



Le projet ITER - Éléments de synthèse, avancement et perspectives

Octobre 2020

Jacques PIGNAULT

Le projet ITER (« International Thermonuclear Experimental Reactor », le chemin en langue latine) a déjà fait l'objet d'un article publié dans « les Plumes de l'ARA » en 2015. Cet article est disponible sur le site de l'ARA. Après avoir décrit de façon très synthétique l'objectif visé, les participants, les modalités de financement, l'organisation et le statut de l'installation, ce qui suit s'attache à présenter l'échéancier global en vigueur aujourd'hui et les résultats espérés. En l'état, les travaux réalisés sur site ont surtout porté sur le génie civil (terrassements et construction des bâtiments). Ils ont amené le projet à un état charnière rendant possibles les opérations d'assemblage des technologies de procédé qui démarrent actuellement.

1. Carte de visite du projet ITER

L'objectif

Il s'agit de déclencher et de contrôler la réaction dans laquelle la fusion du deutérium et du tritium produit un noyau d'hélium, un neutron et de l'énergie. Cette réaction ne peut se produire que lorsque la matière est à l'état de plasma (électrons séparés des noyaux). Elle libère une énergie près de quatre millions de fois supérieure à celle que génèrent des réactions chimiques telles que la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel et quatre fois supérieure à celle de la fission nucléaire.

Obtenir cette fusion dans une enceinte expérimentale, alors qu'elle se produit depuis des milliards d'années au sein du soleil et des étoiles, nécessite que soient remplies trois conditions :

- ❖ Une température très élevée (150 M°C), pour provoquer des collisions fortement énergétiques
- ❖ Une densité de particules de plasma suffisante, pour obtenir une forte probabilité des collisions,
- ❖ Un temps de confinement suffisant, pour maintenir le plasma dans un volume défini.

En termes de performance chiffrée, l'objectif sera considéré comme atteint lorsque ITER aura démontré qu'il peut produire durant des périodes de 400 à 600 secondes (soit 10 mn) une puissance de fusion de 500 MW pour une puissance injectée en entrée de 50 MW.

Le principe de base

Pour atteindre l'objectif, les développements réalisés antérieurement (notamment en Russie, en Europe, au Japon et aux USA) ont montré la pertinence d'utiliser une machine de type « Tokamak » (cage magnétique en forme d'anneau permettant de contrôler et de confiner un plasma chaud, cf. figure 1). Cette cage a deux rôles principaux :

- ❖ engendrer et contenir les réactions de fusion au sein d'un bouclier magnétique. Puisqu'il est immatériel, ce bouclier peut résister aux températures nécessaires (150 millions de degrés) à l'enclenchement du processus de fusion,

- ❖ recueillir l'énergie transmise par les neutrons aux parois internes du Tokamak et la transformer en chaleur.

