

LIGNÉE TECHNIQUE OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

#5 Lignée technique des tokamaks

En ces temps de transition énergétique, la fusion nucléaire suscite un regain d'attention. Encore au stade expérimental, celle-ci attise les espoirs d'une source d'énergie propre, peu chère, renouvelable et sans risques. Les regards se portent notamment sur Cadarache en Provence où 35 pays construisent ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Le défi est à la mesure des ambitions : chauffer un gaz d'hydrogène à 150 millions de degrés pour déclencher les réactions de fusion et produire 500 MW (mégawatts) de puissance thermique.

● -- Origine et évolution des tokamaks --

Depuis plus d'un siècle, la communauté scientifique s'active à maîtriser l'énergie de fusion sur Terre. De nombreuses équipes scientifiques se consacrent à l'étude de gaz portés à très hautes températures – qu'on appelle plasmas – qui composent notamment la matière stellaire et qui pourraient permettre d'effectuer sur Terre des réactions de fusion.

Un gros progrès a eu lieu avec le développement du confinement magnétique des plasmas et le concept de « tokamak », un dispositif torique doté de plusieurs aimants.

Les premiers tokamaks furent des machines de petite taille pouvant tenir sur une table, comme T-1 (photo), le premier tokamak (soviétique). La technologie et les systèmes de contrôle étaient relativement simples. Ces machines ont cependant démontré la possibilité de générer des plasmas de haute température et de confiner leur énergie pendant un certain temps (toutefois assez court : de l'ordre de quelques fractions de seconde). La seconde génération de tokamaks, apparue

dans les années 1970-1980, était caractérisée par l'utilisation extensive de moyens de chauffage auxiliaires. D'autres perfectionnements ont suivi, comme le « diverteur », sorte de cendrier géant destiné à recueillir les produits de la réaction de fusion. Cette troisième génération de tokamaks, de plus grande taille que ceux qui les ont précédés, comme Jet (Joint European Torus) en Europe, TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) aux Etats-Unis, JT-60 au Japon et T-15 en Union soviétique, va permettre aux scientifiques d'étudier les plasmas dans des conditions proches de celles d'un réacteur de fusion.

Inauguré en 1984, Jet a été pendant presque quarante ans le plus grand tokamak du monde. Il a été détrôné en décembre 2023 par JT-60SA, un tokamak construit par l'Union européenne et le Japon à Naka. Il y a à l'heure actuelle plus de 130 machines de fusion expérimentales publiques et privées, en fonctionnement, en construction ou en projet dans le monde¹.

¹ IAEA (2022) World Survey of Fusion Devices 2022, 180 pp, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CRCP-FUS-001webRev.pdf>

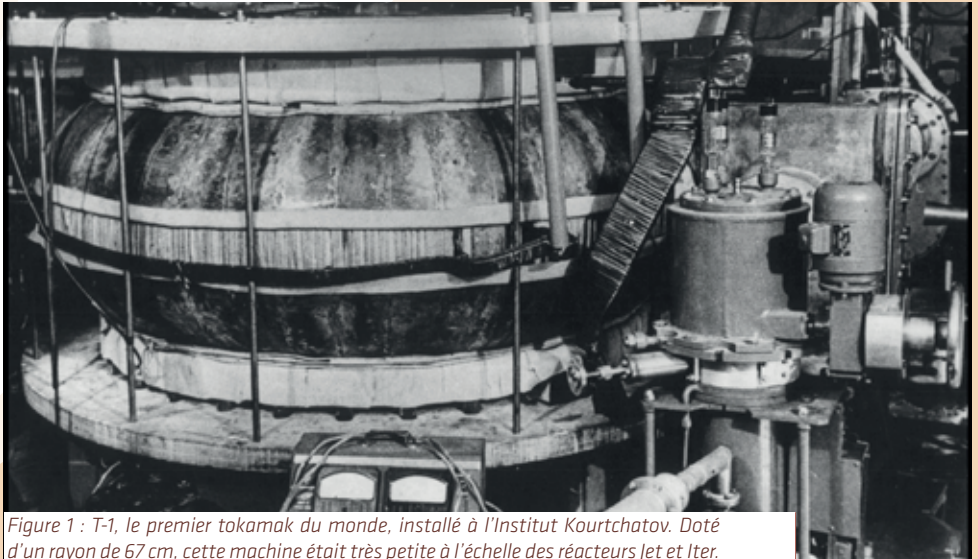


Figure 1 : T-1, le premier tokamak du monde, installé à l'Institut Kourchtatov. Doté d'un rayon de 67 cm, cette machine était très petite à l'échelle des réacteurs Jet et Iter.

