



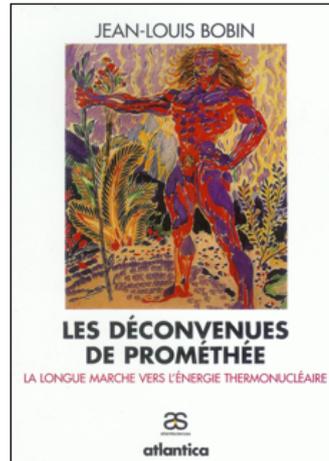
La fusion thermonucléaire contrôlée est souvent présentée comme le Saint Graal des technologies destinées à mettre des sources d'énergie à la disposition de l'humanité. Alors que le XXI^e siècle est déjà bien entamé, des scientifiques sont toujours à sa recherche. Cette forme d'énergie nucléaire aurait bien des avantages. Le combustible est abondant. Il n'y a pas de danger d'emballement. Les déchets radioactifs se limitent à des matériaux activés sous l'effet des neutrons, problème aisément gérable.

Mobilisée depuis le milieu du XX^e siècle, une vaste communauté internationale n'a pas encore réussi à construire un réacteur à fusion générateur d'électricité. ITER, le projet de confinement magnétique le plus avancé en ce premier quart du XXI^e siècle, ne comporte pas de couplage à un alternateur.

Plusieurs générations d'acteurs d'une aventure scientifique loin d'être terminée sont passés par des séquences d'exaltation entrecoupées de périodes de doute.

Une entreprise prométhéenne

- Actualité de la fusion nucléaire
- Quelques rappels
 - Feu doux (confinement magnétique, ITER),
 - Feu explosif (confinement inertiel, NIF, LMJ)
- Le Tokamak et ITER, une longue histoire
- La fusion par laser, une autre longue histoire
- Perspectives d'avenir



2

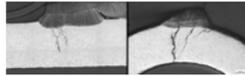
Qu'en est il aujourd'hui ? Alors que l'actualité de la fin de 2022 a refocalisé l'attention sur la fusion nucléaire avec des bonnes et des mauvaises nouvelles.

Pour appréhender l'origine et les implications de celles-ci, il convient de rappeler quelques bases à partir desquelles se sont développées deux approches principales : une configuration particulière de confinement magnétique, le TOKAMAK qui conduit au projet international ITER ; le confinement inertiel avec l'utilisation des lasers de puissance.

Lancés depuis plus d'un demi-siècle, les programmes correspondants ont produit un grand nombre de résultats. Les avancées sont significatives malgré une apparente lenteur. Des voies d'avenir se dessinent qui pourraient accélérer la marche vers de nouvelles sources d'énergie décarbonées.

Actualité

ITER NEWSLINE -
21 Nov, 2022
Machine assembly



Key components to be repaired

When building a machine as large and as complex as ITER, difficulties and setbacks do not come as surprises—they are an integral part of manufacturing, assembling and installing first-of-a-kind components. From the first stages of fabrication to the final insertion in the Tokamak pit, component challenges are a constant and familiar companion. Sometimes, however, in the midst of ordinary, almost daily issues, a concern of a larger dimension arises—one which demands in-depth examination, creativity in devising corrective actions, and time and budget to repair. Two-and-a-half years into its machine assembly phase, ITER is facing a concern of this nature: defects have been identified in two key tokamak components, the thermal shields and the vacuum vessel sectors.

Des fissures détectées dans le mégaprojet démoniaque de fusion nucléaire ITER à Cadarache

Par Rédaction le jeudi 24 novembre 2022, 16:40 - Cadarache - [Lien permanent](#)

<http://coordination-antinucleairesudest.net/2012/index.php?>



Fusion nucléaire : comment les physiciens américains ont décroché le graal

Par [Franck Daninos](#)

Publié le 16.12.2022 à 17h14

Après trente années d'efforts acharnés, les chercheurs américains de National Ignition Facility sont parvenus à atteindre l'ignition, processus où la fusion de noyaux atomiques produit davantage d'énergie qu'il n'en consomme. Le tout grâce au laser le plus puissant au monde, construit pour les besoins de la discussion nucléaire des États-Unis.

France's Iter project on nuclear fusion may hold key to sustainability

Scientists in California reported a major breakthrough this week — but it is a project based in France that experts say may lead to the promised land of abundant clean energy, writes Constance Kampfner

Bad news, good news

Une mauvaise nouvelle:

Un nouveau malheur d'ITER qui va entrainer des retards et très probablement des surcoûts. Les opposants trouvent là une nouvelle raison de protester contre sa construction.

Une bonne nouvelle:

Le franchissement d'un seuil de parité énergétique dans une expérience de fusion par laser (« *scientific breakeven* »).

Pourquoi la fusion?

Paramètres physiques de réactions exothermiques			
Type de réaction:	chimique	fission	fusion
Exemple	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$^1_0n + ^{235}_{92}U \Rightarrow ^{143}_{54}Ba + ^{91}_{38}Kr + 2^1_0n$	$D (^2H) + T (^3H) \Rightarrow 4He + ^1_0n$
Matières premières (de la centrale)	Charbon et Air	UO ₂ (3% ²³⁵ U + 97% ²³⁸ U)	Deutérium et Lithium
Température typ. (K)	1000	1000	100 000 000
Énergie dégagée par kg de combustible (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$
		$\times 6 \cdot 10^4$	$\times 10^7$

4

Les réactions nucléaires sont susceptibles de libérer de l'énergie en quantités bien plus importantes que les réactions chimiques qui concernent des atomes ou des molécules. Au niveau microscopique, on a affaire à des MeV comparés à quelques eV. Rapporté au niveau macroscopique, on obtient les chiffres du tableau qui montrent par unité de masse un facteur de $6 \cdot 10^4$ entre la fission de l'uranium et la combustion du charbon (et encore on n'a pas compté la masse de l'oxygène !). La fusion est de ce point de vue encore meilleure: un facteur supplémentaire proche de 200, par unité de masse, par rapport à la fission.

Fission et fusion : différences

Fission

- Casser des noyaux lourds, U, Pu... avec des neutrons
- Pas de barrière de potentiel électrostatique
- Gérer des flux de neutrons
-
- $\approx 1\,000\text{ K}$ (0.1 eV)
- Déchets HAVL
- Passage ultra-rapide des concepts au stade industriel

Fusion

- Coller entre eux des noyaux légers, $^2\text{H}^+$ (D), $^3\text{H}^+$ (T)...
- Barrière de potentiel à franchir
- Gérer des flux de particules chargées (température) dans un amplificateur d'énergie ou de puissance.
- $\geq 10^8\text{ K}$ (10 keV)
- Déchets limités aux matériaux activés
- Toujours au stade des recherches

5

Parmi les raisons qui expliquent les succès fulgurants de la fission, il en est une fondamentale qui tient à la physique. En effet cette réaction libérant de l'énergie est provoquée par des neutrons qui ne sont pas affectés par la barrière de potentiel électrostatique protégeant les noyaux des atomes contre d'éventuelles incursions de projectiles chargés positivement. A contrario les réactions de fusion ont lieu entre particules chargées dont l'énergie doit être suffisante pour avoir une bonne probabilité de franchir la barrière par effet tunnel. Pour qu'il en soit ainsi, la température du milieu réactif se compte, comme au centre des étoiles, en dizaines si ce n'est en centaines de millions de degrés. On conçoit aisément que maîtriser dans ces conditions la fusion, appelée alors thermonucléaire, soit une entreprise d'une rare difficulté.

Précurseurs, régime thermonucléaire

- En 1919, Jean Perrin postule que le Soleil tire son énergie de réactions nucléaires de fusion.
- En 1938, George Gamow et Edward Teller imaginent le régime thermonucléaire et effectuent les premiers calculs (à la main).
- Il existe une possibilité d'autoentretien de la réaction si les gains dus à la récupération partielle de l'énergie libérée compensent exactement les pertes.
- Le milieu où se produit la réaction est à la température de 10^8 K (10 keV). Les produits de réaction emportent une énergie de l'ordre de 10 MeV : la fusion thermonucléaire agit comme un **amplificateur d'énergie**.

C'est ignoré de la plupart des livres d'astrophysique : en attribuant l'énergie des étoiles à des réactions nucléaires, Jean Perrin avait précédé Arthur Eddington qui le reconnaît dans ses ouvrages.

