est d'une seconde pour le

deutérium et de 150 000 ans pour l'hélium 3. Ces trois constituants appartiennent à la chaîne p-p, la plus probable dans le processus énergétique du soleil. C'est la lenteur de tels processus qui permet aux réacteurs stellaires de «brûler» pendant des milliards d'années. Il n'est guère possible de reproduire sur terre ces réactions extrêmement lentes et dont nous ne pouvons satisfaire toutes les contraintes physiques. Cependant celles mettant en jeu les isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, semblent être accessibles, c'est ce que nous montre la figure 1.

Les réactions principales de fusion sont indiquées dans le tableau I.

La nucléosynthèse deutérium-tritium libère 94 000 kWh par gramme de combustible, comparativement dix millions de fois plus qu'un gramme de pétrole. Le deutérium existe en grande quantité dans l'eau (0,034 g/litre) bien répartie sur le globe (10^{13} tonnes). Le tritium, n'existant pas à l'état naturel, est produit à partir du lithium dont les réserves contenues dans l'écorce terrestre et dans les océans sont estimées à 10^8 tonnes. Ces caractéristiques à elles seules expliquent le grand intérêt d'une telle source d'énergie.

De manière simplifiée, pour un plasma ne contenant que les combustibles deutérium et tritium (sans prendre en compte les impuretés), nous pouvons résumer les conditions de viabilité de l'énergie de fusion sous trois formes. Le premier objectif à atteindre est évidemment la condition de breakeven, pour laquelle l'énergie produite par les réactions de fusion est égale à celle investie dans le plasma, il faut, dans le cas d'un plasma D-T à 100 millions de degrés, que le produit $nT_E > 7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ soit validé (n étant la densité de particules par m³ et T_E , le temps de confinement énergétique).

Une deuxième relation, connue sous le nom de critère de Lawson, tient compte du rendement d'un réacteur.

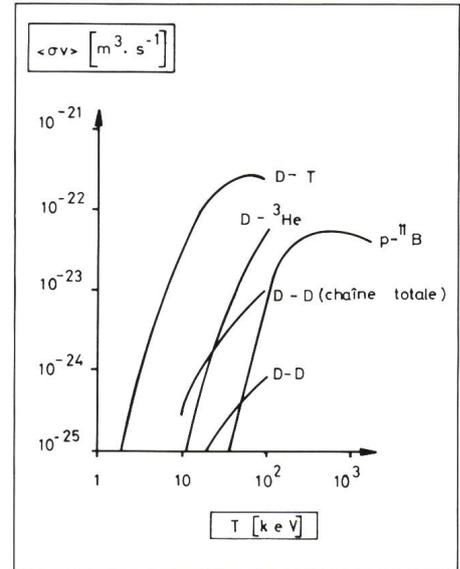


Figure 1 Sections efficaces des principales réactions de fusion

L'énergie captée sous forme thermique est convertie ($n = 0,33$) en énergie électrique et restituée au plasma pour compenser les pertes dues notamment au rayonnement de freinage des particules (Bremsstrahlung). Cette condition, qui prend déjà en compte les systèmes de conversion énergétique, est formulée de la façon suivante:

$$nT_E > 1,4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s.}$$

La condition d'ignition est encore plus sévère que les deux précédentes. Pour qu'un plasma thermonucléaire continue de «brûler» sans apport d'énergie extérieure, sous-entendu que l'énergie des particules alpha (hélium) compense toutes les fuites d'énergie et maintient les conditions de réaction, s'exprime ainsi $nT_E > 2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$, toujours pour un mélange D-T à 100 millions de degrés.

Ces trois formulations sont représentées dans la figure 2. Ces critères doivent être considérés pour des plasmas sans impuretés métalliques ou ga-

Réactions et énergie produites	Seuil de réaction Température en keV	Gain max. par fusion
$D^2 + T^3 \rightarrow He^4 (3,52 \text{ MeV}) + n (14,06 \text{ MeV})$	10	1800
$D^2 + D^2 \rightarrow T^3 (1,01 \text{ MeV}) + p (3,03 \text{ MeV})$ à 50%	50	80
$\rightarrow He^3 (0,92 \text{ MeV}) + n (2,45 \text{ MeV})$ à 50%	50	70
$D^2 + He^3 \rightarrow He^4 (3,67 \text{ MeV}) + p (14,67 \text{ MeV})$	100	180
$B^{11} + H \rightarrow 3 He^4 (8,67 \text{ MeV})$	300	30

Tableau I Réactions principales de fusion

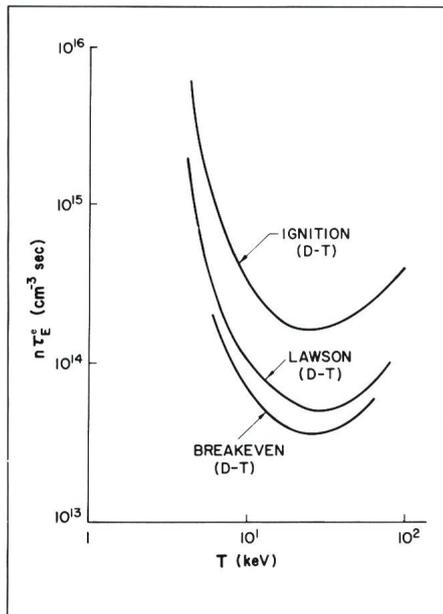


Figure 2 Comparaison de divers seuils de rentabilité de la fusion D-T [2]

zeuses. Dans le cas où les impuretés atteignent 0,1 à 2%, selon les atomes contenus dans le plasma, les rayonnements de freinage et de recombinaison deviennent alors si importants que le seuil viable des réactions est fortement repoussé.

3. Le point sur les recherches en fusion magnétique

Afin de produire ces conditions, deux filières principales ont été envisagées: la voie «fusion inertielle» et la voie «fusion magnétique». La méthode «inertielle» consiste à créer un plasma très dense pendant un bref instant ($T = 10^8$ K, $n = 10^{30}$ à 10^{32} m⁻³, $T_E = 10^{-9}$ à 10^{-11} s). Une cible solide contenant du deutérium et du tritium est alors irradiée par des faisceaux de particules énergétiques (ions, électrons, photons...). Les faisceaux d'ions lourds et de lumière laser (notamment rayons X) portent les espoirs de cette recherche; il ne faut cependant pas perdre de vue qu'actuellement, on se heurte au bon rendement des lasers et des sources de particules. D'autre part ces domaines, liés à la recherche militaire, sont nationaux et «classifiés». Nous discuterons donc des résultats obtenus dans la fusion lente ou magnétique.

Parmi toutes les configurations magnétiques, le tokamak est l'installation qui a reçu le plus d'attention au cours de ces 15 dernières années, conséquence directe des bons résultats obtenus sur ce type d'appareillage. Le tokamak

(de l'acronyme russe signifiant «courant dans une chambre magnétique torique») est un système torique qui fonctionne sur le principe d'un transformateur (illustré fig. 3). Un courant circulant dans les enroulements primaires engendre un champ électrique qui induit un courant secondaire dans l'anneau de plasma. On superpose à ce courant un fort champ magnétique torique pour assurer la stabilité MHD (magnétohydrodynamique) du plasma, des champs magnétiques verticaux aident à la stabilité horizontale et verticale du plasma. Le programme soviétique démarra en 1955 sous la direction de M.A. Leontovich et L.A. Artsimovich, avec des contributions importantes de I.E. Tamm et A. Sakharov (celui dont on parle beaucoup ces jours-ci) qui ont conçu le premier réacteur basé sur le tokamak. Il a fallu attendre la conférence internationale de Novosibirsk en 1968 pour que ce type de machine soit adopté par la communauté scientifique, dès lors, nous avons assisté à la construction de divers tokamaks dans le monde, les stellarators (autres machines toriques sans induction de courant dans le plasma) et les machines à miroirs magnétiques leur ont peu à peu cédé la place.

