

ITER, vers la maîtrise de l'énergie des étoiles

Bernard Bigot*

@ 84226

Au cœur du Soleil et des étoiles, les noyaux d'hydrogène fusionnent et libèrent de formidables quantités d'énergie. Sitôt 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, mais également le mot latin qui signifie «le chemin», est l'aboutissement de cette ambition. À Saint-Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône), la Chine, l'Europe, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis ont mis en commun leurs moyens pour construire et exploiter la plus puissante des installations de fusion jamais conçue et démontrer la faisabilité de l'énergie des étoiles.

Il y a tout juste un siècle, au tournant des années 1920, des hommes de science — Jean Perrin en France, Arthur Eddington au Royaume-Uni — ont levé le voile sur un des grands mystères de l'Univers. En postulant que l'énergie du Soleil et des étoiles procédait de réactions nucléaires — la fusion de l'hydrogène en hélium —, ils ont ouvert la voie à un champ de recherche et à une ambition dont ITER constitue aujourd'hui l'étape essentielle.

ITER, acronyme de *International Thermonuclear Experimental Reactor*, mais également le mot latin qui signifie «le chemin», est la plus grande coopération scientifique internationale jamais mise en œuvre. Pour la mener à bien, la Chine, l'Europe, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis¹ ont mis en commun leurs moyens humains, scientifiques, technologiques et industriels pour construire et exploiter la plus puissante des installations de fusion jamais conçue. Au cœur de la machine

ITER, les noyaux d'hydrogène vont fusionner comme ils fusionnent au cœur du Soleil et des étoiles et générer ainsi une production massive d'énergie.

ITER est un «tokamak» (du russe «торондальная камера с магнитными катушками», chambre toroïdale et bobines magnétiques), un type de machine dont le concept et l'architecture ont été développés en Union soviétique à la fin des années 1950.

Le tokamak ITER s'inscrit dans une longue lignée d'installations de recherche tout en marquant une rupture radicale — le volume dans lequel se produiront les réactions de fusion est dix fois supérieur à celui du plus gros tokamak construit à ce jour et pour la première fois ces réactions donneront lieu à une production nette d'énergie. ITER ouvrirait ainsi la voie à une exploitation industrielle et commerciale de l'énergie de fusion.

* ITER (cf. biographies p.83-84).

$E = mc^2$

Le cœur du Soleil et des étoiles est le siège d'une prodigieuse alchimie qui transmute à chaque seconde des centaines de millions, voire des milliards de tonnes d'hydrogène en hélium. Conformément à la formule d'Einstein $E = mc^2$, l'infime perte de masse qui résulte de cette réaction se traduit par une formidable libération d'énergie.

À la veille de la deuxième guerre mondiale, le cadre théorique de la fusion thermonucléaire était solidement établi : Hans Bethe avait identifié dès la fin des années 1930 l'enchaînement des réactions² qui, dans les étoiles de type solaire, fusionne deux noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium. Quelques années plus tôt, Ernest Rutherford avait obtenu en laboratoire la fusion du deutérium (un des deux isotopes lourds de l'hydrogène) en hélium et constaté «l'effet considérable» que cette réaction produisait.

Il apparaissait dès lors envisageable, non pas de recréer à l'identique les processus à l'œuvre au cœur des étoiles, mais d'en reproduire le principe.

La première application de la «fusion sur Terre» fut militaire. La fusion des deux isotopes lourds de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, est au cœur du principe de la bombe H — «H» pour hydrogène — que les États-Unis ont testée en 1952 et l'Union soviétique en 1955.

Les technologies militaires ont toutefois peu de points communs avec les applications civiles que l'on anticipe dès cette époque. L'un des caractères essentiels des recherches civiles sur l'énergie de fusion en découle : dès la fin des années 1950, à l'ouest comme à l'est, les travaux des différents laboratoires ont été déclassifiés et la collaboration internationale érigée en règle.

«... quand la société en aura besoin»

D'emblée, quelques grands principes se sont imposés. Sur Terre, l'environnement propice à la fusion ne sera pas la matière ultra-dense du cœur des étoiles, mais, au contraire, un milieu extrêmement ténu — un gaz ionisé très chaud (un plasma), dont la densité est de l'ordre du millionième de celle de l'atmosphère. Quant au confinement de ce plasma, il sera assuré non par la force gravitationnelle comme dans les corps stellaires, mais par un champ magnétique très puissant.

Si la physique enseigne que la réaction de fusion peut être obtenue en combinant de nombreuses paires d'éléments légers, deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium (1 proton, 1 neutron) et le tritium (1 proton, 2 neutrons) se sont imposés comme combustibles privilégiés — les seuls dont la fusion à grande échelle peut être envisagée en l'état présent de notre technologie.

