

Vers une source d'énergie inépuisable

Paul-Henri REBUT - Didier GAMBIER

LA DUALITE MATIERE ENERGIE : $E = M_0 C^2$

L'histoire de la fusion thermonucléaire ne se confond pas exactement avec l'histoire de l'univers. En effet si celui-ci débute avec le Big Bang, il faut attendre quelques secondes avant de voir les premières réactions de fusion s'installer et la matière prendre progressivement le pas sur l'énergie.

Les trois premières minutes de l'histoire de l'univers.

Le déroulement exact des événements qui dirigent la naissance de l'univers est encore une inconnue pour les physiciens. Néanmoins, une observation expérimentale permet de comprendre en partie l'évolution de l'univers jusqu'à nos jours. La naissance de l'univers fut en effet marquée par une gigantesque explosion de lumière : le Big

Bang. Cette explosion est encore «visible» sous la forme d'une signature radio correspondant à un rayonnement de corps noir à 3°K (le rayonnement de corps noir correspond au spectre émis par un milieu en équilibre radiatif comme un four de chaudronnerie par exemple).

A partir de cette observation on peut remonter progressivement le cours du temps et modéliser les premiers instants suivant le modèle standard de l'univers en expansion. Au moment du Big Bang, il y a 13 milliards d'années, la «température ambiante» est si élevée qu'il ne peut y avoir création de matière sans qu'il y ait aussitôt annihilation ; l'univers n'est alors qu'un bain d'énergie. Il faut attendre 10^{-10} s pour voir apparaître les particules les plus lourdes que l'on puisse observer dans les grands accélérateurs ; les quarks. La température est alors 100 GeV -soit de l'ordre de 10^{15} °K- et l'on est loin des conditions propices à la création des particules telles que le proton ou le neutron dont les énergies de masse atteignent 1GeV ($E = m_0c^2$).

A mesure que le temps passe, l'univers continue son expansion et la température diminue. Une seconde après le Big Bang, l'ère de la fusion thermonucléaire commence : la température n'est plus que de 1 MeV et les noyaux formés par capture des neutrons deviennent stables. La nucléosynthèse a commencé, le neutron et le proton peuvent réagir pour former du deutérium suivant la réaction : $(p,n) \longrightarrow (d,\gamma)$ avec émission d'un photon γ . Avec l'apparition des **deutons** *, l'univers entre pour longtemps dans une phase où l'énergie est concentrée sous forme de matière.

Il faudra encore attendre quelques 100 secondes pour que l'univers soit un réacteur thermonucléaire, période qui ne s'étendra pas au-delà de deux minutes.

Par la suite les plasmas thermonucléaires ne pourront être créés qu'en certaines régions de l'univers -les galaxies- et en certains points : les étoiles.

Les étoiles : un chaudron thermonucléaire.

La formation d'une étoile commence dans la galaxie par la compression lente du gaz interstellaire sous l'effet des forces de gravitation. Ce gaz, composé

* le deuton est le noyau (hydrogène lourd) composé d'un proton et d'un neutron. Le noyau du tritium (instable) sera le triton composé d'un proton et de deux neutrons.

principalement d'hydrogène, s'échauffe en se contractant jusqu'à atteindre une énergie moyenne de l'ordre de 1 eV où il s'ionise. Le gaz devient alors un plasma de protons et d'électrons.

Lorsque la température atteint 1 keV, la densité au centre du plasma atteint 10^{29} m⁻³. Les réactions de fusion sont alors suffisantes pour que la compression gravitationnelle soit compensée par la pression de radiation des photons issus des réactions de fusion. La compression s'arrête et une étoile est née.

Le réacteur qui permet à l'étoile de vivre est alors allumé pour plusieurs milliards d'années.

Le soleil et la fusion.

Le soleil est une étoile relativement jeune - 4,5 milliards d'années - qui contient beaucoup d'hydrogène -80%- qu'elle continue de brûler en son centre. La nucléosynthèse y est limitée à la formation des noyaux légers. D'une manière générale, il y a incompatibilité entre plasmas de fusion et matériaux lourds. De plus, à ces températures il n'existe aucun solide. Le soleil est en équilibre sous l'effet des forces de compression gravitationnelles et de la pression de radiation des photons émis lors des réactions de fusion.

