

# Quelles échéances vers la disponibilité de l'option « fusion de l'hydrogène » ?

*À côté de ses fonctions de président de la Fondation de la Maison de la Chimie, Bernard Bigot est directeur général de l'Organisation ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor<sup>1</sup>), en charge de réaliser le programme international de recherche ITER de développement de la fusion nucléaire contrôlée.*

*Une première phase de la carrière de Bernard Bigot est une phase classique d'enseignement supérieur et de recherche scientifique fondamentale dans le domaine de la physico-chimie, et particulièrement de la catalyse. Une deuxième phase de management de la recherche s'est logiquement branchée sur la première avec plusieurs années au niveau du ministère de la Recherche et de la Technologie où il s'est vu confier les fonctions de directeur général de la recherche et de l'innovation.*

*En 2003, Bernard Bigot a rejoint le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) comme Haut-Commissaire, l'une des fonctions les plus influentes du commissariat. Il a ensuite, il a été Administrateur Général de l'organisme de 2009 à 2015. Parallèlement, Bernard Bigot a été représentant pour le gouvernement de l'accueil en France du programme international sur la fusion nucléaire et est devenu en mars 2015 directeur général de l'Organisation ITER.*

*En 2019, le conseil d'ITER a prolongé son mandat pour cinq ans. Construit sur ses responsabilités de direction de cette institution d'une complexité extraordinaire, de 35 partenaires internationaux, l'exposé de Bernard Bigot nous fera un peu mieux comprendre à la fois la difficulté, les enjeux et le côté un peu science-fiction d'une aventure scientifique tout à fait réelle.*

1. [www.iter.org/fr](http://www.iter.org/fr)

Ce chapitre aborde la fusion de l'hydrogène (**Figure 1**), qui est une deuxième manière, à côté de la fission nucléaire à la base de nos centrales nucléaires actuelles, d'extraire l'énorme potentiel d'énergie disponible dans les noyaux atomiques. En cette période d'apparition des besoins d'une transition énergétique, il s'agit bien là d'une énergie d'avenir.

## 1 Émergence, histoire et généralités sur la fusion nucléaire

### 1.1. La naissance du concept de fusion

Cette aventure est née au détour du siècle dernier quand, en 1919, un français, Jean Perrin (**Figure 2**), a publié un article faisant l'hypothèse que la source d'énergie

qu'utilisaient le Soleil et les astres était celle qui résulte de la fusion des noyaux d'hydrogène.

Cette hypothèse extrêmement originale a été reprise quelques mois plus tard de manière indépendante, à l'époque où la circulation de l'information n'était pas ce qu'elle est aujourd'hui, par un de ses collègues britanniques, Arthur Eddington (**Figure 3**), qui a confirmé de son point de vue cette hypothèse. Jean Perrin avait fait un petit calcul sur le dos d'une enveloppe en estimant que vu la masse d'hydrogène qu'il devait y avoir dans le Soleil, il y en avait encore assez pour 5-7000 ans de fonctionnement. Même s'il s'était trompé d'un facteur d'un million, il avait effectivement engendré une idée particulièrement fructueuse.

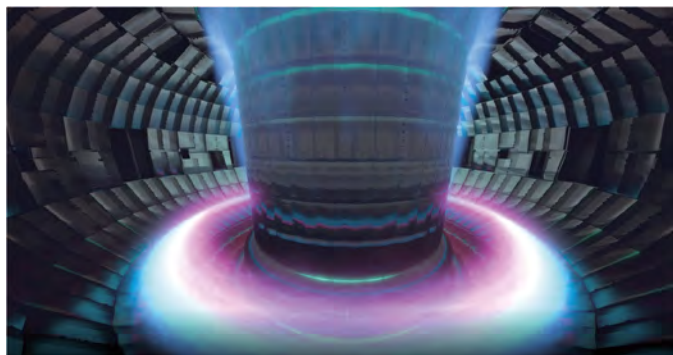


Figure 1

La fusion de l'hydrogène, énergie d'avenir. Image du cœur d'un réacteur à fusion d'hydrogène (en rose le plasma).

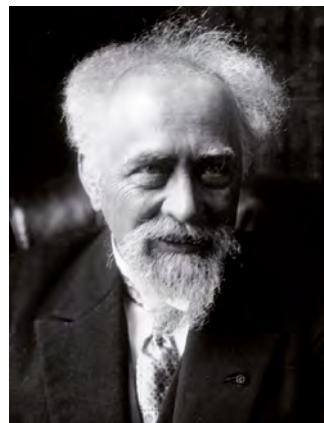


Figure 2

Le physicien Jean Perrin (1870-1942) suggéra que, dans les conditions de température et de pression qui règnent au cœur de notre étoile, le Soleil, les noyaux d'hydrogène fusionnent et donnent naissance à des noyaux d'hélium.

Une quinzaine d'années plus tard, dans une expérience en amphithéâtre en présence du public, pour la première fois au monde a été mise en évidence « sur Terre » la fusion de noyaux d'hydrogène



Figure 3

Arthur Eddington (1882-1944) formula une hypothèse similaire à celle de Jean Perrin.

(Figure 4). Par bombardement d'une cible de deutérium<sup>2</sup> par des atomes de deutérium jusqu'à en provoquer la fusion, Ernest Rutherford a effectivement constaté la production d'énergie et caractérisé le fait que les produits de cette fusion étaient des atomes d'hélium et des neutrons. Le mécanisme de cette réaction n'était pas élucidé, mais il s'agissait cependant d'une rupture essentielle : au-delà des hypothèses purement spéculatives initiales qui avaient été émises, une démonstration physique était réalisée.

C'est quelques années plus tard, en 1939, que l'alsacien Hans Bethe (Figure 5A), prix

2. Deutérium : un isotope de l'hydrogène, c'est-à-dire qu'il possède un seul proton (même numéro atomique que l'hydrogène), mais ne possède qu'un neutron, contrairement à l'hydrogène.



Figure 4

Lors d'une expérience publique en 1934, Ernest Rutherford (1871-1937) obtient un « effet considérable » en bombardant une cible de deutérium avec des noyaux de deutérium accélérés. Les noyaux de deutérium fusionnent en un noyau d'hélium porteur d'énergie.

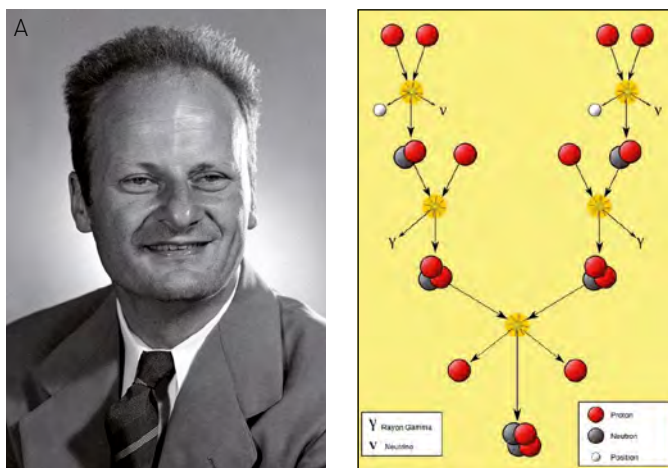


Figure 5

A) L'Alsacien Hans Bethe (1906-2005), qui identifia l'enchaînement des réactions qui se produisent au cœur des étoiles de type « solaire », obtiendra le prix Nobel de physique en 1967 ; B) Schéma explicatif de la fusion des noyaux d'hydrogène telle qu'elle se produit au cœur des étoiles sous l'effet des forces gravitationnelles et qui ne peut être reproduite sur Terre. C'est ce qui explique la recherche d'une approche alternative utilisant des champs magnétiques intenses.

Nobel de physique, a identifié l'enchaînement des réactions qui se produisent au cœur des étoiles dites « de type solaire ». Il a identifié la chaîne des réactions en jeu et montré qu'elle aboutit à la production d'énergie avec la production simultanée de deux particules particulières : un noyau d'hélium, qui est le fruit de la fameuse fusion des noyaux d'hydrogène, et un neutron (Figure 5B). Évidemment, cela suscitait un grand intérêt, énormément d'efforts ont été engagés.

### 1.2. Définition et fonctionnement du concept de fusion

Quel est le moteur de la réaction de fusion dans les astres ?

C'est la pression gravitationnelle, et c'est sous son effet que dans les étoiles à hydrogène, le cœur est dans l'état de plasma<sup>3</sup> ; l'hydrogène est porté à de très hautes températures – la température du cœur du Soleil est de 15 millions de degrés –, où les noyaux sont séparés des électrons. La densité est alors imposée par la pression gravitationnelle : la densité du cœur du Soleil est environ cent fois celle

3. Plasma : état de la matière partiellement ou totalement ionisé. C'est le quatrième état de la matière. Le plasma est un milieu constitué d'un mélange de particules neutres, d'ions positifs, et d'électrons négatifs. Il est électriquement neutre et ses particules interagissent les unes avec les autres.

du fer ; très lentement, dans ces conditions extrêmes, les noyaux se rapprochent à des distances si courtes (subatomiques) que, par le jeu des forces d'attraction nucléaire à courtes portées qui sont celles qui assurent la cohésion des noyaux, ils surmontent la répulsion électrostatique qui leur impose dans les conditions « normales » de ne pas se rapprocher (Figure 6). Les noyaux vont alors fusionner et produire les phénomènes évoqués.

Sur Terre, on ne peut évidemment pas imaginer de réunir des masses telles que celles des astres – la masse du Soleil fait 300 000 fois la masse de la Terre. Pour faire fusionner les atomes, on a donc été amené à imaginer une technique totalement opposée, utilisant un plasma d'une densité ultra-faible (le millionième de la densité de l'atmosphère), qui permet d'accélérer les noyaux d'hydrogène pour qu'ils fusionnent lorsqu'ils entrent en collision. Avec une haute efficacité, ils donnent alors naissance au même phénomène que celui qui est à l'œuvre dans les astres. Sur la Figure 7, on voit deux noyaux d'hydrogène (en fait des isotopes lourds de l'hydrogène, le deutérium et le tritium), qui entrent en collision. Ils produisent alors les deux particules évoquées plus haut : le noyau d'hélium et le neutron. La collision se fait à 150 millions de degrés, l'équivalent de 0,7 million d'électronvolts, et le noyau d'hélium produit cinq fois plus d'énergie que l'énergie de la collision et le neutron en a vingt fois plus. L'énergie vient de la diminution de la masse

décrite par la célèbre formule  $\Delta E = \Delta mc^2$ .