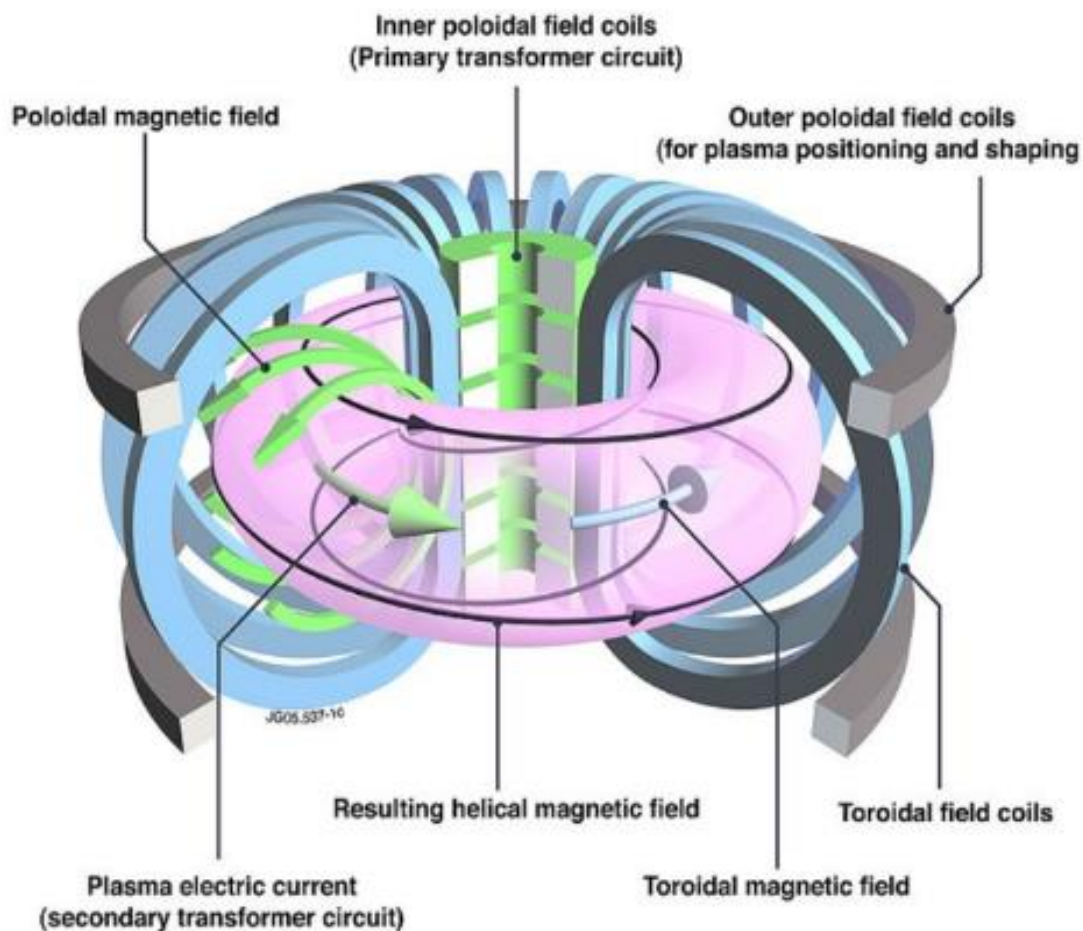


Figure 1 : principe du Tokamak (source Octarina)

Le noyau d'hélium est porteur d'une charge électrique. Il sera donc soumis aux champs magnétiques du Tokamak et restera ainsi confiné dans le plasma. Toutefois, 80 % environ de l'énergie produite sera emportée hors du plasma par le neutron qui, n'étant pas chargé électriquement, demeurera insensible aux champs magnétiques. Les neutrons seront donc absorbés par les parois du Tokamak, transférant leur énergie à ces dernières sous forme de chaleur.

Dans l'installation ITER, cette chaleur sera évacuée par des tours de refroidissement. Dans le prototype de réacteur de fusion (DEMO), qui succédera à ITER, ainsi que dans les futures installations industrielles de fusion, la chaleur sera utilisée pour produire de la vapeur et, au moyen de turbines et d'alternateurs, de l'électricité.

Les participants

Le projet a eu une très longue période de maturation. C'est en novembre 1985, à Genève, que Mikhaïl Gorbatchev propose à Ronald Reagan d'œuvrer ensemble à la conception d'un réacteur expérimental de fusion nucléaire. C'est en novembre 2010, soit 25 ans plus tard, que le montage du projet conduit à démarrer les premiers travaux de terrassement, sur le site de Cadarache, à Saint-Paul-lès-Durance (Bouches-du-Rhône).

L'accord final fut scellé le 21 novembre 2006 au palais de l'Élysée. Il stipule que les sept membres partageront les coûts de construction, d'exploitation et de démantèlement des installations, ainsi que les résultats expérimentaux et la propriété intellectuelle générée.

Les sept membres représentent au total 35 pays : Chine, UE (les 28 pays auxquels s'ajoute la Suisse), Inde, Japon, Corée, Russie, USA.

