

L'ÉNERGIE

N° 645 / Juillet-Août 2019

Tribunes

Energie et **D**éveloppement durable,
vice-président de la Banque mondiale pour les infrastructures

Olivier Appert

Articles

Le **2060** :
Arnaud Mainsant, David Marchal, Jean-Michel Parrouffe

I E , ..
Bernard Bigot

L'
Fabrice Bertoncini, Jean-Pierre Burzynski, Pierre Marion, Jérôme Sabathier

C :
Jean-Marie Martin-Amouroux

Rubriques

Salaheddine Soummane

Nathalie Popiolek

ITER, vers la maîtrise de l'énergie des étoiles

Bernard Bigot*

Au cœur du Soleil et des étoiles, les noyaux d'hydrogène fusionnent et libèrent de formidables quantités d'énergie. Sîtôt cette réaction identifiée il y a tout juste un siècle, une ambition s'est fait jour : reproduire, sur Terre, ce que la nature accomplit de manière continue depuis des milliards d'années et accéder à une source d'énergie virtuellement inépuisable, sûre, propre et apte à répondre aux besoins des générations futures. ITER, acronyme de International Thermonuclear Experimental Reactor

TIRÉ À PART

$E = mc$

TIRÉ À PART

Générer et gérer le tritium

De nombreuses réactions de fusion peuvent être obtenues à partir des noyaux atomiques légers. On peut par exemple fusionner deux noyaux de deutérium (D + D), un noyau de deutérium et un autre de tritium (D + T), un noyau de deutérium et un noyau d'hélium 3 (D + ^3He) ou encore un noyau d'hydrogène — c'est-à-dire un proton — et un noyau de bore 11 ($^{11}\text{B} + \text{H}$).

Chacune de ces réactions présente des caractéristiques particulières et se révèle plus ou moins difficile à obtenir. Dans la perspective de production d'énergie, la réaction D + T présente un avantage décisif : sa section efficace maximum, que l'on atteint à une température relativement basse — de l'ordre de la centaine de millions de degrés toutefois — est au moins dix fois supérieure à

TIRÉ À PART

politiques pour qu'ils accordent à la recherche sur la fusion les moyens qui lui faisaient alors défaut.

Au seuil de la faisabilité

Tandis que progressait la connaissance théorique et que les machines gagnaient en performance (l'architecture «tokamak» s'impose

à la fin des années 1960), une évidence se faisait progressivement jour : pour réaliser la démonstration décisive de la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion, une machine disposant d'un très grand volume de plasma serait nécessaire — une machine qui mobiliserait un budget et des ressources humaines hors de la portée d'une seule nation.

L'Europe allait accomplir un premier pas dans cette direction en décidant de construire le Joint European Torus (JET). Doté d'un volume de plasma de 80 m³ environ, soit dix à vingt fois la capacité des plus gros tokamaks alors en opération, JET, construit à Culham, au Royaume-Uni, produisit son Premier Plasma en 1983 et devint, en 1991, la première installation au monde à mettre en œuvre un plasma nucléaire (deutérium-tritium) et à réaliser des réactions de fusion à une échelle significative.

Aux États-Unis, le Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) empruntait un chemin similaire³. Au milieu des années 1990, les deux machines, l'européenne et l'américaine, obtenaient des productions d'énergie record (jusqu'à 16 MW pour le JET). Mais pour créer les conditions propices aux réactions de fusion, JET et TFTR avaient requis plus d'énergie pour chauffer le plasma que les réactions n'en avaient restitué. La démonstration scientifique était dans les deux cas éclatante, mais le bilan énergétique, même s'il se rapprochait de l'équilibre, ne pouvait satisfaire aux exigences d'une industrie industrielle.

JET et TFTR avaient porté la fusion jusqu'au seuil de la faisabilité. Initié au début des années 1980, un autre projet, plus ambitieux encore, prenait forme. ITER fut lancé sur la scène politique et diplomatique quand le président américain Ronald Reagan et le secrétaire général du PC soviétique Mikhaïl Gorbatchev se rencontrèrent pour la première fois lors du sommet de Genève au mois de novembre 1985. En appelant de leurs vœux «une grande collaboration internationale dans le domaine de l'énergie de fusion [...] pour le bénéfice de l'ensemble de l'humanité», les deux hommes jetaient les bases de ce qui est aujourd'hui l'un des plus grands programmes de recherche jamais mis en place, l'un des plus vastes chantiers de construction en Europe et une expérience inédite de collaboration internationale.

Avant d'entrer dans les détails du programme ITER, de son histoire et de ses enjeux, il importe de comprendre quels sont les atouts de l'énergie de fusion et comment son

exploitation peut répondre, sur la très longue durée, à la croissance prévisible des besoins énergétiques de l'humanité.

L'un des plus grands défis de notre civilisation

Le développement de nos sociétés s'est édifié sur la consommation d'une succession de sources d'énergie toujours plus concentrées : la biomasse, l'éolien, le charbon, le pétrole, le gaz naturel et enfin l'énergie nucléaire.