Le courant circulant dans l'anneau de plasma ne peut fournir assez d'énergie, par effet Joule, aux particules constituant le plasma, car celui-ci devient un excellent conducteur élec-

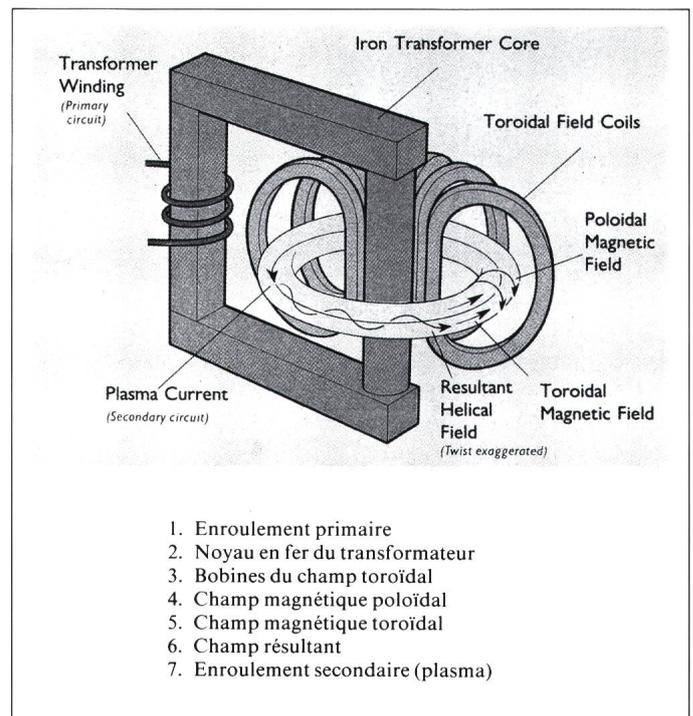
trique au delà de 30 millions de degrés (20 fois meilleur que le cuivre à température ambiante). Des systèmes de chauffage auxiliaire doivent donc être adjoints aux expériences:

- injection de particules très énergétiques (faisceaux d'hydrogène et de deutérium),
- couplage d'ondes dont l'énergie est absorbée par les particules du plasma,
- compression adiabatique, en comprimant le volume, la densité et la température augmentent.

Depuis les quelques 100 000 °K, obtenus dans ces installations au début des années 60, aux plus de 150 000 000 °K atteints ces deux dernières années, les appareillages ont pris de l'ampleur et sont devenus très sophistiqués, preuve en est la complexité et les dimensions de JET, TFTR et JT 60. Les principaux tokamaks en exploitation ou en projet sont listés dans le tableau II.

La découverte en 1982 de deux régimes de fonctionnement des tokamaks non prévus par la théorie a eu une incidence capitale sur le design des expériences qui ont suivi. Il a été démontré sur le tokamak ASDEX (R.F.A.) qu'en utilisant un écorceur magnétique, même en présence de chauffage additionnel, la qualité d'isolation thermique restait bonne. Or il était apparu auparavant que, quelle

Figure 3 Schéma de principe d'un tokamak



Tokamak	Pays	R ₀ (m)	a(m)	B _T (T)	I(MA)
JET	CEE	2,96	1,25×2,10	3,50	7
TORE SUPRA	France	2,38	0,85	4,50	1,70
ASDEX up Grade	RFA	1,65	0,5×0,8	4	4
TEXTOR	RFA	1,75	0,50	2	0,50
FTU	Italie	0,92	0,31	8	1,60
DITE	G.-B.	1,17	0,27	3,5	0,35
Compass	G.-B.	0,55	0,22×0,38	1,75	0,3
TCA	Suisse	0,60	0,18	1,50	0,135
TCV	Suisse	0,87	0,24×0,72	1,43	1,20
LT-4	Australie	0,50	0,14	3	0,06
TORTUS	Australie	0,44	0,12	1,50	0,07
Tokamak de Varennes	Canada	0,84	0,27	1,50	0,22
JT 60	Japon	3,03	0,95	4,50	2,70
JFT2M	Japon	1,30	0,3×0,5	1,60	0,50
TFTR	U.S.A.	2,48	0,85	5,20	2,50
PBX	U.S.A.	1,43-1,55	0,3-0,45	1,40	0,56
DIID	U.S.A.	1,67	0,67×1,40	2,20	5
VERSATOR	U.S.A.	0,40	0,13	1,50	0,025
TEXT	U.S.A.	0,53	0,15	1	0,40
MACROTOR	U.S.A.	0,90	0,40	0,30	0,10
TUMAN3	URSS	0,55	0,23	0,50	0,10
T-10	URSS	1,50	0,39	5	0,65
T-15	URSS	2,43	0,70	3,50	1,40

Tableau II Les principaux tokamaks en exploitation ou en projet

que soit la méthode de chauffage auxiliaire, le temps de confinement se dégradait de manière draconienne. Actuellement, il semble que l'enclenchement de décharges de haute qualité soit assurée sur tous les tokamaks à diaphragme magnétique.

Le développement, entrepris depuis 1977, permettant d'approvisionner le plasma en combustible par des injections de glaçons d'hydrogène ou de deutérium, a aussi contribué au maintien de bonnes qualités des décharges. La technique de l'alimentation par des «bouffées» de gaz avait le désavantage de modifier le profil de densité et de température sur la périphérie du plasma. Des glaçons de deutérium solide de 2,6 à 6 mm de diamètre atteignant des vitesses de 2700 m s⁻¹ sont injectés dans JET où l'on souhaiterait des vitesses encore plus grandes pour atteindre le centre de la décharge avant que l'ablation du glaçon ne soit complète.

Du point de vue des méthodes de chauffage additionnel, ce sont les techniques utilisant l'injection de faisceaux de neutres (faisceaux de D⁰ à 120 keV sur TFTR et de 80 keV sur JET) et l'onde cyclotronique ionique (32 MW à 25-55 MHz pendant 20 secondes sur JET) qui ont montré les meilleurs résultats pour le moment (fig. 4 et 5 de

JET). De grands espoirs sont placés dans l'utilisation de l'onde cyclotronique électronique déjà utilisée sur des tokamaks à bas champ magnétique pour le chauffage et le contrôle du profil de température, pour cela des développements de tubes de très haute puissance à hyperfréquences (au-delà de 100 GHz) sont en cours. C'est le cas au Centre de recherches en physique des plasmas qui participe en collaboration avec ABB dans le cadre de l'Euratom à l'étude d'un gyrotron à 115 GHz (fig. 6).

Un autre aspect qui devra avoir son importance dans la création et le maintien de la décharge pendant de longues impulsions, est la génération du courant par des méthodes non-inductives (l'utilisation de l'effet transformateur ne sera plus possible pour des plasmas dont la durée sera de l'ordre de quelques centaines de secondes). Plusieurs expériences ont démontré la possibilité de générer le courant dans le plasma par l'onde hybride inférieure; le résultat le plus significatif, 2 MA, a été obtenu sur JT 60 (Japon). Cependant cette méthode se heurte à une limite de densité au-delà de laquelle l'efficacité du processus décroît rapidement, aussi pense-t-on à l'emploi de l'onde cyclotronique électronique, mais cette méthode doit encore faire ses preuves.

Les performances les plus substantielles ont été obtenues sur JET et TFTR au cours de ces dernières années, ainsi que le reflète la figure 7. Citons surtout le meilleur paramètre de fusion n Ti T_E = 3×10²⁰ keV×m⁻³ s de TFTR et le meilleur temps de confinement T_E = 1,2 s de JET. L'expérience européenne détient globalement les meilleurs résultats, surtout avec l'annonce cet été d'un courant de plasma de 7 MA.