Première rupture technologique : les aimants supraconducteurs

La supraconductivité fut découverte en 1911 par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes, qui remarqua qu'à une température inférieure à 4,2 K (-268,8 °C), proche du zéro absolu, le mercure ne présentait plus aucune résistance électrique. Mais ce n'est qu'en 1957 que la physique de la supraconductivité fut maîtrisée, lorsque les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer proposèrent une théorie décrivant la supraconductivité comme un phénomène quantique, ce qui leur valut le prix Nobel de physique en 1972. Cette rupture technologique permet d'augmenter considérablement les champs magnétiques produits par des aimants en annulant pratiquement leur consommation électrique (figure 2).

Dans le tokamak Iter, le confinement magnétique sera assuré par 43 aimants supraconducteurs dont le poids total atteindra dix mille tonnes. Il y aura dix-huit aimants toroïdaux, en forme de D majuscule, de dix-sept mètres de haut, six aimants poloïdaux circulaires (de six à vingt-quatre mètres de diamètre), un solénoïde central et dix-huit aimants de correction. Le système magnétique d'Iter sera le plus grand du monde et

concentrera une énergie magnétique totale de plus de cinquante milliards de joules.

Le matériau supraconducteur des dix-huit bobines de champ toroïdal (chacune de dix-sept mètres de haut) et du solénoïde central est un alliage de niobium et d'étain (Nb3Sn), celui des aimants poloïdaux est un alliage niobium-titane (NbTi). Plus de 100.000 kilomètres (plus de deux fois la circonférence de la Terre) de brins supraconducteurs ont été produits par l'industrie dans six des sept membres d'Iter - la Chine, l'Union européenne, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis. C'est la plus grosse production mondiale.

Dans les aimants Iter, les brins (mesurant environ un millimètre de diamètre) ont été associés, recouverts d'une matrice de cuivre et enserrés dans une gaine d'acier. C'est le principe du « câble-en-conduit à double canal », le tuyau central permettant le passage de l'hélium liquide et garantissant leur refroidissement permanent.

Lorsqu'ils seront refroidis à 4 K, les câbles deviendront supraconducteurs, c'est-à-dire qu'ils transporteront le courant électrique sans aucune résistance.

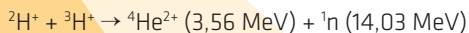


Figure 2 : Tore-Supra, la machine construite par le CEA à Cadarache, a été le premier tokamak doté d'aimants supraconducteurs. (Crédit : CEA)

Deuxième rupture technologique : les tokamaks entrent dans l'ère nucléaire

Machines purement expérimentales à l'origine, les tokamaks ont rapidement attiré les espoirs des scientifiques de maîtriser la fusion nucléaire et produire de l'énergie.

Pour produire de l'énergie à partir de la fusion d'atomes légers, la nature offre une dizaine de combinaisons possibles. Mais en l'état actuel de la technologie, une seule nous est relativement accessible : la fusion des deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. Dans la famille des réactions de fusion d'hydrogène, c'est celle qui est la plus avantageuse. Elle se caractérise en effet par la plus grande « section efficace » (mesure de la probabilité d'interaction des deux noyaux), avec un maximum à une énergie relativement basse, de l'ordre de 100 keV¹, et dégage une importante quantité d'énergie dont les trois-quarts sont emportés par le neutron produit par la réaction de fusion qui peut s'écrire de la manière suivante :



Si cette réaction est avantageuse sur le plan énergétique, elle présente l'inconvénient d'utiliser du tritium. Cet isotope lourd de l'hydrogène est en effet un élément radioactif et est donc radiotoxique, quoique faiblement, et de durée de vie relativement courte (12,3 ans). Seuls quelques tokamaks ont, dans le monde, expérimenté la réaction « DT » : essentiellement Jet et TFTR. Une fois le premier plasma réalisé, Iter fonctionnera en mode nucléaire (au plus tôt sans doute vers 2040). Parce que Iter contiendra en permanence 3-4 kilos de tritium, le site est considéré comme une « installation nucléaire de base » et, à ce titre, contrôlé par l'ASN (Autorité de Sécurité Nucléaire) pour les aspects nucléaires, la radioprotection et la protection de l'environnement, conformément à l'article 14 de l'Accord Iter. Iter sera donc le premier tokamak « nucléaire ».

