

La fusion thermonucléaire: Bon vent pour un projet multinational patronné par l'AIEA



*Les scientifiques travaillent de concert
à la réalisation technique du réacteur à fusion*

A long terme, nous avons le choix entre trois sources d'énergie: le soleil, le réacteur sur-générateur et la fusion.» C'est en ces termes que M. Heinz Riesenhuber, ministre de la recherche et de la technologie de la République fédérale d'Allemagne, s'exprimait en 1989 pour résumer la situation et stimuler la coopération mondiale dans l'étude de l'énergétique thermonucléaire.

L'état d'avancement et les chances de succès des travaux sur la fusion thermonucléaire contrôlée ont été réévalués en 1990 par le Conseil international de la recherche sur la fusion, organe consultatif de l'AIEA représentant toutes les parties du monde.

Dans le rapport de ce conseil, on peut lire ceci: «L'expérience récente montre que l'on ressent de plus en plus vivement le besoin de sources d'énergie à long terme à la fois diversifiées et généralement accessibles. Ces sources d'énergie devraient être non seulement exploitables techniquement, mais aussi acceptables sur les plans de l'économie, de la sûreté et de l'environnement. La fusion est, en puissance, une de ces sources. L'exploitation d'une source d'énergie nouvelle comme la fusion se heurte à des problèmes scientifiques et technologiques redoutables dont la solution occupera plusieurs générations humaines. Cela dit, la continuité des progrès remarquables accomplis jusqu'à ce jour vers la réalisation du réacteur à

fusion est de bon augure. Les combustibles primaires au deutérium-tritium pour le réacteur à fusion (deutérium et lithium) se trouvent en telle abondance dans la nature que l'on peut considérer cette filière de réacteur comme une source pratiquement inépuisable d'énergie pour l'ensemble du monde.»

Deux techniques entièrement différentes d'exploitation pacifique de l'énergie thermonucléaire sont à l'étude: le «confinement magnétique» et le «confinement par inertie», pour reprendre la terminologie usuelle (*voir les encadrés*).

Les possibilités d'échange international d'informations sur le confinement par inertie ont récemment éveillé l'attention, mais cette formule semble intéresser surtout les Etats-Unis. En revanche, la fusion par confinement magnétique est étudiée depuis longtemps déjà dans nombre de pays moyennant une dépense annuelle totale approchant les 2 milliards de dollars. L'essentiel de l'effort porte sur quatre grands programmes mis en œuvre par la Communauté européenne, les Etats-Unis, le Japon et l'Union soviétique. Plusieurs autres pays financent d'intéressants programmes de recherche, de moindre envergure toutefois.

Depuis plus de 30 ans, la recherche sur la fusion par confinement magnétique bénéficie d'une collaboration internationale extrêmement active. Dès sa création, l'AIEA s'est employée à promouvoir à l'échelle mondiale un échange d'informations scientifiques sur la fusion. Depuis 1987, elle s'occupe des problèmes plus concrets de la coopération multinationale à grande échelle dans le cadre du projet de réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER).

par
David Banner
et
Paul Haubenreich

M. Banner est chef de la Section de physique de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA; M. Haubenreich est l'ancien secrétaire du Conseil de l'ITER.