4. Perspectives et stratégie de la recherche à court et à moyen termes

En fonction des résultats qui seront obtenus sur les tokamaks JET et TFTR, des décharges contenant du deutérium et du tritium seront produites dans ces deux appareillages, vers la fin de leur exploitation en 1992. Ces expériences devront permettre d'étudier le confinement des particules d'hélium issues des réactions de fusion et en même temps de déterminer pour la première fois le bilan énergétique en terme de plasma D-T. Mais elles auront pour conséquence une activation importante de la structure des tokamaks due au flux de neutrons à 14,06 MeV. Des moyens de robotique et de télémanipulation ont été mis en place à cet effet; il ne sera plus permis aux techniciens ni de travailler dans l'enceinte ni dans la halle expérimentale (fig. 8 et fig. 9 de JET). La halle du tokamak JET est conçue de manière totalement étanche aux radiations émises par la structure expérimentale; sur TFTR, c'est un système modulaire formant un «igloo» qui sert d'écran. Actuellement, les décharges D-D ont déjà produit des neutrons de 2,5 MeV qui ont activé les parois des enceintes de JET et de TFTR, sans toutefois perturber de manière significative le travail in situ. Sur TFTR, par exemple, lorsque la campagne d'exploitation est au plus fort, 1,5×10¹⁷ neutrons peuvent être produits en un jour, ce qui résulte en un niveau de radiation induite dans l'enceinte contenant le plasma de 600 millirem par heure immédiatement après les impulsions de plasma avec injection de neutres énergétiques (supershots). Il semble que cette dose est produite par l'interaction des neutrons avec le manganèse contenu dans la paroi en acier inoxydable. La demi-vie de cet élément est de 2,5 heures, ce qui n'affecte donc pas trop la maintenance de l'appareillage.

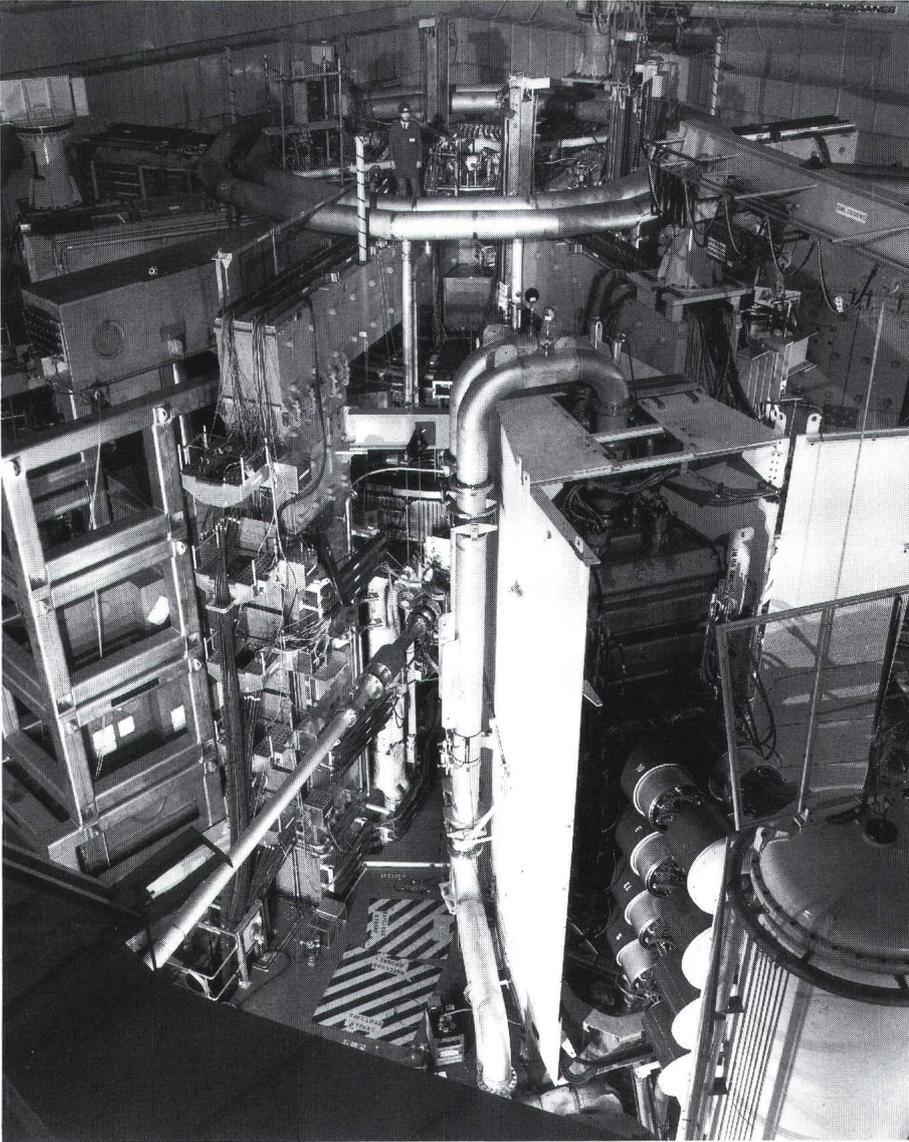
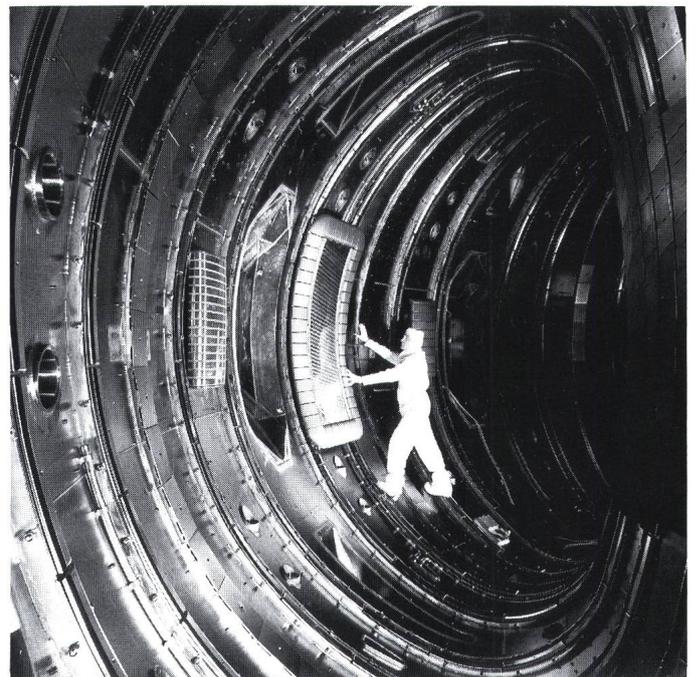


Figure 4 Vue générale de JET avec, au premier plan, un injecteur de faisceaux neutres

Des projets employant des aimants supraconducteurs apporteront un nouvel éclairage à la construction des futures installations en abordant une partie technologique importante. Tore Supra (France) a été mis en marche en avril dernier, les aimants supraconducteurs en NbTi sont refroidis à l'hélium superfluide à 1,8°K sous pression atmosphérique selon une nouvelle conception. Les thèmes abordés, autres que les bobinages supraconducteurs, porteront sur des plasmas fortement chauffés et sur la génération de courant par ondes. Le tokamak soviétique T15, de dimension proche de celle de Tore Supra, comporte des bobinages supraconducteurs en Nb₃Sn. Il devrait être mis en exploitation en 1989.

De nouveaux projets sont en cours de conception parmi lesquels CIT aux USA, NET en Europe, FER au Japon.

Figure 5
Vue intérieure de JET, un ingénieur y inspecte une antenne de couplage des ondes cyclotroniques ioniques au plasma



Ces expériences devront supporter des plasmas thermonucléaires de longue durée. Elles auront pour objectifs, l'étude des réactions de fusion en présence de manteaux modulaires de sur-génération du tritium, l'étude des matériaux qui entreront dans la composition de la première paroi du réacteur, l'effet dû au flux thermique issu du plasma et notamment dû aux disruptions et à l'arrêt des décharges. Il n'est actuellement pas prévu de récupérer l'énergie et de la convertir.

Il sera possible alors de déterminer plus précisément la nature des problèmes tant physiques que technologiques qu'il faudra résoudre avant d'extrapoler les paramètres d'un prototype de réacteur.