Ces photons ne s'échappent pas directement du coeur du soleil, ils sont successivement absorbés et réémis par le milieu qu'ils traversent, de façon qu'un équilibre thermodynamique s'établisse à l'intérieur de la zone radiative. Le rayonnement solaire a ainsi les propriétés d'un corps noir dont la température en surface est de 6000°K. L'énergie dissipée par le soleil est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température en surface. C'est cette énergie qui est la source de vie des espèces sur la terre.

Réactions de fusion

Les étoiles jeunes synthétisent les éléments légers pour lesquels l'énergie de liaison par nucléon est la plus faible. Il en résulte que l'énergie libérée dans les

réactions de fusion des éléments légers est proportionnellement plus élevée que celle libérée dans la fission des éléments lourds. La synthèse d'éléments lourds, par capture de neutrons, a généralement lieu dans les étoiles géantes, massives, où la température est très élevée.

Le soleil, quant à lui, est le siège de phénomènes intéressants pour la fusion : les éruptions solaires dont le mécanisme n'est pas encore complètement élucidé. On peut observer pendant les éclipses des gerbes de plasma à sa surface dont la forme aléatoire est celle d'une boucle. Il s'agit là d'un bel exemple de fusion par confinement magnétique dont il sera question plus loin.

LE FEU DEROBE

Réactions de fusion accessibles de 10 à 100keV.

Les réactions de fusion accessibles sur terre et intéressantes pour la fusion sont principalement celles qui ont lieu entre les noyaux de deutérium ou entre les noyaux de tritium et de deutérium.

Le deutérium est à l'origine des réactions de fusion qui peuvent être envisagées sur terre. Il existe en grande quantité dans l'eau avec une abondance de 100-160 ppm par rapport à l'hydrogène tandis que le tritium n'est pas stable à l'état naturel (la période de demi-vie du tritium étant de 13,6 ans). Il faut donc synthétiser le tritium. Cela est possible dans la réaction de capture neutronique par un noyau de lithium. Les réserves de lithium, estimées à 10 Mt, équivalent à une réserve potentielle de quelques millions de tonnes de tritium, ce qui est considérable.

Le critère de Lawson

Au sein du plasma thermonucléaire de deutérium (d) et de tritium (t), la puissance de fusion est fournie par la réaction $(d,t) \rightarrow (\alpha,n)$ *. Elle est proportionnelle au nombre de réactions ayant lieu par unité de volume.

* α, n : α : particules α (noyaux d'hélium) n : neutrons (voir paragraphe suivant)

L'énergie fournie, lors de la réaction D-T, se scinde en deux parties. Une partie est emportée par les **particules alpha**. Elle sert à chauffer le plasma si les particules α sont confinées pendant des temps suffisamment longs pour qu'elles puissent transférer leur énergie au plasma. L'autre partie de l'énergie, emportée par les neutrons, sert au chauffage de la couverture entourant le plasma.

Un plasma thermonucléaire n'est pas dans un état d'équilibre thermodynamique. Il faut, pour le maintenir, qu'il y ait un équilibre entre la puissance de chauffage, fournie par la thermalisation des particules α , et la puissance perdue vers l'extérieur.

On définit alors l'**ignition** comme le domaine des paramètres où la réaction est auto-entretenu. Le critère qui caractérise cette situation est appelé critère de Lawson.

Si le critère de Lawson définit les conditions nécessaires au fonctionnement d'un réacteur, une étape symbolique dans la quête de la fusion est celle où la puissance fournie par les réactions de fusion (neutrons et particules α) égale la puissance de chauffage. C'est la définition de la **faisabilité scientifique de la fusion**.

La fusion non contrôlée : la bombe H

Les domaines d'application de la fusion thermonucléaire sont divers. Le premier est lié au développement de l'arme la plus redoutable de l'arsenal des grandes puissances : la bombe à fusion du noyau d'hydrogène plus connue sous le nom de «Bombe H».

Une bombe H est constituée d'un mélange de deutérium et de tritium. Pour que ce mélange puisse exploser, il faut qu'il soit comprimé puis chauffé. Le mélange est placé au centre d'une sphère dont l'enveloppe est constituée par une bombe à fission qui, dans son explosion, va produire les conditions nécessaires à l'allumage de la bombe H. Les réactions de fusion vont alors porter et maintenir le mélange à très haute température pendant toute la durée de l'explosion : le confinement est inertiel. Une bombe H est donc à l'ignition et le temps τ du critère de Lawson est limité par la durée de l'explosion. Une bombe H de 10 «Méga-tonnes d'équivalent TNT» correspond à la consommation électrique de la France pendant 10 jours.