ITER Organization a également conclu deux accords de coopération technique avec des pays non-Membres : l'Australie en 2016 (au travers de l'agence australienne pour la science et la technologie ANSTO), et le Kazakhstan en 2017 (au travers du centre nucléaire national du Kazakhstan).

Il faut souligner que la Grande Bretagne, retirée de l'Union et de la Communauté européenne le 31 janvier 2020 souhaite continuer à participer. Des négociations sont en cours pour cela.

L'organisation

ITER-Organization. Cette organisation internationale a été officiellement créée le 24 octobre 2007. Elle est le maître d'ouvrage et l'exploitant nucléaire du réacteur expérimental ITER. Implantée sur le site de Cadarache, elle dispose en propre des moyens requis pour mener sa mission : construction, exploitation, mise à l'arrêt et démantèlement. On trouve à sa tête un Directeur Général (depuis le 5 mars 2015, Bernard BIGOT, ancien administrateur Général du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) qui rend compte au Conseil ITER

Le Conseil ITER. Il est responsable de la promotion et de la direction stratégique du projet. Il est composé de représentants de chaque membre du projet et se réunit au moins deux fois par an. Il nomme les hauts responsables, modifie les règlements, approuve les budgets annuels et décide de l'enveloppe budgétaire globale du projet. Le Conseil s'appuie sur les recommandations de trois comités consultatifs : science et technologie, management, audit financier.

Les agences « domestiques ». On en compte sept, une par membre. Elles sont chargées de fournir à ITER Organization les éléments de l'installation dont la fabrication leur a été confiée. Chacune de ces agences contribue à hauteur de 9% à la valeur totale du programme, à l'exception de l'Agence européenne, baptisée Fusion for Energy et basée à Barcelone, qui en prend à sa charge 46% dont la quasi-totalité des bâtiments de l'installation. Cette différence s'explique par le fait que l'Europe, et particulièrement la France, bénéficient de la plus large part des retombées économiques d'ITER, du fait du site d'accueil sélectionné.

L'Agence ITER France (AIF). Agence du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), elle a été mise en place pour gérer la contribution de la France, en tant que « pays hôte », au programme ITER : génie civil du site et de ses accès, accueil des collaborateurs et de leur famille, interface avec les autorités françaises notamment.

Le statut de l'installation

Le combustible de la future machine ITER sera un mélange gazeux constitué à parts égales de deutérium et de tritium, deux isotopes de l'hydrogène. Le tritium est un élément faiblement radioactif qui doit être confiné de manière extrêmement rigoureuse car, très mobile, il se combine avec de l'oxygène pour former de l'eau tritiée et pénètre facilement dans l'organisme à travers le cycle de l'eau. L'installation ITER a en conséquence le statut d'INB (Installation Nucléaire de Base). A ce titre, ses étapes successives de création, de mise en service, d'exploitation et de mise à l'arrêt sont soumises à examen et autorisation de l'ASN (Autorité de Sécurité Nucléaire).

Un challenge important à souligner est de garantir l'étanchéité des opérations de maintenance en milieu tritié et de la gestion des déchets technologiques associés.

2. Déroulement du projet ITER

L'échéancier global actualisé (source ITER Organization) est présenté dans le tableau qui suit.

2005 - 2007	Choix du site de Saint-Paul-lez-Durance (13) en 2005, signature de l'Accord ITER en 2006
2007 - 2010	Création d'ITER Organization en 2007, préparation de la plateforme (déboisement, nivellement). Construction entre 2008 et 2010 des voies d'accès à la plateforme (« l'itinéraire ITER ») des éléments qui arriveront par transport maritime jusqu'au golfe de Fos
2010 - 2014	Fondations du Complexe Tokamak. En 2012, décret officiel d'autorisation de création de l'Installation nucléaire de base (INB) ITER
2014 - 2021	Construction du Bâtiment Tokamak. L'agence européenne pour ITER transfère à ITER Organization le bâtiment Tokamak en mars 2020.
2010 - 2021	Construction de l'installation ITER et des bâtiments auxiliaires nécessaires au Premier Plasma
2008 - 2021	Fabrication des principaux éléments et systèmes pour le Premier Plasma
2015 - 2023	Transport (via « l'itinéraire ITER ») et livraison sur site des éléments
2020 - 2025	Assemblage (dit phase 1) de la structure principale de la machine et des systèmes nécessaires pour la production du premier plasma. La chambre à vide est formée en 2022.
2024 - 2025	Tests intégrés et mise en exploitation. Premier plasma en décembre 2025
2025 - 2026	Montée en puissance progressive de la machine
2035	Opération en deuterium-tritium