Il y a un an, les négociations entre la Communauté Européenne, le Japon, l'URSS et les USA ont abouti à la création du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Les rencontres au sommet entre les pays industrialisés, ainsi que les rencontres Gorbachev - Reagan, avaient relancé l'idée de la coopération à l'échelle mondiale qui a pris le relais du programme INTOR. C'est chose faite, une équipe internationale a été formée. Ses travaux ont commencé au printemps dernier à Garching (RFA) où se trouve également l'équipe européenne de NET. Le but de ce programme est de mettre en commun les connaissances acquises par les quatre partenaires pour aboutir à un projet conceptuel de réacteur expérimental, réalisable soit dans leur propre pro-

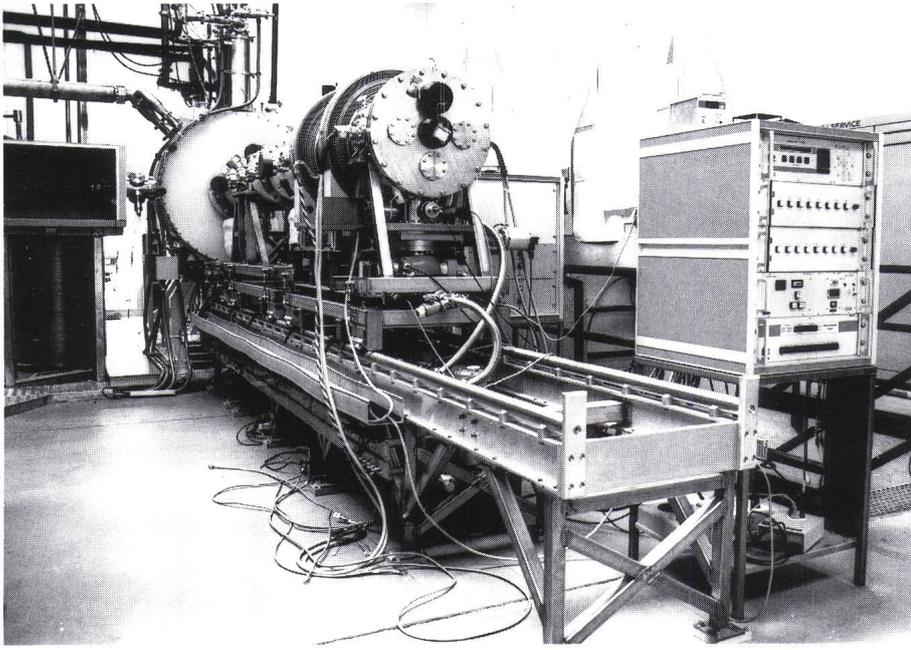


Figure 6 Vue de l'installation d'essai du Gyrotron de 115 GHz dans une salle du Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

gramme soit dans un programme plus vaste de collaboration internationale.

5. Conception d'un réacteur à fusion

Pour cerner le design conceptuel d'un réacteur et les problèmes inhérents, nous nous baserons en grande partie sur les travaux réalisés à la de-

mande de l'Euratom en 1986 par un groupe d'experts [1]. Un grand nombre d'études de réacteurs, basés sur le tokamak, ont été réalisées depuis le début des années 70, elles ont surtout permis de faire le point sur les étapes à franchir pour rendre viable techniquement, économiquement et écologiquement l'utilisation de la fusion comme source d'énergie. Le tableau III [1]

donne un aperçu de ces projets en indiquant la puissance électrique et les coûts hypothétiques. La figure 10 montre, à titre d'exemple, une coupe du projet NUWMAK (pris dans [2]), illustrant bien les différentes régions qui entourent le plasma et qui constituent les zones où la surgénération du tritium aura lieu (blanket), ainsi que celles utilisées pour la protection (shield) des bobines supraconductrices (VF coils et TF coils). Cette protection a encore pour but d'isoler la partie du réacteur soumise aux flux de neutrons de la salle du réacteur. Dans ce projet, la structure de la première paroi est constituée par un alliage de titane-aluminium-vanadium (Ti6 Al4V) qui offre une bonne tenue au flux neutronique qui a été défini ici de 4,3 MW/m²; le manteau serait un eutectique lithium-plomb (Li⁶²Pb³⁸) pour ralentir et surgénérer le tritium, enfin le liquide réfrigérant de l'eau bouillante. Les bobines supraconductrices en niobium-titane (NbTi), refroidies par de l'hélium superfluide à 1,8 °K, produiraient un champ magnétique de 6 Teslas au centre du plasma. Il existe d'autres scénarios de réacteurs qui évoluent en fonction des connaissances.

Les études portent notamment sur le design des couches fertiles (blankets) et montrent diverses options possibles parmi lesquelles on retiendra:

- le lithium liquide stagnant dans une structure en alliage de molybdène (TZM) refroidie par un sel de lithium-beryllium-fluor (FLIBE),
- le lithium sous forme d'oxyde (Li₂O),
- un eutectique liquide autoréfrigérant au lithium-plomb,
- le lithium sous forme de céramique à base de silicate (Li₄SiO₄, Li₂SiO₃...) ou d'aluminate (LiAlO₂...) réfrigéré par de l'hélium.

Des expériences ont montré qu'il était possible de récupérer du tritium de ces couches fertiles. Dans le cas de l'eutectique liquide LiPb, le tritium a été extrait à l'aide de getters au Ti ou de gaz inertes en ébullition.

En ce qui concerne les matériaux de la première enceinte des essais de résistance à la fatigue et à la traction après irradiation ont été réalisés notamment sur des aciers austénitiques et martensitiques ainsi que sur des aciers austénitiques au manganèse-chrome et sur des alliages de vanadium. Ce sont ces derniers qui pourraient être choisis pour des applications à

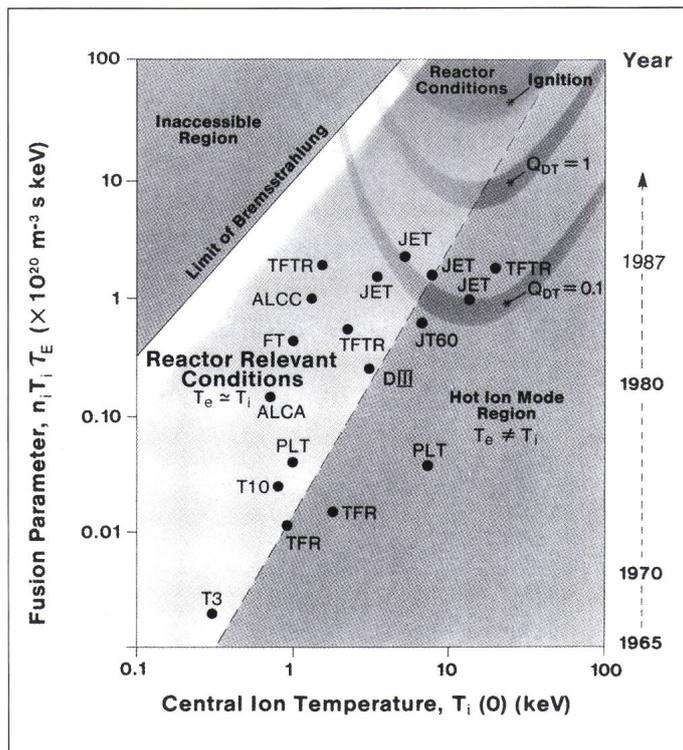


Figure 7 Performances comparées des installations expérimentales du type tokamak, dans le diagramme du bilan énergétique [3]

Année de publication	Année d'évaluation du coût	MWe net	Nom du projet	Coût spécifique en capital direct (\$/kWe) estimé l'année de l'évaluation
1974	1974	2030	PPPL (Princeton, USA)	433
1975	1974	1474	UWMAK I (Univ. Wisconsin, USA)	723
1975	1975	1709	UWMAK II (Univ. Wisconsin, USA)	706
1976	1975	1985	UWMAK III (Univ. Wisconsin, USA)	1154
1976	1976	2500	Culham I (UKEA-Culham, G.-B.)	750
1979	1978	660	NUWMAK (Univ. Wisconsin, USA)	1279
1980	1977	1200	Culham II B (UKEA-Culham, G.-B.)	1442
1980	1980	1200	Starfire (Argonne National Lab., USA)	1439

Tableau III Réacteurs conceptuels D-T du type tokamak

	EG ₁	EG ₂	EG ₃
Centrale à charbon	5-7	6-9	53-93
Centrale à fission PWR (U enrichi par diffusion)	3-5	7-5	15
Centrale à fission PWR (U enrichi par centrifugation)	10	13	80
Centrale à fusion	5	7	64

EG₁: énergie électrique produite/énergie thermique équivalente investie
 EG₂: énergie électrique produite/énergie totale investie
 EG₃: énergie électrique produite/énergie électrique investie