¹ L'électron-volt (et ses multiples – keV ou kilo (mille) électrons-volts, MeV ou Méga (million) électrons-volts, etc.) est une unité qui représente l'énergie acquise par un électron au repos lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel électrique d'un volt.

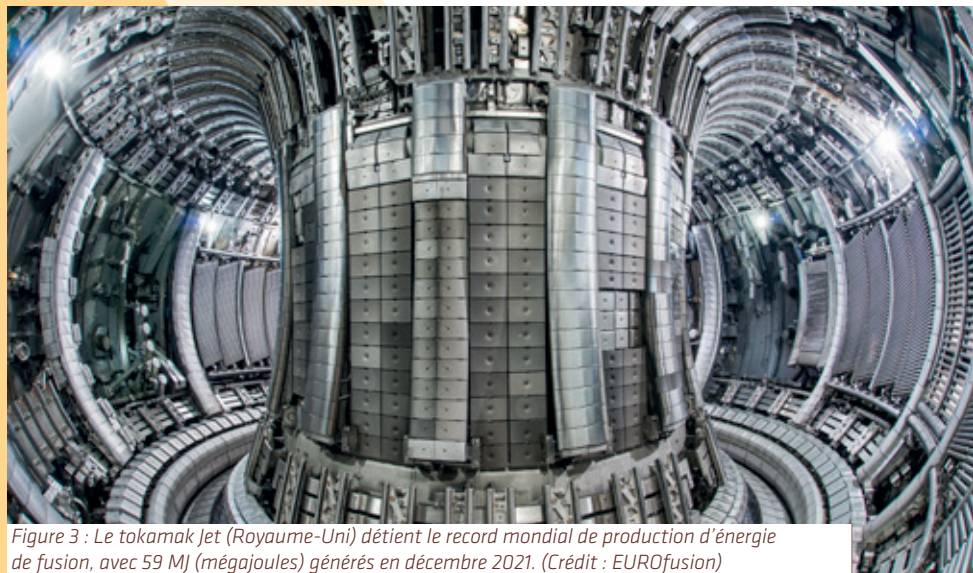


Figure 3 : Le tokamak Jet (Royaume-Uni) détient le record mondial de production d'énergie de fusion, avec 59 MJ (mégajoules) générés en décembre 2021. (Crédit : EUROfusion)

▲ -- Iter, le plus grand tokamak du monde --

Grâce au traité Euratom, l'Europe a pu se doter de puissantes machines de fusion comme Jet (Joint European Torus) et Iter dans le cadre de coopérations respectivement européennes et internationales.

Le 21 avril 1988 fut publié au Journal officiel des Communautés européennes ce qui peut être considéré comme l'acte de naissance officiel d'Iter, qui parut sous le titre : « Accord de participation de la Communauté européenne de l'énergie atomique aux activités ayant trait à un avant-projet de réacteur thermonucléaire expérimental international (Iter) au côté du Japon, de l'Union des républiques socialistes soviétiques et des Etats-Unis d'Amérique »².

Sur cette base, les partenaires ont engagé les premières études pour définir le concept général d'Iter et finaliser, en 2001, les plans détaillés de la machine et le cahier des charges. A la même époque, trois nouveaux

membres ont rejoint Iter : la Corée du Sud et la Chine en 2003, et l'Inde en 2005.

Il restait enfin à décider du lieu de construction d'Iter. Après plus de trois années de discussions techniques et de négociations politiques, le site de Cadarache fut retenu à l'unanimité par les membres d'Iter réunis en conseil le 28 juin 2005 à Moscou. Les travaux de construction ont démarré en 2007.