Cette production d'énergie extrêmement conséquente motive chercheurs

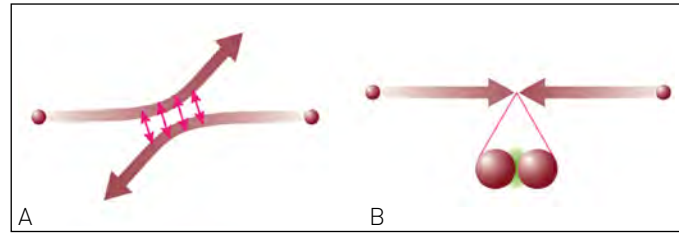


Figure 6

A) Schéma représentant la force électrostatique qui repousse les noyaux à faible vitesse (donc basse température) ; B) Schéma représentant les noyaux qui se rapprochent suffisamment pour rentrer dans le champ des forces nucléaires attractives à courte portée.

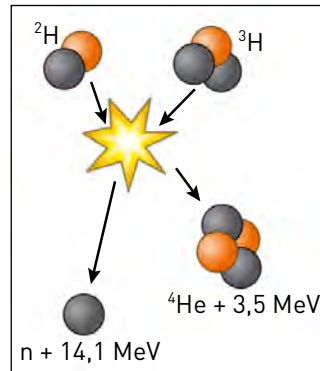


Figure 7

Schéma de la fusion sur Terre. La réaction de fusion peut être obtenue à partir de différentes combinaisons de noyaux légers. Avec les connaissances et la technologie actuelle, c'est la réaction deutérium (D) + tritium (T), isotopes lourds de l'hydrogène, qui est la plus accessible. On peut noter que, comme au cœur des étoiles, la réaction de fusion sur Terre est une réaction de conversion masse/énergie selon la formule  $\Delta E = \Delta mc^2$ . Le potentiel énergétique d'un gramme de DT équivaut à celui de 8 tonnes de pétrole.

et ingénieurs pour développer une technologie qui l'exploite de manière appropriée. Cette promesse d'une source d'énergie virtuellement illimitée a mobilisé de nombreux pays notamment à l'époque l'Union soviétique, la France, le Royaume-Uni, la Grande-Bretagne, les États-Unis.

### 1.3. La naissance des premières machines

Un premier brevet pour une machine de fusion a été déposé en 1946 (*Figure 8*).

En 1951, l'astrophysicien américain Lyman a développé le concept de ce qu'on appelle le stellerator (*Figure 9*), une

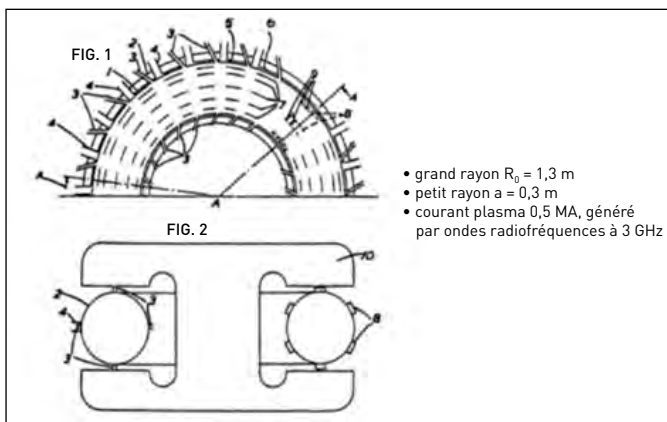


Figure 8

Schéma du premier brevet déposé pour une machine de fusion en 1946.



Figure 9

Le stellerator développé par l'astrophysicien américain Lyman Spitzer (1914-1997) en 1951.

technologie qui permet d'envisager effectivement cette collision des noyaux d'hydrogène.

Plus tard, deux Soviétiques, Andreï Sakharov et Igor Tamm, ont proposé une technologie alternative que l'on appelle le Tokamak (Figure 10), qui est essentiellement un tore<sup>4</sup> magnétique dessiné pour assurer la stabilité du plasma.

De très nombreuses expériences ont été développées sur ce principe. La Figure 11

4. Tore : solide représentant un tube courbé refermé sur lui-même (exemple : un donut est un tore).

montre le premier Tokamak qui a été construit en France, à Fontenay-aux-Roses, où, à l'échelle de quelques mètres de diamètre au plus, on peut observer le phénomène. On peut même réaliser un « Tokamak de table ».

Dans toutes ces expériences de taille réduite, on consomme plus d'énergie qu'on n'en récupère. Le volume de plasma est beaucoup trop faible et du fait d'effets de dissipation de cette énergie aux bords de l'installation, le rendement est extrêmement faible. Cela n'a découragé personne et le développement s'est poursuivi.

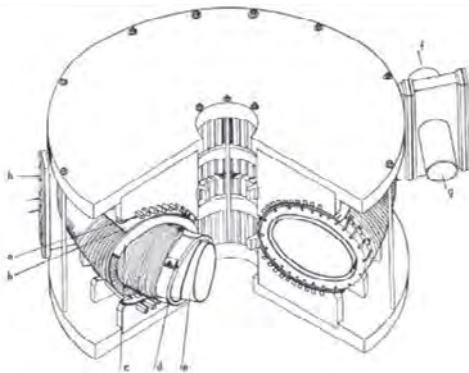


Figure 10

Le Tokamak inventé par Andreï Sakharov (1921-1989) et Igor Tamm (1895-1971).

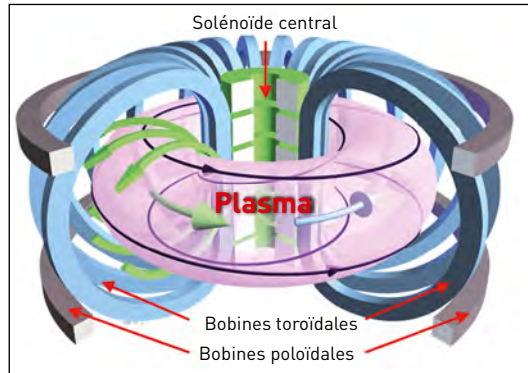
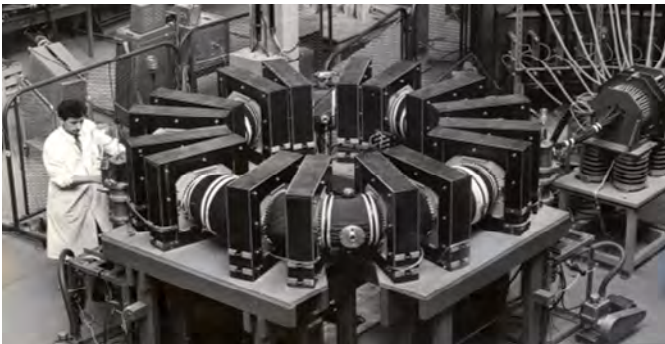


Figure 11

Le premier Tokamak construit en France à Fontenay-aux-Roses en 1957.



En 1968, des performances exceptionnelles du premier Tokamak, à l'époque soviétique, ont été présentées à la communauté internationale (Figure 12). La performance annoncée selon laquelle on avait déjà atteint plusieurs millions de degrés – pas encore les 150, mais plusieurs

millions de degrés – a déclenché un certain scepticisme mais elle s'est vue confirmée (Figure 13).

Le principe du Tokamak est celui d'une enceinte dans laquelle on fait le vide, puis où l'on injecte une très faible quantité d'hydrogène (environ deux grammes dans un volume

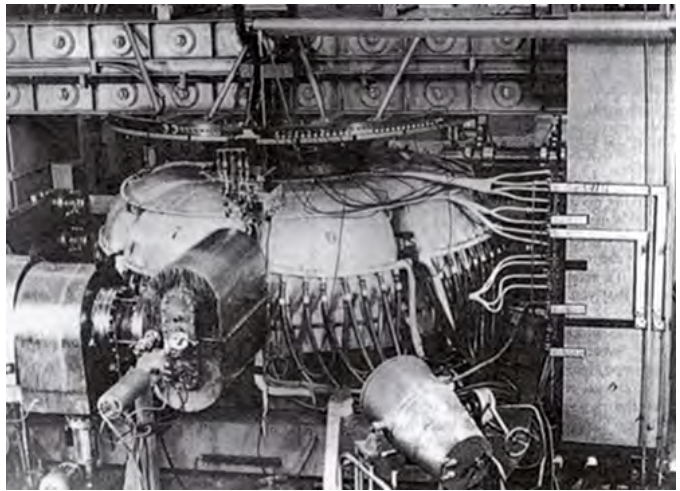


Figure 12

Photographie du Tokamak soviétique T-3 présenté à la communauté internationale en 1968. La recherche mondiale adopte le concept.

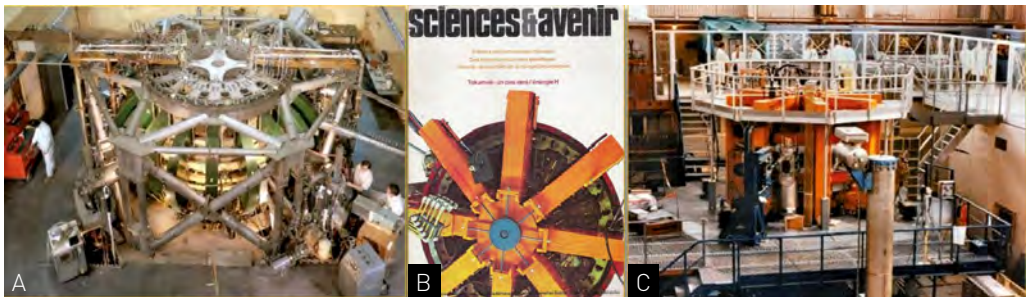


Figure 13

L'avènement des Tokamaks : A) Les Tokamaks Princeton Large Torus ; B) Couverture du magazine Sciences et avenir parlant du Tokamak français ; C) Le Tokamak de Fontenay-aux-Roses, le premier Tokamak français et le plus puissant au monde au milieu des années 1970.



de plusieurs centaines voire milliers de mètres cubes), la densité extrêmement faible permettant l'accélération des noyaux.