Les applications militaires de la fusion thermonucléaire démontrent qu'il est possible, sur terre, d'utiliser l'énergie de fusion. Dans une bombe H, l'énergie libérée dans l'explosion est si forte qu'elle est destructive. Dans l'utilisation pacifique de l'énergie de fusion, l'énergie produite doit être proportionnellement beaucoup plus faible pour pouvoir être absorbée de manière non destructive par le milieu environnant.

La fusion contrôlée : les 2 voies d'un réacteur de fusion.

Si dans les applications militaires de la fusion, les énergies libérées sont supérieures à mille Giga-Joules ($\sim 10-100 \times 10^{15} \text{J}$), pour les applications dans un réacteur de fusion contrôlée elles sont de l'ordre de quelques Giga-Joules ($\sim 10 \times 10^9 \text{J}$) soit 1 million de fois moins.

A l'exception des questions d'efficacité, l'énergie de fusion est produite, dans le cas de la fusion inertielle, pendant le temps d'explosion d'une cible ou pendant un temps de confinement dans le cas de la fusion magnétique.

La fusion par confinement inertiel ressemble dans son principe à la bombe H. Le mélange D-T est maintenu dans une capsule dont l'enveloppe sert de pousseur. Un faisceau laser irradie la cible de façon uniforme et la comprime. A la fin de la compression les réactions de fusion fournissent l'énergie nécessaire au chauffage du milieu fusible et permettent de maintenir, pendant le temps de l'explosion, les conditions de fonctionnement du réacteur.

Les difficultés rencontrées par la méthode sont techniques et scientifiques. Les difficultés techniques sont importantes car il faut : préserver la structure sphérique de l'implosion par un éclairage uniforme (de l'ordre du pour-cent) ; éviter le préchauffage du milieu fusible qui s'oppose à la compression ; disposer de lasers qui puissent délivrer des énergies de plusieurs centaines de kilo-Joules. Mais les difficultés scientifiques sont encore plus contraignantes. En effet, la densité du plasma en fin de compression doit au moins atteindre 500 à 1000 fois la densité du solide -de $0,2 \text{ g/cm}^3$ - pour limiter au maximum le rayon de la micro-capsule et donc l'énergie libérée lors de l'explosion, proportionnelle au cube du rayon. Pour un rayon

d'environ 0,1cm, l'énergie libérée lors de l'explosion correspondrait déjà à une bombe puissante d'une tonne d'équivalent TNT.

La fusion par confinement magnétique ne présente pas les mêmes difficultés. Le champ magnétique, qui sert au confinement du plasma, est produit par des bobines entourant un anneau (**figure 1**) torique creux à l'intérieur duquel circulent les particules du plasma. A l'inverse de la fusion par confinement inertiel, les dimensions de l'anneau de plasma sont grandes, de l'ordre du mètre.

Néanmoins des difficultés existent qui justifient les efforts de recherche dans la filière par confinement magnétique. Ces recherches sont surtout concentrées dans les **tokamaks** : appareils qui ont permis de grands progrès, comme en témoignent les résultats obtenus dans le **tokamak JET**.

LE JET

Dans le cadre des programmes de recherche sur la fusion contrôlée, le tokamak JET - l'acronyme anglais pour Joint European Torus- est l'appareil de pointe de l'Europe communautaire, auquel sont associées la Suède et la Suisse. C'est par un acte du Conseil des Ministres que la décision de sa construction fut prise le 1er juin 1978, et c'est en 1983 que le JET a produit son premier plasma. La Grande Bretagne est le pays hôte de «l'entreprise commune JET» et c'est à Culham, près d'Oxford, qu'est installé ce Tokamak.

Les objectifs fixés par les partenaires européens étaient très ambitieux puisque les performances du plasma du JET devaient s'approcher de celles d'un plasma de fusion. Le projet JET a pour objectifs de définir à la fois les paramètres physiques et les dimensions géométriques du réacteur de fusion, ainsi que ses conditions de fonctionnement pour la filière «Tokamak».