Retenons, en guise de conclusion, que l'histoire de la fusion nucléaire est indissociable des connaissances scientifiques et techniques en physique des plasmas, qui ont permis également d'explorer plusieurs alternatives technologiques à Iter. Ainsi, plusieurs sociétés visent à construire des tokamaks de taille réduite (par exemple, Tokamak Energy au Royaume-Uni et Commonwealth Fusion Systems aux Etats-Unis) ; d'autres projets cherchent à exploiter la fusion de bore et d'hydrogène ou à explorer la fusion par confinement inertiel³.

² Journal Officiel de l'Union européenne L 102 du 21 avril 1988, p. 31-44, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_1988.102.01.0031.01.FRA&toc=OJ:L:1988:102:TOC

³ Le confinement inertiel utilise soit des faisceaux laser soit des dispositifs mécaniques pour comprimer le plasma et atteindre des densités suffisamment élevées pour déclencher des réactions de fusion nucléaire.

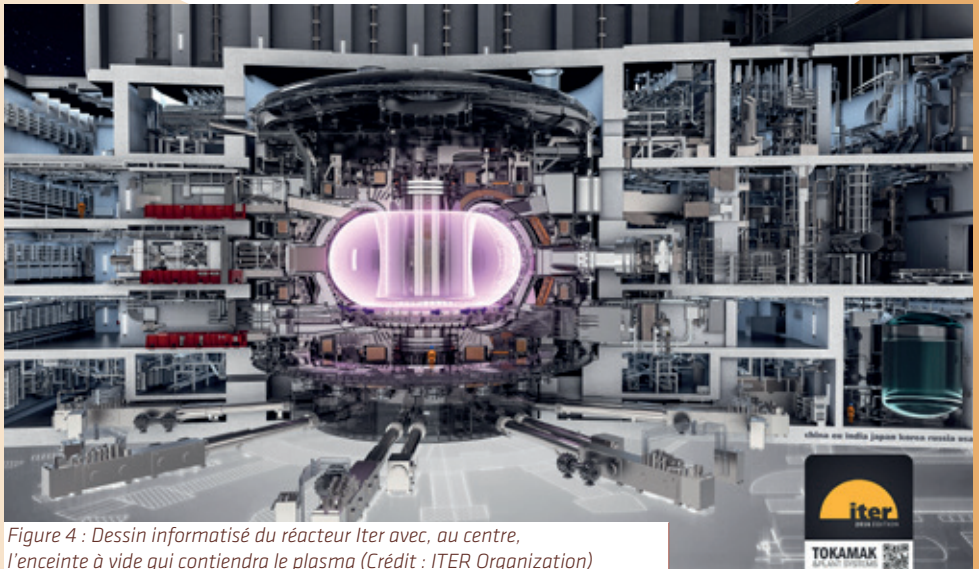


Figure 4 : Dessin informatisé du réacteur Iter avec, au centre, l'enceinte à vide qui contiendra le plasma (Crédit : ITER Organization)

● -- La fusion nucléaire aujourd'hui --

Aujourd'hui, Iter n'est plus le seul projet de cette taille sur la fusion dans le monde puisque celui-ci s'est vu complété de façon constructive par une quarantaine de projets dans le monde qui tous œuvrent à maîtriser l'énergie de fusion et dont la plupart sont soutenus par des financements privés (apportés par de grosses entreprises, des milliardaires tels que Bill Gates et Jeff Bezos, etc.). De plus, la Chine et les Etats-Unis accélèrent leurs programmes nationaux de fusion.

Parmi ces projets, le National Ignition Facility (Nif) en Californie se consacre à la fusion par confinement inertiel (192 faisceaux laser sont utilisés pour comprimer et chauffer une cible située au centre d'une « chambre d'expériences » de dix mètres de diamètre). Le 5 décembre 2022, les chercheurs du Nif ont réalisé une « avancée historique », en générant un plasma dégageant 2,5 MJ à partir de 3,15 MJ utilisés pour chauffer le plasma, soit un facteur de gain supérieur (Q) à 1, dépassant donc le seuil de « l'ignition ».

Iter reste l'un des projets scientifiques et pacifiques les plus ambitieux du monde. La collaboration internationale est un élément essentiel et original du programme et, de la recherche sur la fusion en général. La plupart des avancées et des découvertes faites dans tel ou tel pays du monde sont immédiatement partagées avec les autres programmes de recherche. Projet politique, Iter est doté d'une forte image qui lui permet d'actionner les leviers de la finance publique et privée pour assurer un flux permanent de perfectionnements et d'innovations.