Jeunes immigrés aux USA Gamow (russe) et Teller (hongrois) analysent le régime thermonucléaire et montrent qu'il est bien adapté à une abondante production d'énergie. Dans le régime thermonucléaire, les noyaux qui réagissent ont une énergie utile notablement supérieure à l'énergie thermique : typiquement 6 à 10 fois. Dans un milieu gazeux à l'équilibre thermodynamique les ions de cette tranche de la queue de distribution aux grandes énergies (constamment renouvelée) sont les seuls qui contribuent efficacement à la réaction, quelle que soit celle-ci.

L'énergie des produits de réaction est de l'ordre de 1000 fois supérieure à l'énergie moyenne des ions. Lorsqu'ils sont chargés, ils perdent tout ou partie de leur énergie au sein du milieu en réaction et peuvent ainsi servir à entretenir celle-ci.

Maîtrise du feu thermonucléaire

Comment tirer parti d'un facteur d'amplification de l'ordre de 500?

- **Feu doux** : **confinement magnétique**. Le défi :
Maintenir le plus longtemps possible à la température de 10^8 °K, en l'isolant de toute paroi par du champ magnétique, un **plasma** tenu contenant 10^{14} ions/cm³.
densité faible pour éviter l'emballement de la réaction
- **Feu vif** :
explosion d'une très petite quantité de matière (des microgrammes) ;
confinement inertiel
- Température élevée: > 100 millions de degrés (10 keV).
Dans tous les cas, le milieu réactif est un **plasma**

7

Il existe deux façons principales d'aboutir au contrôle des réactions de fusion :

- ou bien les pertes sont telles qu'il existe un point d'équilibre stable que l'on s'efforcera de maintenir le plus longtemps possible en isolant le plasma de toute paroi matérielle qui le refroidirait. C'est la voie du *confinement magnétique* : l'interposition d'un champ magnétique isole de toute paroi le plasma chaud pour éviter d'inacceptables pertes par conduction. La densité du plasma doit être inférieure ou égale à 10^{20} ions par m³ pour limiter la densité d'énergie à une valeur compatible avec les champs magnétiques réalisables dans de grands volumes.
- ou bien, en l'absence d'un point de fonctionnement stable, on laisse le système s'emballer en faisant en sorte que l'énergie produite à la fin du processus, après extinction par épuisement partiel du combustible, soit très supérieure à l'énergie investie tout en restant suffisamment basse pour ne pas détruire l'installation. C'est la voie dite du *confinement inertiel* qui est plutôt l'absence de confinement. Les lasers de grande puissance y ont trouvé une application importante

Calculs de coin de table :

Magnétique 1 GW de fusion consomme 3 mg de DT par seconde

Inertiel 1 mg DT → 340 MJ (si le rendement est 30%, 100 MJ ≈ 25 kilos de TNT)

Dans le cœur des étoiles, la nature s'y prend autrement : confinement gravitationnel de masses considérables d'hydrogène.

Le plasma

- Quatrième état (fluide ionisé) de la matière
- Extrême sensibilité, à toutes les échelles, aux champs électromagnétiques internes ou externes
- Excellent conducteur à haute température (comparable aux supra)
- Siège de multiples modes d'oscillation
- Instable
- Turbulent
- ...



8

La majeure partie de l'univers visible est constituée de plasma.

C'est un fluide donc comme tel, sujet à tous les problèmes rencontrés en hydrodynamique : instabilités (Rayleigh-Taylor...), turbulence...

Il est ionisé : l'application d'un champ magnétique le rend anisotrope ; les innombrables modes d'oscillation engendrent des formes spécifiques de turbulence.

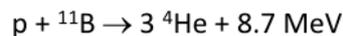
Les premières recherches sur la fusion au cours des années 1950-60 ont mis en évidence que les connaissances sur cet état de la matière, champion dans le domaine de l'infiniment complexe, étaient très insuffisantes.

Réactions envisageables

Réactions du deutérium (noyau stable mais peu lié)



Réaction proton-bore (tri alpha)



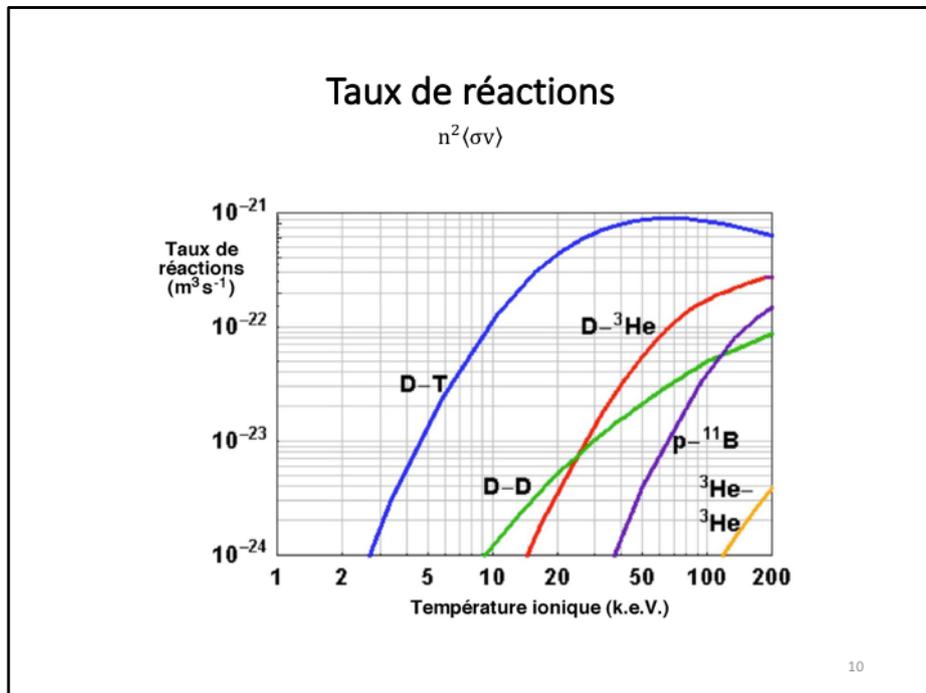
} a-neutroniques

9

Le deutérium (D) est le premier isotope lourd de l'hydrogène. Son noyau, stable mais peu lié, se compose d'un proton et d'un neutron. Il réagit avec une probabilité intéressante sur lui-même pour donner soit un proton et un noyau de tritium comportant un proton et deux neutrons, soit un neutron et un noyau d'hélium 3, deux protons et un neutron. Aucune des deux branches de la réaction DD ne l'emporte sur l'autre.

Du point de vue de la fusion, deux autres réactions du deutérium sont encore meilleures. La réaction deutérium tritium (DT) qui produit un neutron et un noyau d'hélium 4 libère plus d'énergie. Elle est en même temps plus vigoureuse que toutes les autres réactions du deutérium. La réaction deutérium hélium-3 libère autant d'énergie que la précédente mais elle a une probabilité moindre. Produisant un proton et un hélium-4, elle est a-neutronique ce qui limite fortement la radioactivité induite, d'où son intérêt.

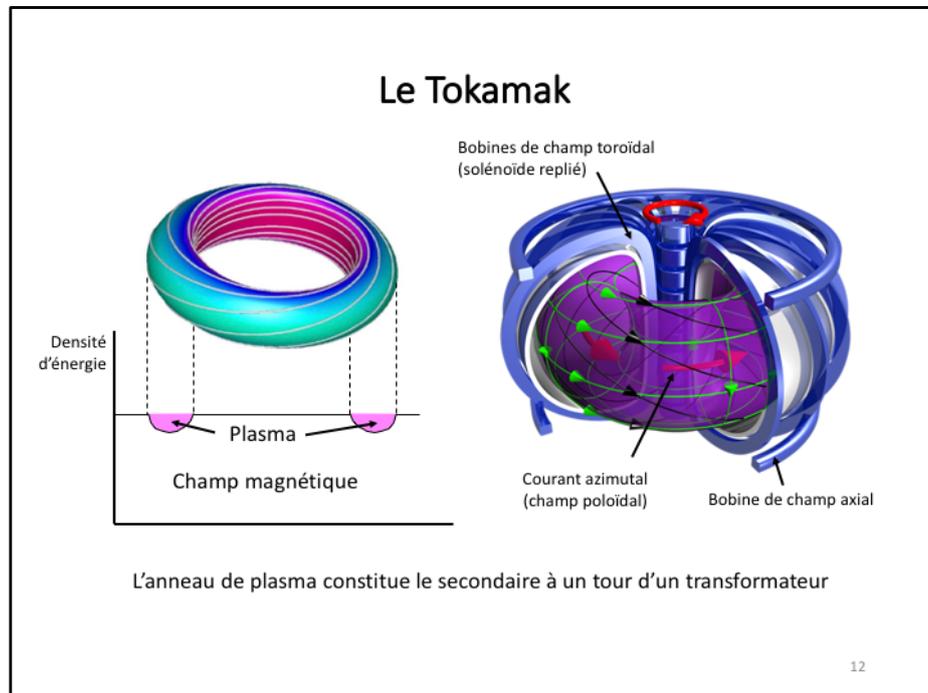
La réaction proton Bore 11 est également a-neutronique et s'ajoute aux précédentes dans le cadre des recherches sur la fusion.