Projet ITER

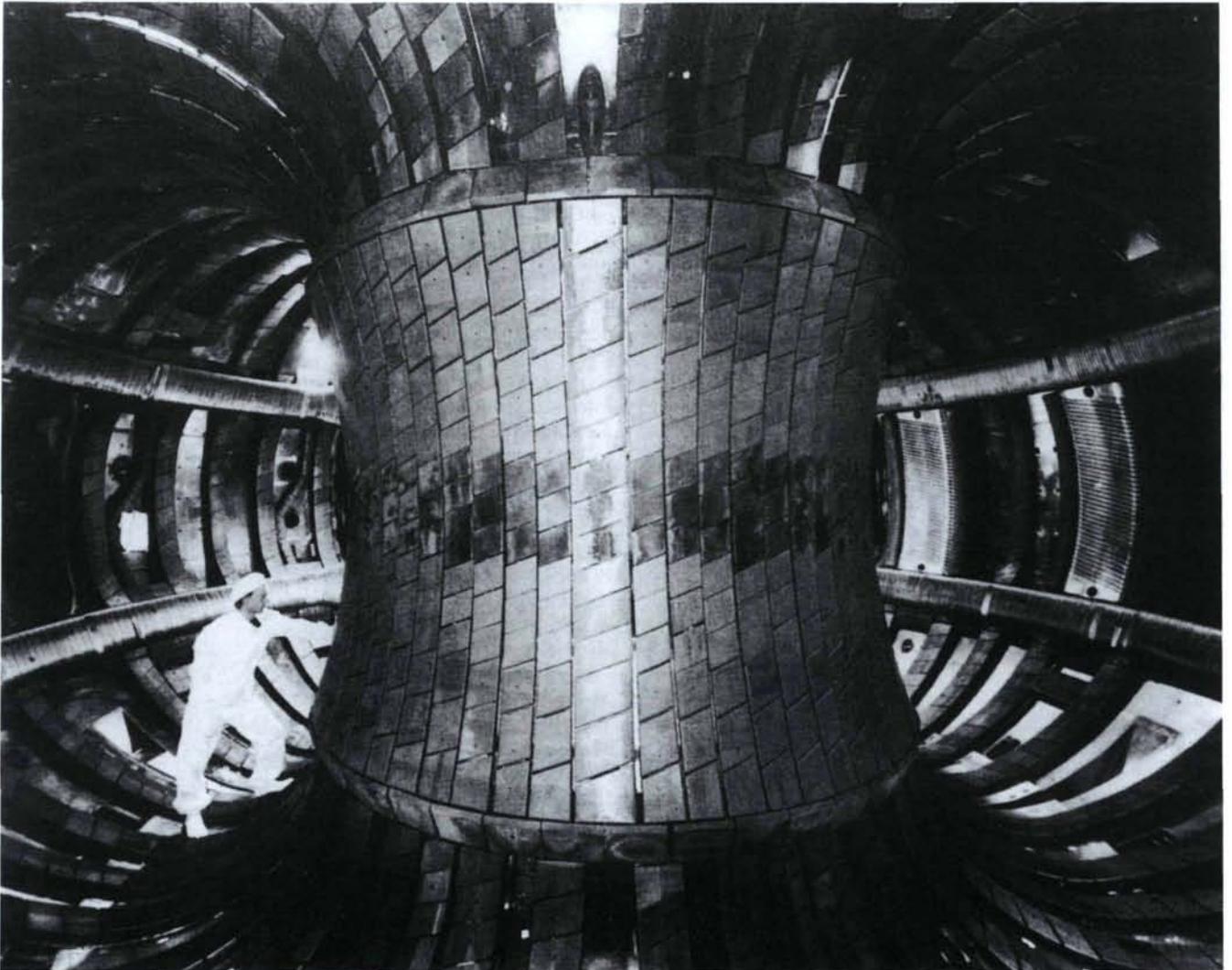
Vue en perspective du tokamak européen JET (Joint European Torus), à confinement magnétique, la plus grande installation expérimentale du monde. Lors des expériences, un plasma d'hydrogène est créé et magnétiquement confiné dans la chambre, dans les conditions nécessaires pour réaliser la fusion thermonucléaire, en particulier des températures approchant 100 millions de degrés centigrades.

Vers 1986, les quatre grands programmes sur la fusion en étaient tous au point où il fallait logiquement passer à la réalisation d'une machine présentant les caractéristiques techniques d'un réacteur à fusion d'une dimension et d'une puissance suffisantes pour obtenir l'ignition et la fusion contrôlée du combustible. Toutes les parties intéressées savaient parfaitement que cette nouvelle étape exigerait des ressources considérables, tant en personnel technique qu'en moyens financiers pour la construction et l'exploitation du réacteur. Le désir impétueux d'aller de l'avant et l'ampleur de l'entreprise ont amené les chefs de gouvernement qui contribuaient à la recherche sur la fusion à demander que l'on intensifie la coopération dans ce domaine.

Le Directeur général de l'AIEA a répondu à cet appel en invitant des représentants des quatre programmes principaux sur la fusion à une série de réunions organisées à Vienne en

1987, au cours desquelles ils ont élaboré le plan détaillé d'une étude de conception d'un réacteur thermonucléaire expérimental international. Il s'agissait bien là de la première mesure concrète prise en vue de la réalisation d'une machine répondant aux besoins de ces quatre programmes. Le choix unanime s'est porté sur l'option technique dite «tokamak», fondée sur le principe du confinement magnétique du plasma, dont la première étude a été faite en Union soviétique, puis a été reprise par de nombreux pays qui l'ont développée et perfectionnée. Le Directeur général a ensuite invité les parties intéressées à participer à l'étude de conception envisagée, sous le patronage de l'AIEA et conformément au mandat qui avait été arrêté. Les quatre parties ont accepté l'invitation et se sont engagées à prendre les dispositions nécessaires pour élaborer les plans de cette machine, établir un devis et déterminer les conditions de son implantation, pour la fin de 1990.

