

Laurent Audouin

# ITER: le « oui » de l'écologiste et le « non » du physicien

ITER est présenté comme la promesse d'un avenir énergétique radieux et la pertinence de son financement n'a guère fait l'objet de critiques dans le monde politique, sauf chez les Verts. Mais ces critiques étaient-elles les bonnes? Si beaucoup d'arguments environnementalistes classiques ne paraissent guère convaincants envers un réacteur de fusion, les critiques scientifiques, bien que minoritaires dans la communauté des physiciens, mettent fort bien en lumière les faiblesses de ce grand projet. Après avoir défrayé la chronique au milieu de l'année 2004, les (més) aventures du réacteur à fusion ITER (« chemin » en latin, et moins prosaïquement International Thermonuclear Experimental Reactor) ont quelque peu disparu de la scène médiatique. À cela, rien de choquant, les grands projets scientifiques faisant rarement la une de l'actualité. Perçu tour à tour comme un défi financier, un objet de rivalité politique et caressant nos fantasmes prométhéens, ITER ne soulève plus guère de discussions de nature scientifique. Et pourtant... ITER, c'est rien moins que l'ambition de maîtriser, sur Terre, l'énergie qui fait vivre les étoiles, à savoir la fusion nucléaire. La fusion de deux noyaux légers a pour propriété d'être fortement exo-énergétique et, dans un monde en quête perpétuelle d'énergie, les chiffres donnent le tournis: là où la combustion d'un gramme de pétrole libère 42 kJ, où la fission d'un gramme d'uranium nous « rend » aujourd'hui 360 MJ, ce n'est pas moins de 1 GJ qu'il deviendrait, sur le papier tout au moins, possible d'obtenir à partir d'un simple gramme d'eau. Le miracle d'une énergie abondante, disponible pour tous, et écologiquement soutenable serait-il enfin à portée de main?

Hélas, les difficultés techniques sont à la hauteur de l'enjeu : la température de fonctionnement (plusieurs dizaines de millions de degrés) donne à elle seule une idée de l'ampleur du défi à relever par les physiciens et les ingénieurs. Et, de fait, si les premières études datent de l'après-guerre, et malgré des investissements considérables et continus, on est encore très loin d'une simple machine de démonstration. À cet égard, ITER constituerait une étape clé, mais une étape seulement : il devrait démontrer la capacité à fabriquer ce fameux démonstrateur technologique, dernière (ou avant-dernière?) étape vers le réacteur producteur d'énergie.

Les mécanismes qui ont abouti au concept même d'un ITER sont l'illustration du *bottom-up* qui prévaut traditionnellement en physique fondamentale pour les grands instruments. Une communauté scientifique se constitue autour d'un grand projet, en détaille le contenu, le coût et les programmes de recherche qui y seront menés. Le projet est étudié plus avant si les tutelles scientifiques (directions d'organismes, conseils scientifiques nationaux) donnent leur accord, puis celles-ci demanderont le financement aux instances politiques. La qualité des découvertes espérées, la potentialité d'applications possibles et la taille de la communauté supportant le projet sont autant de facteurs pris en compte au moment de décider de la réalisation. La production abondante d'une énergie propre étant une perspective éminemment séduisante d'un point de vue politique et la communauté de la fusion étant très active et structurée au niveau mondial, elle reçut un accueil favorable pour ses premières propositions (début des années 80). Dès le départ, il paraissait évident qu'ITER serait trop gros (et donc trop cher) pour ne pas être mondial. Le projet a ainsi connu une éphémère heure de gloire en tant que symbole de la réconciliation est-ouest au milieu de la décennie. Mais la taille de l'installation et donc son coût avaient jusqu'à récemment dissuadé toute décision concrète à son endroit. Les discussions, qui ont depuis des années quitté le terrain scientifique pour le politique, se déroulent aujourd'hui entre 6 partenaires (Europe, Canada, Chine, Japon, Corée du Sud, États-Unis). Elles achoppent ces derniers mois sur la localisation géographique de cette machine unique, les 3 premiers soutenant une implantation en Europe (Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône), les 3 derniers défendant la candidature du Japon. Il est vrai qu'avec un budget prévisionnel total de 10 milliards d'euros (5 pour la construction et 5 pour le fonctionnement, étalés sur une durée estimée à 20 ans), ITER aura un impact énorme sur l'économie et l'environnement scientifique du site qui l'accueillera. Monstre financier, ITER apparaît également aux yeux

de beaucoup d'écologistes comme une aberration vis-à-vis de ce que devrait être une politique énergétique responsable, parfaite illustration de la fuite en avant d'un « complexe militaro-nucléaire ». Or ce raisonnement-là ne résiste pas à l'analyse.