Les résultats scientifiques obtenus dans le JET

Les progrès accomplis durant les deux dernières décennies sont remarquables

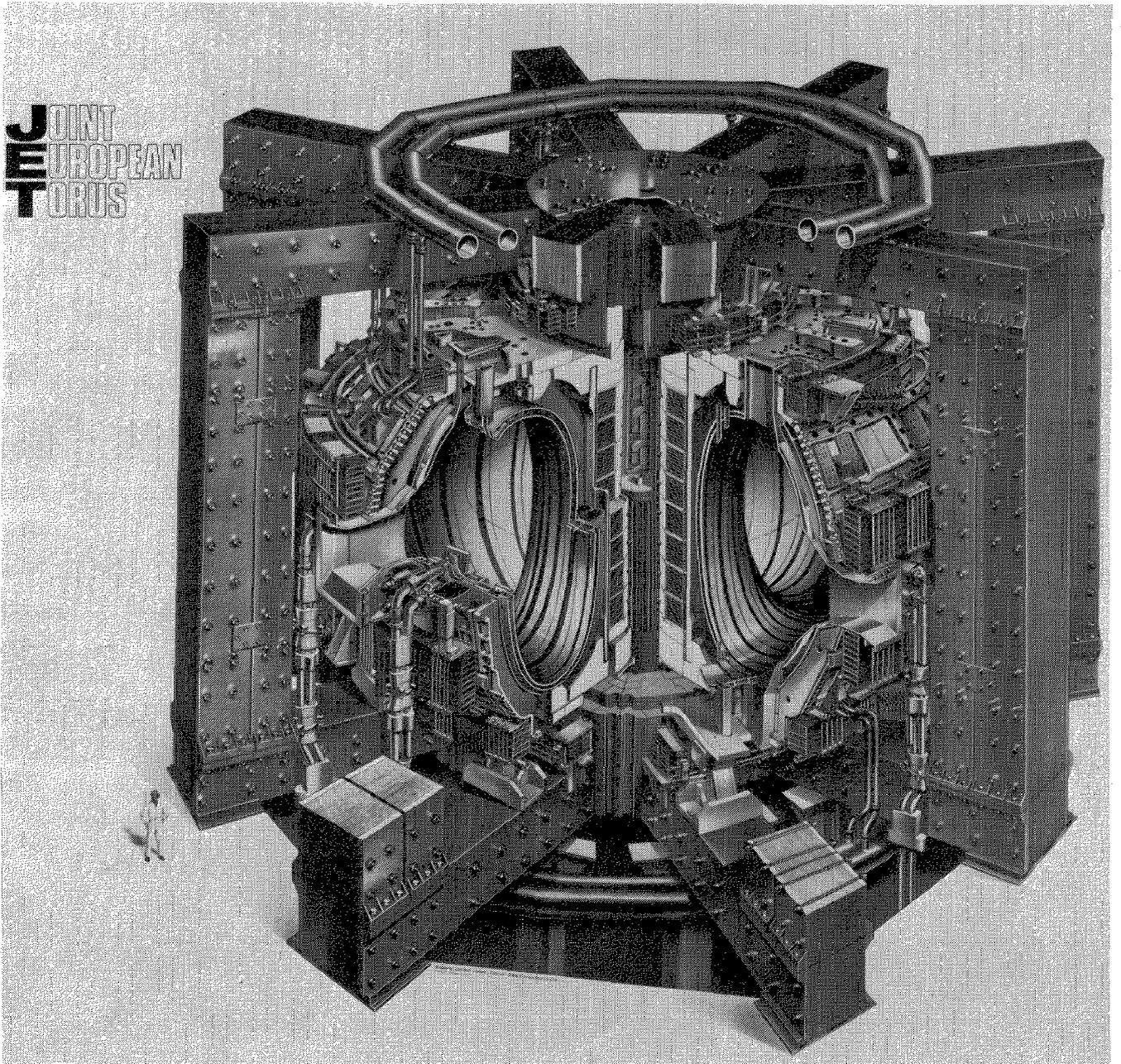


Figure 1
Vue éclatée du Tokamak JET

Le primaire du transformateur est représenté par les bobines entourant l'axe vertical central, relié aux bras du circuit magnétique. Les bobines du champ magnétique toroïdal entourent la chambre à vide. Au nombre de 36 elles sont visibles en coupe derrière la face interne de la chambre. De grandes bobines horizontales sont visibles à l'extérieur de la chambre. Elles servent à positionner le plasma.

puisque, dans cette période, le "produit de fusion" qui caractérise la performance des tokamaks a été multiplié par un facteur 1000. Une valeur record du produit de fusion a été maintenue de façon transitoire (0,1 seconde), ce qui situe les performances du JET à moins d'un facteur 10 de celles de l'ignition. Le JET a simulé de façon transitoire la faisabilité scientifique de la fusion.