Lorsqu'une particule électrique passe à proximité d'une ligne de champ magnétique, elle est capturée et s'enroule comme par une trajectoire hélicoïdale en accélérant continuellement. Pour atteindre des vitesses équivalentes à des températures de 150 millions de degrés, il faut, certes un fort champ magnétique pour une très forte accélération, mais aussi assez d'espace avant d'entrer en collision avec un autre noyau. Quelle que soit la grandeur de l'accélération, si on n'a pas assez d'espace pour accélérer avant de rentrer en collision avec un voisin, on n'atteindra jamais la bonne vitesse. C'est la raison pour laquelle il faut des équipements de très grande taille, faute de quoi on n'assiste qu'à un nombre d'évènements de fusion par unité de temps trop limité pour atteindre la température souhaitée.

Chacun doit ainsi être convaincu que c'est la physique qui impose la taille. Plus le volume du plasma est important, meilleur est le rendement global. Dans les années 1990, des développements significatifs ont été réalisés dans ce sens, notamment avec un équipement qui fonctionne toujours et qui va bénéficier du soutien de l'Europe pour une prolongation de son activité pour quelques années, « dans l'attente du démarrage d'ITER ». Il s'agit du « *Joint European Torus* », construit près de Culham en

Grande Bretagne. Cet équipement a été capable de produire jusqu'à 16 mégawatts de puissance de fusion, le record mondial. Le plasma avait un volume d'environ 80 mètres cubes, mais malheureusement la valeur de l'énergie de fusion produite était de seulement 70 % de celle injectée dans le plasma pour maintenir sa température.

Une autre expérience, aujourd'hui arrêtée, s'était développée aux États-Unis, avec le fameux TFTR (« *Tokamak Fusion Test Reactor* »), d'un volume de 30 mètres cubes. Dans un cas comme dans l'autre, pour la première fois était mise en évidence la capacité de production massive d'énergie de fusion. Cependant, le rendement était toujours inférieur à 1, et il a fallu réfléchir aux caractéristiques de l'équipement nécessaire pour une vraie démonstration avec l'objectif très clair d'un rendement d'au moins 10 entre l'énergie injectée dans le plasma et l'énergie produite (Figure 14). C'est l'objectif du projet ITER, dont il va s'agir maintenant.

#### 1.4. Les avantages de la fusion nucléaire

Alors pourquoi, aujourd'hui, 35 pays, 7 grands partenaires ont accepté de se mobiliser ensemble pour conduire ce grand programme de recherche et faire la démonstration de la fusion ? C'est parce que cette technologie présente tout un ensemble d'avantages extrêmement importants et que tous sont convaincus qu'il y a nécessité

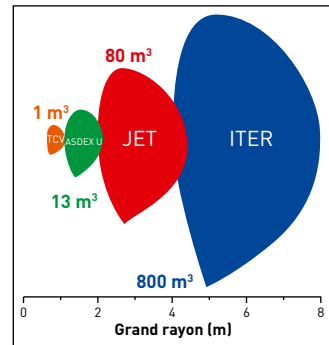


Figure 14

La physique impose la taille : dans les années 1990, deux machines de grande taille, le « *Joint European Torus* » (JET, 80 m³) européen et le « *Tokamak Fusion Test Reactor* » (TFTR, 30 m³) américain obtiennent des puissances de fusion significatives (jusqu'à 16 MW pour JET). Toutefois, l'énergie investie sous forme de puissance de chauffage du plasma était supérieure à l'énergie restituée par les réactions de fusion au sein du plasma. Pour obtenir un gain net d'énergie, un volume de plasma encore plus important est nécessaire. D'où le projet ITER, qui vise  $Q \geq 10$  (rendement énergie restitué sur énergie investie), avec un volume de plasma de l'ordre de 800 m³.

urgente de remplacer les énergies fossiles par des énergies propres pour assurer les besoins énergétiques d'une population mondiale, qui va vers les 10 milliards d'individus. On a besoin d'une « énergie de base » qui, lorsque le soleil ne brille pas, que le vent ne souffle pas, que la pluie n'est pas au rendez-vous de l'hydraulique, reste en capacité d'assurer les besoins énergétiques de la population. L'avantage de la fusion est que c'est une « source massive », donc complémentaire des énergies renouvelables, lesquelles sont au contraire des « sources distribuées ou diffuses ». Elle est potentiellement continue mais aussi programmable dans le temps et repose sur une matière première pratiquement inépuisable (l'eau) pour assurer la production du deutérium et du tritium nécessaires (Figure 15). C'est à des échelles de la centaine de millions d'années qu'il y a des ressources sur Terre de cette nature.

À la différence de l'énergie de fission ou de l'énergie de combustion du charbon ou du pétrole etc., la production

d'énergie de fusion ne fait intervenir aucun stockage d'énergie : elle fonctionne en flux. Aussi vite que l'on s'écarte des paramètres de fonctionnement de la fusion, la réaction s'arrête, il n'y a plus d'énergie dans le réacteur. Cette propriété permet de démarrer ou d'arrêter à volonté en une fraction de seconde le plasma réactif.

Une autre propriété extrêmement importante est l'aspect intrinsèquement sûr de la technologie mise en œuvre, la réaction ne pouvant pas s'emballer. Dès que l'on s'écarte des paramètres nominaux, effectivement très exigeants (un très haut champ magnétique, un vide très poussé), la réaction s'arrête. On peut perdre le circuit de refroidissement, on peut perdre le circuit d'alimentation électrique, la réaction ne conduit pas à une destruction de l'équipement ni à un relâchement de matière à l'extérieur. Troisième élément important, la réaction de fusion ne produit *a priori* que de l'hélium, gaz chimiquement neutre, non radioactif, et ce, dans des quantités très faibles. Songeons qu'une centrale



Figure 15

Exemples de dynamique d'un plasma dans le Tokamak WEST (CEA-Cadarache).

de production de l'électricité de 1 000 Mégawatts en une année consomme entre 6 et 10 millions de tonnes de combustibles fossiles par an. Par fusion, on consommera à puissance égale moins de 350 kg de combustibles et on relâchera moins de 350 kg d'hélium au lieu d'une trentaine de millions de tonnes de dioxyde de carbone ou de gaz à effet de serre pour les combustibles fossiles. Par ailleurs, il n'y a pas de risque de prolifération puisqu'effectivement l'équipement est extrêmement volumineux et ne peut pas être déplacé à d'autres fins. Il y a certes de la radioactivité induite au cours du fonctionnement de l'équipement (ne serait-ce qu'à partir du tritium), mais sa durée de demi-vie est courte (12,3 années), et s'il y a activation de chaînes liées aux impuretés (par exemple à partir du nickel ou du cobalt) de l'acier de la machine, les quantités restent très limitées.

## 2 Le projet ITER

### 2.1. L'impulsion politique qui a permis d'aboutir au projet

En 1985, en fin de guerre froide, une célèbre rencontre internationale (*Figure 16*) à Genève a décidé le lancement d'un grand programme destiné à apporter la démonstration tant attendue de la production d'énergie par la fusion de l'hydrogène. Cet objectif nécessitait la conception et la construction d'une installation de très haute technologie et de très grande dimension.

Immédiatement, l'Europe et le Japon se sont joints aux États-Unis et à l'Union soviétique de l'époque et ont lancé un grand programme et mobilisé pendant environ une quinzaine d'années 200 ingénieurs, chercheurs, scientifiques pour élaborer le concept de la machine qui serait nécessaire (*Figure 17*).

Vers les années 2000, ce concept a été considéré



Figure 16

Première rencontre de Reagan-Gorbatchev en novembre 1985 à Genève.



Figure 17

En 1988, sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), les quatre premiers partenaires, États-Unis, Union soviétique, Union européenne et Japon décident de lancer les études pour le dessin conceptuel.

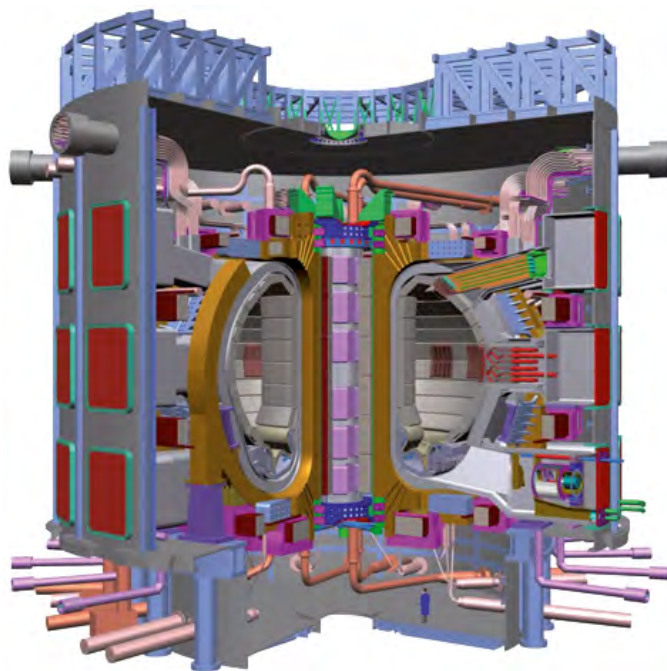


Figure 18

Dessin finalisé de la machine prévue. Cela marque le début des négociations sur la gouvernance, les ressources humaines et le choix d'implantation du site.

comme suffisamment mûr (Figure 18) pour permettre de commencer à réfléchir à la fois à son financement, à sa gouvernance et à sa localisation.

Rapidement, la Chine, la Corée du Sud puis l'Inde se sont joints à l'effort et, en 2005 à Moscou, un premier accord entre les 35 pays a été signé, l'Europe représentant 29 pays (les 28 de l'Union européenne, ainsi que la Suisse). Un accord international solennel a ensuite été signé en 2006 à l'Élysée (Figure 19) pour mettre sur pied ce programme avec un engagement minimal sur 42 ans des 7 partenaires : l'accord ITER.