Grâce à un pic de la section efficace aux environs de 100 keV, le taux de la réaction DT surpasse largement tous les autres. Pour la réaction DD, les taux calculés cumulent les deux branches.

Confinement magnétique: Tokamak, ITER

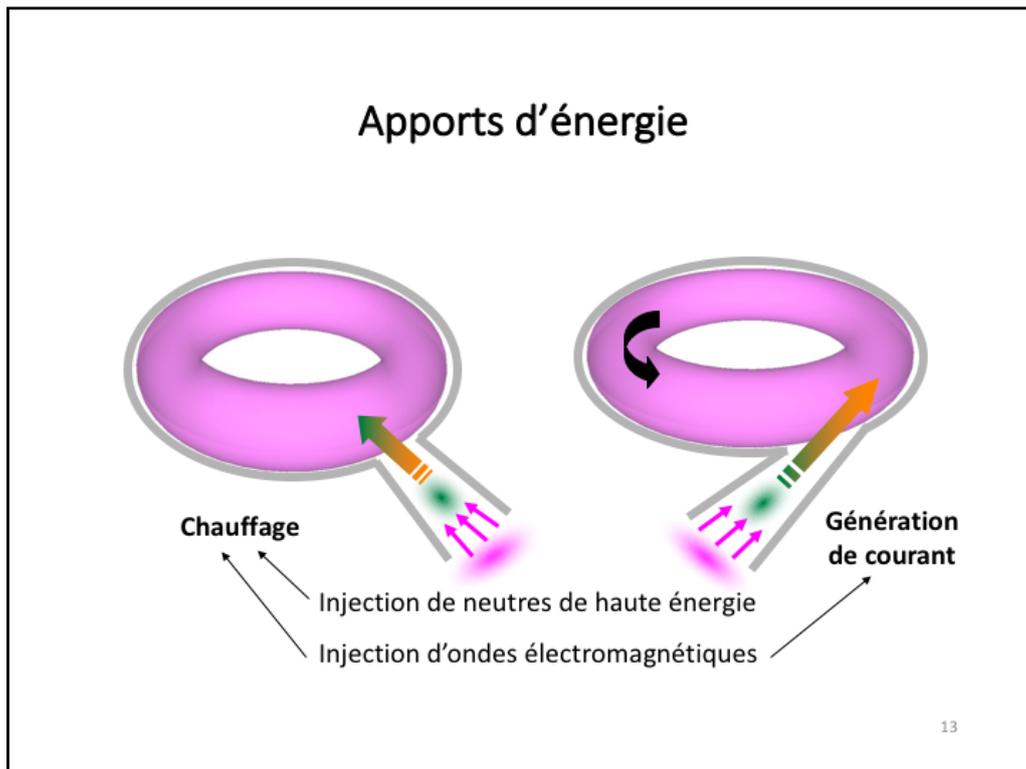
Pour obtenir un régime quasi stationnaire il convient d'utiliser un confinement magnétique : le plasma doit être extrêmement tenu et isolé de toute paroi par du champ magnétique. De multiples configurations ont été imaginées et testées.



La configuration la mieux étudiée et qui a donné lieu aux développements les plus importants pendant le dernier tiers du XX^e siècle et le début du XXI^e est appelée « *Tokamak* » d'après un acronyme forgé en russe pour chambre torique et confinement magnétique. Cette machine fut conçue en Russie — alors l'URSS — et Andreï Sakharov est crédité de l'idée de base, émise en 1952. Dans les années 60, Lev Artsimovitch en a dirigé les premières expérimentations à l'institut Kourtchatov de Moscou.

Il s'agit d'un anneau de plasma assez ventru parcouru par un courant de forte intensité. Le champ magnétique de ce courant combiné à celui d'un solénoïde replié assure une bonne stabilité du confinement. En contrepartie, la densité d'énergie matérielle est très inférieure à celle du champ. Le courant est créé par induction, l'anneau de plasma jouant le rôle du secondaire à un tour d'un transformateur. Cela implique a priori un fonctionnement pulsé.

Il existe bien d'autres possibilités de confinement magnétique qui ont pour la plupart fait l'objet d'expérimentations à petite échelle. Vers 1970 les performances obtenues étaient insuffisantes par rapport à celles des Tokamaks qui ont donné lieu au développement d'une véritable filière : au cours du dernier tiers du XX^e siècle, des tokamaks de plus en plus gros ont été construits dont TFTR à Princeton (USA) et le JET (Européen) à Culham en Grande Bretagne.



Pendant la montée linéaire du courant, le plasma qui ne subit pas de compression s'échauffe progressivement par effet Joule. Il devient de plus en plus conducteur au point que dans toutes les machines exploitées à ce jour, lorsque la température électronique atteint environ 2 keV, la résistivité du plasma, excessivement faible, se compare à celle des supraconducteurs. L'effet Joule est alors inopérant. Pour atteindre des températures plus élevées, il convient d'injecter de l'énergie dans le plasma.

Trois techniques de chauffage ont rapidement fait partie intégrante du développement de la filière. On a utilisé avec succès : la compression adiabatique (rapidement abandonnée car moins efficace), l'injection de neutres et l'irradiation par des radiofréquences.

Ces dernières, à condition d'être judicieusement appliquées, peuvent induire un courant toroïdal susceptible de maintenir la configuration magnétique au delà de la durée de l'impulsion fournie par le transformateur (« *current drive* »).

Conditions à satisfaire

- Critères généraux pour toute machine à fusion :

- Lawson (1957)

$$n\tau_c > 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}, \quad T \approx 10^8 \text{ °K}$$

τ_c = temps de confinement du plasma

- Triple produit

$$nT\tau_E \geq 3 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ °K s}$$

τ_E = temps de confinement de l'énergie

- Critère spécifique au Tokamak:

- Goldston (1984) pour dimensionner la machine

$$I^2 \text{ (MA)} = 1.4 \cdot 10^{-20} nT\tau$$

14

Le critère de Lawson résulte d'un raisonnement d'ingénieur sur la boucle :

réaction de fusion → machine thermique → alternateur → réseau



Le triple produit implique le temps de confinement de l'énergie, constante de temps de refroidissement observée lorsqu'on coupe toutes les sources d'énergie susceptibles de chauffer le plasma.

Ils ont donné le coup d'envoi d'un grand programme



15

ITER est au départ un projet politique.

En 1985 et 1986 eurent lieu des rencontres au sommet entre le président des Etats Unis, Ronald Reagan et le premier secrétaire du parti communiste de l'Union Soviétique Mikhaïl Gorbatchev.

Les physiciens des plasmas Alvin Trivelpiece pour les USA et Evgenyi Velikov pour l'URSS participèrent à ces réunions. On les voit en bas à droite sur cette photo.

Au plus haut niveau

1985 R. Reagan M. Gorbatchev
 A. Trivelpiece E. Velikov

approuvent le principe d'une collaboration internationale sur la fusion.

- Ce sera finalement le projet I.T.E.R.
(la voie?).

16

Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev tenaient à concrétiser une ère nouvelle des relations entre l'Est et l'Ouest au moyen d'une entreprise commune de longue haleine sur un objectif ambitieux sans être vital à court terme mais impliquant une réelle et permanente coopération. De part et d'autre les conseillers scientifiques, Alvin Trivelpiece pour les Etats Unis, Evgenyi Velikhov pour l'Union Soviétique, étaient issus de la physique des plasmas. La fusion magnétique offrait une opportunité idéale. Il fut donc décidé d'institutionnaliser la collaboration sur un unique projet entre des équipes travaillant depuis une dizaine d'années aux Etats-Unis, en Europe, en Russie et au Japon sur une nouvelle génération de tokamaks au-delà du JET et de TFTR. L'implosion de l'URSS en 1991 ne remit pas en cause cette entreprise.