Dans des expériences différentes, les valeurs obtenues individuellement pour chacun des paramètres qui caractérisent les différents tokamaks atteignent celles du réacteur. Ces résultats placent le JET en tête des recherches mondiales sur la fusion.

La nouvelle phase du JET

La contamination du plasma par l'afflux d'impuretés, arrachées à la paroi matérielle interagissant avec le bord du plasma, limite les performances. En effet, l'accumulation d'impuretés métalliques de nombre de charge élevé augmente les pertes par rayonnement et empêche d'atteindre la température d'ignition. Les impuretés «légères» -carbone, oxygène, beryllium, etc...- augmentent la dilution des noyaux de deutérium -deuton d- et de tritium -triton t- et réduit le nombre de réactions d,t.

Dans le JET, les méthodes passives ne suffisent pas à contrôler le contenu en impuretés du plasma. Des méthodes actives doivent être développées et testées dans les conditions voisines de celles du réacteur, ce qui est prévu dans une nouvelle phase du JET qui prolongerait le projet jusqu'en 1996.

A l'issue de ces études, un mélange deutérium-tritium sera utilisé qui devrait permettre d'obtenir des puissances de fusion supérieures à 10 MW, ce qui démontrerait la faisabilité scientifique de la fusion.

LE REACTEUR THERMONUCLEAIRE.

Les résultats obtenus dans le JET, les contraintes de la technologie et les prédictions de la physique, permettent de définir les paramètres du coeur d'un réacteur de fusion (**tableau I**).

Les conditions opératoires du réacteur correspondent à la réactivité maximale du mélange. Dans son principe, un réacteur de fusion par confinement magnétique est donc intrinsèquement sûr.

Pour «allumer» le réacteur, c'est-à-dire pour entrer dans le domaine de l'ignition, 50 à 100MW de puissance auxiliaire de chauffage suffisent. Le chauffage additionnel peut être réalisé par injection d'atomes neutres rapides ou par l'absorption d'ondes électromagnétiques.

Paramètres	Valeurs
Grand Rayon du Plasma (R_0)	8m
Petit Rayon du Plasma (horizontal)	3m
Petit Rayon du Plasma (vertical)	6m
Champ Magnétique sur l'axe	4.5T *
Courant Plasma	30MA **
Durée du Plateau de Courant	1000-4000s
Puissance Auxiliaire de Chauffage	50Mw
Puissance de Fusion	0.5-4Gw

* Teslas ** Mega ampere

w	watt
kw 1000w	kilowatt
Mw 1000 kw soit 1.000.000 w	Megawatt
Gw 1000Mw soit 1.000.000.000 w ou encore 1.000.000 kw	Gigawatt

Tableau I
Les paramètres possibles du coeur d'un réacteur de fusion

A l'ignition, les «cendres» non radioactives d'hélium peuvent étouffer le réacteur s'il n'existe pas de pompage adapté. Le contrôle des impuretés dans un réacteur est donc impératif. L'extraction de l'hélium et le maintien de l'ignition nécessitent de pomper de l'ordre de un kilogramme de gaz à l'heure. Il faut ensuite séparer les cendres d'hélium du mélange D-T ce qui peut se faire, à la température de l'hélium liquide (80°K) par absorption de l'hélium sur des plaques métalliques.

Le mélange D-T épuré est alors ré-injecté sous forme gazeuse, ou de glaçons, à la périphérie du plasma.

Un réacteur de fusion doit aussi produire le tritium qu'il brûle. Il est régénéré dans la couverture qui entoure le plasma. Mais, la réaction $(d,t) \rightarrow (\alpha,n)$ produit un neutron par triton. Pour pouvoir régénérer le tritium, il faut donc multiplier le nombre de neutrons : on peut y parvenir en utilisant, dans la couverture entourant le plasma, un matériau multiplicateur de neutrons (béryllium). L'usage du béryllium semble indiqué pour la fusion car, en plus de ces propriétés de multiplication de la production de neutrons, c'est un matériau qui ne s'active pas et qui présente une faible rétention du tritium. Parmi les matériaux qui ne s'activent pas, on distingue aussi : C, Al, Li, Na, He, O, etc... Pour la première paroi, faisant face au plasma et dans laquelle le bombardement des neutrons est le plus dangereux du point de vue de la radioactivité des déchets, il existe une métallurgie des matériaux qui, développée, permettrait de pratiquement concevoir un réacteur sans activation.

