

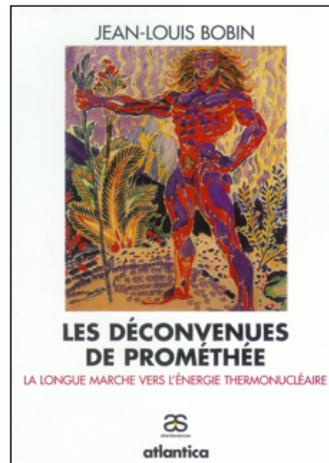


Mythologie

La fusion nucléaire est-elle un mythe comme voudraient le faire croire ses détracteurs ? Quelle que soit la réponse à cette question, deux mythes lui sont reliés : la quête du Graal et Prométhée, ce Titan qui avait dérobé aux dieux le feu du Soleil.

Une entreprise prométhéenne

- A la recherche du feu du Soleil : quelques bases physiques
- Feu doux (confinement magnétique, ITER), feu explosif (confinement inertiel, NIF, LMJ)
- Le Tokamak
- ITER : un long fleuve tranquille ?
- Avenir ?



2

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.

Qu'en est il aujourd'hui ?

Pourquoi la fusion?

Paramètres physiques de réactions exothermiques			
Type de réaction:	chimique	fission	fusion
Exemple	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$^1_0n + ^{235}_{92}U \Rightarrow ^{143}_{56}Ba + ^{91}_{36}Kr + 2^1_0n$	$D (^2H) + T (^3H) \Rightarrow 4He + ^1_0n$
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)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$
		$\times 6 \cdot 10^4$	$\times 10^7$

3

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 proche de 200, par unité de masse, par rapport à la fission.

Fission et fusion : différences

Fission

- Casser des noyaux lourds, U, Th, 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)
- $\geq 10^8\ \text{K}$ (10 keV)
- Déchets limités aux matériaux activés
- Toujours au stade des recherches

4

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.

Des précurseurs :

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).



5

Perrin avant Eddington qui le reconnaît dans ses ouvrages.

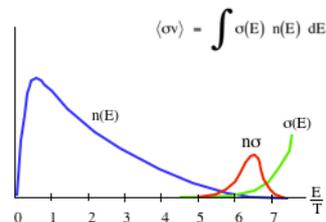
Jeunes immigrés aux USA Gamow (russe) et Teller (hongrois) analysent le régime thermonucléaire et montrent qu'il est bien adapté à une abondante production d'énergie.

Régime thermonucléaire



à Los Alamos (ca. 1950)

Les contributions à la réaction viennent de la queue de distribution :



6

Dans le régime thermonucléaire, le taux de réaction dépend du produit, intégré sur l'étendue de la distribution en énergie des projectiles, de la densité de noyaux d'une énergie donnée par la section efficace correspondant à cette énergie. Ce produit passe par un maximum situé assez loin dans la queue de distribution (Gamow tirant la queue du chat dans ce photomontage). Le pic est assez étroit.

Les noyaux qui réagissent ont ainsi 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.

Réactions envisageables

Réactions du deutérium (noyau stable mais peu lié)



Réaction proton-bore (tri alpha)



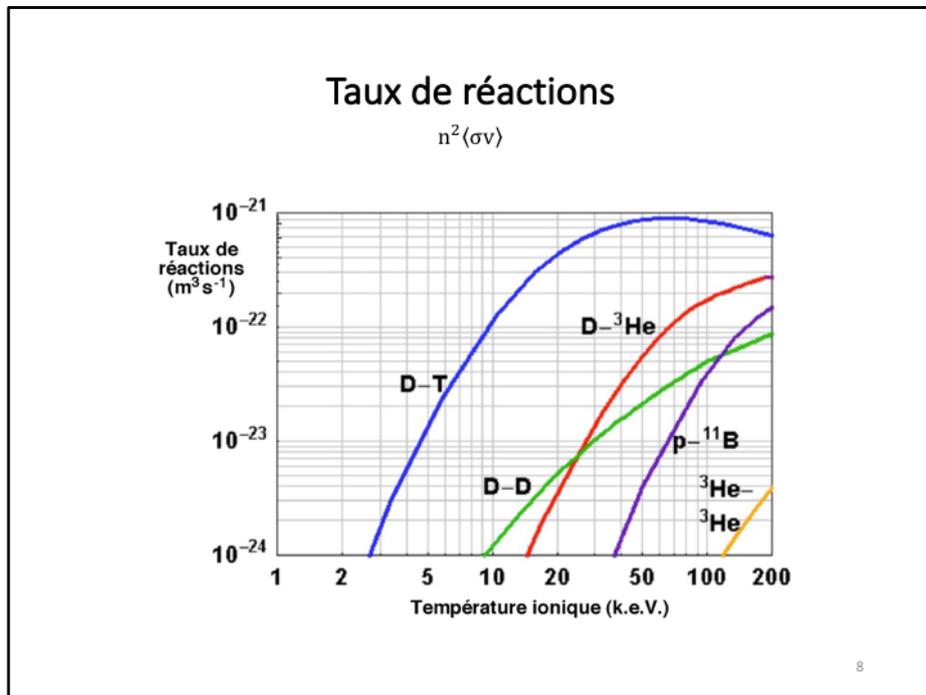
} a-neutroniques

7

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.