Cette prise de décision au plus haut niveau s'inscrivait dans la nécessité d'une coopération internationale pour les étapes futures sur le chemin (ITER, voie royale?) de la fusion nucléaire.

Le programme ITER



- Machine ITER
- Machines annexes : JET, WEST (ex Tore Supra), ASDEX, JT 60 SA (Japon), EAST (Chine) ...
- IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility)

17

ITER est une organisation internationale à 7 partenaires : l'Europe, via Euratom, la Chine, la Corée (du sud), les Etats-Unis, l'Inde, le Japon et la Russie. L'Europe contribue pour 40 % au budget total de l'entreprise (construction du tokamak puis au moins 25 années d'exploitation) chacun des autres partenaires pour 10 %. La France intervient pour un cinquième des dépenses de l'Europe. Pour la réalisation de la machine, les travaux ont été répartis en sous ensemble homogènes, la responsabilité totale de chacun d'eux étant confiée à un seul des partenaires.

La machine ITER ne sera qu'un élément, le principal, dans un ensemble d'expériences visant à la réalisation d'un réacteur électronucléaire à confinement magnétique. En parallèle, on poursuivra l'exploitation de JET et de WEST (ex TORE SUPRA) tandis qu'un complément de programme, étudié depuis 2006 par une association entre le Japon et l'Union Européenne, a enclenché la modernisation du tokamak japonais JT-60 en JT-60SA (pour Super Advanced) qui comportera un solénoïde supraconducteur.

D'ici à 2030 aucun tokamak ne soumettra les matériaux qui le constituent à des flux de neutrons représentatifs des conditions d'un futur réacteur. Or, il est nécessaire de mener des recherches sur le comportement des matériaux exposés à de telles contraintes. Pour cette raison, une installation spécifique, IFMIF (pour International Fusion Material Irradiation Facility) doit être construite au Japon en complément du programme ITER.

I.T.E.R. 1998/2001

		Réacteur ITER 1998	ITER
Critère sur le triple produit	$nT\tau \geq 3 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ }^\circ\text{K s.}$		
Loi d'échelle de Goldston	$I^2 \text{ (MA)} = 1.4 \cdot 10^{-20} nT\tau$	$I \geq 20 \text{ MA}$	15 MA
Dimensions de l'anneau		$R \approx 9 \text{ m, } a \approx 3 \text{ m}$ $V \approx 2 \text{ 000 m}^3$	6m, 2m 800 m³
Masse de DT dans le plasma		2 g	≤ 1 g
Puissance de fusion		≥ 1 GW	400 MW

18

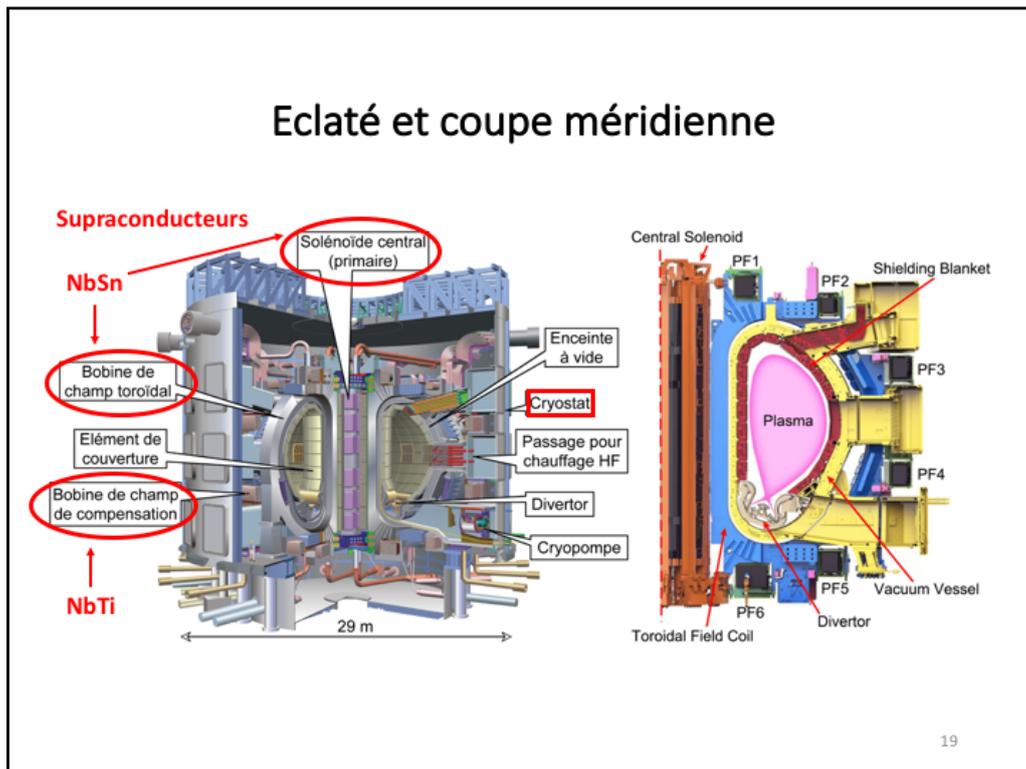
Dans ses ambitions premières, ITER visait explicitement, à échéance 2010-2020, la démonstration de l'allumage de la réaction thermonucléaire confinée. Cela aurait constitué l'équivalent de ce que fut pour la fission la divergence de la réaction en chaîne obtenue à Chicago le 2 Décembre 1942.

En juillet 1998, dans les délais, un projet détaillé de réacteur prototype (ITER-EDA pour Engineering Design Activities) était présenté à l'instance de décision. Le coût de construction était estimé à environ 7 milliards de dollars, sans garantie de non-dépassement, pour un allumage incertain. Jugé trop coûteux, ce projet n'a pas été approuvé et les responsables se virent confier la mission de définir un tokamak d'objectifs, de taille et de prix plus modestes.

Le nouveau projet, soumis en 2001, renonce à l'allumage. Dans la mesure où des systèmes de chauffage du plasma et de génération de courant non-inductive doivent être mis en place, l'allumage perd de son intérêt.

Le programme vise maintenant un gain en puissance de l'ordre de 10 au niveau de 400 MW de fusion D-T pendant 400s. Le tableau présente, dans une comparaison avec le projet de 1998, le dimensionnement de cette machine dont la construction a été décidée en 2003.

Eclaté et coupe méridienne



Le dessin d'ITER adopte une section méridienne en forme de D, comme le JET et intègre trois éléments majeurs : un solénoïde supraconducteur, un divertor et un dispositif de récupération de l'énergie de fusion, la *couverture**. Les deux premiers ont déjà été expérimentés. Le voisinage a priori insolite de supraconducteurs à la température de l'hélium liquide et d'un plasma à 10^8 K a fait ses preuves à Tore Supra. Le divertor a été un succès sur le JET et JT-60, après des essais réussis sur de petits tokamaks.

La couverture sera mise en œuvre pour la première fois. Elle est composée de modules dont l'épaisseur sera de 450 mm, facilement démontables et qui incorporent la première paroi face au plasma. Celle-ci, subissant un flux d'énergie de 200 à 500 kilowatts par mètre carré, doit satisfaire de multiples exigences : transparence aux neutrons, résistance aux contraintes thermiques et aux interactions plasma parois, bonne rigidité mécanique dans les conditions d'exploitation de la machine. Le reste du module doit absorber un flux de neutrons de 14 MeV représentant une puissance de 600 à 800 kilowatts par mètre carré. L'énergie de ces neutrons est transformée en chaleur transférée vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un fluide de refroidissement : de l'eau dont la température ne devra pas dépasser 200 °C sous 30 bars, ce qui est insuffisant pour faire tourner dans de bonnes conditions une turbine couplée à un générateur électrique.

Etapes importantes du chantier

- Mise en place des plots antisismiques
- Ferrailage de la dalle supportant la machine



20

Le choix du site s'est porté en 2005 sur un terrain contigu au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache situé au sud de la France dans la basse vallée de la Durance. La région PACA a beaucoup œuvré pour qu'ITER s'installe sur son territoire en affectant au projet un budget de 467 millions d'euros. Cette participation financière a été confirmée après les élections régionales de 2010 mais la région ne contribuera pas aux augmentations de coût. Le chantier a été lancé en 2007. La plateforme de 40 ha était finie de niveler à l'été 2009.