Le réacteur fonctionne en mode pulsé et la durée des décharges est de plusieurs heures. La puissance de fusion et la puissance électrique couplée au réseau de distribution dépasse le Gigawatt, ce qui situe le réacteur de fusion dans la gamme des plus importantes unités de production d'énergie. Enfin, le coût de construction d'un réacteur de fusion étant évalué à un ECU par watt, la filière fusion devrait être économiquement compétitive.

Ainsi, le réacteur de fusion par confinement magnétique offre, pour l'avenir, une solution majeure à la production d'énergie : une sécurité intrinsèque, par un fonctionnement au maximum de la réactivité du plasma ; une pression faible ; des cendres non radioactives ; une structure d'ensemble du réacteur faiblement activée par le bombardement neutronique ; enfin une énergie produite sans limite naturelle.

Avant de construire un prototype de réacteur de fusion (DEMO) il faut résoudre les multiples questions qui continuent à se poser. Dans le programme de recherche de la prochaine étape, les questions d'ingénierie, telles que le test des matériaux, devraient être séparées des questions plus scientifiques comme la

démonstration de la faisabilité de l'ignition dans les conditions du réacteur.

Cette étape se ferait sans doute dans le cadre d'une collaboration internationale entre la CEE, les Etats Unis, le Japon et l'URSS (Programme ITER-International Thermonuclear Experimental Reactor-). Dans ce cadre, nous pensons que l'Europe est bien placée pour prendre en charge la construction du coeur d'un réacteur de puissance à la suite du projet JET.

PERSPECTIVES POUR L'HUMANITE

Le développement de la fusion - et l'impact qu'elle peut avoir sur l'humanité - s'appuie sur l'utilisation du deutérium. La concentration de deutérium par rapport à l'hydrogène varie entre 10^{-4} sur terre et 10^{-6} dans le gaz interstellaire, ce qui en fait un gaz très abondant mais pas pour autant facilement utilisable.

Sur terre, le deutérium se trouve combiné avec l'oxygène dans l'eau. Il est donc uniformément réparti et existe en grande quantité. Son extraction à partir de l'eau de mer est bien connue. Si l'on compare les possibilités énergétiques issues de la fusion des atomes de deutérium avec la combustion du pétrole, on constate que la «combustion» du deutérium, contenu dans un litre d'eau, équivaut à celle de 300 litres de pétrole. Les réserves sont donc illimitées. Pour la première fois dans son histoire, l'humanité a accès à une source inépuisable d'énergie. Les pays qui disposeront des technologies de fusion pourront dans l'avenir produire l'énergie dont ils auront besoin. La fusion offre aux générations futures une perspective inédite dans notre histoire. Mais la fusion fait plus encore en produisant une énergie de qualité dont les effets sur l'environnement sont faibles.

A plus long terme, l'utilisation d'une énergie de fusion abondante dans l'univers pourrait ouvrir la voie à la conquête du système solaire. Il faudrait pour cela développer des propulseurs à fusion et aussi des «stations services de l'espace» où les

vaisseaux spatiaux pourraient se ravitailler en deutérium. La fusion permet ainsi d'envisager une expansion de l'espèce humaine au delà des limites terrestres, à la découverte de nouveaux mondes.

CONCLUSIONS

Le développement de la fusion thermonucléaire contrôlée est plus qu'une option pour l'humanité, c'est un espoir.

La fusion est universelle. Elle est à l'oeuvre dès les premières minutes de l'histoire de l'univers et à l'origine de la création des éléments. Plus tard, elle règle la vie des étoiles et, par voie de conséquence, la vie des espèces sur terre. Maîtrisée par l'homme, elle peut le libérer à jamais des problèmes de production d'énergie et devenir le moyen de son expansion sur terre puis aux confins du système solaire et peut-être plus loin encore.

Les résultats obtenus sur le JET nous donnent aujourd'hui confiance dans le potentiel de la fusion. Chacun des paramètres nécessaires au fonctionnement du réacteur a été atteint individuellement. Dans une même expérience, le critère qui définit le point de fonctionnement du réacteur a été approché à moins d'un facteur 10. La réussite n'est pas si éloignée. Il faut continuer notre effort et l'Europe, par ses capacités scientifiques et techniques, peut s'engager dès maintenant dans la construction du coeur d'un réacteur thermonucléaire.

Avec l'avènement de la fusion, une nouvelle étape pourrait être franchie qui devrait garantir un futur pour l'humanité.

Paul-Henri REBUT
JET Joint Undertaking, Abingdon, G.B.