Tableau IV Gains d'énergie pour diverses centrales électriques

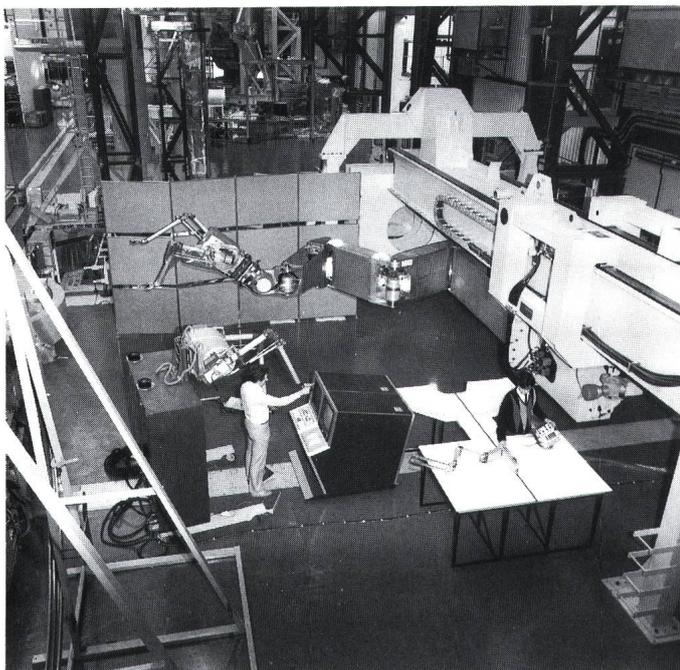


Figure 8 Test du bras articulé permettant de travailler à l'intérieur du tore de JET

long termes. Après examen d'un grand nombre de matériaux de protection de la première paroi (tournée vers le plasma) on retient actuellement le graphite, des carbures de silicium (SiC) et des composés de graphite-carbure de silicium.

Des expériences portant sur la solubilité, la diffusibilité et la perméabilité du tritium dans les métaux doit faire l'objet d'études intensives. A ce propos, les intérêts sont multiples puisqu'ils intéressent aussi bien les matériaux du manteau et de la première paroi, mais aussi les écrans biologiques directs du réacteur ainsi que les containers de stockage.

Une partie de l'étude effectuée par l'Euratom révèle, après une étude exhaustive des scénarios, l'aspect de gain énergétique qui pourrait exister entre les différents types de centrales (tableau IV, [1]). Ainsi, une comparaison entre une centrale à fusion et une centrale à fission, en termes d'énergie investie et d'énergie produite, a fait l'objet d'une étude montrant un facteur 2 en faveur de la fusion.

6. Impact des réacteurs sur l'environnement

Un réacteur produisant de l'énergie (fig. 11) doit satisfaire à un certain nombre de critères pour qu'il soit socialement accepté:

- l'approvisionnement doit être garanti par des combustibles existant en quantité abondante et bien répartis sur le globe,
- la propreté chimique, absence d'émission de dioxyde de carbone, SO₂, NO_x ou de substances toxiques,
- un impact radiologique faible sur l'environnement par rapport au fond naturel de rayonnement,
- la résistance aux accidents et aux catastrophes,
- la fiabilité technique,
- l'acceptabilité économique.

L'énergie de fusion, basée sur les réactions D-T, répond en partie à ces critères, il est possible de dégager un grand nombre de choix dans le design pour approcher de ceux-ci. Des progrès sont réalisés et l'on s'efforce de rechercher des solutions viables pour l'environnement, la sécurité et l'économie.

Une centrale de 1000 MWe consommerait 300 kg de lithium et 90 kg de deutérium par an. A titre de comparaison ceci équivaldrait à brûler

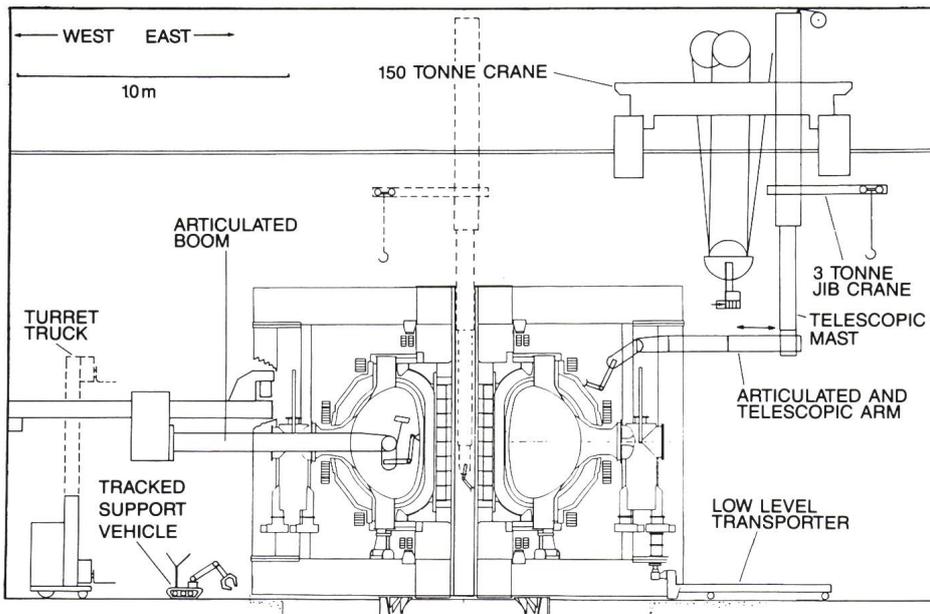


Figure 9 Schéma montrant les diverses installations de robotiques et de télémanipulation installées autour de JET (Dia. JET)

2 000 000 de tonnes de pétrole ou 3 600 000 de tonnes de charbon. Avec l'abondance des réserves dont la planète dispose, l'utilisation de la fusion D-T et D-D pourrait devenir une des principales sources d'énergie à long terme.

Les combustibles primaires (Li,D) et le sous-produit de réaction He ne sont pas radioactifs. Le tritium, radioactif,

est produit dans la centrale et devrait y rester. Seule une première quantité, nécessaire à la première charge du réacteur, doit être transportée.

La période radioactive du tritium est de 12,3 ans et sa désintégration s'accompagne de rayonnements bêta (électrons). Il est présent en très petite quantité dans la haute atmosphère (l'inventaire naturel est de 7 à 14 kg

produits par l'interaction des rayons cosmiques et de l'azote). Le tritium gazeux s'oxyde à l'air et dans le sol pour former de l'eau tritiée, et sous cette forme, il est plus facilement absorbée par les tissus humains. L'eau tritiée ne se concentre pas dans l'organisme, il n'y a pas d'organe critique. L'échange de l'eau est relativement important, conduisant à une période biologique moyenne de 10 jours. L'énergie émise au cours de sa désintégration est déposée in situ. Sa radiotoxicité est faible, étant donné sa répartition dans l'organisme, sa faible énergie et sa courte période biologique. Aucun indice ne permet de déclarer que le tritium se concentre dans la chaîne alimentaire.

Avec un taux de surgénération de 1,02 à 1,6, la quantité de tritium conservée dans l'inventaire d'une centrale sera très réduit (2 à 3 kg), répartie dans différents buildings. Ceci aura pour effet, dans le cas d'un grave accident, qu'une quantité maximale de 200 g de tritium sous forme, la plus dangereuse, d'eau tritiée (HTO) pourrait s'échapper du toit du réacteur. Dans des conditions climatiques adverses, ceci aurait pour conséquence qu'une dose maximum de 6 à 8 rems pourrait être déposée dans un rayon de 1 km de la centrale. Ce qui ne devrait pas nécessiter le déplacement de la population établie dans les environs de la centrale.

Dans le cas des opérations de routine, les effluents atmosphériques relâchés par une centrale seraient de l'ordre de 20 000 Ci (T) par an (60% HTO, 40% gaz). Ce qui équivaut à dire que, collectivement, pour 2000 centrales à fusion, le public ne serait pas soumis à une dose plus grande que 0,04% du fond naturel. Le taux de production d'autres effluents est négligeable.