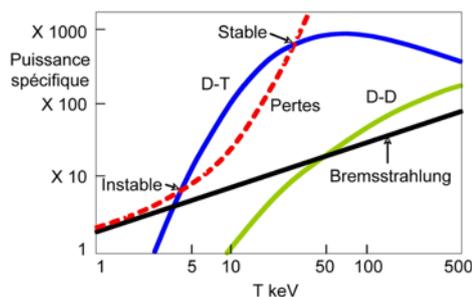


Grâce à un pic de la section efficace aux environs de 100 keV, le taux de la réaction DT surpasse largement tous les autres. Pour la réaction DD, les taux calculés cumulent les deux branches.

Allumage et autoentretien de la réaction

La dépendance en densité est la même pour le gain d'énergie dû à la récupération des produits chargés de la réaction et la perte minimale par « bremsstrahlung » (rayonnement de freinage).

En comparant gains et pertes, il apparaît des seuils en température pour l'autoentretien de chaque réaction.



D-T
D-D (2 branches)

la température doit être supérieure à 4.4 keV
la température doit être supérieure à 48 keV

9

Les gains par récupération de l'énergie des produits de réaction chargés sont plus élevés que les pertes inévitables par « bremsstrahlung » (ligne noire) quand la température dépasse un certain seuil, différent pour chaque réaction. Lors d'une excursion de température au-delà du seuil la puissance de chauffage l'emporte et la réaction s'emballé (*instabilité thermique*). Mais les pertes sont en général supérieures au « bremsstrahlung », courbe en tireté rouge. Il apparaît alors un deuxième point de croisement qui correspond à un équilibre stable : pour une excursion vers des températures encore plus élevées, les pertes l'emportent sur les gains, ce qui entraîne un retour à l'équilibre tandis que pour un refroidissement c'est l'inverse, les gains l'emportent et restaurent l'équilibre. La réaction est alors contrôlable.

Le point clé de l'équilibre est la *maîtrise des pertes*. Dans ces conditions de température et de densité, le plasma est transparent à son propre rayonnement : tout photon émis en son sein s'échappe. Ces pertes radiatives dépendent des impuretés (ions plus chargés que le noyau d'hydrogène) dont il est impératif de contrôler les proportions. D'autres pertes viennent des fuites de particules, proportionnelles à la surface extérieure du milieu combustible. Pour les minimiser, il convient d'augmenter le rapport volume/surface donc, à géométrie donnée, d'accroître les dimensions. C'est une des raisons pour lesquelles les progrès dans le domaine du confinement magnétique sont obtenus au fil des ans avec des machines de plus en plus volumineuses.