### **Un projet écologiquement acceptable...**

Le motif le plus profond de critique d'un projet de réacteur à fusion est le caractère nécessairement centralisé d'un tel mode de production d'énergie. Un fonctionnement centralisé entraîne l'apparition de « points névralgiques » qui requièrent une sécurité poussée, guère compatible avec un modèle de société fortement libertaire. Cela suppose de plus le développement d'une infrastructure de transport d'énergie avec les pertes que l'on connaît, et s'oppose radicalement au concept de décentralisation et de parcimonie qui fait partie intégrante du paradigme écologiste. Or si cet argument est intellectuellement séduisant il est aussi quelque peu dogmatique, puisqu'il revient à oublier l'existence de centres urbains, consommateurs d'énergie centralisés par définition, ou la présence inévitable d'activités industrielles qui peuvent être localement relativement « énergivores ». Tout comme il est absurde d'alimenter en électricité une ferme du Larzac à coup de lignes à très haute tension branchées sur une centrale située à des dizaines ou des centaines de kilomètres de distance, il n'apparaît guère efficient de vouloir absolument alimenter une aciérie ou l'agglomération parisienne par des dizaines, voire des centaines de milliers d'éoliennes, parcimonieusement réparties dans les campagnes environnantes. L'optimisation de la production plaide pour une loi d'échelle, où les moyens de production sont à l'image des densités de consommation auxquelles ils ont à répondre.

L'autre motif de critique radical est la notion même de « besoin en énergie ». Devant l'absence presque totale de politiques d'économie d'énergie, et connaissant le potentiel considérable de celles-ci, on finit par en oublier qu'elles ont aussi leurs limites. Les scénarios Negawatt ou encore le rapport parlementaire d'Yves Cochet (1997) tracent par exemple des pistes très bien documentées. Leurs auteurs se réjouissent notamment de pouvoir démontrer que la sortie du nucléaire est possible. Elle l'est en effet... Mais le pendant est de renoncer à pratiquement toute diminution de la consommation d'énergie fossile ! Si on souhaite, au contraire, lutter en priorité contre l'effet de serre, les économies d'énergies et l'accroissement massif de la production par les renouvelables doivent être en priorité substitués à la consommation des fossiles, la sortie du nucléaire devenant un objectif de moyen ou de long

terme, en tout cas étalé sur une période beaucoup plus longue. Bien entendu, ce raisonnement est pessimiste et ne prend pas en compte une évolution des mentalités dans le sens de la décroissance et de la sobriété, auquel cas il devient peut-être possible de mener de front dénucléarisation et décarbonation. L'électrification effrénée du chauffage urbain, promue par EDF afin d'absorber son excédent de production en parfaite contradiction avec la plus élémentaire notion d'efficacité énergétique, est la parfaite illustration du fait que la surévaluation des besoins menait *in fine* à la gabegie. Mais la sous-évaluation des besoins mènerait à une crise énergétique dont la seule sortie politiquement réaliste serait de se remettre à brûler tout et n'importe quoi, pour le plus grand malheur de l'environnement. La conclusion de ce raisonnement est qu'il est pour le moins dangereux de décréter qu'on peut se passer d'étudier une source d'énergie potentiellement massive, même si la perspective de sa mise en œuvre reste lointaine.