Les équipes se sont mises au travail en avril 1988 et les plans étaient achevés en décembre



1990. L'étude a été faite en partie dans chacun des pays intéressés et en partie dans un établissement mis à leur disposition par la Communauté européenne à Garching, près de Munich. Pendant les périodes de travail en commun, qui occupaient environ six mois de l'année, une bonne cinquantaine de scientifiques et ingénieurs résidaient sur le site de Garching, tandis que les autres, plus nombreux, poursuivaient leurs travaux dans les différents pays. L'organisation rationnelle de l'opération a favorisé leur étroite collaboration. La direction générale du projet était assurée par le Conseil de l'ITER où chaque partie était représentée par deux membres.

Bien que les quatre programmes aient eu des objectifs analogues quant au réacteur expérimental et fussent d'accord au début sur les spécifications techniques générales, les quatre projets présentés n'étaient pas identiques; aussi le travail en commun a-t-il eu le grand mérite de concilier les points de vue et d'uniformiser les plans. A la fin de 1988, les participants au projet s'étaient mis d'accord sur les paramètres

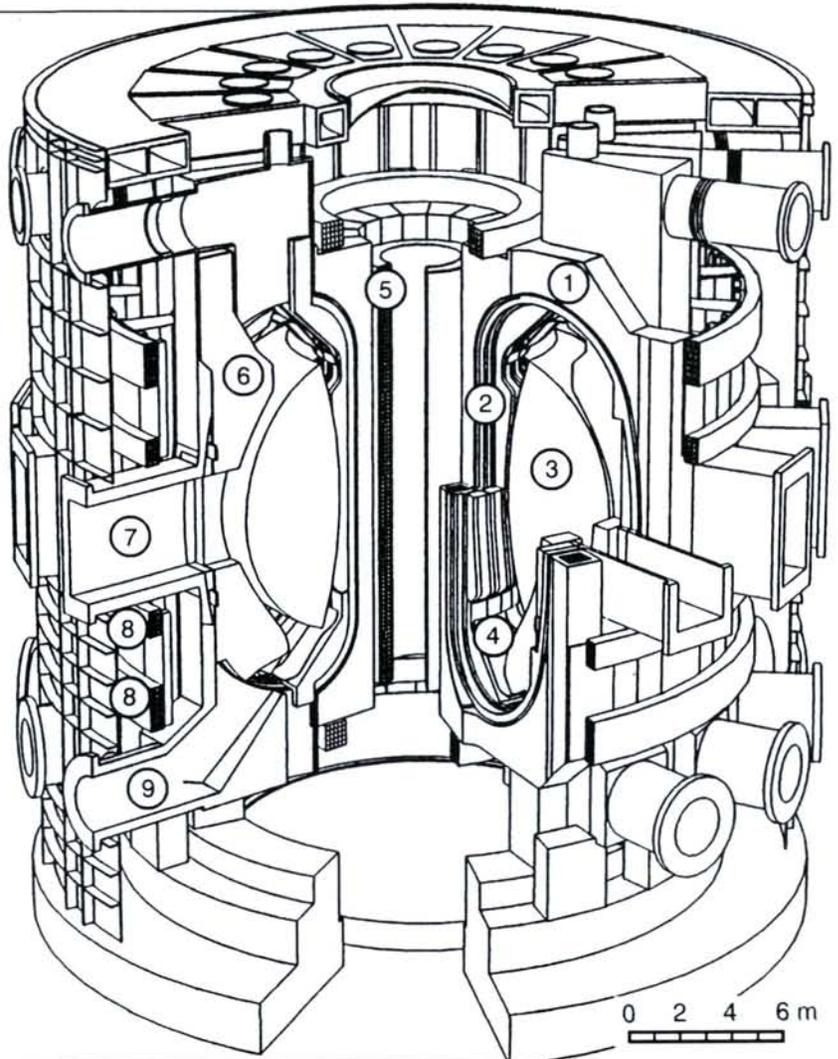
à retenir pour la machine et sur les concepts relatifs aux bobinages, aux matériaux et à la maintenance.