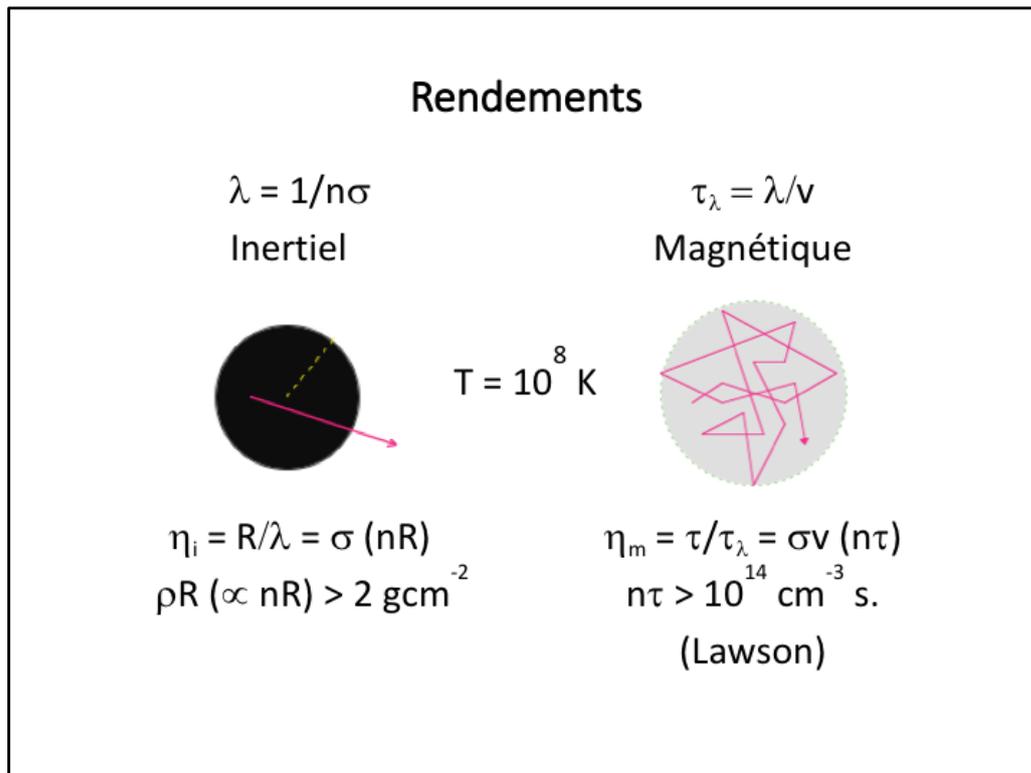
Confinements

- Maîtrise du feu thermonucléaire :
 - Température élevée: > 100 millions de degrés (10 keV). Le milieu réactif est un **plasma**
 - Feu doux : densité faible pour éviter l'emballement de la réaction
 - Feu vif : explosion d'une très petite quantité de matière (des microgrammes) ; voie **inertielle**
- 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.

10

Il existe deux façons 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 la tenue des matériaux de structure.
- 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 inertielle* qui est plutôt l'absence de confinement. Les lasers de grande puissance y ont trouvé une application importante



Dérivation simple de critères à partir du libre parcours de réaction λ .

En régime explosif (inertiel) la fraction f de T brûlée doit être supérieure à 30 %. Elle est proportionnelle au rapport du libre parcours au rayon R de la zone de réaction. D'où une condition sur le produit ρR de la masse volumique par le rayon.

En régime stationnaire avec confinement magnétique, f ne dépasse pas quelques pour cent. Elle est proportionnelle au rapport entre le temps τ de confinement de l'énergie et le temps de réaction. La condition porte maintenant sur le produit $n\tau$ de la densité particulaire par le temps de confinement.

En raison de la différence entre les rendements impliqués dans l'un et l'autre cas, la condition sur ρR est environ 10 fois plus contraignante que celle de Lawson sur $n\tau$.

Calculs de coin de table :

- Inertiel 1 mg DT \rightarrow 340 MJ \approx 25 kilos de TNT (si le rendement est 30%)
- Magnétique 1 GW de fusion consomme 3 mg de DT par seconde.

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
- Siège de multiples modes d'oscillation
- Instable
- Turbulent
- ...



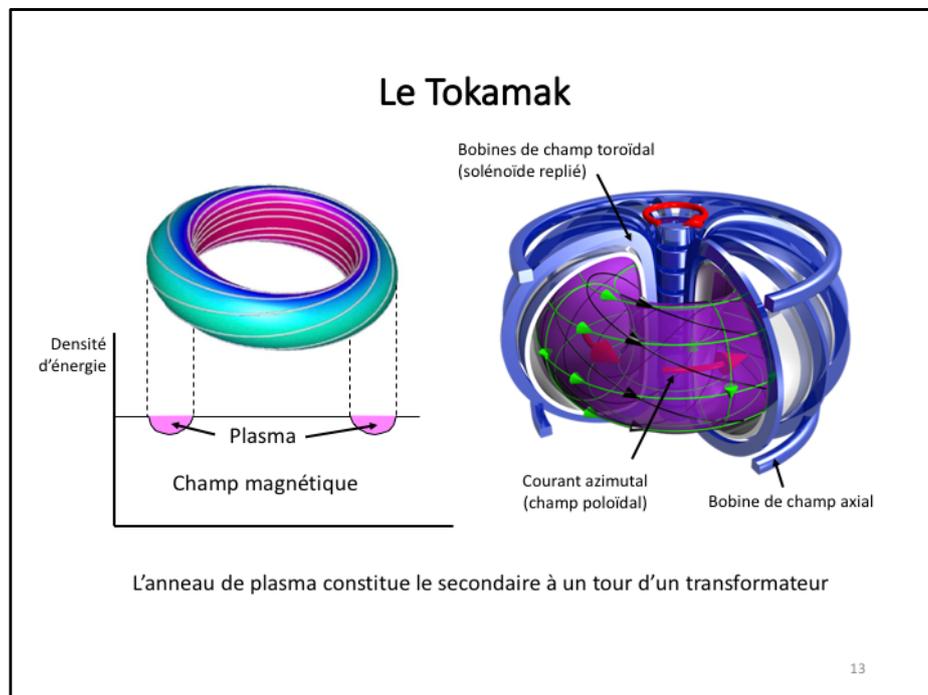
12

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 ont mis en évidence que les connaissances sur cet état de la matière étaient très insuffisantes.