Au début des années 1960, en Union soviétique, aux États-Unis, au Royaume-Uni, en France, au Japon, en Chine, physiciens et ingénieurs sont à l'œuvre, explorant les territoires encore inconnus (ils le demeurent partiellement...) de la physique des plasmas ; construisant des machines dont les performances se révèlent généralement décevantes ; progressant avec difficulté mais sans jamais se décourager vers leur objectif : maîtriser le feu des étoiles et accéder à une source d'énergie nouvelle, apte à répondre aux besoins d'une civilisation technologique en plein essor.

La problématique de l'énergie ne présentait pas, à cette époque, l'acuité qui est la sienne aujourd'hui. La fusion offrait une perspective certes enthousiasmante, mais l'horizon de son application industrielle et commerciale demeurait encore lointain. Lev Artsimovitch, qui dirigeait les recherches sur la fusion en Union soviétique, affirmait alors : «L'énergie de fusion sera disponible quand la société en aura besoin.» Formulé autrement : quand le besoin d'une source d'énergie nouvelle s'imposera avec suffisamment de force aux décideurs

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 celle des autres réactions envisageables.

D + T est en outre une réaction très énergétique : un gramme de ce « mélange » peut libérer autant d'énergie que la combustion de 8 tonnes de pétrole et l'un de ses ingrédients, le deutérium, se trouve en abondance dans la nature : chaque litre d'eau en contient 33 milligrammes et les techniques d'extraction industrielle sont maîtrisées de longue date. Le tritium en revanche est quasi inexistant à l'état naturel — c'est un élément radioactif (émetteur β de faible énergie) dont la demi-vie est de 12,3 ans et qui se désintègre spontanément en hélium.

Isotope lourd de l'hydrogène, le tritium est un élément très mobile : inhalé ou ingéré sous forme « d'eau tritiée », il peut causer une irradiation interne dommageable. La gestion du tritium dans l'installation ITER fait donc l'objet, conformément à la réglementation de sûreté nucléaire, d'un ensemble de mesures particulièrement rigoureuses.

Certains types de réacteurs de fission (CANDU), qui utilisent l'uranium naturel comme combustible et l'eau lourde comme fluide caloporteur, produisent spontanément du tritium — de l'ordre d'une vingtaine de kilos annuellement pour la totalité du parc mondial.

Cette production, aujourd'hui inutilisée, suffira pour alimenter ITER pendant la quinzaine d'années que durera sa campagne d'expériences nucléaires. Pour assurer l'avenir industriel de la fusion, il est toutefois impératif de développer des solutions permettant de produire du tritium en grande quantité — de l'ordre de 100 à 200 kilos annuellement pour chaque réacteur de 1 000 MW.

Dans le cadre de son programme expérimental, ITER testera différentes solutions de « modules tritigènes » basés sur un principe simple : l'impact d'un neutron sur une cible de lithium 6 génère un noyau de tritium et un noyau d'hélium.

Si le principe physique est simple et bien connu, les technologies à mettre en œuvre sont complexes. Six concepts de modules « tritigènes » ont été développés par les pays partenaires d'ITER. Disséqués, analysés et passés en revue par un comité spécialisé avant d'être formellement approuvés, leur fabrication pourrait être lancée à l'horizon 2024-2025.

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 filière 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 *in fine* 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 de la révolution industrielle, dans les premières décennies du XIX^e siècle, à peine plus d'un milliard d'êtres humains peuplaient la planète ; à la fin de ce siècle, nous serons sans doute dix fois plus nombreux.

Dans cette perspective, quels que soient les scénarios envisagés et quelle que soit l'efficacité des mesures d'économie d'énergie qui pourront être mises en œuvre, la demande mondiale sera au moins multipliée par trois d'ici 2100. La part de l'électricité, qui compte aujourd'hui pour 20 % de la consommation mondiale d'énergie, s'établira alors autour de 50 % — et c'est l'électricité qui constitue désormais le principal vecteur de développement des sociétés.

Répondre à cette demande dans des conditions aussi sûres et «propres» que possible est l'un des plus grands défis auxquels notre civilisation doit faire face. Et les options qui permettent de le relever sont limitées.

Les combustibles fossiles, dont l'utilisation massive a soutenu notre développement économique, social et culturel pendant près de deux siècles, se sont révélés profondément dommageables pour la santé, le climat, et les grands équilibres environnementaux. Un consensus existe désormais pour en réduire la consommation au plus tôt, et de manière drastique.

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 flux 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 filière 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 et la gestion sur la très longue durée des déchets radioactifs.

Un facteur de limitation, moins souvent évoqué et cependant essentiel, tient à la nature et à l'organisation mêmes des États. L'exploitation

Franchir la barrière

Pour qu'une réaction de fusion se produise, il faut que deux noyaux légers se rapprochent suffisamment l'un de l'autre de manière à ce que les forces nucléaires attractives, qui agissent à très courte portée, l'emportent sur la répulsion électrostatique (la «force de Coulomb») qui les éloigne.