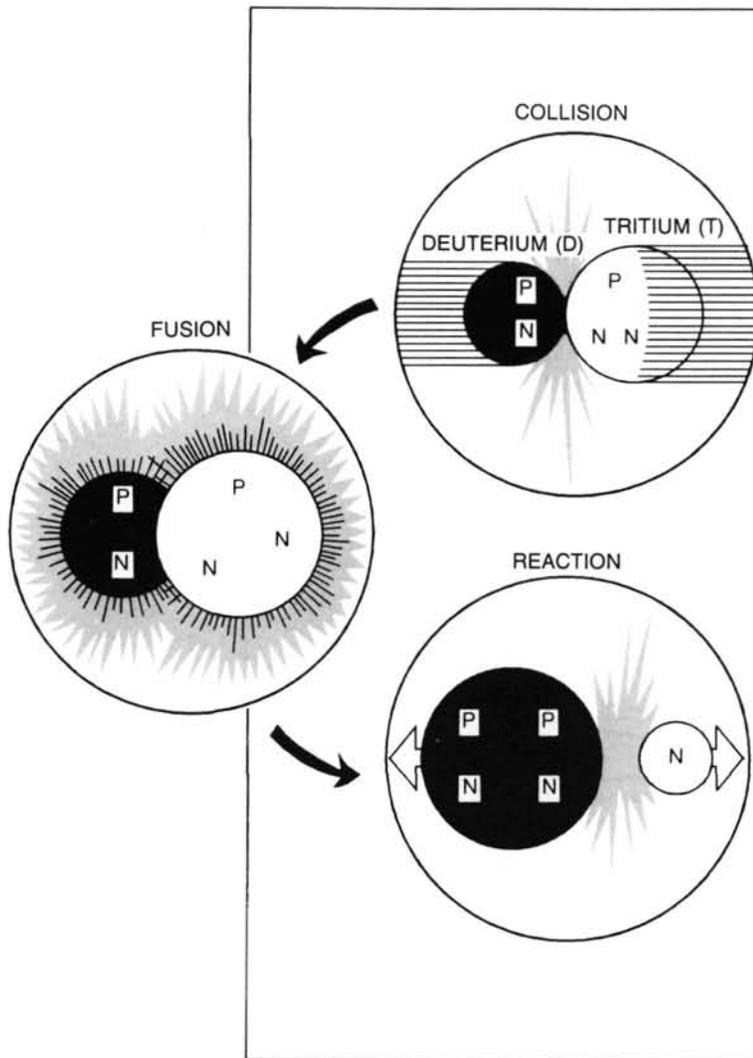
A l'appui de l'étude, les pays participants ont déployé une grande activité de recherche-développement, notamment dans le domaine de la technologie auquel chacun d'entre eux a consacré quelque 10 millions de dollars par an, sans parler des travaux en cours sur la physique du confinement dont maints aspects concernaient tout spécialement l'ITER. Les résultats du projet ont été analysés et adoptés comme base de conception fiable.

A la fin de 1990, l'équipe quadripartite a présenté les plans théoriques d'une centrale complète et donné des indications précises sur la façon dont le réacteur pourrait être construit et exploité, avec un exposé des conditions que devrait remplir le site, ainsi qu'un plan de réalisation. Celui-ci comporte à son tour un exposé des travaux communs de recherche-développement dans le domaine de la physique et de la technologie qu'il faudrait entreprendre pour établir les plans détaillés. Les participants

Schéma du tokamak ITER:

- 1) bobine de champ toroïdal;
- 2) chambre à vide;
- 3) plasma;
- 4) déflecteur;
- 5) solénoïde axial;
- 6) chemise et blindage;
- 7) accès horizontal;
- 8) bobines de champ poloïdal;
- 9) vers la pompe à vide.