Situation à mi-2020

A la mi-2020, le projet avait réalisé 70 % du travail à accomplir pour la production du premier plasma. Il faut souligner que c'est au terme de dix ans de travaux (4 ans pour créer la fosse du Tokamak, 6 ans pour la construction du bâtiment) menés par l'agence européenne pour ITER que peuvent enfin démarrer les opérations d'assemblage des composants technologiques conçus et réalisés par les agences domestiques des différents membres, et acheminés sur site.

On recense au total un million de composants qui seront ainsi conçus, construits, acheminés, livrés, assemblés, testés et progressivement mis en service.

D'un point de vue financier, le budget du projet a connu de très importants surcoûts et semble aujourd'hui stabilisé à hauteur de 20 milliards d'euros, soit quatre fois l'enveloppe initialement prévue en 2007. Ce budget, présenté en mai 2016 par le Directeur Général d'ITER Organization, a été validé par le Conseil ITER du 16 juin 2016.

L'Union européenne, à laquelle est associée la Suisse, assure 46% du financement. Entre 2014 et 2020, 80% de la contribution européenne a été assurée par Bruxelles et 20% par la France, en tant que pays hôte. Les six autres participants apportent 9% chacun.

Il faut souligner que seulement 20% du budget est fourni en cash pour financer les dépenses de fonctionnement et les travaux. Le reste se fait en « nature ». Chaque pays livre, par l'intermédiaire de son agence domestique ITER les composants qui sont contractuellement de son ressort.

Les plus gros arrivent par bateau, à Fos-sur-Mer, et sont ensuite transportés la nuit par convoi exceptionnel sur une centaine de kilomètres.

Il est clair par ailleurs que ce mode de financement, un peu complexe à gérer, est tributaire des décisions budgétaires de chacun des états participants, elles-mêmes soumises à d'éventuelles négociations politiques.

La figure 2 présente de façon synthétique l'origine des composants principaux, telle que prévue dans les accords ITER.