Il importe donc de communiquer aux noyaux une vitesse suffisante pour surmonter cette répulsion. De fait, pour que la réaction deutérium-tritium puisse se produire, la température du milieu, qui détermine la vitesse moyenne des particules qui le composent, doit être de l'ordre de 100 millions de degrés Celsius.

Pour obtenir un rendement énergétique positif, il faut qu'un très grand nombre de réactions puissent se produire en un temps déterminé. Le volume et la densité des particules au sein du plasma (de l'ordre de 10^{20} particules par mètre cube), la conservation de leur haute énergie pendant une durée suffisamment longue (de l'ordre d'une seconde et demie), et donc la qualité du confinement du plasma, constituent les paramètres-clé d'un plasma de fusion.

d'une filière industrielle de fission nucléaire, depuis l'enrichissement du combustible jusqu'au stockage ultime des déchets, requiert non seulement une expertise scientifique 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 fission 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 fission 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 exclu; la perte de refroidissement, accident majeur dans une installation nucléaire conventionnelle, ne menace pas son intégrité. Enfin, 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 fission : produire 1 gigawatt de puissance électrique pendant un an requiert environ 50 tonnes d'uranium enrichi dans un réacteur de fission, 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 cependant, d'immenses progrès ont été accomplis dans la compréhension du comportement des plasmas, de leurs turbulences et de leurs instabilités. Parallèlement, les performances des machines de fusion, et tout particulièrement celles des tokamaks, n'ont cessé de progresser.

Le temps est loin où, dans l'atmosphère d'incertitude qui prévalait au début des recherches, des physiciens du laboratoire de Los Alamos, aux États-Unis, baptisaient leur machine «Perhapstron»... (de l'anglais *perhaps*, «peut-être»).

Au regard des trois paramètres qui définissent la performance d'un plasma (le triple produit de la température, de la densité et du temps de confinement de l'énergie, ou «critère de Lawson»), les machines de fusion ont enregistré une progression spectaculaire — pas moins de trois ordres de grandeur entre le triple produit obtenu dans les années 1960 et celui que réalisent aujourd'hui les tokamaks les plus avancés. En moyenne, leur performance a doublé tous les 18 mois, soit un rythme de progression, certes irrégulier, mais plus rapide en moyenne que celui des composants électroniques, lesquels ont enregistré sur la même période un doublement de leur densité de transistors tous les 24 mois («Loi de Moore»).

La recherche sur l'énergie de fusion dispose donc désormais des outils conceptuels et des moyens technologiques qui permettent d'envisager avec optimisme la démonstration de faisabilité — un objectif que la communauté internationale a assigné au programme ITER.

Défis, 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 défis, de contretemps, de déconvenues et d'avancées spectaculaires; de périodes de profond découragement et de moments d'immense enthousiasme.

Des difficultés de tout ordre — technique, politique, diplomatique, financier, organisationnel, etc. — se sont inévitablement dressées sur son chemin. Mais la nécessité d'ITER a fini par s'imposer. ITER est un projet dont l'humanité ne peut faire l'économie. Pour chacun des membres du programme, il s'agit de savoir si la fusion de l'hydrogène constitue une option viable pour son approvisionnement durable en énergie.

Entre la fin des années 1980 et le début des années 2000, sous la direction successive des Français Paul-Henri Rebut, le «père» du JET européen, et Robert Aymar, l'une des figures majeures de la recherche sur la fusion en France, ITER a peu à peu pris forme. Privilégiant parfois le symbole au détriment de l'efficacité, les «équipes internationales» chargées de concevoir et de dessiner la machine étaient établies sur trois sites, chacun sur un continent différent : San Diego aux États-Unis, Garching en Allemagne, Naka au Japon. Un physicien russe dirigeait le site de San Diego, où se trouvait également la direction générale du projet; un Français était responsable de celui de Naka, et un Américain pilotait la structure européenne installée à Garching, près de Munich.

Tout au long de ces années, ITER a traversé des heures graves. L'effondrement de l'URSS en 1991, le désengagement des États-Unis entre 1999 et 2003, les fluctuations du soutien politique, les divergences sur le design de la machine, ont menacé à de multiples reprises l'existence même du projet. Mais la détermination des quelques hommes et femmes qui le portaient n'a jamais fléchi.

En 2001, au terme d'une décennie de travaux préliminaires et d'études, un document de plusieurs milliers de pages était enfin finalisé. Ce rapport final décrivait avec précision la machine, ses différents éléments et systèmes, ses objectifs, son budget estimé poste par poste, son calendrier et les impératifs auxquels devrait répondre le site qui l'accueillerait.