Aujourd'hui, ces partenaires représentent plus de 50 % de la population mondiale et 85 % du produit intérieur brut, c'est-à-dire que ce projet a toutes les garanties d'être soutenu et pérenne. Pourquoi tous ces pays se sont-ils engagés ? La raison est qu'ils mesurent que, seul, aucun pays, quelle que soit sa puissance, ne pourrait espérer réussir à faire la démonstration attendue dans de meilleurs délais. ITER mettra sans doute une vingtaine d'années pour construire la machine et faire cette démonstration. Un pays seul n'arriverait au mieux qu'à l'échelle du siècle, ce qui n'est pas à la mesure de l'urgence énergétique et climatique.

## 2.2. Le fonctionnement du Tokamak ITER

La Figure 20 représente l'image du Tokamak découpé comme un fruit en deux. La section torique de la chambre à vide figure en couleur orange. C'est dans cette enceinte,



Figure 19

Le 21 novembre 2006, l'accord ITER est signé au palais de l'Élysée, les sept membres d'ITER (Chine, UE, Inde, Corée, Russie, États-Unis) représentent plus de 50 % de la population mondiale et 85 % du PIB de la planète.

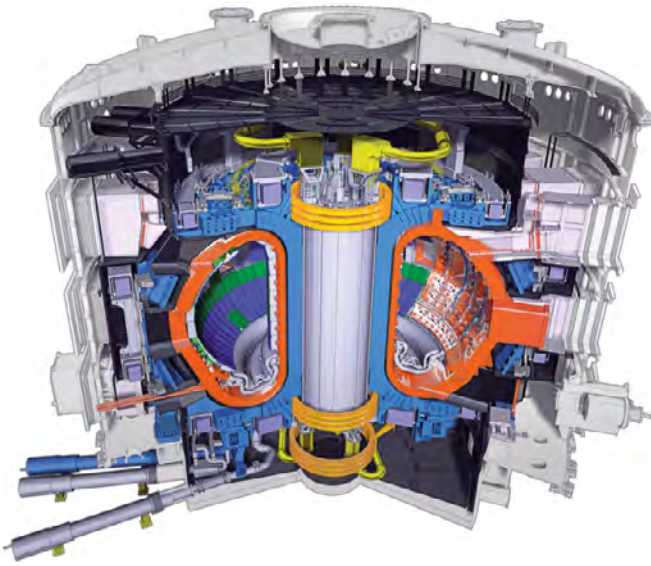


Figure 20

Schéma du Tokamak ITER. La chambre à vide pèse environ 8 000 tonnes. Les bobines verticales pèsent chacune respectivement 360 tonnes. Les bobines horizontales pèsent chacune respectivement entre 200 et 400 tonnes. Le solénoïde central pèse, lui, 1 000 tonnes. Au total, le Tokamak ITER pèse environ 23 000 tonnes – c'est le poids de 3,5 tours Eiffel.

de près de 1 800 mètres cubes, que l'on fera le vide ; sa paroi (une double paroi) sera parcourue par une circulation d'eau qui captera l'énergie de fusion sous forme de chaleur.

Comment capture-t-on l'énergie ? Du point de vue de l'énergie, on peut résumer l'essentiel de la réaction de fusion de l'hydrogène à la production de deux particules qui

partent avec une énergie cinétique considérable, le noyau d'hélium et le neutron.

L'hélium, qui emporte cinq fois plus d'énergie que l'énergie de la collision, reste confiné dans le plasma et son énergie sert à auto-chauffer le plasma. Lorsqu'il atteint la température du plasma, on le soutire avec le reste du combustible d'hydrogène et de deutérium qui n'a pas encore fusionné pour obtenir le rendement optimisé.

Le neutron, lui, s'échappe de la cage magnétique puisque par nature il n'est pas sensible au champ magnétique. Il va venir en collision avec la paroi ; on a recouvert celle-ci de tuiles de béryllium<sup>5</sup>, qui ont la vertu d'adsorber le neutron, transformant ainsi son énergie cinétique en énergie thermique. Cette étape porte la température de la paroi à environ de 200 °C et fait passer l'eau à l'état de vapeur, utilisé ensuite pour activer des turbines.

L'enceinte à vide, le cœur du dispositif, est environnée d'une cage magnétique constituée de 18 bobines<sup>6</sup> verticales, de 6 bobines horizontales et d'une bobine centrale, représentées sur la *Figure 20*, respectivement en bleu ou en blanc.

5. Béryllium : c'est l'élément chimique de numéro atomique 4, une source complémentaire de neutrons dans le réacteur expérimental à fusion d'ITER.

6. Bobine : elle est construite à partir d'un fil conducteur isolé enroulé autour d'un noyau. Ce noyau peut être fait de matériau magnétique comme le fer doux, ou de matériau non magnétique tel que le carton ou le plastique. Une bobine est caractérisée par son inductance, c'est-à-dire l'aptitude à s'opposer à la variation de l'intensité du courant qui la traverse.

L'ensemble de cette cage magnétique et de ses bobines, susceptible d'être réchauffé au contact de la chambre à vide, est cependant maintenu à une température inférieure à 270 °C en dessous de zéro, qui est la température en dessous de laquelle le matériau que nous utilisons reste supraconducteur<sup>7</sup>, c'est-à-dire ne consomme pas d'énergie lorsqu'il est traversé par le courant électrique.

Le courant électrique opérationnel a une intensité de 70 000 ampères. Cette intensité est nécessaire pour produire un champ magnétique assez puissant d'une part pour assurer la qualité du confinement du plasma dans les lignes de champ magnétique et d'autre part créer l'accélération nécessaire aux réactions de fusion.

L'ensemble du dispositif est installé dans un cryostat<sup>8</sup>, qui assure la température de moins 270 °C (c'est-à-dire 4 °C seulement au-dessus du zéro absolu) ; le cryostat est une « grande boîte » de 30 mètres de diamètre, 30 mètres de hauteur et soumise à un vide poussé pour éviter les pertes d'énergie. On aura là l'écart de température le plus extrême qui existera jamais – y compris dans l'univers –, 150 millions de degrés au centre du plasma et à moins de 2 m de là moins 270 °C : c'est ce défi difficile à imaginer que nous avons à

7. En dessous d'une certaine température, un matériau peut devenir supraconducteur, c'est-à-dire qu'il n'oppose plus aucune résistance au passage du courant électrique, il ne dissipe pas d'énergie.

8. Cryostat : appareil servant à conserver une substance à basse température.

relever ! Il oblige à inventer les méthodes les plus sophistiquées pour assembler tous ces composants, une masse totale d'environ 23 000 tonnes... mettre 3 tours Eiffel et demi dans la fameuse « boîte » de 30 mètres sans nuire aux performances thermiques hors du commun exigées.

Revenons sur le défi thermique que pose ITER. Il s'agit d'apporter dans l'enceinte dix fois plus d'énergie thermique que l'énergie apportée sous forme de chaleur. C'est la condition nécessaire au démarrage du plasma. Comment cela marche ? On commence par faire le vide, on injecte ensuite deux grammes d'hydrogène dans l'enceinte à vide. On excite ensuite ces deux grammes par une décharge électrique, à l'instar de ce qu'on fait dans les tubes fluorescents ; on sépare les électrons des noyaux et ces particules chargées se couplent aux bobines et soutirent l'énergie magnétique. Il faut bien sûr entretenir celle-ci pour effectivement accélérer les noyaux.

À partir d'une température de l'ordre de 40 millions de degrés, on a bien progressé mais on reste loin de l'atteinte de la température finale nécessaire, les 150 millions de degrés. À ce stade, on utilise une excitation supplémentaire par des milliers de générateurs micro-ondes, qui en une seconde vont injecter l'énergie nécessaire et permettre le démarrage du plasma et entrer en phases d'auto-entretien où les atomes d'hélium vont jouer leur rôle (voir ci-dessus).

Il s'agit là d'un défi technique extraordinaire à gagner par une équipe de 35 pays (Figure 21).

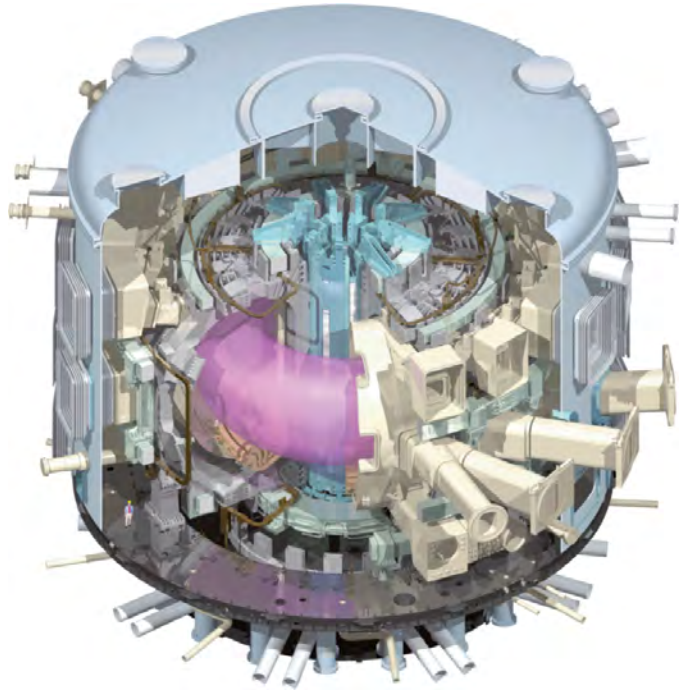


Figure 21

*Schéma du Tokamak ITER. Il devra être capable de générer dix fois plus d'énergie qu'il n'en aura reçue.*

### 2.3. L'organisation et défis d'ITER

Si extraordinaire qu'il soit, le défi technique de la démonstration du procédé de fusion industrielle pourra être gagné. C'est le pari que font tous les pays participants à ITER. On sera alors en face d'une rupture technologique majeure qui entraînera une rupture industrielle majeure, avec la construction de peut-être plusieurs centaines de centrales du type évoqué plus haut. En participant à ITER, les acteurs préparent leurs champions industriels à faire la démonstration que les composants extrêmement innovants et complexes (matériaux,

précisions) qui seront parties intégrantes du système seraient à leur portée. Ils ont donc constitué un ensemble de sept agences domestiques qui fourniront en nature les composants qu'il faudra intégrer (Figure 22).