Si Iter doit démontrer la faisabilité technologique des tokamaks, des questions restent encore en suspens, comme la rentabilité économique et l'approvisionnement en tritium (dont le stock civil mondial est estimé à une trentaine de kilos). Iter testera plusieurs technologies de production de tritium dans l'enceinte à vide, pour permettre aux futurs réacteurs de s'auto-alimenter en ce combustible critique.

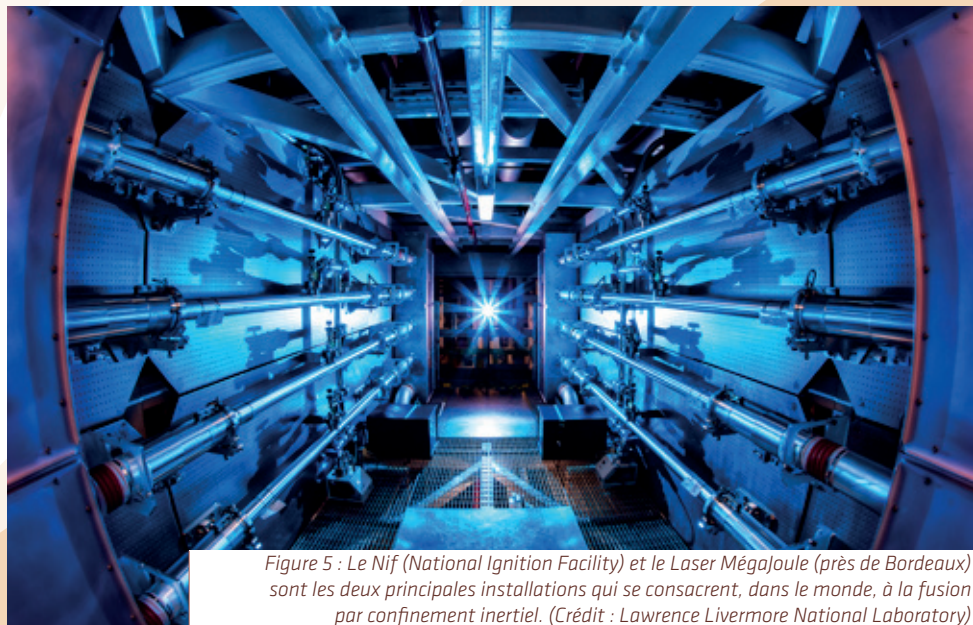


Figure 5 : Le Nif (National Ignition Facility) et le Laser Mégajoule (près de Bordeaux) sont les deux principales installations qui se consacrent, dans le monde, à la fusion par confinement inertiel. (Crédit : Lawrence Livermore National Laboratory)



Figure 6 : Vue du chantier Iter à Cadarache en mars 2023 avec au centre les deux bâtiments adjacents de l'assemblage et du réacteur. Le site a une superficie totale de cent quatre-vingt et un hectares. (crédit : ITER Organization)

LIGNÉE TECHNIQUE* OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

*Définition d'une lignée technique :
« [...] les objets évoluent selon des « lignées », c'est à dire des ensembles regroupant les objets de même type, ayant même fonction et même principe de fonctionnement ».

Bruno JACOMY

Cette plaquette s'inscrit dans un projet d'inventaire et de valorisation du patrimoine scientifique, technique et contemporain d'Aix-Marseille Université.

Contact :

Culture et Patrimoine Scientifique

Direction de la Recherche et de la Valorisation

3 place Victor Hugo

13003 Marseille

corine.levy-battesti@univ-amu.fr

+33(0)4 13 94 97 29

www.univ-amu.fr/fr/public/valorisation-du-patrimoine-scientifique

Rejoignez le réseau !
Join the network



www.univ-amu.fr

Cette plaquette a été réalisée en partenariat avec Iter



Auteurs :

Michel Claessens, docteur en sciences, ancien porte-parole d'Iter,

Robert Amoux, agent responsable de communication, ITER Organization.

Avec la participation scientifique de **Claude Gazanhes**, directeur du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de 1986 à 1992.

Sur une idée de **Corine Lévy Battesti**, ingénieure d'étude, chargée de l'inventaire des instruments scientifiques d'Aix-Marseille Université.