Plus d'un millier d'ingénieurs et de chercheurs avaient contribué à son élaboration qui exprimait le consensus scientifique et technique auquel étaient parvenus les partenaires du projet (à cette date, l'Europe, le Japon et la Russie). Une fois de plus, l'entreprise ITER révélait son caractère inédit : des nations aux cultures et aux pratiques différentes, aux préoccupations et aux intérêts parfois divergents, validaient une «feuille de route» qu'elles s'engageaient à respecter.

Choisir un site

Mais quatre ans passeraient encore avant que les membres d'ITER, désormais au complet⁴, ne s'accordent pour choisir le site qui accueillerait l'installation. Le Japon proposait de construire l'installation à Rokkasho-Mura, au nord de l'archipel⁵; l'Europe plaidait pour Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache, à une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône), où le Commissariat à l'énergie atomique avait rassemblé ses recherches sur l'énergie de fusion à la fin des années 1980 et où il exploitait depuis 1988 le tokamak Tore Supra⁶.

Entre les tenants des deux sites, la négociation fut longue et souvent âpre. Cadarache, qui cumulait de nombreux atouts, souffrait d'un sérieux désavantage : son éloignement des installations portuaires où seraient débarquées les pièces de la machine fabriquées dans les usines des pays membres du programme.

La contribution des membres d'ITER en effet, s'effectue principalement «en nature». Chacun est responsable de la fabrication d'un certain nombre d'éléments (pièces de la machine et

systèmes industriels) qui, une fois finalisés, 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.

La proposition, par la France, d'aménager un « itinéraire à grand gabarit » entre le port de Berre-l'Étang et le site de Cadarache, financé 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 (« l'Approche élargie »⁷) 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 »)

créée par le « Joint ITER Agreement » signé à Paris au mois de novembre 2006 ; chacun des membres mit en place une agence nationale (*Domestic Agency*) pour recueillir les financements de son gouvernement et gérer les fabrications qui lui incombait. La relation avec la France, « pays hôte », fit l'objet d'un « accord de siège » entre le gouvernement français et ITER Organization.

Au mois de janvier 2007, la France, dans le cadre de ses engagements envers ITER, lança les travaux d'aménagement du vaste espace (180 hectares) qu'elle avait concédé à ITER Organization, défrichant, nivelant et équipant la plateforme de 42 hectares qui accueilleraient l'installation. Dans l'attente des bâtiments définitifs destinés à les héberger, les équipes d'ITER s'installèrent dans des structures préfabriquées mises à leur disposition par le CEA voisin. Tout était désormais en place pour que le « projet de papier », en gestation depuis tant d'années, se traduise enfin en réalité concrète.

Des structures uniques et hors-norme

C'est à l'Europe, « membre hôte » du programme ITER, qu'incombe, outre sa part de fabrication de composants, la responsabilité de construire et de livrer à ITER Organization la quasi-totalité des bâtiments que compte

ITER : une « Installation Nucléaire de Base »

ITER est la première installation de fusion au monde classée « installation nucléaire ». Bien que son exploitant (ITER Organization) soit une entité relevant du droit international, l'Accord ITER la soumet aux dispositions du droit nucléaire français et l'accord de siège signé en 2007 avec la France la place sous le contrôle de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) française.

ITER est également la première Installation Nucléaire de Base (INB) française dont le dossier de sûreté a été examiné dans le cadre des exigences renforcées de la loi de 2006 sur la Transparence et la sécurité nucléaire (TSN).

La nature internationale d'ITER et le principe de la « fourniture en nature » par lequel les membres d'ITER apportent l'essentiel de leur contribution, conduit pour la première fois l'ASN à étendre ses inspections aux sites dans lesquels sont fabriqués les composants PIC (*Protection Important Components*) de la machine. À ce jour, outre la trentaine d'inspections qu'ils ont réalisée sur le chantier de construction, les inspecteurs de l'ASN se sont rendus en Italie, en Espagne, en Corée, en Russie et, sur site, dans l'atelier d'assemblage du cryostat sous responsabilité indienne.

Le neutron comme source de chaleur

La réaction de fusion entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium produit un noyau d'hélium et un neutron. Sous forme cinétique, le neutron emporte environ 80 % de l'énergie générée (14,1 MeV); le noyau d'hélium les 20 % restant (3,5 MeV), le tout représentant environ 25 fois l'énergie cinétique de la collision qui leur a donné naissance.

Parce qu'il est électriquement chargé, le noyau d'hélium demeure prisonnier de la cage magnétique qui confine le plasma au cœur de la chambre à vide. Par collisions, le noyau d'hélium (ou « particule alpha ») transfère une partie de son énergie au plasma et contribue ainsi à entretenir sa température — c'est le « chauffage alpha ». Avant d'être extrait de la chambre à vide par pompage, le noyau d'hélium cède son énergie cinétique résiduelle à un système appelé « divertor », capable de supporter un flux thermique de 20 MW/m³.