Le site est situé sur la faille de la moyenne Durance. Cette particularité entraîne la nécessité d'un dispositif parasismique. La dalle supportant la machine repose elle même sur un système de plots permettant d'encaisser des secousses jusqu'au niveau 5.8 sur l'échelle de Richter.

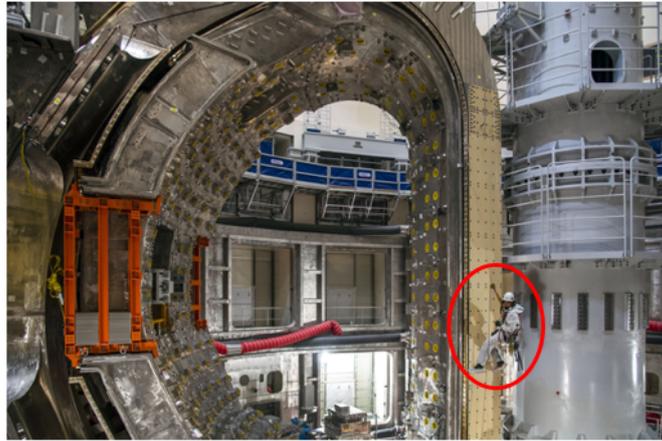
Le chantier en 2022



21

Les quarante hectares de la plateforme sont maintenant construits avec au centre le bâtiment réacteur. Tout est prêt pour le montage de la machine dont les composants arrivent par convois exceptionnels circulant le long d'un itinéraire routier aménagé pour cela depuis l'étang de Berre.

Montage



22

La phase de montage de la machine a maintenant débuté avec la mise en place des premières bobines supraconductrices de champ toroïdal. Elle vient d'être interrompue après la découverte de fissures dans les éléments livrés par la Corée du sud : bouclier thermique et secteur de l'enceinte à vide. C'est le dernier en date des malheurs d'ITER.

Les malheurs d'ITER

- 1998 Projet refusé : trop coûteux pour un résultat incertain.
- 2003-07 Manifestations anti ITER à l'occasion du débat public en région PACA
- 2010 Troisième report de la date du premier plasma. Nouvelle échéance (contraignante) : décembre 2019.
- 2010 L'administration Obama propose de réduire de 30% la contribution des Etats Unis.
- 2010 Europe Ecologie obtient l'arrêt du financement par la région PACA au-delà des 70 M€ déjà engagés.
- 2010 Nouveau recul d'échéances: fonctionnement DT reporté à 2026.
- 2010-15 Dérapages budgétaires provoquant la destitution de deux directeurs généraux (japonais) du projet.
- 2021 Détection de fissures dans des éléments déjà livrés
- 2022 L'ASN s'en mêle et fait suspendre le montage pour vérifications

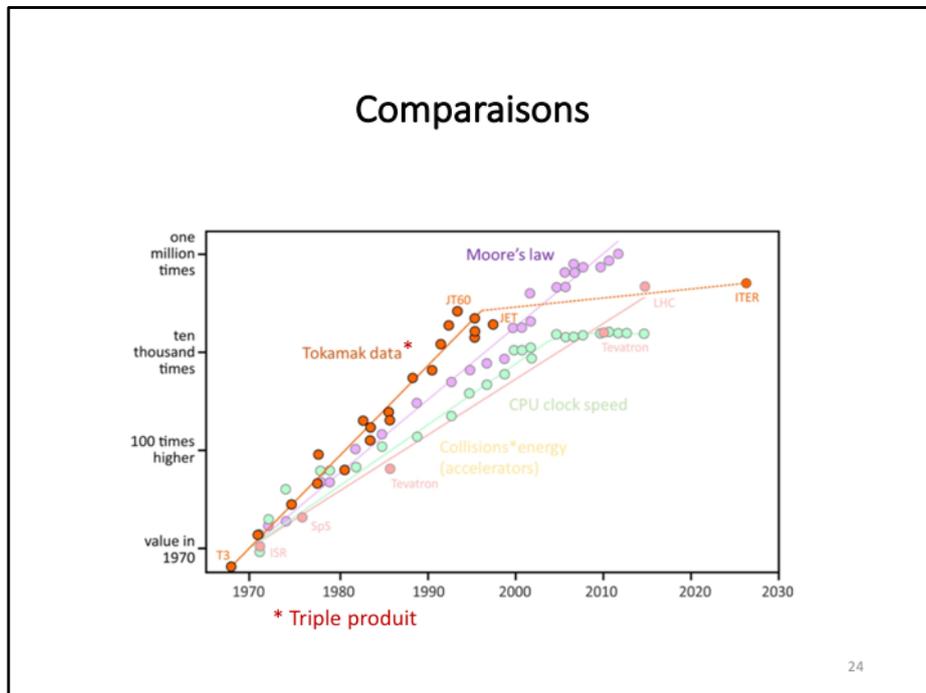
23

L'histoire d'ITER est parsemée de péripéties sur les plans financier, juridico-administratif, technique... dont l'effet principal a été de ralentir le programme et d'en augmenter le coût.

Contribuent également aux malheurs d'ITER, la maladie, la démission et le décès de Bernard Bigot, directeur du projet de 2015 à 2022 avec pour mission de tenir les budgets malgré les possibilités de dépassement incontrôlable ouvertes par les traités organisant ce programme. Le nouveau directeur est Pietro Barabaschi, un vétéran de la filière Tokamak (JET) et du projet ITER.

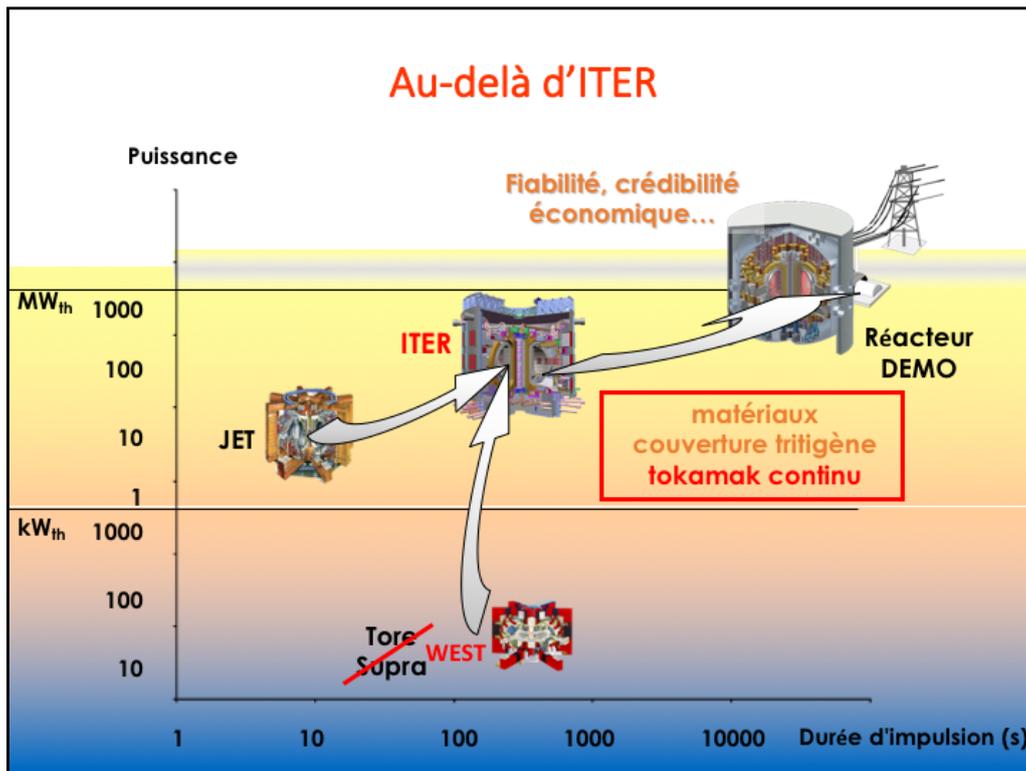
La délai entre la remise du projet en 2001 et la décision prise en 2003 de construire le réacteur à Cadarache est normal pour le choix d'un site dans le cadre d'une coopération internationale (« concours de beauté » en 2002 à Lyon au cours d'une conférence de l'AIEA sur la fusion).