Dans le même temps, la demande en énergie n'a cessé de croître, et s'accélère au rythme de l'augmentation de la population mondiale et de la diversification de ses besoins. À l'orée

Le développement des énergies renouvelables est assurément souhaitable, mais en dépit de leurs performances croissantes elles sont par nature diffuses et intermittentes. Parce que leur coût d'énergie est faible, «fermes» solaires ou champs d'éoliennes doivent occuper de très vastes espaces, ce qui induit d'inévitables conflits d'usage, particulièrement avec les terres agricoles. La connectique est en outre complexe et l'intermittence exige de fortes capacités de stockage ou la mise en place de sources complémentaires, aptes à prendre le relais en cas d'interruption soudaine de la production. À l'exception de l'hydroélectricité ou de la géothermie dans certaines régions du monde, les énergies renouvelables ne sont pas de nature à couvrir les besoins des sociétés industrielles et urbanisées.

Une ressource virtuellement inépuisable

Reste l'énergie nucléaire — plus précisément l'énergie de fission qui, avec quelque 450 réacteurs en activité, assure moins de 10 % de la production mondiale d'électricité. (La France, dont la production d'électricité repose à plus de 75 % sur l'énergie nucléaire, est une exception majeure.)

Haut-commissaire à l'énergie atomique de 2003 à 2009, puis administrateur général du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de 2009 à 2015, j'ai consacré une large part de ma vie professionnelle à la fission nucléaire. J'en connais les atouts, qui justifient son usage par ceux qui en maîtrisent la technologie, j'en ai toujours mesuré les défis et les limites.

Le principal atout de la fission réside dans son caractère massif, continu, partiellement modulable et non générateur de gaz à effet de serre. La ressource minérale sur laquelle elle est fondée — l'uranium — n'est cependant pas inépuisable. Au mieux, au rythme de consommation actuel, l'horizon est ici de quelques siècles pour la fission conventionnelle (neutrons thermiques) et un peu plus lointain (quelques millénaires) pour les réacteurs de « Génération IV » (neutrons rapides).

Quant aux défis qui doivent être relevés, ils sont nombreux et je ne mentionnerai que les deux plus importants : l'amélioration continue de la sûreté des installations nucléaires (neutronique —

d'une lière industrielle de ssion nucléaire, depuis l'enrichissement du combustible jusqu'au stockage ultime des déchets, requiert non seulement une expertise scientique et technologique considérable, mais également des institutions réglementaires fortes, une grande stabilité politique et une solide pratique démocratique qui, seule, garantit l'indépendance des instances de contrôle.

Peu de pays répondent aujourd'hui à l'ensemble de ces critères aucun ne peut les garantir sur la très longue durée — de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années pour certains produits de ssion à condition qu'ils soient enfouis de manière sûre — qu'exige la gestion des déchets nucléaires les plus radioactifs.

Ma conviction, forgée par une longue expérience, c'est que la ssion nucléaire ne peut être qu'une solution transitoire dont l'accès est nécessairement réservé à un petit nombre de pays dans l'attente d'une solution plus durable.

Ces limitations ne pèsent pas sur l'énergie de fusion. Puisant à une ressource virtuellement inépuisable — l'hydrogène —, un réacteur de fusion est un système intrinsèquement sûr : le risque « d'emballlement » est excluy la perte de refroidissement, accident majeur dans une installation nucléaire conventionnelle, ne menace pas son intégrité. En n, ni l'exploitation d'une installation de fusion, ni son démantèlement ne produisent de déchets radioactifs de haute activité à vie longue.

À masse égale, la réaction de fusion est sensiblement plus énergétique que la réaction de ssion : produire 1 gigawatt de puissance électrique pendant un an requiert environ 50 tonnes d'uranium enrichi dans un réacteur de ssion, mais seulement 350 kilos de combustible hydrogène (deutérium et tritium) dans un réacteur de fusion. Pour générer la même puissance, une centrale au charbon doit consommer 8 millions de tonnes de combustible.

Une progression spectaculaire

Ces avantages ont toutefois une contrepartie : la réaction de fusion de l'hydrogène est extrêmement difficile à obtenir et plus encore à maintenir dans la durée — une difficulté qui procède à la fois de la nature des plasmas très chauds au sein desquels l'on cherche à obtenir la réaction et des technologies mises en œuvre dans un réacteur de fusion.

En un peu plus d'un demi-siècle cepen-

seshysicieionsuns b ntr

Dés, contretemps, déconvenues

Porté par un petit groupe de scientifiques déterminés, soutenu par quelques hommes politiques visionnaires, le projet, lorsqu'il commença de se dessiner, tenait de l'utopie. Son histoire peut se lire comme une suite de dés, de contretemps, de déconvenues et d'avancées spectaculaires

TIRÉ À PART

systèmes industriels) qui, une fois réalisés, doivent être livrés sur le site de construction pour y être assemblés. Distant de la mer d'une centaine de kilomètres, le site proposé par l'Europe devait trouver le moyen de compenser son handicap.

créée par le «Joint ITER Agreement» signé le 10 (natio

La proposition, par la France, d'aménager un «itinéraire à grand gabarit» entre le port de Berre-l'Étang et le site de Cadarache, nancé par l'État et le Conseil général des Bouches-du-Rhône, l'implication personnelle du président de la République, Jacques Chirac, et la mise en place d'une collaboration spécifique entre l'Europe et le Japon («Approche élargie») eurent un effet décisif : le 28 juin 2005, à Moscou, les membres d'ITER décidaient, à l'unanimité, de construire l'installation en lisière du centre CEA de Cadarache, sur le territoire de la commune de Saint-Paul-lez-Durance, au point de contact de quatre départements : les Bouches-du-Rhône, le Var, les Alpes-de-Haute-Provence et le Vaucluse.