La fusion thermonucléaire

La fusion thermonucléaire et ses effets se manifestent partout dans l'univers. C'est elle qui donne la vie aux étoiles. Elle est la source de l'énergie solaire qui chauffe notre planète. Elle résulte de la collision à très grande vitesse des noyaux de certains atomes légers. Deux de ces atomes fusionnent en un seul en libérant une quantité considérable d'énergie. La fusion du deutérium (D) et du tritium (T), tous deux isotopes de l'hydrogène, est la plus facile à réaliser et ce sera très probablement celle que l'on utilisera tout au moins dans les réacteurs à fusion de la première génération. La collision des noyaux de deutérium et de tritium doit se produire à des niveaux d'énergie cinétique correspondant à l'agitation thermique provoquée par des températures de l'ordre de 100 millions de degrés. Les nouveaux noyaux qui en résultent émettent immédiatement un neutron, ce qui laisse un noyau d'hélium stable identique à ceux qui existent dans la nature. L'énergie libérée par la réaction se présente d'abord sous forme d'énergie cinétique du neutron et du noyau d'hélium (qui constitue la particule alpha), qui se séparent à très grande vitesse.

La fusion d'un gramme de mélange deutérium-tritium libère autant d'énergie que la combustion de 10 000 litres d'essence, mais sans produire de gaz délétères.

ont également proposé un calendrier et un devis préliminaire concernant la construction et l'exploitation de l'installation.

Aux termes de l'étude de conception, les résultats ont fait l'objet d'un examen approfondi à la fois par l'équipe mixte commune et par les équipes de chaque pays. La conclusion était unanime: l'étude de conception proposait une bonne base technique pour passer logiquement à la phase suivante du projet ITER.

Dans le même temps, un devis préliminaire a également été établi, selon lequel la construction du réacteur exigerait sept ans de travaux et un investissement d'environ 4,9 milliards de dollars, à partager entre les participants. Avant la mise en chantier, il faudrait six ans pour mener à bien l'étude d'ingénierie qui consisterait notamment à fixer les spécifications techniques, à mettre au point les plans des composants et à étudier les sites possibles.

Les équipes prévues pour cette étude d'ingénierie ont établi un plan de travail rationnel prévoyant une répartition équitable des tâches. Elles ont estimé qu'il faudrait consacrer envi-

ron 250 millions de dollars à l'établissement des plans et 750 millions aux travaux de recherche et développement en matière de technologie et d'ingénierie. Environ la moitié du travail sur les plans sera assurée dans un établissement central par une équipe mixte travaillant toute l'année, composée de 180 scientifiques et ingénieurs des pays participants, avec une aide locale. Certains travaux de conception seront confiés à des laboratoires et à des établissements industriels de ces mêmes pays. Les programmes de recherche dans le domaine de la physique menés par les participants à ITER et par d'autres groupes continueront de communiquer leurs résultats afin de confirmer le bien-fondé de la conception d'ITER et de planifier l'expérimentation.

Tous les travaux de recherche-développement en technologie concernant spécifiquement le projet seront confiés à des établissements des pays participants. La gestion du projet sera assurée par un directeur et son secrétariat, rémunérés par un fonds commun. Le projet étant considéré par les participants comme une

Amorçage et confinement de la fusion

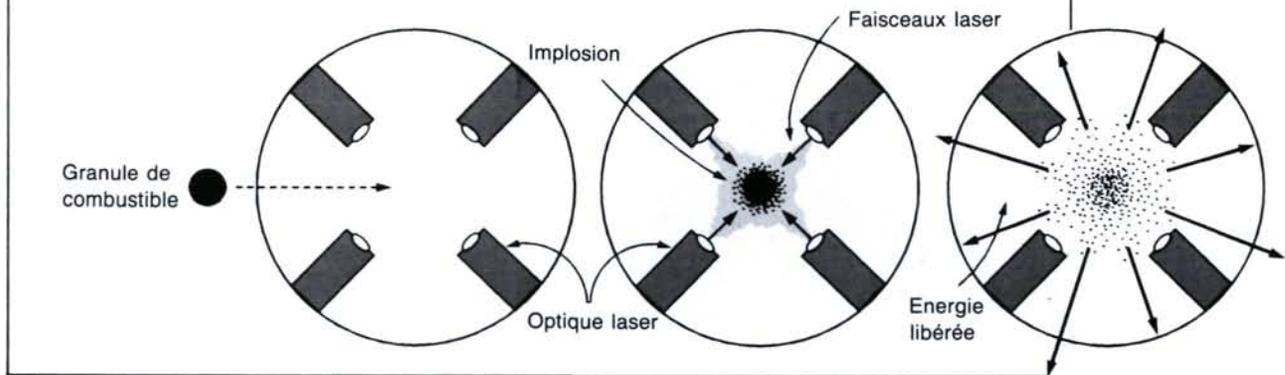
Dans le cas du confinement magnétique, le combustible est introduit sous la forme d'un gaz froid raréfié qui est ensuite chauffé jusqu'à ce qu'il se transforme en plasma. Ce «quatrième état de la matière» est atteint lorsque l'agitation des particules atomiques devient si intense que le noyau et les électrons se séparent.