Le neutron, électriquement neutre, s'échappe de la cage magnétique et impacte les parois internes de la chambre à vide auxquelles il cède son énergie cinétique. Cette énergie se transforme en chaleur qui élève jusqu'à ~ 200 °C la température du circuit d'eau pressurisée circulant dans les structures internes des parois.

Dans un réacteur industriel, c'est à partir de cette eau pressurisée que s'amorcera le cycle de production de l'électricité au moyen de générateurs de vapeur, de turbines et d'alternateurs comme dans une centrale conventionnelle.

ITER, machine expérimentale qui ne fonctionnera pas de manière continue et dont le programme opérationnel prévoit de nombreuses phases d'arrêt (entretien, remplacement d'équipements), ne sera pas doté de ces équipements. Quant à la chaleur générée lors des « tirs » de plasma, elle sera évacuée par une tour de refroidissement à tirage induit constituée de dix cellules individuelles.

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 annulaires⁸; un autre destiné à l'assemblage du cryostat; un édifice exceptionnellement massif, le Complexe Tokamak⁹, qui regroupe les bâtiments dédiés à la gestion du tritium, au tokamak lui-même et aux systèmes de diagnostics; un hall d'assemblage¹⁰ 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 440 000 tonnes de béton et d'acier reposent sur un système parasismique conçu pour filtrer 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 édifée sur le site est la plus puissante unité de ce type jamais construite. Elle produira et distribuera les fluides indispensables au refroidissement des aimants supraconducteurs¹² de la machine, de son écran thermique et des cryopompes utilisées pour réaliser le vide très poussé qui règnera à l'intérieur de la machine et de son enveloppe protectrice.

À ce jour, près des trois quarts des travaux de génie civil sont réalisés et de nombreuses installations (usine cryogénique, bâtiments de conversion électrique, etc.) sont en cours d'équipement. Au cœur de la plateforme, le béton du Bâtiment Tokamak a atteint sa hauteur

définitive et l'on se prépare à dresser en prolongement du hall d'assemblage la structure métallique du hall de levage, dont le double pont roulant, d'une capacité de 1500 tonnes, permettra de déposer avec une très grande précision les éléments préassemblés de la machine dans la fosse d'assemblage.

Pour ce qui concerne les fabrications *in situ*, deux anneaux de 17 mètres de diamètre (bobines de champ poloidal) sont en cours de production et deux des quatre sections du cryostat sont désormais finalisées. Deux autres bobines, d'un diamètre encore supérieur (24 mètres) entreront en fabrication dans les années qui viennent.

Aux limites de la faisabilité industrielle

Ces chiffres, ces dimensions, ces capacités hors-norme reflètent la nature unique de la machine qui est au cœur de l'installation. Le plus gros tokamak en activité, le JET européen, dispose d'un volume de plasma de 80 m³ environ. Celui d'ITER sera de l'ordre de 850 m³, le seuil presque minimal pour garantir l'isolation thermique du plasma et, par voie de conséquence, un temps de confinement de l'énergie propice aux réactions de fusion.

D'une certaine manière, tout procède de ce volume minimal et du système magnétique qui lui est associé : la puissance de l'usine cryogénique et des systèmes de chauffage externe, les dimensions des espaces sous vide et, ultimement, celles des bâtiments eux-mêmes.

La machine ITER et le cryostat qui l'enveloppe pèsent 23 000 tonnes, soit 3,5 fois la masse de la tour Eiffel; chacun des 18 aimants verticaux qui créent le champ magnétique toroïdal est plus lourd (360 tonnes) qu'un Boeing 747 à pleine charge; la masse des six bobines annulaires s'étage de 200 à 400 tonnes. Le bobinage du solénoïde central, le «cœur battant» de la machine, pèse à lui seul un millier de tonnes et le champ magnétique (13 Teslas) qu'il génère pourrait soulever un porte-avions.

Les pièces de la machine les plus exposées au feu du plasma sont conçues pour résister à des charges thermiques dix fois supérieures à celles qu'un véhicule spatial rencontre lors de sa rentrée dans l'atmosphère terrestre — dans une mission spatiale toutefois, cette phase ne dure que quelques minutes, alors que les plasmas d'ITER pourront durer jusqu'à une heure.

Au niveau du «divertor», cette pièce particulièrement massive¹³ située dans la partie basse de la machine et qui assure l'extraction des effluents gazeux et des impuretés du plasma, la charge thermique sera de l'ordre de 20 MW par mètre carré. À titre de comparaison, les flux de chaleur dans un réacteur de fission sont de l'ordre de 1 MW/m². Pour résister à l'intensité de ce flux de chaleur, les éléments «face au plasma» du divertor sont recouverts de tuiles de tungstène activement refroidies dont les prototypes sont actuellement testés en Russie dans une installation dédiée et dans le tokamak WEST du centre CEA de Cadarache.