On devine tout de suite les efforts considérables de coordination entre les différentes équipes qui sont à surmonter pour que soient effectivement obtenues les fournitures en nature évoquées dans le cadre de l'accord ITER. Les pays non européens fournissent en valeur l'équivalent de 9 % du coût de la construction et l'Europe cinq fois plus car c'est en Europe qu'est installé l'équipement (Figure 23).

La Figure 24 donne à nouveau l'image du Tokamak et fait

ressortir la complexité de l'approvisionnement des composants résultant de l'implication de plusieurs partenaires sur chacun des équipements. C'est que chacun voulait être sur une courbe d'apprentissage et prendre la juste proportion des difficultés. En revanche, il est acquis que toute la propriété intellectuelle, tout le savoir-faire industriel, le « *know-how* », sera partagé entre tous. Par exemple, si une entreprise coréenne a mis au point une technologie qui n'a pas été effectivement expérimentée par une équipe américaine, l'équipe américaine bénéficiera tout de même du savoir-faire en question.

La construction de la cage magnétique géante (Figure 25) donne l'exemple d'un défi



Figure 22

Schéma de l'organisation d'ITER, une équipe centrale et sept agences domestiques.



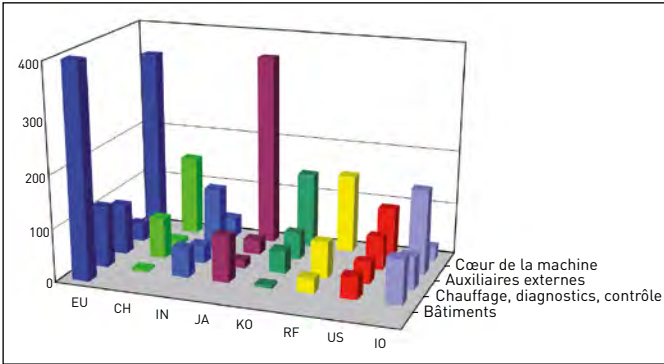


Figure 23

Des fournitures en « nature » : les sept membres d'ITER fabriquent les pièces de la machine et des auxiliaires. L'Europe construit en outre la quasi-totalité des bâtiments.

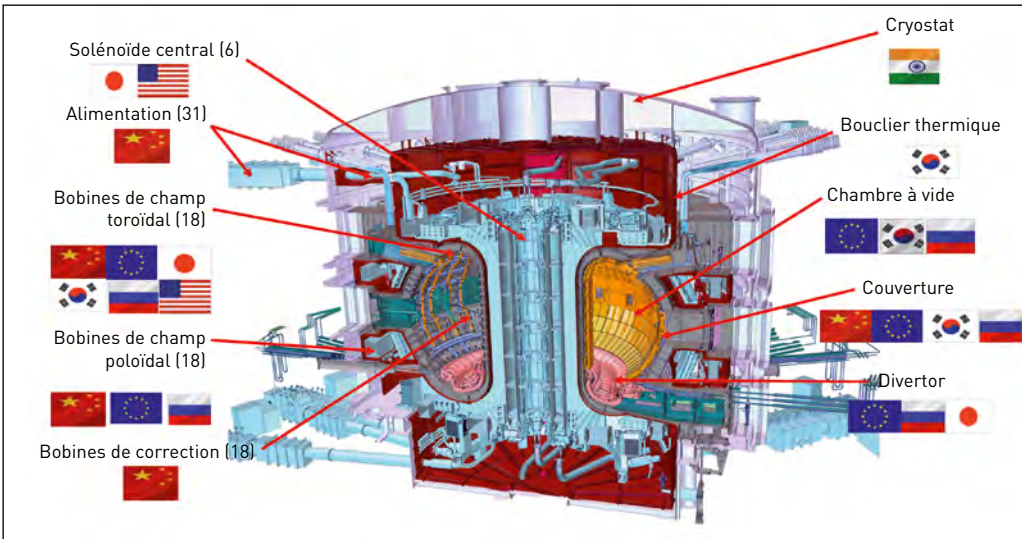


Figure 24

Schéma du Tokamak montrant la provenance de ses différents éléments.

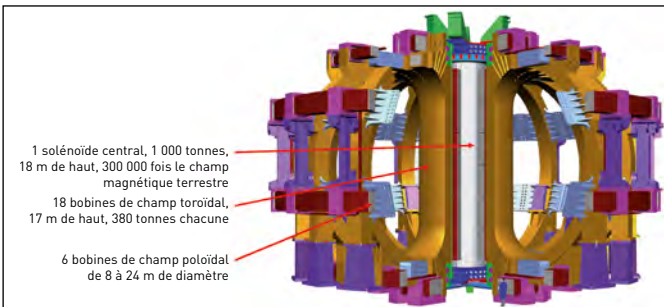


Figure 25

Schéma du Tokamak, en blanc/gris au centre : la bobine centrale, en ocre : les 18 bobines verticales et en rouge les 6 bobines horizontales.

particulièrement spectaculaire. On remarque sur cette image le petit personnage en bas à droite. Même s'il fait 2 mètres, la cage fait 20 mètres de haut, 20 mètres de diamètre, rassemblant 18 bobines verticales, 6 bobines horizontales et la bobine centrale. Il faut que l'axe magnétique de cette cage soit positionné avec une précision inférieure au quart de millimètre avec l'axe géométrique de l'enceinte à vide.

Il faut réaliser l'exigence de cette extrême précision. On doit faire circuler les particules d'hydrogène à des vitesses extrêmement élevées, dans des conditions telles que, si leur trajectoire n'est pas parfaitement conforme à la géométrie nécessaire, on va « aller dans le décor », c'est-à-dire heurter la paroi avant d'avoir eu la collision atomique nécessaire. Le défi d'ITER c'est donc à la fois de pouvoir manipuler, fabriquer des composants de très grande taille, de l'ordre de 20 mètres, avec des masses qui peuvent atteindre le millier de tonnes, et de les assembler avec une précision extrême. C'est l'alliance des

contraires : des dimensions colossales mais des précisions extrêmes ! Pour ce qui est des dimensions, les conditions sont plutôt familières de la construction navale (*Figure 26*), mais la précision exigée est celle des horlogers (*Figure 27*).

La *Figure 28* donne l'exemple d'une tâche en cours : il s'agit d'assembler près de 10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs refroidis à 270 °C en dessous de zéro degré.

Les bobines sont construites avec des matériaux supraconducteurs ; du point de vue de la chimie, c'est l'équivalent de céramiques. Les forces magnétiques entre les composants sont tellement considérables que si les bobines, leurs câbles supraconducteurs, n'étaient pas enchâssés dans des boîtiers les câbles se déchireraient. On est donc obligé d'enchâsser les câbles dans des boîtiers. Il faut que l'écart entre la surface du câble supraconducteur et la surface du boîtier soit inférieur au quart de millimètre alors que la taille du composant est de 20 mètres de long. La bonne



*Figure 26*

*Exemple de dimension de type construction navale. On a ici un portique géant fourni par la Corée qui va manipuler des charges qui, une fois pré-assemblées, pèseront environ 1 500 tonnes.*



Figure 27

Exemple de la précision d'horlogerie requise : dans les ateliers de Mitsubishi Heavy Industry, au Japon, insertion verticale du bobinage d'un aimant de champ toroïdal (TF) dans son boîtier. L'ensemble pèse plus de 300 tonnes et les tolérances d'assemblage sont de l'ordre de 0,2 millimètre.

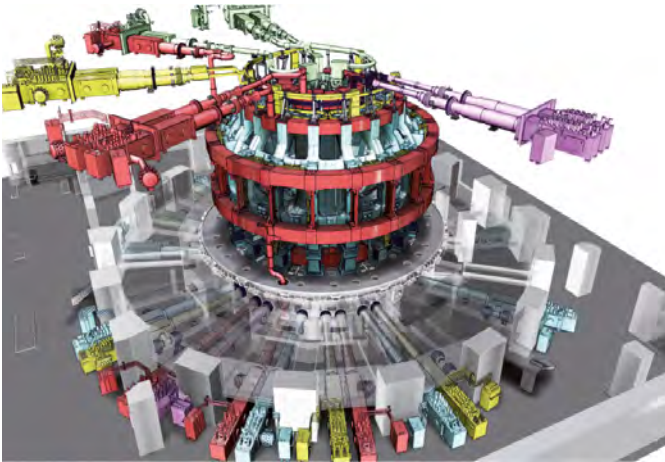


Figure 28

Sur ce schéma du Tokamak, on voit en couleur les aimants supraconducteurs (10 000 tonnes) produisant le champ magnétique qui génère, confine, modère et contrôle le plasma dans la machine. Les aimants de niobium-titane ou niobium-titane sont refroidis à 4 °K (-269 °C) par un flux d'hélium supercritique.

nouvelle est que l'industriel choisi est capable de réaliser cet exploit : nous avons déjà cinq bobines qui ont été faites et totalement qualifiées. Il y en reste certes encore treize à produire, mais on sait aujourd'hui que ces exploits-là sont des exploits accessibles.

#### 2.4. Le calendrier d'ITER

Ce projet s'est engagé en 2016 après une période de développement préliminaire. Il

a fait l'objet d'une revue de projet devant le conseil ITER (Figure 29).

Cette revue de projet a conduit à un calendrier et évidemment à une estimation des coûts associés avec une perspective d'un premier plasma en décembre 2025, donc dans moins de cinq ans maintenant, les premières expériences de physique en 2028 et le plasma de pleine puissance en 2035. Pour le premier plasma, on fera fusionner de l'hydrogène



Figure 29

Le conseil d'ITER se réunit deux fois par an (juin et novembre) au siège d'ITER à Saint-Paul-lez-Durance.

standard, qui ne produira pas d'énergie mais garantira que l'assemblage de l'équipement a été correct. On devra ensuite ajouter des composants de l'équipement futur les uns après les autres.