La fusion thermonucléaire fait appel au maniement du noyau atomique, activité vite assimilée aux bombes atomiques et autres contaminations radioactives. Un exposé sur la notion de radioactivité et sur ses différentes expressions dépasserait le cadre de cet article. Mais il faut rappeler que, si la radioactivité peut être dangereuse, elle est également facilement détectable et que les normes en vigueur ont atteint un niveau de sévérité parfois difficilement justifiable, notamment dans le cadre des laboratoires. L'utilisation de fortes quantités de tritium (plusieurs kilogrammes dans un cœur de réacteur à fusion industriel tel qu'on l'imagine aujourd'hui) est particulièrement pointée du doigt. Or, en l'occurrence, il ne saurait être produit hors du cœur pour y être injecté : on ne conçoit pas aujourd'hui d'autre voie que de le produire en continu dans le cœur du réacteur, à l'aide de couvertures de lithium. D'autre part, la fusion ne crée pas de « cendres radioactives » (on ne produit que de l'hélium). Le point critique du point de vue environnemental est le flux extraordinairement élevé de neutrons générés par les réactions de fusion, qui devraient rapidement activer les matériaux de structure, lesquels devront être régulièrement remplacés. Mais ce point paraît nettement moins critique que dans le cas des réacteurs à fission : si les quantités de déchets ne seront sans doute pas fondamentalement réduites par rapport aux centrales actuelles, les caractéristiques chimiques des matériaux concernés les rendront parfaitement aptes à un stockage aisé (contrairement à nombre de produits de fission et autres actinides mineurs) et leur activité à moyen et long terme sera réduite de plusieurs ordres de grandeur.

Dernier sujet d'inquiétude et non des moindres : les applications militaires. Ici, la réponse est sans équivoque : les technologies à l'œuvre sont radicalement différentes de celles requises par les bombes, même thermonucléaires. On pourra certes objecter que la maîtrise des technologies nécessaires à un réacteur à fusion requiert les mêmes connaissances de base que celles requises pour des bombes ; mais cela signifie alors qu'il faut au plus vite interdire l'enseignement de la physique nucléaire et la pratique des recherches qui lui sont associées, si on ne veut pas voir émerger bientôt des D<sup>r</sup> Khan par milliers... Sans parler de la biologie ou de la chimie, dangereux précurseurs d'armes de destruction massive ! Enfin la peur d'un accident nucléaire (explosion) est clairement dépourvue de tout fondement : la rupture des champs de confinement du plasma aboutirait peut-être à la destruction des aimants créant ces mêmes champs mais la vaporisation instantanée du plasma arrêterait aussitôt toute réaction nucléaire.

On voit donc que les craintes environnementalistes vis-à-vis d'ITER et des réacteurs à fusion semblent globalement peu, voire pas, fondées. Face à la menace du changement climatique, au choc inévitable entre une demande d'énergie qui ne saurait diminuer aussi rapidement que ne le feront les stocks d'hydrocarbures, et aux problèmes inhérents au recours massif à la fission nucléaire, la fusion pourrait au contraire être une solution « écologiquement raisonnable », à défaut d'être idéale. Mais on va voir que cela ne suffit pas à accorder un blanc-seing au projet ITER.

### **Mais un choix scientifiquement très discutable**

À travers l'information qui circule dans le public, on a parfois l'impression qu'ITER n'est jamais qu'un projet d'ordre technologique et industriel. Or c'est loin d'être le cas... Un réacteur à fusion soulève trois types de problèmes, dont aucun n'a encore quitté la sphère de la recherche fondamentale : la maîtrise des plasmas dans lesquels doivent se dérouler les réactions de fusion, la production des éléments devant fusionner, et la tenue des matériaux générant les champs de confinement. ITER ne s'intéressera qu'à la première de ces questions. Ce n'est pas une machine conçue pour résoudre les deux autres, alors qu'elles constituent des points de blocage tout aussi importants, si ce n'est davantage.