Comparaisons



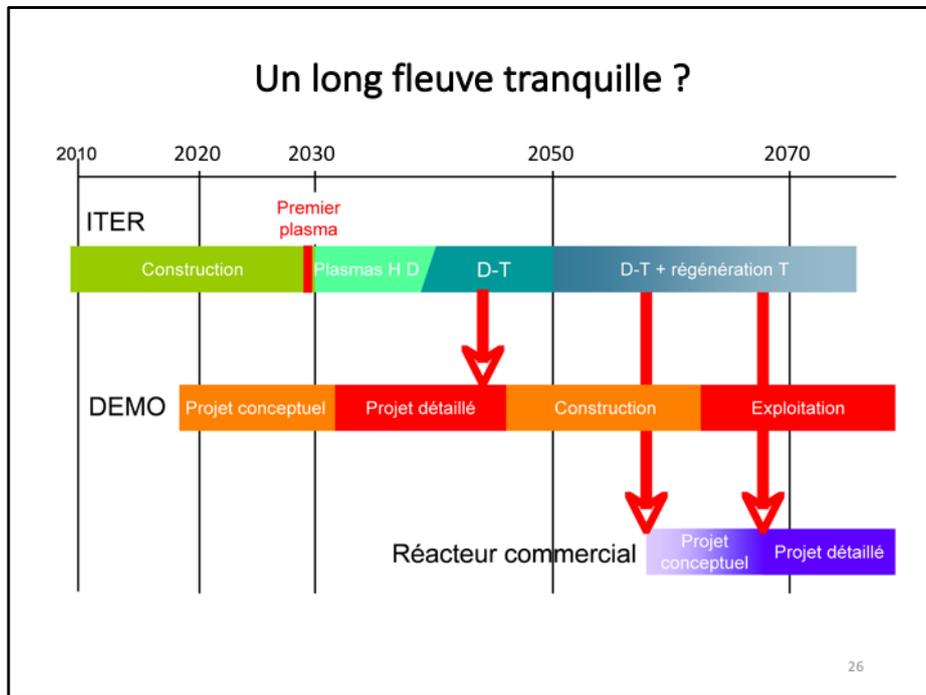
Et pourtant...

Revenant sur l'historique de la filière tokamak, il existe un indicateur de performance, le triple produit, dont on peut suivre l'évolution au cours du temps et la comparer à celle d'autres technologies à croissance rapide. Sur trente ans, jusqu'à la fin du XXe siècle, les tokamaks ont fait aussi bien sinon mieux que la célèbre loi de Moore qui illustre les progrès de l'informatique. Au XXIe siècle la situation est tout à fait différente, dominée par l'avancée plus ou moins cahoteuse de la construction d'ITER.



Vues d'avenir :

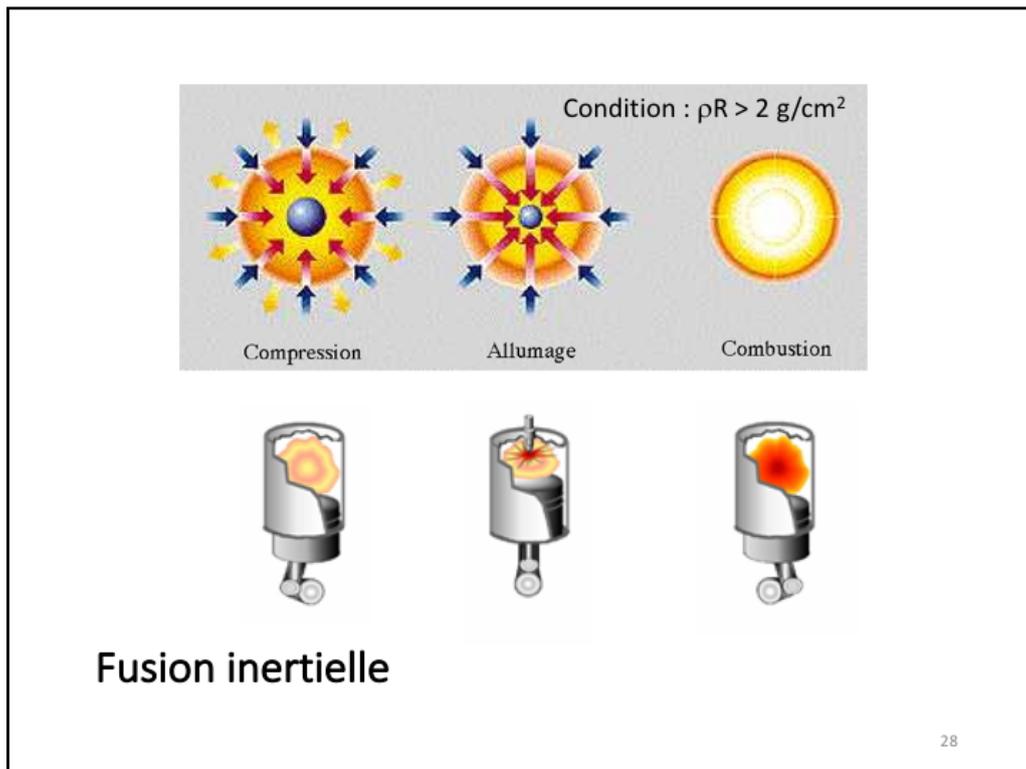
Une fois acquis les succès d'ITER, l'étape suivante serait sous le nom de DEMO un véritable réacteur produisant de l'électricité, amorce d'une commercialisation en cas de succès. Des études papier sont déjà en cours dans divers laboratoires. Elles ne partent pas de zéro (première version ITER-1998). Aucune décision n'est encore prise pour la suite et n'est semble-t-il pas près de l'être.



Dans mon ouvrage « *Introduction à la fusion thermonucléaire contrôlée* », j'avais présenté une vision de l'avenir de la filière tokamak. L'échéancier correspondant est maintenant caduc. Les dates clé sont repoussées de plusieurs années dans l'avenir (sans garantie quant aux dates).

**Confinement inertiel :
lasers de la classe MEGAJOULE**

L'autre voie de recherches importante et le confinement inertiel.



Le principe de la fusion par confinement inertiel s'apparente à celui des moteurs à combustion interne. Mais la compression s'effectue suivant les trois directions de l'espace au lieu d'une seule. En conséquence un rayon réduit d'un facteur 25 augmente la densité du milieu par un facteur supérieur à 10000, mais la réaction explosive est suffisamment rapide pour produire toute son énergie avant la dislocation du système.

Les premières simulations numériques effectuées, autour de 1970, par John Nuckolls à Livermore et Keith Brueckner pour KMS-Industries, étaient très encourageantes 2.5 mégajoules d'énergie de fusion pour 50 kilojoules de rayonnement laser.

Contraste



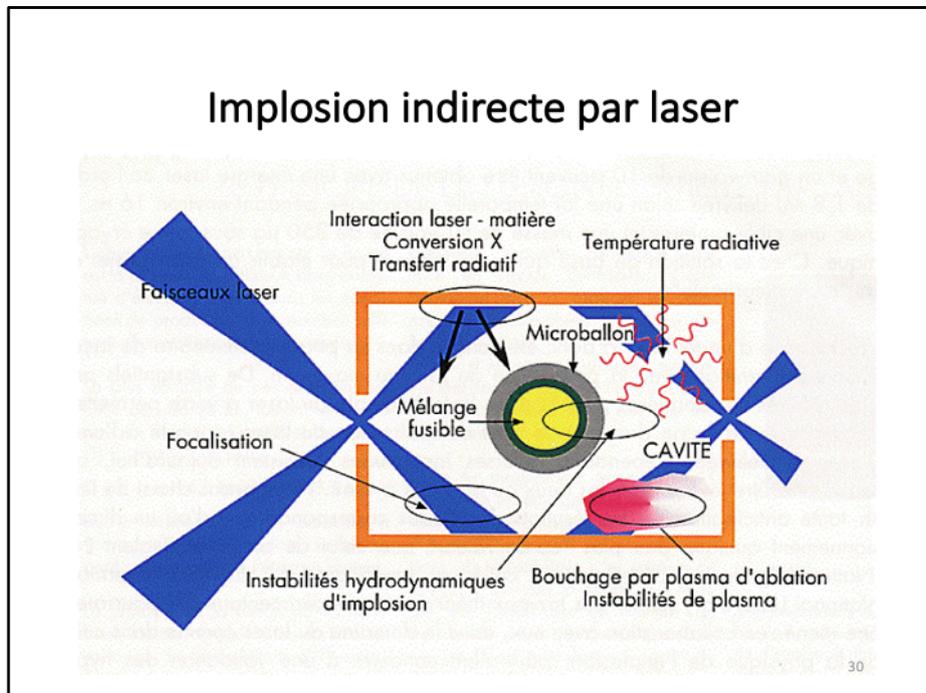
Laser mégajoule

Cible à comprimer

29

Comme pour le confinement magnétique, on n'a pas échappé à la course au gigantisme ni à l'insolite. Les lasers de la classe mégajoule, NIF à Livermore et LMJ près de Bordeaux sont de très grands instruments. On notera le contraste entre la taille de l'installation LMJ qui occupe un bâtiment de 300m de long et celle de la cible à irradier.