La bonne nouvelle est que depuis 2015 nous sommes sur la route du calendrier qui

a été donné à cette époque, et nous avons déjà reçu un certain nombre des composants (petits triangles noirs sur la Figure 30). Tous doivent être prêts avant la fin 2022 ou au tout début de 2023. Le cryostat sera fermé fin 2024, et espérons que nous démontrerons

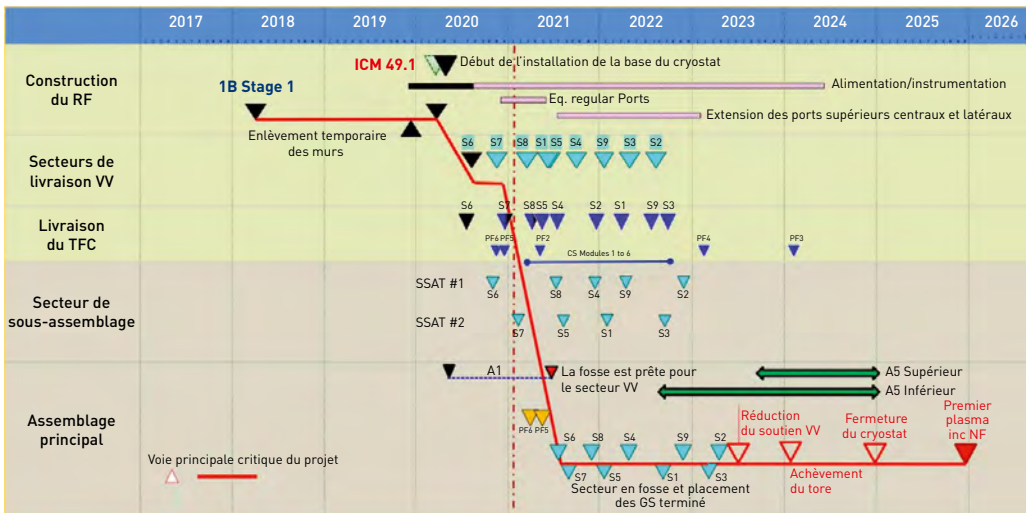


Figure 30

Détail du calendrier de construction, les petits triangles noirs représentant les composants déjà reçus.

en 2025 que nous sommes au rendez-vous de la démonstration du premier plasma.

Au-delà de cela, nous allons devoir ajouter les éléments des annexes d'exploitation. Alors qu'il y aura des dizaines de kilomètres de tuyauteries, de câbles, etc., en place au moment de l'installation, il serait déraisonnable d'installer artisanalement la première paroi qui devra collecter l'énergie. Cette paroi est constituée de 440 tuiles et chacune de ces tuiles, avec son support refroidi individuellement, pèse 4,5 tonnes. Seul un robot pourra les installer et cela demandera environ deux années de travail.

On ne peut évidemment se permettre d'installer cette paroi de collecte de l'énergie puis de constater qu'il y a une fuite et devoir démonter les nombreuses tuiles en question pour trouver la fuite et la réparer. Nous avons donc imaginé une approche par étapes où c'est juste après le premier plasma qu'on installe les moyens de collecte de l'énergie. On permet aux physiciens,

avec cette capacité ajoutée, de faire de premières expériences avec un combustible approprié. Puis on ajoutera des chauffages pour atteindre plus rapidement les 150 millions de degrés. Enfin, la dernière étape sera celle du recyclage du combustible. La chimie jouera alors un rôle essentiel puisqu'il va s'agir de séparer les constituants du mélange de l'hélium, de l'hydrogène deutérium, de l'hydrogène tritium. Avec une parfaite continuité et une grande précision, il faudra séparer le 1 % d'hélium produit des 99 % autres et recycler. La chimie sera donc au premier plan (Figure 31).

Pour conclure, voici quelques précisions complémentaires sur le point d'avancement des travaux. Depuis le lancement du programme, et notamment à partir de 2015, on suit toutes les activités nécessaires à l'achèvement du premier plasma, soit environ 25 000. À chacune d'entre elles, il a été donné un poids, et donc à chaque fois qu'on a rempli l'objectif d'une activité, on associe le poids dans la somme

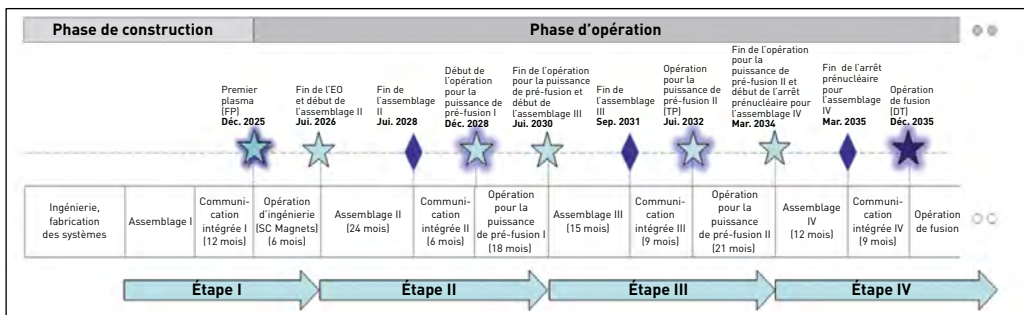
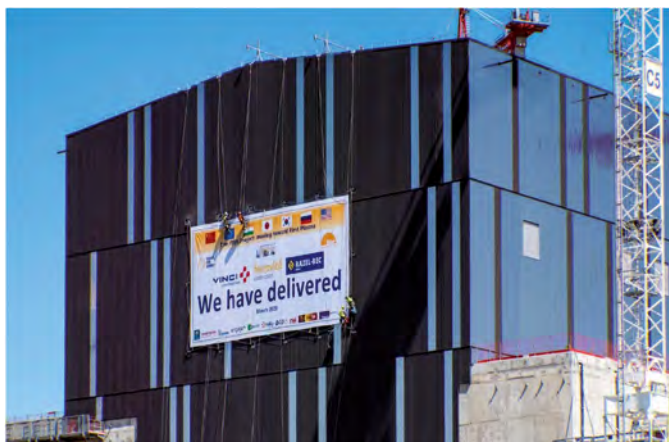


Figure 31

Calendrier de construction et d'opération du plasma. Le calendrier est basé sur une approche par étapes. Cette proposition a été élaborée en étroite coordination avec les agences domestiques. Il prend en compte les contraintes budgétaires des membres d'ITER.

cumulée des activités accomplies. Aujourd'hui, on est à 72 % des tâches qui sont nécessaires pour aller jusqu'au premier plasma (*Figure 32*).



*Figure 32*

Photographie de l'avancement du projet des tâches sur le site français pour aller jusqu'au premier plasma.

Comme depuis 2015 nous sommes sur un rythme d'environ 0,6-0,7 % de croissance par mois et qu'il nous reste aujourd'hui 58 mois, nous sommes capables d'atteindre les 38 % qu'il nous manque. En restant lucides et humbles, nous savons que l'étape la plus compliquée est l'étape d'assemblage et de qualification. C'est un défi qui est encore devant nous et... assez serré.

### 2.5. Le site d'ITER : fabrication, acheminement, assemblage : un casse-tête géant

Le chantier ITER (*Figure 33*) est une grande plateforme d'environ 1 kilomètre de long et 500 mètres de large. Au centre, se trouve le « complexe Tokamak », le centre névralgique du système.



*Figure 33*

Photographie aérienne du chantier ITER et ses différents bâtiments et éléments.

C'est un grand bâtiment enfoui 18 mètres sous le sol, reposant sur une grande dalle de 120 mètres de long et 80 mètres de large, elle-même reposant sur des poteaux antisismiques pour éviter les effets du moindre mouvement qui pourrait désassembler les différents composants assemblés. Derrière ce Tokamak, se trouve le « hall d'assemblage », puis un certain nombre d'équipements nécessaires, comme le poste électrique, caractérisé par une très grande dimension rendue indispensable par la très grande quantité d'électricité qu'il faut prélever sur le réseau au démarrage du système – le démarrage du plasma, qui pourtant ne dure qu'une fraction de seconde (voir plus haut). Il faudra ensuite convertir l'énergie thermique produite par la fusion en énergie électrique et la coupler au réseau européen au moyen de bobines continues, comme adapté au fonctionnement d'une source d'énergie alternative.

Il y a dix ans n'existait qu'une plateforme pratiquement sans aucun équipement si ce

n'est une petite excavation au centre et aujourd'hui, la plateforme est un peu occupée. La **Figure 34** montre l'ampleur spectaculaire des progrès réalisés.

Cette année ont été réalisées des étapes majeures (**Figure 35A**) : on a réussi à positionner la base du cryostat, qui est une grande soucoupe, comme une « assiette creuse » d'une certaine manière, mais qui pèse tout de même 1 250 tonnes et fait 30 mètres de diamètre, ainsi que le cylindre supérieur, puisque le tout peut être comparé à une boîte de conserve géante ; sur le fond sont positionnés des cylindres les uns sur les autres avec une précision inférieure au demi-centimètre. Il s'agit, on le voit, de deux cercles de trente mètres de diamètre et plusieurs centaines de tonnes à ajuster l'un sur l'autre puis soudés pour qu'il n'y ait aucun risque de fuite dans l'enceinte (**Figure 35B**).

La descente de la fameuse soucoupe de la base dans le puits est visible sur la **Figure 36**. De chaque côté il y avait moins de quelques



**Figure 34**

Avancement du chantier d'ITER : A) Photographie du site prise en août 2010 ; B) Photographie du site prise en novembre 2020.