Comme toutes les particules d'un plasma sont chargées électriquement, elles sont sensibles à un champ magnétique. Pour assurer le confinement de ce plasma, il faut créer des champs magnétiques dont la configuration oblige les particules chargées à suivre des trajectoires courbes qui n'intersectent pas les parois de la chambre contenant le plasma. Le chauffage doit continuer jusqu'à ce que l'agitation thermique des particules atteigne le niveau d'énergie cinétique nécessaire pour que les collisions produisent la fusion.

L'étude extrêmement poussée du phénomène a permis de définir les méthodes de chauffage et de confinement permettant de

réaliser effectivement la fusion. Il faut, pour cela, une chambre à plasma de grande dimension et des champs magnétiques intenses.

Le principe fondamental de la fusion par inertie consiste en un chauffage extrêmement rapide du combustible pour provoquer un grand nombre de réactions de fusion productrices d'énergie avant que les forces qui s'exercent sur les particules atomiques et subatomiques ne provoquent la dispersion de la masse en réaction. Le système actuellement envisagé pour une application pratique consiste à introduire un granule d'hydrogène congelé dans la chambre à fusion où il est immédiatement soumis aux impulsions de plusieurs faisceaux lasers convergents (voir la figure). L'échauffement instantané de la surface du granule provoque une onde de choc implosive qui chauffe et comprime l'intérieur du granule jusqu'à réaliser les conditions de la fusion thermonucléaire. L'énergie est produite pendant l'infime fraction de seconde qui précède l'explosion du granule. Pour la production industrielle d'énergie, il faudrait provoquer la répétition continue de la réaction en succession rapide.



démonstration non seulement de la faisabilité technique du réacteur à fusion, mais aussi de sa sûreté et de son innocuité pour l'environnement, les considérations de sûreté et d'écologie demeureront les lignes directrices des travaux d'ingénierie.

Les résultats de l'étude de conception n'ont pas eu pour seul effet de donner confiance aux techniciens; ils ont aussi convaincu les gouvernements qu'il était souhaitable de continuer à travailler sur le projet ITER étant donné les énormes avantages en retour que procurerait l'énergie de fusion. Malgré la complexité de la collaboration internationale, les parties ont bien vu que le grand intérêt de l'effort commun serait le partage de ressources scientifiques et technologiques assez rares, et aussi des dépenses dans le domaine prioritaire qu'est le développement de l'énergie.

A la suite des discussions préliminaires qui ont eu lieu entre les participants à ITER et qui révélèrent une parfaite identité de vues sur les modalités éventuelles de la coopération dans les études d'ingénierie, les gouvernements de

chaque partie ont donné l'autorisation d'engager des négociations officielles. Le Directeur général de l'AIEA les a invités à se réunir à Vienne à cette fin et leur a donné l'assurance que l'Agence était disposée à offrir ses services en vue de la création et du maintien de l'équipe principale prévue pour ces études. La première réunion a eu lieu au Centre international de Vienne, les 11 et 12 février 1991.

Le Secrétaire d'Etat à l'énergie des Etats-Unis a exprimé en ces termes un avis partagé par tous au sujet de la négociation d'un accord concernant les études d'ingénierie: «En tant que partenaires dans la recherche internationale, il nous appartient de continuer de collaborer à notre étude commune du réacteur qui pourrait faire la preuve qu'il est possible de réaliser la fusion et d'en exploiter l'énergie. La science et le contribuable ont déjà profité de cette recherche en commun menée littéralement jour et nuit et dans le monde entier.»

Trois des pays participants ont offert l'hospitalité à l'équipe: la Communauté européenne a proposé Garching où a eu lieu l'étude de

conception, le Japon a proposé le centre de recherche de Naka et les Etats-Unis l'Université et le Centre d'études sur la fusion de San Diego. Les locaux disponibles pourraient recevoir jusqu'à 180 scientifiques et ingénieurs et un effectif d'appoint de 120 personnes et seraient équipés du matériel d'informatique nécessaire aux travaux. Les systèmes de communication permettraient à l'équipe principale et aux équipes d'ITER de chaque pays de collaborer sans entrave.