ITER n'est évidemment pas la première machine confrontée à de tels défis technologiques. Un sous-marin explorant les abîmes, une sonde lancée vers les confins du système solaire, une fusée spatiale ou un rover évoluant sur la planète Mars le sont tout autant. Mais les technologies et les systèmes complexes sur lesquels ils reposent ont été éprouvés et validés par des décennies d'utilisation. Le tokamak ITER, même s'il bénéficie du retour d'expérience accumulé depuis un demi-siècle, est une machine *first-of-a-kind* — un instrument unique, qui repousse les technologies existantes aux limites extrêmes de la faisabilité industrielle.

Prenons l'exemple du vide : dans l'enceinte toroïdale du Tokamak où se produisent les réactions de fusion, le vide qui doit être obtenu est proche de celui de l'espace interstellaire où la pression est dix millions de fois plus faible que celle de l'atmosphère terrestre.

Les pompes mécaniques traditionnelles sont incapables de créer un environnement aussi extrême. ITER a donc développé des

«cryopompes» dont les panneaux internes¹⁴, refroidis à 4,5 K (moins 268,5 °C) piègent et immobilisent par adsorption les molécules et les atomes que les pompes mécaniques n'ont pu évacuer.

Un apprentissage industriel partagé

Autre difficulté, plus redoutable encore : tout en autorisant le passage de nombreux systèmes (télémanipulation, injection du combustible, antennes de chauffage, diagnostics de toute nature, etc.), la chambre à vide du Tokamak ITER doit demeurer absolument hermétique («*leak-proof*» à l'hélium) en dépit des multiples interfaces et des centaines de mètres de soudures de cette enceinte entre toutes stratégique. Le niveau d'étanchéité de la chambre à vide est tel que, sur une période de 10 000 ans, le volume d'air susceptible de traverser la paroi est équivalent à celui d'un verre de table...

Le système magnétique, qui confine le plasma dans la chambre à vide, offre un autre exemple des immenses défis technologiques auxquels la construction de la machine se trouve confrontée. Le Tokamak ITER compte quelque 10 000 tonnes d'aimants qui, pour être maintenus à l'état supraconducteur, doivent être refroidis à la température extrême de 4 K (moins 269 °C).

Ce système compte plus de 180 kilomètres de câbles supraconducteurs gainés d'acier (la distance qui sépare Marseille de Nice ou Paris d'Arras) et des milliers d'interfaces et de points de soudure au travers desquels doivent circuler en permanence 25 tonnes d'hélium liquide, fournies par l'usine cryogénique de l'installation. Comme dans la chambre à vide ou le cryostat, aucune fuite, même la plus infime, ne saurait être tolérée.

Ce niveau d'exigence, qui garantit la qualité et la performance des plasmas, s'étend à l'ensemble des éléments et systèmes de l'installation et explique la durée de construction. Pour s'y conformer, les industries et les laboratoires des partenaires européen, chinois, indien,

japonais, coréen, russe et américain ont déployé des efforts considérables en termes de contrôle qualité, développant des technologies inédites, des matériaux, des procédés de fabrication et des techniques d'assemblage innovants. Ils y ont gagné des savoir-faire nouveaux et les avantages compétitifs qui en découlent.

En optant pour le principe de la « fourniture en nature », ITER entendait associer pleinement les industries des membres du programme à l'ensemble des fabrications requises par la machine et ses systèmes annexes.

Le choix, par exemple, de répartir la fabrication des neuf secteurs de la chambre à vide entre l'Europe et la Corée (avec de fortes contributions de l'Inde et de la Russie); celui d'attribuer les différents éléments des bobines de champ toroïdal à la Chine, l'Europe, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis; celui encore d'associer la Chine, l'Europe, la Corée et la Russie à la réalisation de la couverture interne de la chambre à vide ont certes ajouté des contraintes industrielles majeures à un projet qui n'en manquait pas. Mais la formule a permis à chacun des pays membres d'ITER d'acquérir la maîtrise de l'ensemble des fabrications nécessaires à la construction d'un réacteur de fusion.

Or, c'était là l'un des enjeux stratégiques d'ITER. Au-delà de l'objectif premier du programme — démontrer la faisabilité de l'énergie de fusion dans le cadre d'une très large collaboration internationale —, ITER a été conçu comme une entreprise pédagogique, le lieu où les nations participantes acquièrent et partagent¹⁵ l'expertise qui leur permettra, le cas échéant, de développer indépendamment ou en collaboration une filière de fusion industrielle et commerciale.