Les matériaux qui entoureront, à distance, le plasma constituent le vrai talon d'Achille d'un réacteur producteur d'énergie. Ils devront à la fois générer le champ de confinement et résister à une irradiation par neutrons d'une intensité fantastique, supérieure de plusieurs ordres de grandeur aux flux rencontrés dans ITER, et d'une énergie 10 fois plus

élevée que dans les centrales à fission à neutrons rapides. Or il est clair qu'aucun matériau connu ne résisterait longtemps dans de telles conditions : sa structure cristalline serait rapidement si dégradée qu'il perdrait toutes ses propriétés mécaniques. Il est bien prévu de construire en parallèle à ITER une installation dédiée à l'étude de matériaux dans des conditions d'irradiation s'approchant de celles rencontrées pour un réacteur à fusion... Mais rien ne garantit qu'une solution sera trouvée ! Et la faisabilité même d'une telle installation d'irradiation, où la production de neutrons exigerait le recours à un concept radicalement nouveau (irradiation par protons d'un flot de lithium liquide), est encore l'objet d'intenses études de recherche et développement.

Le gigantisme d'ITER est-il le meilleur outil pour l'étude du confinement du plasma ? Il est permis d'en douter : les meilleurs résultats en ce domaine ont jusqu'alors été obtenus à Tore-Supra (Cadarache), une installation d'une taille largement inférieure à celle d'ITER. D'autre part, le choix même d'un Tokamak est contesté par une partie importante des physiciens travaillant sur la fusion à travers le monde, qui estiment que des anneaux de conception différente (Stellarator notamment) pourraient être mieux à même de confiner le plasma à de grandes échelles. Or le choix d'ITER risque de porter un coup sévère à l'exploration de cette voie, car les financements ne sont pas extensibles à l'infini.

Il ne s'agit pas de nier un rôle scientifique à ITER, mais bien de le remettre en perspective. Ce projet ne permet pas de créer un prototype de réacteur : il est simplement un outil d'étude du confinement des plasmas et de la performance du chauffage de celui-ci. C'est finalement un grand instrument, de ceux dont la physique est friande, mais qui devrait être évalué en tant que tel. Il est tout naturel qu'il recueille le soutien des physiciens des plasmas, mais cela ne le rend pas incontournable pour autant. En effet 100 millions d'euros annuel, c'est l'équivalent de l'ensemble de la participation de la France au CERN, le laboratoire européen de physique des particules. C'est aussi près du double de l'ensemble des moyens financiers de tous les laboratoires de physique ou de mathématiques qui sont associés au CNRS (57 millions en 2003) ou de ceux du département des sciences de la vie (65 millions), ou l'équivalent du budget actuel de l'ADEME. Le lobbying habile pratiqué auprès des décideurs politiques par une fraction de la communauté mondiale des plasmas lui a permis de « vendre » directement le projet au monde politique et de séduire les pairs par l'ambition affichée, en évitant autant que possible une mise en perspective financière qui aurait pu susciter des interrogations, surtout en ces temps de vaches maigres pour

la recherche publique. L'échelle mondiale du projet crée aussi un phénomène d'entraînement: décider de ne pas y participer présente le risque évident de marginaliser les équipes nationales de recherche.

### **Un autre « chemin » vers la fusion ?**

Rêvons un peu... Une évaluation de la recherche sur la fusion par le futur Haut conseil de la science conduirait peut-être à suggérer des choix largement différents de la construction immédiate du Béhémoth ITER. L'installation d'irradiation, dont le coût sera loin d'être négligeable, devrait devenir la priorité, l'étude des instabilités des plasmas et de leur confinement étant confiée à une ou plusieurs machines de taille plus modeste, qui pourraient préserver une pluralité d'approche. Sur la route d'un réacteur de fusion, un ITER sera à coup sûr nécessaire mais dans l'état actuel des connaissances il n'apparaît pas comme le point le plus décisif pour trancher quant à la faisabilité de ce fameux réacteur. Remettre ITER en sommeil pour une vingtaine d'années, le temps de lever tout ou partie des hypothèques technologiques pesant sur le futur réacteur, apparaît comme l'option la plus rationnelle.

Le risque est aujourd'hui grand qu'ITER ne vampirise très largement les budgets de recherche de physique au CNRS ou au CEA, dans la droite ligne du gouffre financier qu'est l'ISS. Mais si cette dernière fut décidée par-dessus la tête de la communauté de la recherche, on ne saurait en dire autant d'ITER, qui est largement soutenu par la communauté scientifique. Une mobilisation « contre » ITER n'a ainsi guère de chance d'aboutir, d'autant que le projet est politiquement avalisé et rencontre l'assentiment de la population. C'est donc une autre lutte qu'il faut d'ores et déjà anticiper pour s'assurer que le financement de cette machine n'aura pas de conséquences néfastes sur d'autres lignes de recherche...