Comme nous l'avons constaté, les recherches technologiques portant sur la première paroi et sur le manteau de surgénération du tritium (dans le cas d'un réacteur D-T) sont ou peuvent être liées à des problèmes qui ont des incidences sur la sécurité et l'environnement au sein de la halle contenant le réacteur et les circuits annexes. L'utilisation de matériaux tels que le vanadium ou ses alliages avec le titane, d'alliage niobium-zirconium ou des alliages d'aluminium devraient représenter une solution viable pour la première paroi (dans l'état actuel). En général, la capacité industrielle existe pour produire ces alliages. La décroissance de la radioactivité après l'arrêt du réacteur est relativement rapide (fig. 12 [2]) et elle permettra une réuti-

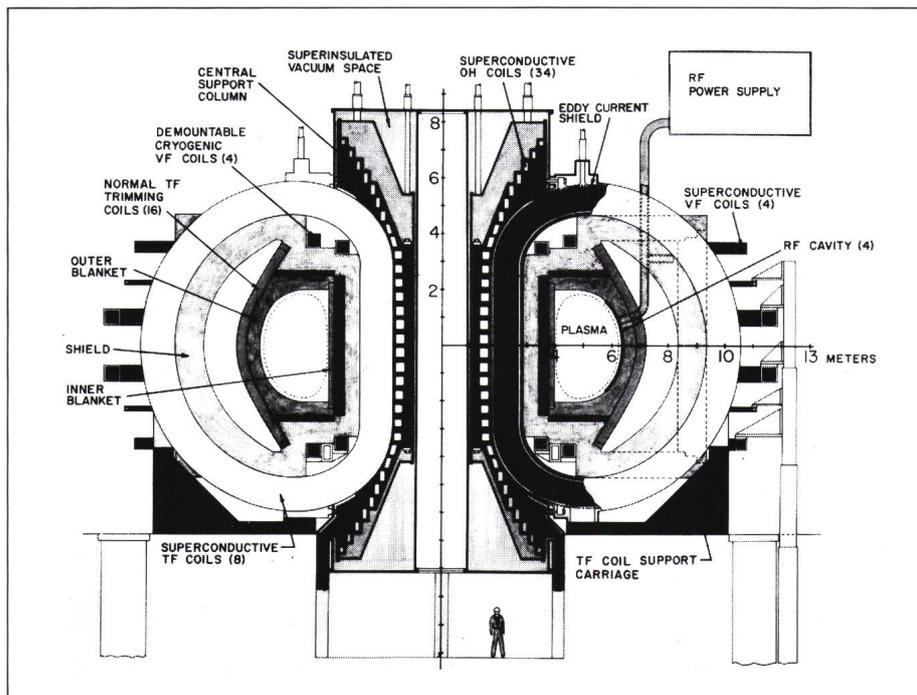


Figure 10 Section de NUWMAK montrant le plasma, le manteau fertile, la protection contre les rayonnements, les systèmes magnétiques et le système de chauffage additionnel RF [2]

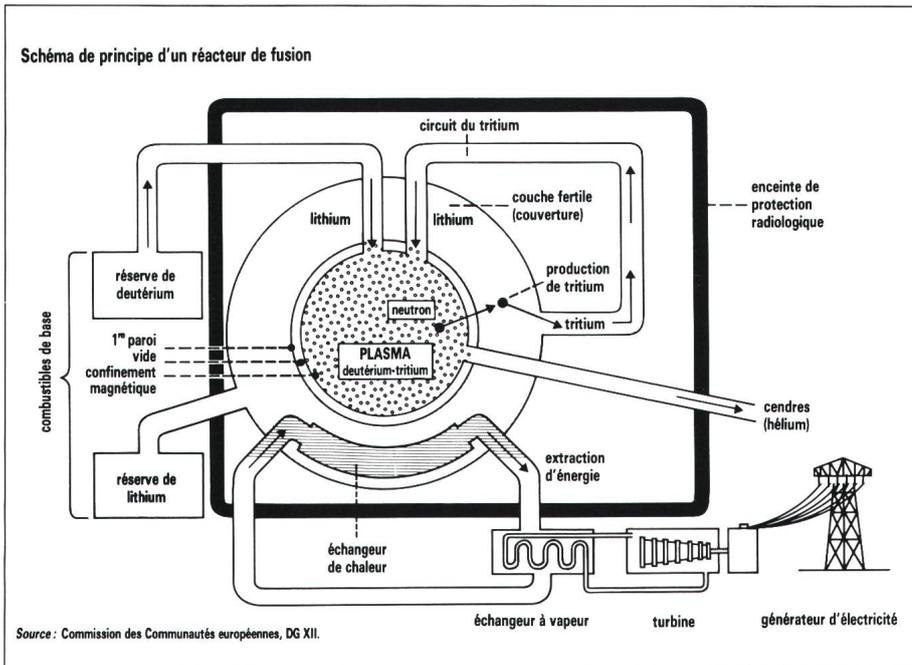


Figure 11 Schéma de principe d'un réacteur à fusion (Réf. EURATOM)

lisation des matériaux à faible activation après un stockage approprié sur le site même de la centrale (pour un alliage de VTi avec 0,1% d'impuretés de Nb-Zr, l'activité serait au niveau de la roche naturelle après 30 ans).

La fusion produira des déchets qui

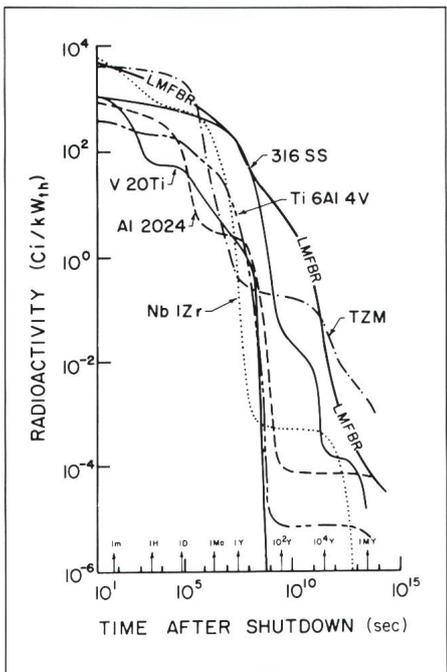


Figure 12 Décroissance de la radioactivité dans la structure d'un réacteur à fusion en fonction du temps après arrêt, ayant opéré 2,5 années avec un flux de neutrons sur la première paroi de 1MW/m². TZM est un alliage de molybdène (TiZrMo). LMFBR est un réacteur à neutrons rapides du type Phenix [2]

ne sont pas associés à la réaction nucléaire: il n'y a pas de production d'éléments radioactifs de type alpha tels que les actinides à longue vie produits dans la fission. Les déchets dont l'activité est élevée proviennent essentiellement de la structure.

Les circuits annexes comme ceux du pompage, de l'évacuation des «cendres» des réactions, du circuit réfrigérant sont reliés à la présence du tritium. Les normes en vigueur limiteraient les pertes de tritium sous forme d'eau à 0,2 g/jour pour 1000 MWe. Des systèmes suffisamment étanches aux fuites de tritium peuvent être conçus en incorporant des barrières anti-diffusion tels que l'utilisation de revêtements de céramique, du cuivre, des getters au titane...

Du point de vue de la sécurité passive, signalons qu'il n'y a pas d'excursion nucléaire au sens d'un réacteur à fission, quelle que soit la panne ou l'incident dans le réacteur à fusion, elle ne peut en aucune circonstance déboucher sur un emballement nucléaire. La quantité de combustible dans le réacteur est faible, elle est juste suffisante pour un fonctionnement de quelques dizaines de secondes. L'interruption de l'écoulement du combustible ou un défaut du système de confinement se traduirait par un arrêt des réactions. De plus, la chaleur résiduelle est faible (la densité de puissance dans un réacteur à fusion pourrait être de 0,4 MWth/m³ comparée à 15 MWth/m³ dans un réacteur à fission).

La structure de la première paroi subirait 2% de la puissance de fonctionnement, ce qui permettrait d'éviter la fusion de la paroi.

L'immobilité de la plupart des inventaires radioactifs confinés dans des matériaux de structure non volatiles, alliée au choix judicieux de ceux-ci contribue encore à la sécurité passive dans un réacteur à fusion.