Acquise dans le cadre d'ITER, cette expertise a trouvé d'autres domaines d'application. Ainsi, l'imagerie médicale bénéficie des avancées réalisées dans le domaine des matériaux supraconducteurs; des techniques développées pour la production de pièces aux formes particulièrement tourmentées sont désormais utilisées dans le monde de l'aéronautique; la robotique et

l'électronique en milieu extrême, la transmission de signal à très haute fréquence et les systèmes de contrôle-commande adaptés aux machines les plus complexes bénéficient pareillement des avancées liées au programme ITER.

Ces *spin-offs* ne sont pas exclusivement technologiques. Les spécialistes de la logistique n'avaient jamais été confrontés, jusqu'ici, à la nécessité d'assurer et de coordonner la prise en charge, le conditionnement, le transport multimodal, la livraison, le stockage, la traçabilité de millions de pièces venant de 35 pays différents — une expérience qui, déjà, sert de modèle à d'autres grandes collaborations internationales.

La « machine d'après »

Au-delà de sa dimension scientifique, technique et industrielle, ITER aura défriché un territoire dont les ressources se révéleront sans doute essentielles pour l'avenir de notre civilisation. En rassemblant en un même lieu et autour d'un même objectif des hommes et des femmes originaires de 35 pays, l'Organisation internationale ITER préfigure ce que seront nécessairement les grandes entreprises de demain.

Ces hommes et ces femmes que distinguent la langue, la culture, les valeurs, les méthodes de travail, le rapport à la hiérarchie, ont appris à travailler ensemble, adoptant une *lingua franca*, l'anglais, qui n'est langue maternelle que pour 15 % d'entre eux.

À l'exception des organisations des Nations unies, une telle diversité ne se rencontre pas. Aux Nations unies toutefois, chacun agit pour le pays qu'il représente — à ITER, quelle que soit notre nationalité, nous sommes tous mobilisés par la seule réalisation de l'objectif commun, en toute indépendance par rapport à notre pays d'origine. La loyauté envers les intérêts du programme prime sur toute autre considération.

Au mois de novembre 2017, ITER avait finalisé la moitié des tâches indispensables à la production de son Premier Plasma, programmé pour la fin de l'année 2025. Progressant depuis

2025-2035 : Du «premier plasma» à la pleine puissance

La feuille de route («*baseline*») validée par le Conseil ITER en 2016, assigne un premier objectif au programme ITER : la production d'un premier plasma à la fin de l'année 2025.

D'une durée minimale de 100 millisecondes, ce plasma d'hydrogène initial — en fait une «campagne» d'une durée approximative d'un mois — a pour objet de vérifier le parfait alignement du champ magnétique du tokamak et de valider l'intégration nominale de ses principaux éléments et systèmes (aimants, alimentation électrique, refroidissement, vide et cryogénie).

Cette première étape franchie, l'assemblage de la machine se poursuivra pendant près de trois ans avec l'installation progressive de systèmes annexes (chauffage additionnel, bobines de correction et de stabilisation, diagnostics, systèmes d'atténuation des disruptions, etc.) qui permettront d'aborder, au mois de décembre 2028, la phase dite «*Pre-Fusion Plasma Operation*» au cours de laquelle seront explorés et caractérisés différents régimes de plasma «non nucléaires» (hydrogène et hélium). Cette phase durera un peu plus de six ans.

À la fin de l'année 2035, au terme d'une période d'arrêt au cours de laquelle les ultimes composants et systèmes seront mis en place, ITER sera prêt à aborder la phase dite «*Fusion plasma operation*» qui culminera par la production de 500 MW d'énergie de fusion pendant une durée minimum de 5 minutes.

Aux plasmas d'hydrogène et d'hélium succéderont des plasmas de deutérium pur, puis des plasmas deutérium et tritium, ce dernier d'abord à l'état de traces puis, progressivement, à un taux de plus en plus élevé jusqu'à 50 % voire au-delà.

Il s'agira alors de réaliser l'objectif majeur du programme ITER : obtenir a) lors de décharges de plasma d'une durée de 300 à 500 secondes une amplification de puissance de l'ordre de 10 (« $Q \geq 10$ »), c'est-à-dire l'obtention d'une puissance de fusion de 500 MW thermiques pour un apport de chauffage de 50 MW; b) une amplification de 5 (« $Q \geq 5$ ») au cours de «décharges longues» de l'ordre de 1000 secondes et enfin, c) toujours avec le même facteur d'amplification (« $Q \geq 5$ ») opérer en régime stabilisé pendant un minimum de 3000 secondes.

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», collectivement baptisée DEMO et caractérisée par un fonctionnement continu, la connexion au réseau et la génération du tritium dans l'enceinte même de la machine.