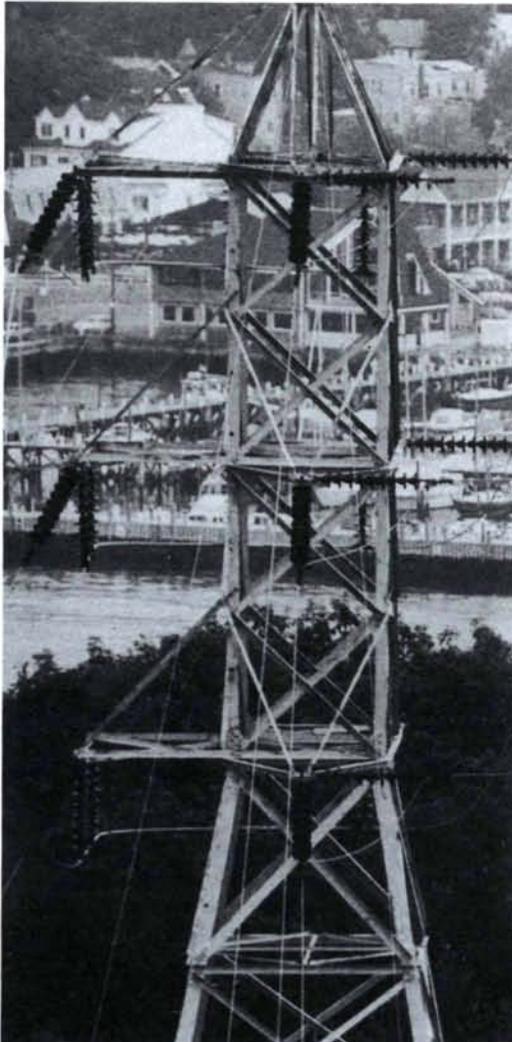
Le choix de l'établissement et du personnel d'encadrement interviendra au cours des négociations. Jugeant d'après ce qui est déjà fait, les parties s'attendent que l'accord pourra être conclu vers le début de l'été 1991, sauf difficultés inattendues.

Energie de fusion

Les combustibles nécessaires à la production d'énergie par fusion thermonucléaire existent

un peu partout en quantité pratiquement illimitée. Les conditions physiques de l'obtention et du contrôle de la fusion thermonucléaire ont été définies par des laboratoires répartis dans le monde entier, au cours de décennies de recherche. Le processus de la fusion est le même que celui qui produit la chaleur irradiée par le soleil et les étoiles. En somme, on pourrait dire que les travaux sur la fusion ont en fin de compte pour objet de créer et d'entretenir un «soleil en miniature» dont on maîtriserait l'énergie pour produire de l'électricité.

Par ailleurs, les effets de la production industrielle d'énergie d'origine thermonucléaire en ce qui concerne l'environnement et la sûreté seraient, semble-t-il, tout à fait acceptables pour la société. S'il s'avère que la construction, l'exploitation et la maintenance des installations nécessaires sont réalisables, ce que les participants au projet jugent probable, la fusion pourrait jouer un grand rôle dans l'approvisionnement mondial en énergie au début du siècle prochain.



L'énergie de fusion, la sûreté et l'environnement

Un réacteur à fusion est un peu comme un réchaud à gaz: il suffit de couper le gaz pour que la flamme s'éteigne immédiatement. En d'autres termes, il n'y a pas de risque d'emballement incontrôlable de la réaction susceptible de provoquer une catastrophe.

Les particules primaires provenant des réactions de fusion ne sont pas radioactives. Les neutrons de fusion sont inévitablement absorbés par les structures ou autres matières environnantes et engendrent des nucléides radioactifs, mais ces derniers sont fixés et de courte période, ce qui facilite leur confinement et leur élimination. La chaleur résiduelle due à la radioactivité qui persiste après l'arrêt de la réaction est relativement faible et peut être aisément dissipée par des systèmes simples et fiables.

Un des éléments dont se compose le combustible de fusion, le tritium, est radioactif, de sorte que l'installation doit être conçue et exploitée de façon à en assurer le confinement. Des mesures bien étudiées ont été mises à l'épreuve et se sont avérées tout à fait efficaces et d'une application commode.

L'évaluation de la conception d'ITER montre que ce réacteur répondrait à toutes les conditions exigées par la réglementation en vigueur en matière de sûreté et d'environnement.