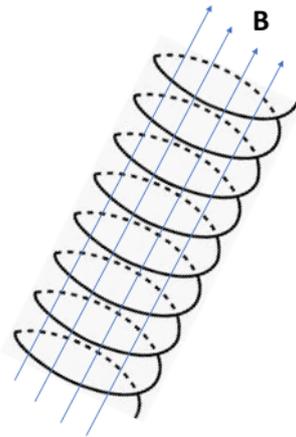


Pour obtenir un régime quasi stationnaire il convient d'utiliser un confinement magnétique : le plasma doit être extrêmement tenu et isolé de toute paroi par du champ magnétique. La figure représente la configuration la mieux étudiée et qui a donné lieu aux développements les plus importants pendant le dernier tiers du XX^e siècle et le début du XXI^e. Elle 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. Lev Artsimovitch en a dirigé les premières expérimentations à l'institut Kourtchatov.

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 jusqu'au projet ITER.

Plasma magnétisé



Confinement :

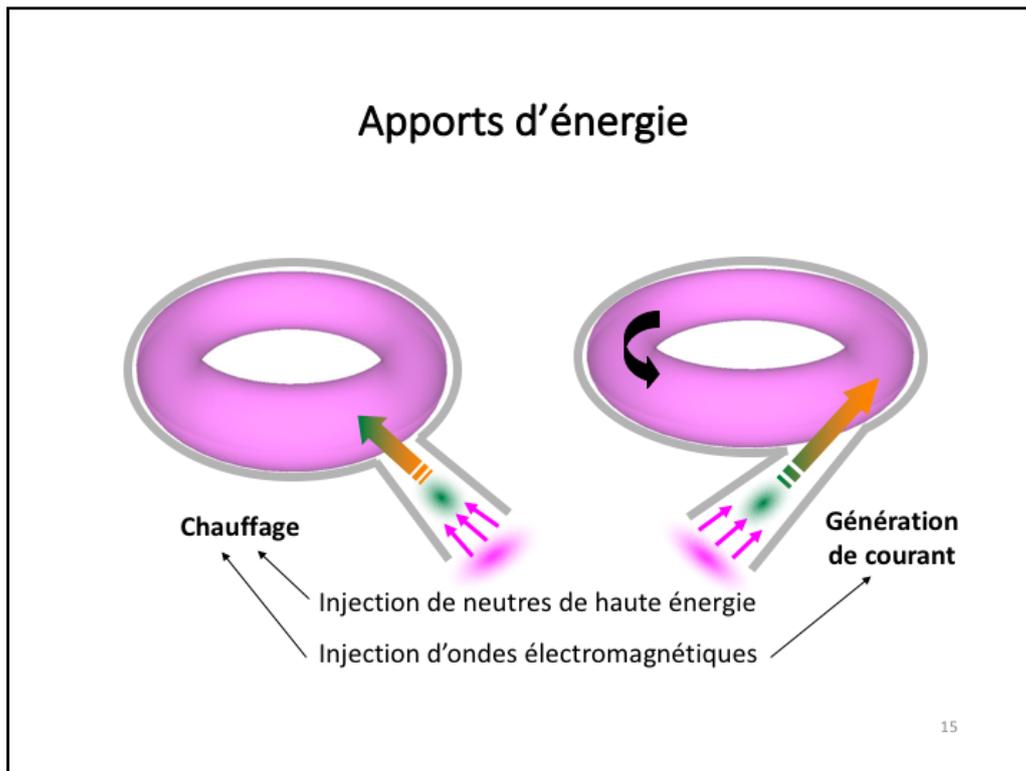
Entre deux collisions, les trajectoires des particules chargées s'enroulent autour des lignes de champ, à des dérives près.

Anisotropie :

Mouvements différents dans le sens parallèle et un sens perpendiculaire au champ.

14

Pour un champ magnétique **B** de 10 teslas (ITER), les rayons de giration sont de 10^{-4} m pour les électrons et 7 mm pour les ions DT.