Tous les DEMO cependant ne se ressemblent pas : celui que projette l'Europe est un «démonstrateur industriel» d'une puissance de 300 à 500 MWe, prélude à une centrale de fusion qui pourrait voir le jour à l'horizon 2050. Coréens et Chinois sont tout aussi déterminés : les premiers ont entamé les études d'un «K-DEMO» dès 2012 et estiment pouvoir en lancer la construction dès 2027; les seconds ont déjà choisi le site de construction de leur *China Fusion Engineering Test Reactor* (CFETR), étape intermédiaire entre ITER et le DEMO chinois dont la construction pourrait commencer en 2030. La Russie se distingue par un projet de réacteur hybride¹⁶, baptisé *DEMO-Fusion Neutron source* (FNS); l'Inde est également engagée dans un projet de réacteur intermédiaire

(SST-2) que ses caractéristiques situent à mi-chemin d'ITER et d'un futur DEMO...

Dans tous les cas, quelles que soient les options et les étapes envisagées par chacun des membres du programme, c'est le retour d'expérience d'ITER qui déterminera les paramètres des futurs DEMO.

Depuis qu'elle fut entreprise, au début des années 1950, la quête de l'énergie de fusion a mobilisé trois générations de physiciens et d'ingénieurs. Ces hommes, ces femmes sont semblables aux bâtisseurs de cathédrales : ceux d'entre eux qui creusaient les fondations savaient que d'autres, longtemps après eux, dresseraient la flèche vers le ciel.

Et comme la construction des cathédrales, ITER et la fusion s'inscrivent dans ce « temps long » que nos sociétés savent de moins en moins appréhender. Mais l'enjeu est à la mesure de cette longue patience : l'énergie de fusion est la seule à pouvoir répondre, en complément avec les énergies renouvelables, à la croissance prévisible de la demande mondiale en électricité, non seulement pour ce siècle, mais pour les milliers, voire les millions d'années qui viennent — une perspective qui suffit à justifier l'ampleur de l'effort international engagé dans le programme ITER.

NOTES

- 1 Ensemble, les membres d'ITER représentent plus de la moitié de la population mondiale et 85 % de la production de richesses de la planète.
- 2 La « chaîne proton-proton », prédominante dans les étoiles de masse relativement faible, comme le Soleil.
- 3 TFTR a été démantelé en 1997.
- 4 Les États-Unis réintègrent le projet en 2003, la Corée et la Chine le rejoignent la même année; l'Inde, qui avait été associée au choix du site, devient le septième membre d'ITER au mois de décembre 2005.
- 5 Une usine d'enrichissement de l'uranium ainsi qu'une installation d'entreposage de déchets et de retraitement du combustible usé cohabitent sur le site de Rokkasho-Mura.
- 6 Équipé de nouveaux composants et rebaptisé WEST (pour W [pour tungstène] *Environment in a Steady-state*

Tokamak) la machine est désormais utilisée comme banc d'essai des technologies qui seront mises en œuvre dans la machine ITER.

7 Signé au mois de février 2007 entre l'Europe (Euratom) et le Japon, cet accord définit le cadre d'un programme de recherche et de développement complémentaire en soutien d'ITER (test de matériaux, simulations avancées, gestion du tritium, etc.).

8 Quatre des six bobines de champ de toroïdal de la machine (17 et 24 mètres de diamètre) sont trop encombrantes pour être livrées par l'itinéraire spécial. Elles sont donc fabriquées sur site.

9 120 mètres de long, 80 mètres de large, 80 mètres de haut.

10 100 mètres de haut, 60 mètres de large, offrant une surface totale de 5500 m².

11 Différentes formulations de béton sont mises en œuvre dans la construction des bâtiments nucléaires : béton de haute densité à base de magnétite importée spécialement de Laponie suédoise; béton ultra-fluide autoplaçant; béton boré « neutrophage », etc.

12 Le bobinage des électroaimants du Tokamak ITER est constitué de matériaux supraconducteurs (niobium-titane ou niobium-étain) qui, une fois refroidis à une température inférieure à 4,5 K n'opposent pas de résistance au passage du courant électrique et ne dissipent en conséquence pas d'énergie.

13 Le divertor est une structure annulaire composée de 54 modules activement refroidis pesant chacun une dizaine de tonnes.

14 Ces panneaux sont tapissés d'une très fine matrice poreuse à base de charbon actif issu d'une récolte particulière de noix de coco...

15 Conformément à l'accord international, les partenaires partagent l'ensemble de la propriété intellectuelle et industrielle développée dans le cadre du programme.

16 Un réacteur hybride combinerait les technologies de la fusion et celles de la fission pour produire des neutrons de haute énergie susceptibles, selon ses promoteurs, de générer des réactions de fission dans un matériau fertile comme le thorium 232 ou l'uranium 238, mais également de « transmuter » les déchets radioactifs de haute activité issus du processus de fission conventionnel. Sur le plan de la sûreté nucléaire, la faisabilité de ce concept reste cependant à démontrer.