7. Conclusion

Les progrès récents réalisés dans la recherche en fusion thermonucléaire laissent entrevoir que le calendrier prévu par les scientifiques pour la démonstration de la faisabilité scientifique sera tenu et qu'au cours de la prochaine décennie le breakeven sera atteint. Il faudra attendre pourtant la génération des futures expériences pour voir la réalisation de l'ignition. Ces projets sont actuellement à l'étude. Ils devraient en même temps apporter une contribution, avec les recherches technologiques menées en parallèle, à la conception d'un réacteur.

Les réacteurs à fusion seront bien différents des réacteurs nucléaires à fission que nous connaissons, et les déchets des centrales seront aussi de nature différente. Cependant s'il est encore trop tôt pour définir un design précis d'un réacteur à fusion, nous pouvons au mieux, à partir d'un concept de machine torique comme celui du tokamak, envisager de résoudre séquentiellement les problèmes auxquels nous sommes confrontés. Comme nous venons de le voir, ce seront là les objectifs des futures installations expérimentales où l'ignition sera possible et que les flux de neutrons rapides seront importants pour permettre l'étude des matériaux à faible activation qui seront employés dans la structure du réacteur. Mais c'est aussi une tâche à laquelle participent, dès maintenant, de nombreux laboratoires en Europe et dans le monde. Evidemment, les travaux sont ponctuels et les incidences mutuelles ne peuvent être déterminées souvent que par une approche simulée par des codes numériques.

VII Références

- [1] Environmental impact and economic prospects of nuclear fusion EURFU BRU/ XII-828/86.
- [2] R. W. Conn «Magnetic fusion reactors» dans le volume 2 de «Fusion» édité par E. Teller. Academic Press 1981.
- [3] Rapport Annuel de JET Joint Undertaking 1987.



Montagefreundlich

Das neue gummiartige Ceander-Kabel XKT-RADOX verbindet die Eigenschaften eines GKT mit den Vorteilen eines elektronenvernetzten RADOX (hohe Alterungsbeständigkeit, höhere Strombelastbarkeit).

Verglichen mit einem herkömmlichen TT-Kabel gleichen Querschnittes weist das XKT-RADOX einen rund 10% kleineren Aussendurchmesser auf – verbunden mit entsprechend höherer Biegsamkeit, auch bei tiefen Temperaturen.

Eine weichere Isolation gewährleistet die gute Verarbeitbarkeit, ohne dass Weiterreisswiderstand und Schlitzfestigkeit abnehmen. Die Verträglichkeit mit Vergussmassen sowie die Haftung von Schrumpfteilen ist vorzüglich. (Übrigens: HUBER + SUHNER bietet Ihnen ein vollständiges Sortiment von SUCOFIT-Schrumpfschläuchen, -muffen, -endkappen und -endverschlüssen an.)

Diese Vorteile verdanken Sie der langjährigen Erfahrung von

HUBER + SUHNER im Bereich der elektronischen Vernetzung. Verlangen Sie unsere Dokumentation oder den Besuch unseres technischen Beraters.



HUBER+SUHNER AG

Geschäftsbereich Kabel

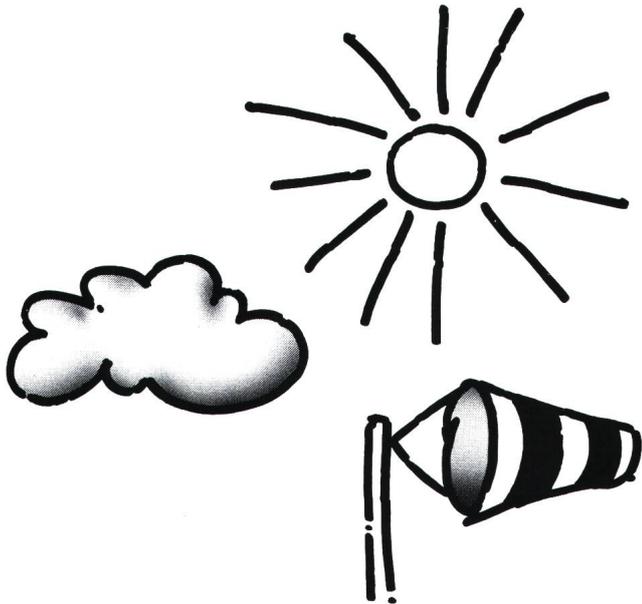
CH-8330 Pfäffikon CH-9100 Herisau

☎ 01 952 22 11 071 53 41 11

☎ 827 600 77 426

FAX 01 952 24 24 071 53 44 44

Das neue, gummiartige XKT/GKT-RADOX von HUBER + SUHNER



SAE Sonnenschutz- automatik- die perfekte Steuerung für jede motorangetriebene Sonnenschutzanlage

das lohnende Betätigungsfeld für den versierten
Elektrofachbetrieb!

Bieten Sie Ihren Kunden mehr!

Durch Automatisierung werden Rolladen-, Stoff- oder
Lamellenstoren erst richtig wirksam für:

- o den besten Schutz der Einrichtungsgegenstände
- o keine Zerstörung der Sonnenschutzanlage
- o mehr Komfort und Unabhängigkeit und
Verminderung des Einbruchrisikos
- o optimalste Bedingungen in Arbeitsräumen

Ob für Betriebs- oder Verwaltungsgebäude, Einfamilien-
häuser und Restaurants, bei Neubauten oder Renova-
tionen SAE Sonnenschutzautomatik steuert alle Sonnen-
schutzanlagen bekannter Hersteller.

Steuergeräte und Sensoren im kompletten Geräte-
programm für alle Anforderungen sind Schweizer
Fabrikate.

Wir geben Ihnen gerne weitere Auskünfte und unter-
stützen Sie fachmännisch.



GASSER-TECHNIK

Für Industrie- und
Bau-Automation,
Rebbergstrasse 58,
8102 Oberengstringen,
Tel. 01 750 37 12,
Telex 829039,
Telefax 01 750 37 10.

Coupon:

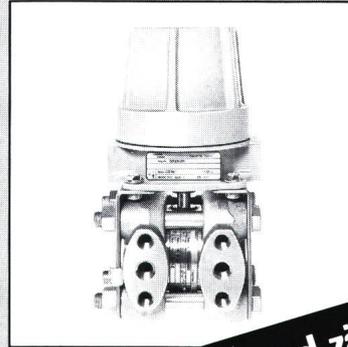
Ich möchte mehr wissen über die
SAE Sonnenschutzautomatik.

- Senden Sie mir Unterlagen
- Rufen Sie mich an

Name/ Vorname:
Firma:

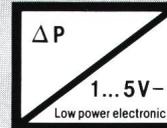
Strasse:
PLZ/ Ort:
Telefon:

Differenzdruck-Transmitter BARAX DP



- 0...10 bis 0...2000 mbar
- Stufenlos einstellbar 15 : 1
- Überlastsicher bis 230 bar
- Beim Einstellen von Null-
punkt und Bereich keine
gegenseitige Beeinflussung

Robust und zäh, doch sehr genau



- Gutes thermisches Ver-
halten, zulässige Mess-
stoff-Temperaturen
- 40 °C bis 120 °C
- Beliebige Seitenwahl der
Mess-Stoff-Anschlüsse
- Einstellbare Dämpfung

camille bauer

Camille Bauer AG
5610 Wohlen
Telefon 057 21 21 11
Telefax 057 22 74 32
Telex 827 901 cbm ch



... günstige Ferien mit
Reka-Checks, in
einer preiswerten
Reka-Ferienwohnung.

Ihr fairer Partner
für Ferien!

reka:
3001 Bern

• Messen • Registrieren • Regeln •



ABB METRAWATT AG

Felsenrainstrasse 1 · 8052 Zürich · Telefon 01-302 35 35 · Telex 823 647 · Telefax 01-302 17 49
52, route du Platy · 1752 Villars-sur-Glâne · Téléphone 037-24 77 57 · Téléfax 037-24 12 85

Ein neues Licht auf dunklen Strassen



Die neue Bistrahleuchte von STR mit nur einer Lichtquelle und dem Gegenstrahleffekt für Strassen- und Tunnelbeleuchtungen.