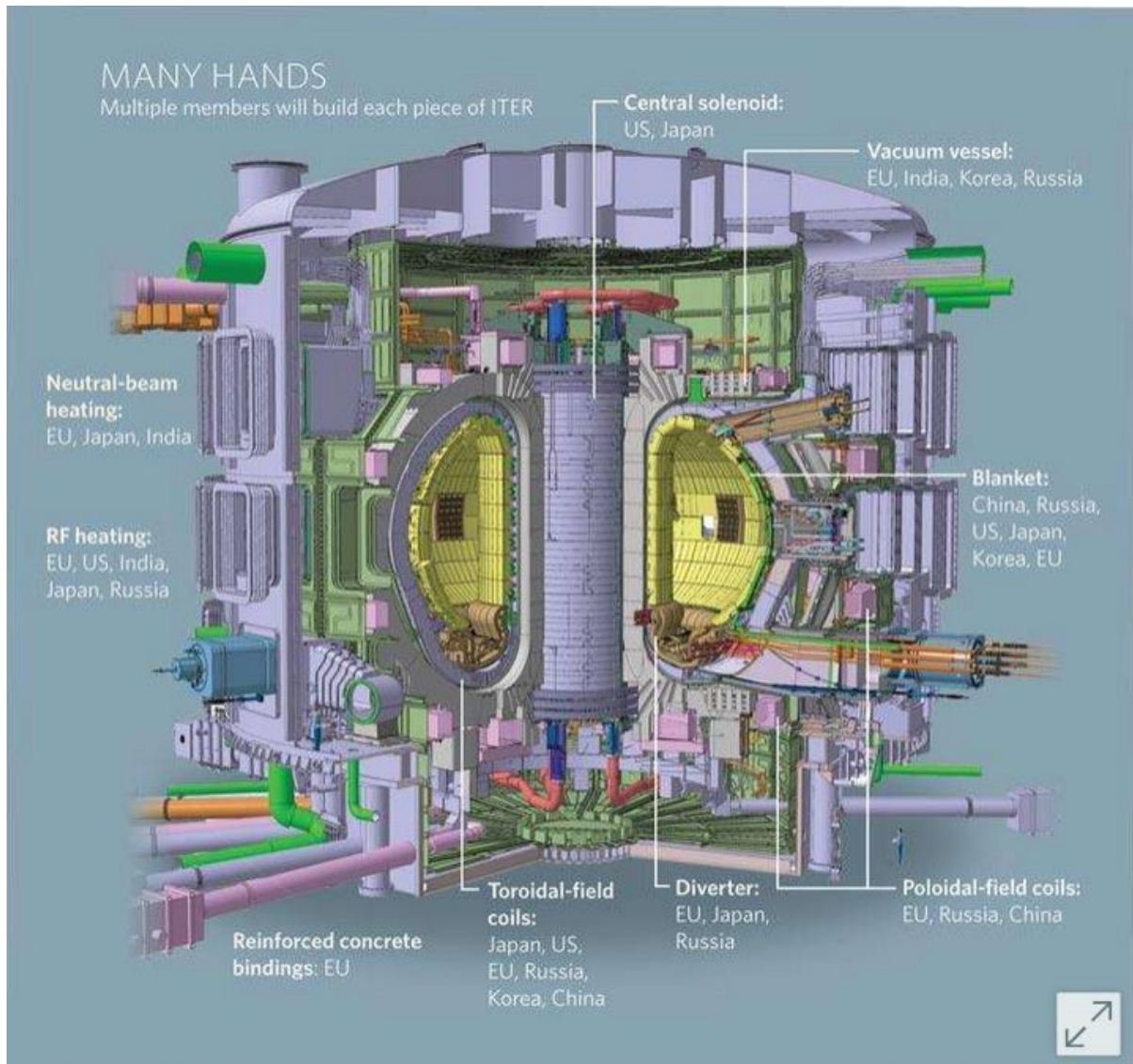


Figure 2 : origine des composants du bâtiment Tokamak d'ITER (Source : Futura-Science, 01/01/2020)

Soulignons que le chantier ITER est actuellement au plus fort de ses activités de construction et d'assemblage (environ 5000 personnes en bureaux et sur site durant les années 2019 à 2022). Par ailleurs, ITER Organization compte parmi son personnel des hommes et des femmes des sept Membres d'ITER. La langue de travail du projet est l'anglais, les intervenants sont multiples et les cultures en présence sont diverses. Les tâches de communication et de coordination n'en sont pas facilitées.

Reste à faire jusqu'en 2035

La phase d'assemblage du Tokamak ITER a débuté avec l'opération de manutention de la base du cryostat. Cette délicate opération a été menée avec succès les 26 et 27 mai 2020. Ce composant est la pièce la plus lourde d'ITER avec ses 1250 tonnes et 30 m de diamètre. Elle accueillera « la plus grande enceinte à vide en acier inoxydable jamais construite » (16 000 m³). Le rôle du cryostat sera d'isoler le système magnétique du Tokamak en enveloppant les aimants supraconducteurs dans un environnement cryogénique.

Etant donné l'ampleur des opérations à accomplir durant les cinq ans qui nous séparent de la réalisation du premier plasma, ITER Organization a pris trois orientations pour sécuriser le projet d'assemblage :

- ❖ Division de la plateforme de construction en trois zones distinctes (cf. figure 3) : le Tokamak (fosse, hall d'assemblage, bâtiment de nettoyage), le « complexe » (à l'exception de la fosse de la machine), les bâtiments auxiliaires (reste de l'installation).