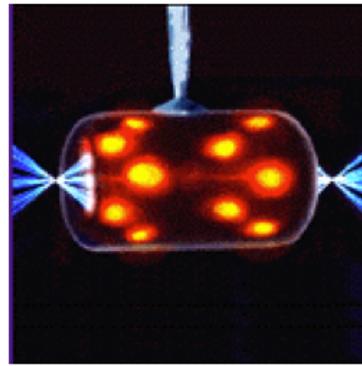
Implosion indirecte par laser



La meilleure façon de mettre en œuvre la fusion par confinement inertiel (FCI) à partir de faisceaux laser est de faire interagir ceux-ci avec la paroi interne d'une cavité contenant la cible à comprimer par l'action du rayonnement secondaire (rayons X).

Cette façon de procéder ouvre la voie pour la mise en œuvre d'autres sources de rayonnement : impacts de faisceaux d'ions lourds ou implosion électromagnétique de nappes de fils.

Capsule pour implosion indirecte

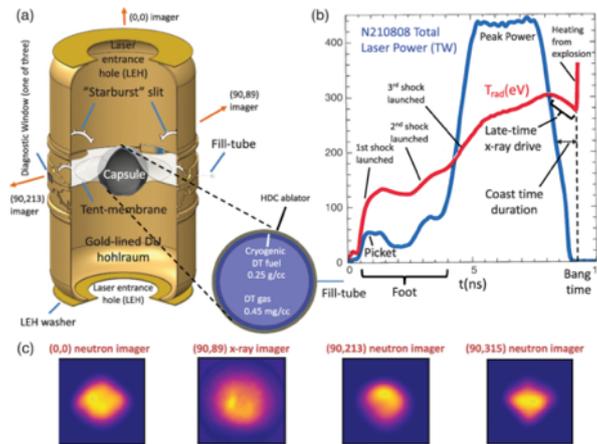


10 mm

A gauche : capsule métallique pour implosion indirecte.

A droite : visualisation en fausses couleurs de l'impact des 10 faisceaux du laser Nova sur la face interne de la capsule.

8 août 2021



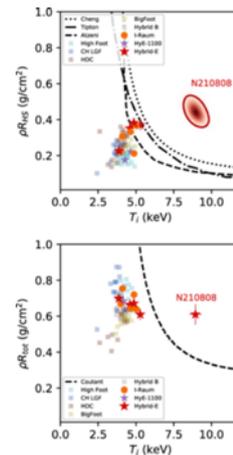
32

Le tir du 8 août 2021 s'approche de la parité énergétique grâce à l'optimisation de l'impulsion laser et du dessin des cibles.

Les images de la zone émettrice des neutrons, chaque carré mesure 100 microns de côté, ont été prises suivant des axes différents afin de pouvoir reconstituer la source en trois dimensions. C'est une aide à la caractérisation des processus thermonucléaires en jeu : allumage de la réaction dans une petite partie de la cible (point chaud).

8-8-2021 et 5-12-2022

- 1.3 MJ de fusion pour 1.9 MJ d'énergie laser.
- Une petite fraction, **point chaud** ("hot spot" HS), de la cible comprimée a été portée à l'ignition.
- Mais celle-ci ne s'est pas propagée au reste du combustible.
- Ce premier résultat encourageant, analysé en détails a entraîné des améliorations du laser et des modifications de l'architecture de la cible pour aboutir **fin 2022 à un gain en énergie de 1.5 par rapport aux faisceaux laser (3.15 MJ contre 2.05)**.
- L'application d'un champ magnétique a des effets bénéfiques sur la production d'énergie de fusion (prouvé avec du D₂ en 2022)



33

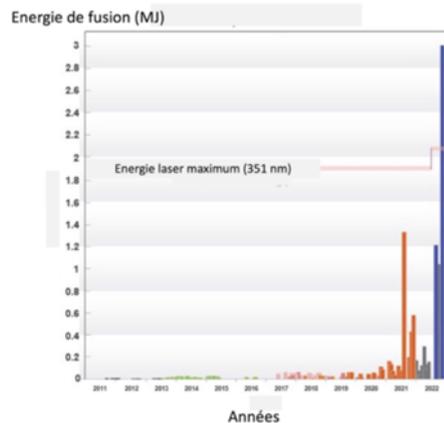
L'exploitation des diagnostics du tir du 8 août 2021 a permis de mettre en évidence un allumage au sens de Lawson de la réaction thermonucléaire mais seulement dans une petite partie de la masse de DT comprimée (point chaud).

L'analyse correspondante a été publiée dans les *Physical Review Letters* (article paru en 2022). Avec ce premier tir couronné de succès, on a commencé de détecter des effets qui jusque-là avaient été observés uniquement dans les simulations numériques.

Les expériences se sont poursuivies jusqu'au 5 décembre 2022 quand a été atteinte la parié énergétique avec les faisceaux laser. On attend les publications qui en révéleront les détails.

Historique des expériences de fusion inertielle menées auprès de NIF. Les couleurs des barres d'histogramme correspondent à différentes architectures de cible.

D'après Mark Herrmann (LLNL), et Physics Today.



Pour obtenir le saut quantitatif amorcé en 2021, le travail d'optimisation a porté d'une part sur la forme temporelle des impulsions laser et d'autre part sur le dessin des cibles. La structure complexe et le choix des matériaux de ces dernières doivent favoriser le transfert d'énergie vers la poussée qui produira la compression tout en minimisant les causes d'instabilités nuisant à cette même compression. Le triplement, obtenu entre 2021 et 2022, de l'énergie libérée montre toute l'importance de l'optimisation de l'architecture des cibles.

Le résultat obtenu le 5 décembre 2022 conforte et amplifie celui du 8 août 2021. L'étape suivante est que cet allumage de point chaud, que l'on pourrait qualifier de « proto ignition », se propage à une fraction importante du combustible ce qui, toutes choses égales par ailleurs, décuplerait au moins l'énergie libérée par la fusion et validerait définitivement le principe du confinement inertiel.

Gains

	Gain « scientifique »	Gain électrique
Confinement magnétique ITER	Attendu 10 En puissance par rapport aux sources servant au chauffage et au « <i>current drive</i> »	1 Par rapport à la puissance consommée sur le site
Confinement inertiel NIF	Obtenu 1.5 En énergie par rapport aux faisceaux laser impactant la cible	0.01 Par rapport à l'énergie nécessaire au fonctionnement du laser

Dans la perspective d'un éventuelle industrialisation, le gains devra dépasser largement une simple parité énergétique. Il convient donc de relativiser les gains espérés ou obtenus dans les expériences de fusion thermonucléaire en cours ou à venir. Ces résultats n'en correspondent pas moins à des points d'étape significatifs.

Fission et fusion : chronologies comparées

	Fission	Fusion	
		Confinement magnétique	Confinement inertiel
1938	Découverte de la fission	Théorie du régime thermonucléaire	
1942	Première réaction en chaîne		
1945	Bombe A		
1952		Bombe H	
1953	Réacteur électronucléaire		
1958		Exposition à Genève	
1960			Premier laser
1968		Tokamak	
1969			Neutrons par laser
1972			Déclassification de l'ICF
1985		Accord Reagan Gorbatchev	
1997		$E_{\text{fusion}}/E_{\text{chauff}} \approx 0.7$ (JET)	
2009		ITER : démarrage du chantier	
2022			$E_{\text{fusion}}/E_{\text{laser}} \approx 1.5$ (NIF)
?		ITER : DT $E_{\text{fusion}}/E_{\text{chauff}} \approx 10$	

36

Quelques raisons pour expliquer la lenteur des avancées de la fusion par rapport à la fission :

- Caractère exceptionnel de la mise en œuvre de la fission : rôle accélérateur de la seconde guerre mondiale.
- Difficultés inhérentes à la maîtrise de l'état de plasma. Dans les années 1950 on savait en réalité peu de choses sur cet état de la matière.
- Evolution inexorable vers le gigantisme.
- Excès de triomphalisme pour des résultats périssables.
- Perte de confiance chez les politiques et dans l'opinion.
- Effort budgétaire limité de la part des états.
- Lourdeur bureaucratique inhérente à toute construction d'envergure et à gros budget
- ...