ITER avait trouvé un site d'accueil. Restait à mettre en place les accords internationaux et les structures opérationnelles qui permettraient d'en concrétiser l'existence. Les équipes de San Diego, Garching et Naka se réorganisèrent dans le cadre d'une organisation de droit international sui generis («ITER Organization»)

Le neutron comme source de chaleur

La réaction de fusion entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium produit un noyau

l'installation. À ce titre, sa contribution à la valeur totale du programme de construction est de l'ordre de 45 %, tandis que les membres non européens contribuent approximativement à hauteur de 9 %, pour une valeur totale (construction et fabrication) de l'ordre de 20 milliards d'euros (valeur de 2016).

La plateforme une fois nivelée et viabilisée, les travaux de construction ont été lancés au cours de l'été 2010. Successivement, un atelier destiné à la fabrication des plus grandes des bobines annulaires; un autre destiné à l'assemblage du cryostat; un édifice exceptionnellement massif, le Complexe Tokamak, qui regroupe les bâtiments dédiés à la gestion du tritium, au tokamak lui-même et aux systèmes de diagnostics; un hall d'assemblage⁰ équipé d'un système de levage d'une capacité de plus de 1500 tonnes; une usine cryogénique; des installations de conversion électrique et

d'autres constructions de différente nature sont sorties de terre.

Ces bâtiments intègrent souvent des structures uniques et hors-norme pour lesquelles des «maquettes» à échelle réelle ont dû être réalisées. On s'est ainsi assuré de la «constructibilité» de la dalle de 1,5 mètre d'épaisseur du Complexe Tokamak et de la «couronne» qui supportera la masse combinée du Tokamak et du Cryostat (23000 tonnes). Dans les deux cas, il s'est agi principalement de vérifier que la complexité et la densité du ferrailage ne faisaient pas obstacle au placement homogène du béton¹¹ dans les armatures.

Pour répondre aux besoins du chantier comme à ceux de l'exploitation future de la machine, la France a équipé le site d'un poste électrique 400 kV qui couvre plusieurs hectares; l'Inde a édifié un atelier temporaire dans lequel sont assemblés et soudés les éléments

du «cryostat» qui enveloppe le tokamak et agit comme une paroi isolante entre l'environnement extérieur et le milieu ultra-froid du système magnétique (le cryostat est une enceinte sous vide cylindrique de 30 mètres de haut et 30 mètres de diamètre).

Ce chantier où s'affairent aujourd'hui près de 2300 personnes (personnels des agences européenne et indienne, salariés des entreprises sous-traitantes) est un monde de superlatifs. La masse du Complexe Tokamak est une fois et demie supérieure à celle de l'Empire State Building. Ses 44000 tonnes de béton et d'acier reposent sur un système parasismique conçu pour limiter les accélérations d'un séisme de magnitude maximale 7 sur l'échelle de Richter. Le système parasismique est constitué de 493 colonnes de béton armé, chacune surmontée d'un «patin» alternant plaques d'acier et épaisseurs d'élastomère de haute densité.

Le réseau électrique industriel est dimensionné pour délivrer une puissance maximale de l'ordre de 120 MW; son pendant «pulsé», qui assurera l'établissement et le contrôle des champs magnétiques ainsi que l'alimentation des systèmes de chauffages auxiliaires du plasma, autorise une consommation pouvant atteindre 500 MW sur de très courtes périodes (de l'ordre de la seconde) lors de l'allumage du plasma en fonction des scénarios du programme d'expérimentation.

L'usine cryogénique édiée sur le site est la plus puissante unité de ce type jamais construite. Elle produira et distribuera les uides indispensables au refroidissement des

Les pièces de la machine les plus exposées au feu du plasma sont conçues pour résister à des charges thermiques dix fois supérieures à

TIRÉ À PART

COUPÉ À PART

au rythme mensuel moyen de 0,6 %, nous pouvons envisager avec optimisme ce premier rendez-vous que nous assigne le calendrier, tout en sachant que l'assemblage des principaux composants d'ici 2024 demeure un défi d'une extraordinaire complexité.

La construction d'ITER marque certes un aboutissement dans la recherche sur l'énergie de fusion. Mais c'est également un premier pas sur le «chemin» qui conduit à son exploitation à l'échelle industrielle. Déjà, plusieurs membres d'ITER ont engagé les études conceptuelles de la «machine d'après