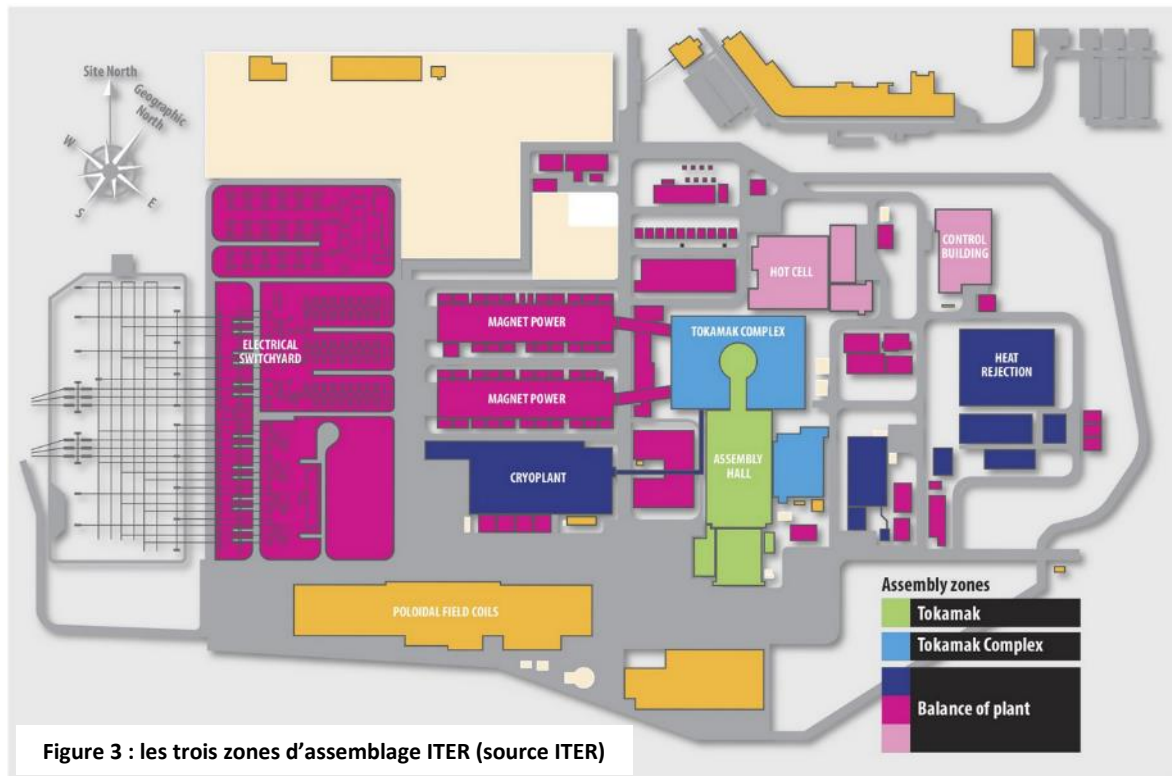


Figure 3 : les trois zones d'assemblage ITER (source ITER)

- ❖ Choix de deux consortiums à qui confier les travaux d'assemblage de la machine. Le premier réunit des entreprises chinoises spécialisées dans l'industrie nucléaire (avec une participation du français Framatome) ; le second rassemble des sociétés italiennes, françaises (Endel-Engie, Orys-Ortec) ainsi qu'une entreprise espagnole. Les systèmes industriels de support ont fait quant à eux l'objet d'une demi-douzaine de contrats différents. En confiant l'assemblage du « cœur de la machine » à deux consortiums, ITER entend minimiser le risque : en cas de défaillance de l'un, l'autre peut prendre le relais sans que le planning des travaux en soit trop affecté.
- ❖ Stratégie de montée en puissance progressive de la machine. La machine sera finalisée étape par étape, avec des expériences scientifiques conduites entre chacune :
 - *Première phase d'assemblage* : de mars 2020 à décembre 2024, les équipes se concentreront sur l'assemblage de la structure principale de la machine et des systèmes nécessaires pour la production d'un premier plasma. A la fin de cette période, le cryostat sera fermé et les systèmes seront testés de manière intégrée. Le premier plasma (prévu au mois de décembre 2025) sera suivi d'une brève campagne expérimentale.
 - *Deuxième phase d'assemblage* : entre juin 2026 et juin 2028. De manière robotisée, et en empruntant les « portes » placées sur trois niveaux du Tokamak, les prestataires installeront les composants qui feront directement face au plasma, tels que les 54 éléments du « divertor » (modules assurant l'extraction des effluents gazeux et des impuretés ainsi qu'une partie de la chaleur générée par les réactions de fusion) et les 440 modules de « couverture » (protection de la chambre à vide et des aimants de la chaleur et des flux de neutrons issus de la réaction de fusion).