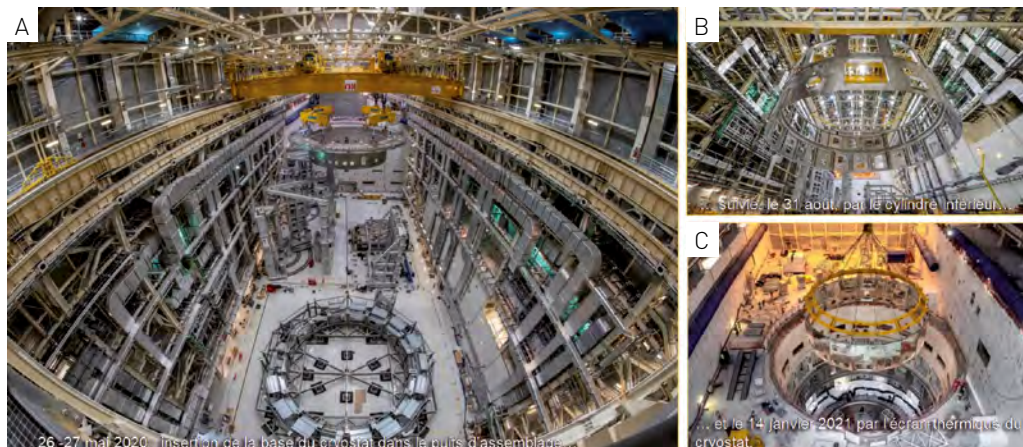


Figure 35

A) 26 au 27 mai 2020 : insertion de la base du cryostat dans le puits d'assemblage ; B) Le 31 août 2020 : ajout du cylindre inférieur sur la base du cryostat ; C) Le 14 janvier 2021 : ajout de l'écran thermique du cryostat.

centimètres par rapport au mur de protection biologique associé. On a réussi « l'accostage » et le positionnement sur les pelotons (Figure 37-38).

En 2020, de nombreux arrivages d'équipements à assembler sont intervenus, en particulier les bobines provenant d'Europe et du Japon, ainsi que les secteurs de la chambre à vide (Figure 39). On a découpé la chambre à vide (1 800 mètres cubes) en neuf secteurs comme des quartiers d'orange (chaque quartier pèse 450 tonnes) ; les

opérations actuelles consistent à les rassembler les uns avec les autres.

C'est dans ces conditions que l'on a invité en fin juillet 2020 tous les chefs d'États à s'exprimer sur les avancements du projet ITER, donc les chefs des sept États mentionnés plus haut se sont exprimés, et le chef d'État français a apporté son soutien à ITER, qu'il a qualifié d'« acte de confiance dans l'avenir ». C'est effectivement cet acte de confiance dans la science qui nous anime (Figure 40).



Figure 36

La base du cryostat, 30 mètres de diamètres, 1 250 tonnes, est la plus massive des pièces de la machine. C'est une des quatre sections du « thermos » géant, fourni par l'Inde, qui enveloppe le Tokamak.



Figure 37

La base du cryostat repose sur un système de support (ancrage et rotules) qui redistribue les forces horizontales et de torsion générées par la production de plasma dans le Tokamak.





Figure 38

Un système de vérins hydrauliques a supporté la base dans l'attente des opérations finales d'ajustement avec des coins de plus d'1 mètre de diamètre ajusté au millimètre près.

Vérin hydraulique : dispositif qui convertit de l'énergie de pression en un mouvement rectiligne (au sein du piston). Il est composé d'un tube dans lequel une tige avec un piston peut se déplacer.



Figure 39

Arrivages massifs de différents éléments du Tokamak en 2020.



Figure 40

Le 28 juillet, lors du lancement officiel de la phase d'assemblage, le président Emmanuel Macron a porté son soutien à ITER : « ITER est un acte de confiance en l'avenir [...]. Grâce à la science, demain peut-être meilleur qu'hier ».

Après l'arrivée sur place des premiers composants, a commencé leur assemblage au sein du « poste d'assemblage » (Figure 41), dans lequel on doit assembler le secteur de la chambre à vide (450 tonnes, 20 mètres de hauteur) avec « une peau de protection

thermique », qui gère le considérable écart de température entre le tokamak – l'eau qui circule dans la double paroi à 200 degrés – et la bobine, qui est à -270 °C (Figures 42-43).

Le secteur représenté sur la Figure 42 a été terminé et qualifié début 2021 ; il va falloir

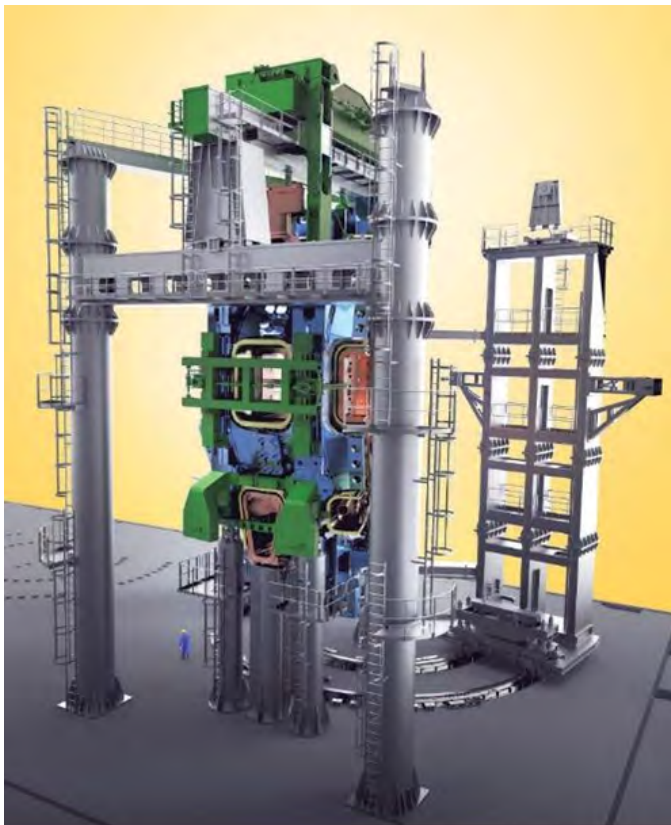


Figure 41

Portique de pré-assemblage ou poste d'assemblage.



Figure 42

Avec la livraison, début août, d'un premier secteur de chambre à vide fabriqué en Corée, ITER va pouvoir procéder au premier des neuf « pré-assemblages » du cœur du Tokamak.



Figure 43

Un « pré-assemblage » est constitué d'un secteur de chambre à vide, deux bobines de champ toroïdal et une section de bouclier thermique.

quelques mois pour l'assurer de manière correcte. Au-delà de l'assemblage du Tokamak, nous travaillons activement à ce que tous les systèmes

annexes nécessaires soient installés correctement et en temps utile. Il s'agit par exemple de 5,5 kilomètres de lignes cryogéniques qui

permettront la circulation de 25 tonnes d'hélium liquide à  $-270\text{ C}$  (Figure 44). Il s'agit aussi des dispositifs de conversion entre le courant alternatif et le courant continu avec 8 kilomètres de lignes électriques en aluminium très pur (Figure 45) démontré comme parfaitement efficace. Le système de refroidissement est sur le point d'être qualifié, puis il y a ce qu'on appelle le phénomène de compensation de la puissance réactive quand on va prélever sur le réseau,

une fraction de seconde, les 500 Mégawatts nécessaires au démarrage du plasma (Figure 46-47). Bien évidemment, il ne faut pas perturber le réseau et donc il y a là aussi des efforts très importants qui sont déployés pour maîtriser tout cela.

En parallèle de ces installations en cours, la fabrication se poursuit en Europe comme les bobines en Italie ; la Figure 48 montre la bobine avec ses circuits en céramique avant qu'elle ne soit



Figure 44

Installation de 5,5 km de lignes cryogéniques.



Figure 45

Modes de conversion entre le courant alternatif et le courant continu avec 8 kilomètres de tuyauteries électriques.



Figure 46

Système d'évacuation de la chaleur (1 200 MW).



Figure 47

Système de compensation de la puissance réactive (1 hectare d'équipements de haute technologie).



Figure 48

Bobines de champ toroïdal, fabriquées en Europe. La première bobine a été livrée sur site au mois d'avril 2020, la seconde en septembre et la troisième en décembre.

enfermée dans son enceinte. On note la complexité du système d'échange de la chaleur à double enceinte pour assurer effectivement un parfait transfert thermique. Et on est en train de fabriquer les plus grandes bobines horizontales,

de 24 mètres de diamètre (Figure 49).

Des fabrications d'éléments d'équipements de toutes natures sont en cours dans tous les pays, conformément aux plans d'avancements prévus (Figures 50-56).

Figure 49

Bobines de champ poloïdal (complémentaire du champ toroïdal), du fait de leur taille (17-24 m de diamètre), quatre des six bobines sont fabriquées sur site par l'Europe.



Figure 50

La chambre à vide : l'Europe fabrique cinq des neuf secteurs de la chambre à vide du Tokamak. Tous sont en cours de fabrication avec des taux de finalisation allant de 66 % à 89 %.



Figure 51

Plus de 1 600 tonnes d'équipements destinés au système d'alimentation des aimants sont fournis par la Chine.



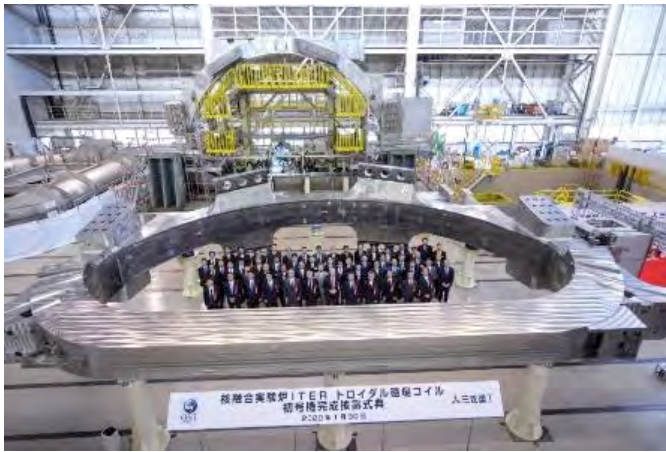


Figure 52

Le Japon fournit neuf des dix-neuf bobines de champ toroïdal (dont un rechange) du Tokamak. La première d'entre elles a été livrée le 17 avril 2020, la deuxième le 3 juillet.



Figure 53

Fabriquées en Inde, pour être assemblée et soudées sur site, les derniers éléments du cryostat ont été livrés le 29 janvier 2021.



Figure 54

La Corée est responsable de la construction de quatre des neuf secteurs de la chambre à vide. Le premier a été livré. Les taux de finalisation des trois autres sont de 86 à 99 %.



Figure 55

La fabrication russe de la bobine poloïdale n° 1 (9 mètres de diamètre, 193 tonnes) entre dans sa phase ultime. Cette bobine est la plus petite des six bobines annulaires de la machine. Elle sera installée peu avant la fermeture du cryostat.