#### **Encadré 1 : la fission et la fusion nucléaire en quelques mots**

Les noyaux des atomes sont constitués de nucléons (protons et neutrons) entre lesquels s'exerce en permanence une force d'attraction très intense, mais qui diminue très rapidement au-delà d'une distance équiva-	lente à la taille de quelques nucléons. D'un autre côté, les protons ont tendance à se repousser les uns les autres du fait de leur charge électrique, qui reste sensible à des distances infiniment supérieures à la taille typique	des noyaux. Il existe donc une sorte d'optimum à la cohésion interne des noyaux atomiques, en fonction de leur nombre de nucléons. Les noyaux très lourds sont ainsi susceptibles de se briser presque spontanément,
--	--	--

<p>libérant au passage de l'énergie: c'est la fission nucléaire. À l'inverse, si 2 noyaux légers se rapprochent suffisamment, ils fusionneront et libéreront davantage d'énergie qu'il n'a fallu leur en fournir pour vaincre leur répulsion réciproque.</p> <p>Cette question de la distance entre les deux noyaux candidats à la fusion est critique: il faut que leur mouvement respectif les conduise l'un vers l'autre avec assez d'énergie pour passer outre leur répulsion électrique, à</p>	<p>l'image d'une balle de golf qui ne pourra tomber dans un trou placé au sommet d'une butte que si elle a assez de vitesse pour monter ladite pente. Or la température d'un matériau n'est rien d'autre que la vitesse moyenne avec laquelle ses atomes s'agitent. À des températures de plusieurs millions de degrés (où la matière atteint l'état de plasma, c'est-à-dire où noyaux et électrons sont désolidarisés), les réactions de fusion deviennent possibles. La réaction</p>	<p>s'accommodant des températures les plus basses tout en libérant une quantité significative d'énergie est la fusion de deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. Le premier est stable et représente grossièrement 0,015 % de l'hydrogène disponible sur terre (autant dire que ses réserves en sont illimitées). Le second est en revanche radioactif (période de 13 ans) et n'existe donc pas sur Terre, mais peut être produit par certaines réactions nucléaires.</p>
---	--	---

## Encadré 2 : un réacteur à fusion en quelques mots

<p>Le propos des réacteurs à confinement magnétique, famille à laquelle appartient ITER, est de maintenir dans la durée le mélange deutérium (« D »)-tritium (« T »), sous sa forme de plasma, à une densité et une température suffisantes pour que les réactions de fusion aient lieu. Or, seuls des champs magnétiques hyper-intenses peuvent confiner un plasma; tout matériau entrant en contact avec lui serait instantanément vaporisé. La fusion de deux noyaux D et T produit un noyau d'hélium et un neutron, ce dernier emportant l'essentiel de</p>	<p>l'énergie libérée par la réaction (environ 14 MeV). Ces neutrons doivent alors déposer leur énergie dans les matériaux entourant le cœur, celle-ci étant convertie en chaleur, laquelle sera (sauf concept radicalement nouveau introduit d'ici là) transformée en électricité via un échangeur d'eau. Bref un réacteur à fusion, comme un réacteur à fission, serait avant tout une grosse bouilloire... L'alimentation en combustible du cœur est difficile car le tritium est un matériau hautement radioactif et difficile à produire. Il a donc été imaginé de le produire direc-</p>	<p>tement dans le cœur, en entourant les couvertures de celui-ci de lithium, noyau qui peut se briser en hélium + tritium sous l'action d'un neutron énergétique... Exactement comme ceux que libèrent les réactions de fusion.</p> <p>ITER est de la famille des « Tokamak », imaginés par Sakharov en 1950. Le champ magnétique y dessine une sorte de tore, dans lequel circule le plasma. De nouvelles formes de champs ont été imaginées depuis lors, notamment le Stellarator, étonnamment tortueux en apparence..</p>
---	---	--