Hybrides fusion-fission

Peut-on accélérer l'évolution vers l'industrialisation de la fusion contrôlée?

Première réponse : les hybrides fusion fission

Un réacteur de fusion est d'abord une énorme source de neutrons de 14 MeV.

Comment les utiliser?

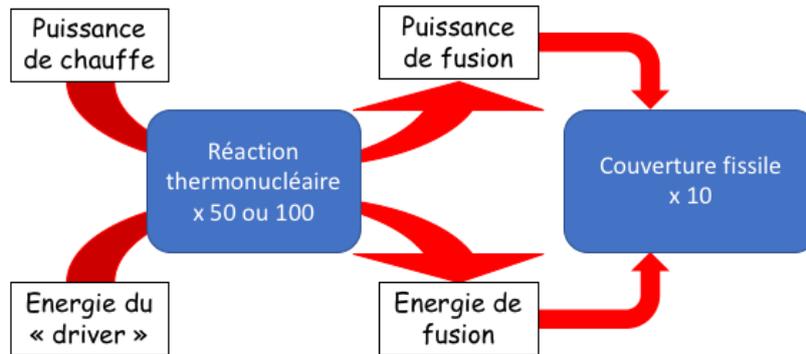
- Céder leur énergie à un caloporteur
- Régénérer le Tritium
- Fissionner des noyaux lourds: U^{238} , Pu, Th, actinides
- Fabriquer des noyaux fissiles: U^{233}
- Induire des transmutations : produits de fission, actinides mineurs et contribuer à leur élimination*

*Rôle comparable à celui des ADS ou du "Mouroutron"...

38

Réduire à faire bouillir de l'eau le rôle des neutrons produits par des machines d'aussi haute technologie que les réacteurs de fusion n'est pas franchement très satisfaisant pour l'esprit. Il y a mieux à faire avec une telle « pierre philosophale » capable de changer un élément en un autre.

Amplifications successives : hybride fusion-fission



39

Pour accélérer le passage au stade industriel, une vieille idée remontant à 1976 (Hans Bethe) consiste à utiliser les neutrons pour fissionner de l'uranium appauvri dans un réacteur hybride fusion-fission. Un facteur d'amplification de l'ordre de 10 est ainsi attendu par rapport à la fusion pure. Des études détaillées en ce sens ont été menées en particulier par Paul Henri Rebut (premier responsable du projet ITER dans sa phase préparatoire) avec le concours de scientifiques du centre d'études russe de Sarov (Arzamas 16) pour la partie calculs.

Hybrides : avantages et problèmes

Perspectives :

- Performances moindres exigées de la partie fusion : état de l'art au début du XXI^e siècle
- Mise en place de dispositifs industriels de fusion, avancée de plusieurs décennies
- Intégration à la quatrième génération de réacteurs électronucléaires

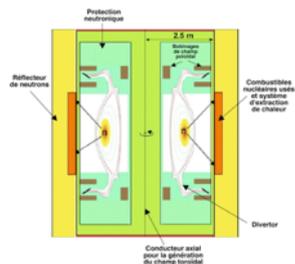
Mais :

- Coût et pour le confinement inertiel, difficulté d'obtenir des cadences élevées
- Fin de l'argument d'une énergie nucléaire « propre »
- Communautés séparées à réunir

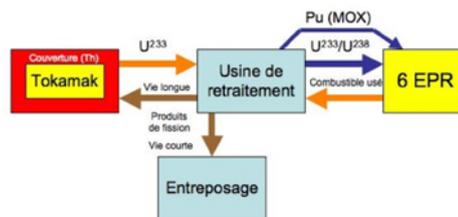
40

Les hybrides peuvent se concevoir aussi bien à partir du confinement inertiel (LIFE à Livermore avec des lasers, InZinerator à Sandia avec la machine électromagnétique Z) que du confinement magnétique (nombreuses études en particulier celles de Wallace Mannheimer, retraité du NRL).

Un rôle pour un hybride à confinement magnétique



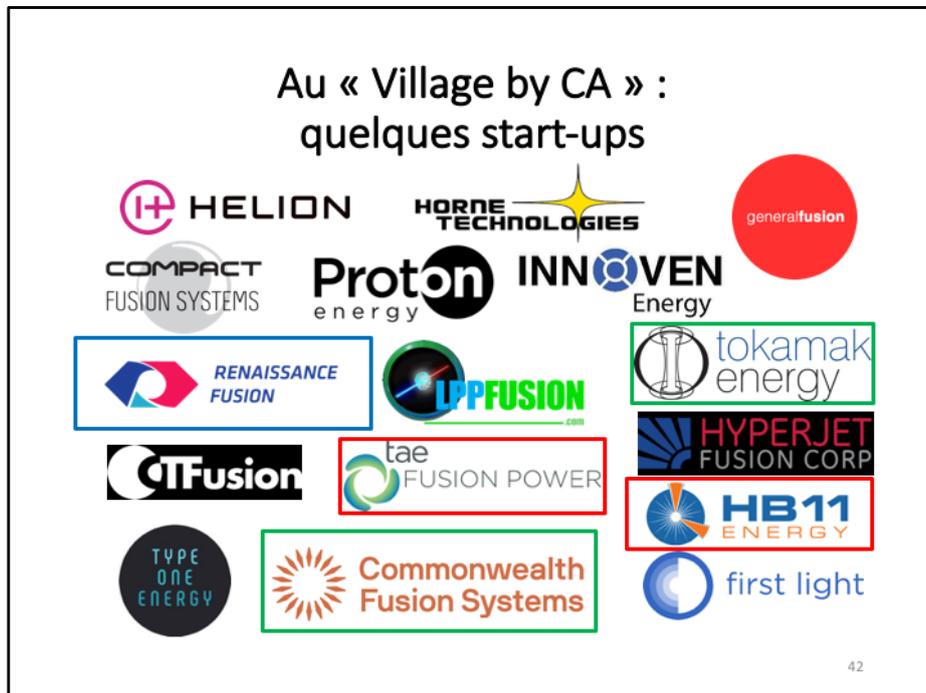
Tore compact à couverture fissile



Hybride fusion fission dans le cycle du Thorium. Complexe nucléaire autonome.

41

Un exemple d'intégration d'un tokamak compact dans un complexe électronucléaire autonome sur une idée de Mannheimer que j'ai adaptée avec le concours de Daniel Heuer (LPSC, Grenoble).



Deuxième réponse en harmonie avec le « Village by CA » : les start-ups.

On assiste depuis quelques années à une floraison d'initiatives. Cette vitalité est plutôt bon signe en vue de la quête du Graal. Les projets sont de taille assez modestes et ne s'inscrivent pas tous dans la filière Tokamak. Bill Gates ou le MIT soutiennent de telles entreprises. Il en existe même une en France : "renaissance fusion" (liseré bleu) à Grenoble sur une variété de confinement magnétique appelée « stellarator ». Elles ont a priori l'agilité qui fait défaut au programme ITER et pourraient être rentabilisées par des brevets relatifs à des avancées sur des éléments clés de la science et de la technologie de la fusion nucléaire.

Ainsi, Commonwealth Fusion Systems, entreprise liée au MIT (liseré vert) développe des circuits supraconducteurs à « haute température » (celle de l'azote liquide) afin de créer des champs magnétiques supérieurs à 20 teslas dans le but de rendre les tokamaks plus compacts à performances égales. Id en UK, Tokamak energy.

Certaines de ces sociétés se lancent dans des projets très futuristes comme la mise en œuvre de la réaction proton-Bore 11 (liseré rouge) : tae pour tri-alpha-energy (San Diego à l'initiative d'un représentant de la première génération de chercheurs ayant travaillé sur la fusion, Norman Rostoker — 1925-2014) ; HB11 en Australie (avec H. Hora).



Mythologie

La fusion nucléaire est-elle un mythe comme voudraient le faire croire ses détracteurs, ou est-elle le Saint Graal des énergies de l'avenir ? Quelle que soit la réponse à cette question, deux mythes lui sont reliés : la quête du Graal (l'avenir est encore bien flou) et Prométhée pour reproduire sur Terre le feu du Soleil.