Une campagne d'expériences mettant en œuvre des plasmas d'hydrogène et d'hélium suivra.

- *Troisième phase d'assemblage* : durant la phase d'arrêt programmé de juin 2030 à septembre 2031, l'installation du système d'injection de neutrons portera à son maximum la capacité de chauffage externe de la machine. Les sous-traitants installeront également les modules tritigènes expérimentaux (les atomes de tritium peuvent être obtenus à partir de l'absorption par des atomes de lithium de neutrons incidents). A l'issue de ces travaux, deux années d'expériences à pleine puissance de chauffage sont prévues.
- *Quatrième phase d'assemblage* : la mise en service de la cellule chaude et de l'usine de gestion de tritium pendant la quatrième phase d'assemblage (mars 2034 à mars 2035) permettra au programme ITER d'engager les opérations à pleine puissance au mois de juin 2035.

3. Les perspectives

ITER ne produira jamais d'électricité. Son rôle est d'ouvrir la voie de la production d'électricité par fusion thermonucléaire. Cette voie est particulièrement séduisante car :

- ❖ *Les réserves en combustible sont immenses.* Le deutérium peut en effet être extrait de l'eau. Le tritium est un élément radioactif à vie courte pouvant être obtenu à partir du lithium qui est un élément stable et abondant dans les océans et dans la croûte terrestre,
- ❖ *Pas d'émission de gaz à effet de serre.* La fusion ne génère ni dioxyde de carbone ni d'autres gaz à effet de serre. Le sous-produit principal est l'hélium, un gaz inerte non toxique,
- ❖ *Pas de risque d'excursion nucléaire car :*
 - la quantité de combustible présent à tout moment au sein du réacteur est très faible (quelques grammes) et correspond à quelques dizaines de secondes de combustion.
 - toute perturbation au sein du réacteur (coupure d'alimentation par exemple) entraîne un refroidissement du plasma et un arrêt spontané de la réaction de fusion.
- ❖ *limitation des déchets de nature radioactive.* Ils seront principalement constitués de déchets technologiques constitués par les matériaux entourant le plasma et rendus radioactifs par le bombardement des neutrons générés par les réactions de fusion. 90% des déchets radioactifs générés par l'exploitation, puis par le démantèlement de l'installation seront des déchets de très faible, faible ou moyenne activité.

La poursuite de cette voie prometteuse nécessite que les expérimentations faites sur ITER démontrent la faisabilité de :

- ❖ la maîtrise des réactions de fusion, particulièrement la stabilité d'une réaction auto-entretenu,
- ❖ la production massive de tritium dans le strict respect des impératifs de sûreté et de sécurité,
- ❖ l'identification de matériaux (pour les enceintes de confinement) résistant de façon durable aux flux de neutrons produit par la fusion.

Les défis à relever restent encore immenses et se pose de plus en plus une angoissante question : Les réacteurs de fusion arriveront-ils à temps pour prendre le relais des réacteurs à fission ?

Sites internet sources :

- ARA (« Réacteur ITER, le projet », J.M. Niezborala, 2015)
- ITER, CEA, IRSN, Octarina, Trust my Sciences
- Futura-Science, Usine Nouvelle