Auf der Suche nach neuen Lösungen hat STR eine Leuchte entwickelt, die nicht nur einen technischen Fortschritt darstellt, sondern auch einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit leistet. So vermitteln die in der Bistrahleuchte quer zur Fahrriichtung angebrachten

Glaslamellen dem Fahrzeuglenker eine optische Führung über den Fahrbahnverlauf. Gleichzeitig erzeugt die Gegenstrahlbeleuchtung einen erhöhten Kontrast, wodurch die Hindernisse oder Fahrzeuge besser sichtbar werden.

Die neu konzipierten Leuchten, die in einreihiger Anordnung angebracht werden, bestehen aus einem rostfreien Stahlgehäuse mit abnehmbarem Deckel und zwei Reflektoren, wovon jeweils einer im Gegenstrahlprinzip auf eine Fahrbahn wirkt.

Sämtliche Berechnungen in bezug auf die Wahl der optimalen Reflektoren, der lichttechnischen Werte und der Leuchtenanordnung werden mit Hilfe firmeneigener Software durchgeführt.

Standard Telephon und Radio AG
Produktbereich Licht und Energie
8820 Wädenswil, Im Giessen
Telefon 01/780 54 44
Telefax 01/780 99 54



Suchen Sie einen qualifizierten Fachmann?

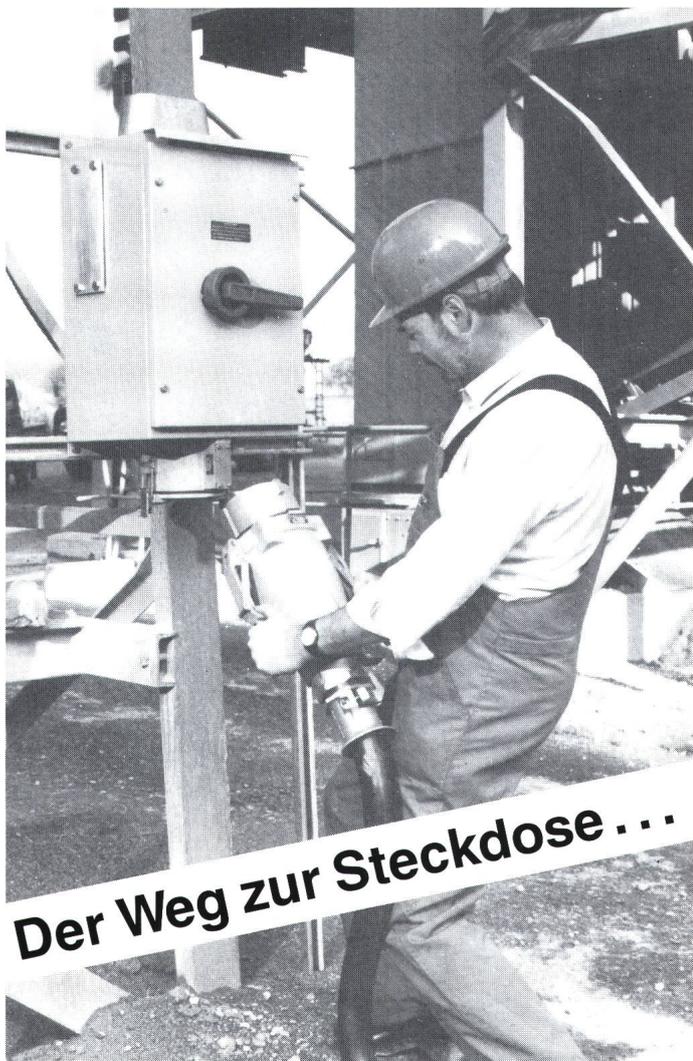


Bulletin



der richtige Platz für Ihr **Stelleninserat!**

Anzeigenverwaltung Bulletin SEV/VSE Postfach 229 8021 Zürich



Der Weg zur Steckdose . . .

... führt oft durch Dreck, Schlamm und Sand. Zum Beispiel auf der Baustelle, im Tunnel, in der Giesserei oder im Kieswerk. – Kein Problem!

Unsere neue Steckergeneration 250 A/ 400 A ist für härteste Beanspruchung geschaffen worden.

Verbraucher bis 400 A und bis 1000 V Betriebsspannung können jetzt steckbar angeschlossen werden.

Der Schalter der Wandsteckdose ist **mechanisch** mit dem Stecker **verriegelt**, so dass dieser nicht unter Last gezogen werden kann.

Ein echtes Plus für Ihre Sicherheit!

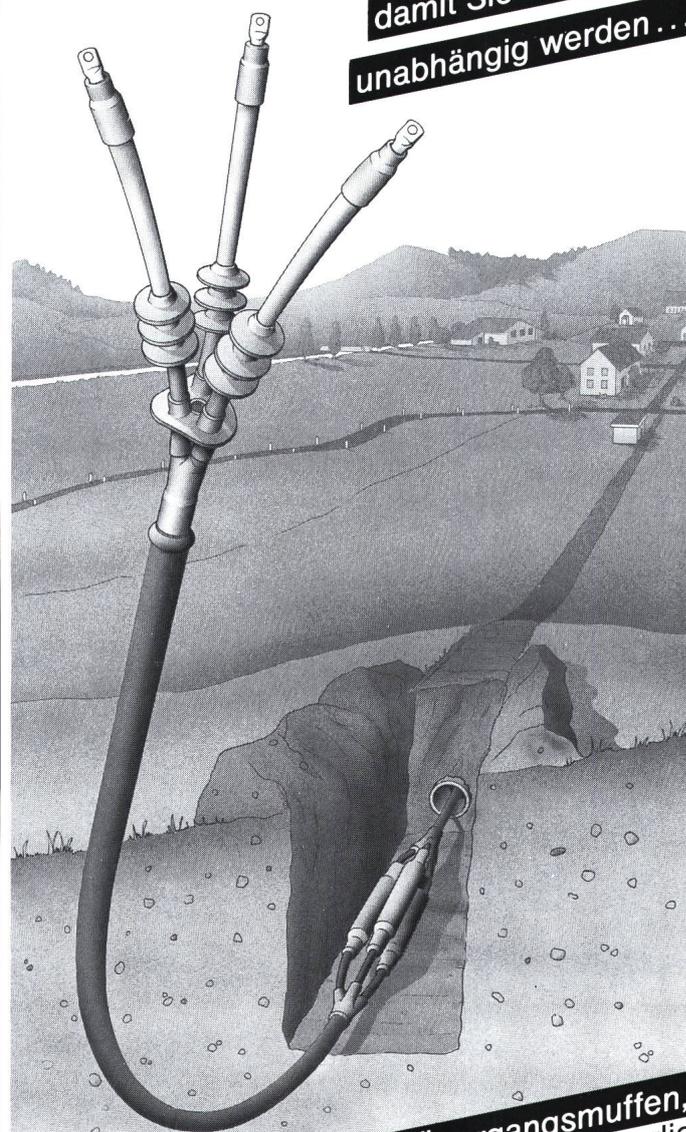
Verlangen Sie ausführliche Unterlagen!

RAUSCHER & STOECKLIN AG
CH-4450 SISSACH
TELEFON 061/98 34 66
TELEX 966 122
TELEFAX 061/98 38 58

**RAUSCHER
STOECKLIN**

Raychem

**Wir tun alles,
damit Sie im Netzbau
unabhängig werden . . .**



**... mit unseren Übergangsmuffen,
Verbindungs- und Endverschlüssen, die
einfach und schnell zu montieren sind. Wir
garantieren Sicherheit und lange Lebensdauer.**

Das bestätigen 20 Jahre Erfahrung,
Langzeituntersuchungen und das Erfüllen aller
nationalen und internationalen Vorschriften.
Wir schulen Ihre Monteure. Das macht sie
unabhängig.

Kompetente Beratung bieten wir Ihnen auch bei:
Adapter für isolierte Anschlüsse (Schaltanlagen),
Sammelschieneisolationen, Niederspannung

Raychem AG

Postfach 229, 6340 Baar
Tel. 042/31 81 31, Telex 868 704

GRAFIK