Figure 56

Les six modules du solénoïde central (plus un rechange) abordent les dernières étapes de la fabrication dans les ateliers de General Atomics près de San Diego en Californie. Les tests du premier module sont finalisés. Ils sont attendus sur site mi-2021.

Solénoïde : système constitué d'un fil électrique en métal enroulé régulièrement en hélice de façon à former une bobine longue.

## Perspectives sur la fusion de l'hydrogène

Tous les pays acteurs sont intensément mobilisés pour réussir cette opération technologique (*Figures 57-61*) hors du commun qu'est ITER. Des initiatives privées parallèles visent à mener des démonstrations complémentaires au programme principal, et c'est plus que bienvenu (*Figure 62*).

Figure 57

Premier exemple de coopération pour ITER : le JET (« Joint European Torus ») se prépare pour une campagne DT, c'est-à-dire qu'il subit des travaux de mise à jour dans le but d'augmenter ses capacités et aider au développement du projet d'ITER.

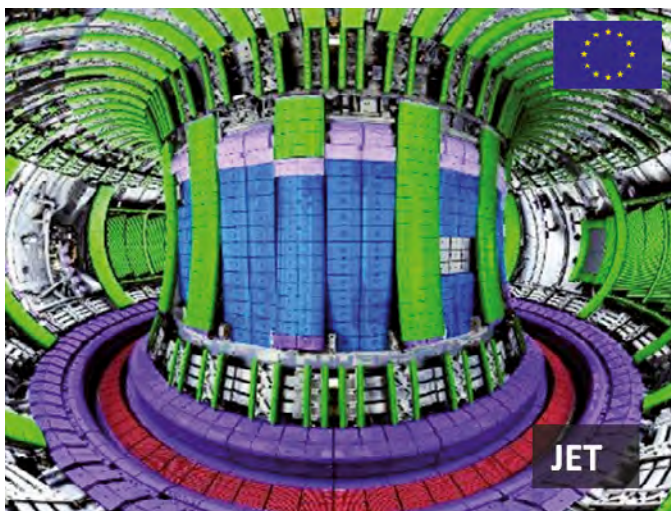




Figure 58

Deuxième exemple de coopération pour ITER entre le Japon et l'Union européenne ; les aimants du Tokamak JT60-SA sont refroidis pour être mis en service de façon imminente. Le JT60-SA, une amélioration du Tokamak japonais JT60, a été conçu pour soutenir les opérations d'ITER en servant de programme de recherche et développement complémentaire et pour chercher la meilleure optimisation pour le fonctionnement des centrales de fusion du futur.

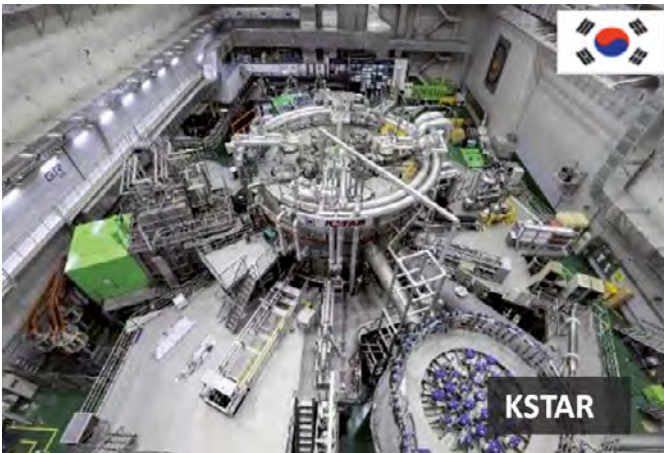


Figure 59

Troisième exemple de coopération : un programme entre ITER et la Corée utilise le Tokamak KSTAR qui sert pour faire des tests d'atténuation des disruptions en configuration « ITER-like ».

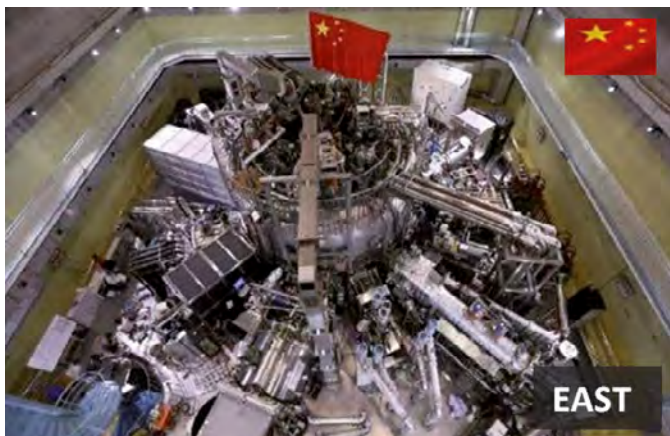


Figure 60

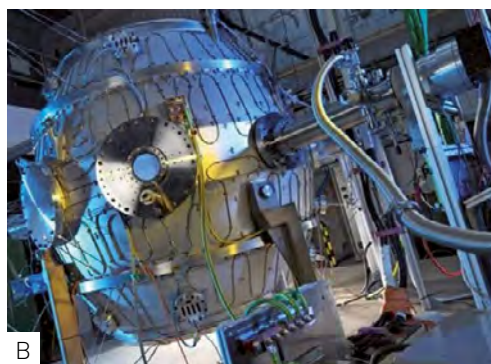
Quatrième exemple de coopération d'ITER avec la France et le Tokamak WEST, notamment, au travers d'une phase d'essai et d'exploitation des composants de revêtement par plasma de type ITER dans le Tokamak achevé en 2019, puis par une phase de longue durée pour tester le mode H à impulsions longues et un fonctionnement en régime permanent.

Figure 61

Cinquième exemple de coopération internationale pour ITER. Le Tokamak chinois a réussi en 2019 à obtenir une série de plasmas stationnaires en mode H.



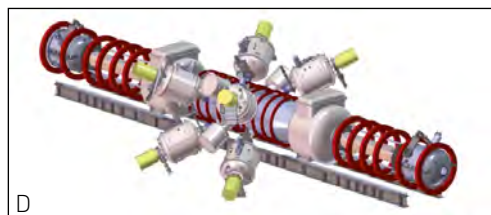
A



B



C



D



E

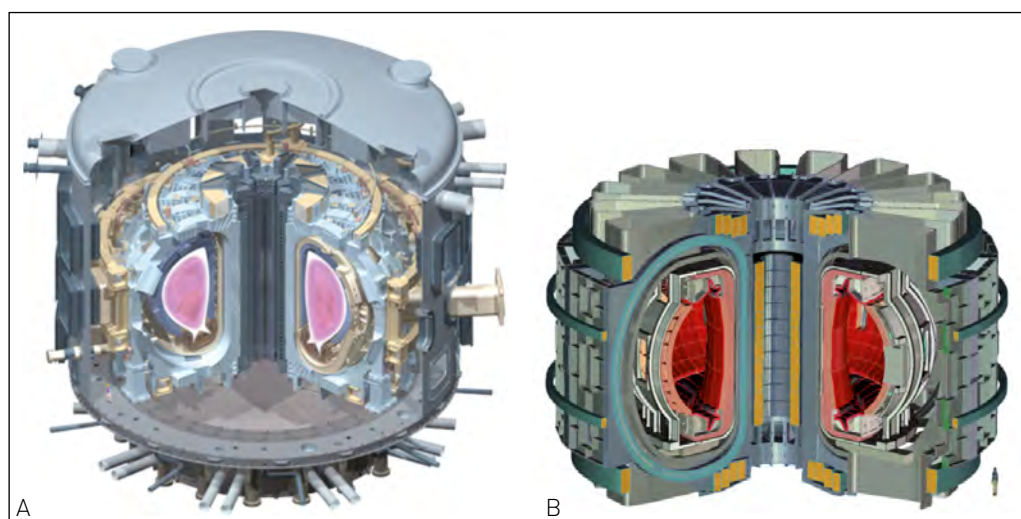
Figure 62

Le développement récent d'initiatives privées, principalement dans le monde anglo-saxon et parfois associées au monde universitaire, renforce la crédibilité de la production d'énergie par fusion contrôlée. En explorant des voies souvent originales, certaines startups contribuent à la connaissance fondamentale autant qu'au développement technologique. ITER et la communauté de fusion sont attentifs à ces développements qui ne peuvent que bénéficier au progrès de la connaissance. Mais les lois de la physique s'imposent partout et certains projets, certaines annonces manquent de crédibilité. A) General Fusion, Canada ; B) Tokamak Energy, Royaume-Unis ; C) TAE Technologies, États-Unis ; D) Tri Alpha, États-Unis ; E) Commonwealth Technologies, États-Unis.



Nous sommes donc sur la route de l'étape de recherche et développement qu'est ITER (*Figure 63*), mais déjà un certain nombre de pays réfléchissent à l'équipement industriel final qui permettra à l'installation d'être connectée au réseau.

On pose souvent la question du délai dans lequel il faut espérer avoir connexion effective de l'installation de fusion au réseau. La *Figure 64* met



*Figure 63*

ITER et au-delà. Les membres d'ITER ont engagé, individuellement, les études conceptuelles de la « machine suivante », collectivement baptisée « DEMO ». A) Schéma du réacteur d'ITER ; B) Schéma de DEMO, le démonstrateur industriel, dernière étape avant la série.



*Figure 64*

Vers l'industrialisation : en 2040, au terme de cinq années d'opérations à pleine puissance et d'optimisation des systèmes, ITER devrait avoir démontré la faisabilité de la fusion d'hydrogène et convaincu décideurs politiques et industriels de son potentiel. En 2045, l'industrie pourrait envisager de lancer la construction des premières centrales de fusion. Entre 2055 et 2060, ce serait la phase d'industrialisation. Puis à partir de 2060, c'est l'aire possible d'un potentiel mix énergétique 50-60 % fusion/fission et 40-50 % renouvelables.

en évidence le fait que l'on peut attendre ce résultat pour les alentours des années 2060, que cette technologie sera susceptible d'être développée. En attendant toutes les équipes sont fixées sur ce magnifique objectif de la démonstration technologique en 2025 (*Figure 65*).



*Figure 65*

*Vue panoramique du site ITER : objectif 2025 !*