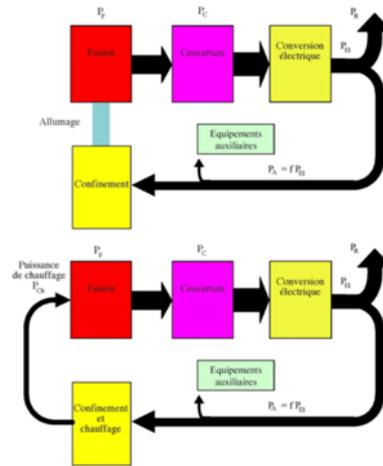
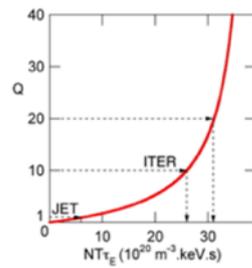
Pendant la montée linéaire du courant, le plasma qui ne subit pas de compression s'échauffe progressivement par effet Joule. Il devient de plus en plus conducteur au point que dans toutes les machines exploitées à ce jour, lorsque la température électronique atteint environ 2 keV, la résistivité du plasma, 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), 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* »).

Réacteurs

En raison de la présence d'un chauffage auxiliaire du plasma, il n'est pas nécessaire d'aller jusqu'à l'allumage. Le réacteur fonctionne alors en amplificateur de puissance. Dans ce cas, le paramètre pertinent est le gain $Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{chauff}}$.



16

Le réacteur thermonucléaire est un amplificateur d'énergie (confinement inertiel, fonctionnement pulsé) ou de puissance (confinement magnétique, régime semi continu). Dans ce dernier cas, l'allumage n'est pas indispensable. ITER ne le prévoit pas.

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

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

17

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.

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



18

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?).

19

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), JT-60 SA, ASDEX, ...
- IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility)

20

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 électro-nucléaire 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		$\geq 1 \text{ GW}$	400 MW

21

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.

Paramètres pour une relation d'échelle semi empirique

Relation d'échelle	$\tau_E = 0.079 I_p^{0.89} B_T^{0.21} P_{tot}^{-0.49} n_L^{0.11} \epsilon_A^{0.23} K_A^{0.52} M_{eff}^{0.5}$
I_p	intensité du courant total traversant le plasma
B_T	champ magnétique toroïdal sur l'axe magnétique du plasma
P_{tot}	puissance totale reçue par le plasma
$n_L = n_e V / 2\pi R_0$	densité électronique linéique moyenne pour un plasma de volume V
R_0	grand rayon du tore
$\epsilon_a = a/R_0$	inverse du rapport d'aspect
$K_a = V / (2\pi^2 R_0 a^2)$	élongation moyenne de la section méridienne du plasma lorsqu'elle n'est pas circulaire exprimée en rapport de volumes
M_{eff}	nombre de masse moyen des ions du plasma (2.5 pour un mélange D-T)

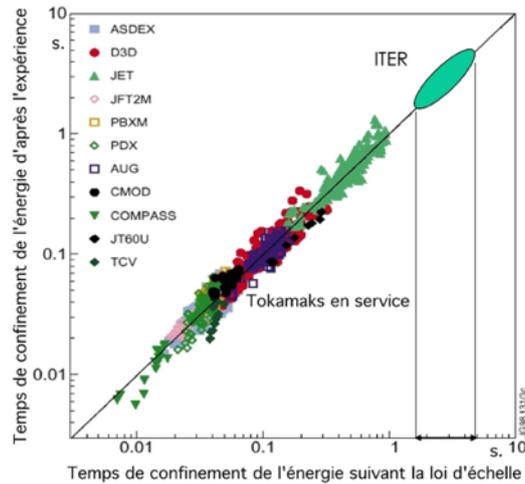
22

Le projet ITER a été élaboré à partir des résultats obtenus avec les tokamaks de deuxième et troisième génération qui ont permis de constituer une base de données assez étendue à partir de laquelle on a établi une loi d'échelle en mode H, à peu près consensuelle, combinant les 8 paramètres « d'ingénieur » du tableau.

Le mode H pour *high confinement*, a été mis en évidence sur les tokamaks de deuxième génération ASDEX (Garching, Allemagne) et DOUBLET-3 (San Diego, USA). L'apparition de ce mode H dans un tokamak dont la configuration magnétique comporte une séparatrice dépend de la puissance de chauffage auxiliaire : la puissance nette, rayonnement déduit, traversant la dernière surface fermée doit dépasser un certain seuil. La transition est facilitée lorsque les parois internes de la chambre à vide sont tapissées de « tuiles » d'élément léger, carbone ou béryllium, de façon à minimiser l'intrusion d'impuretés lourdes émettrices d'un fort rayonnement. Le temps de confinement est doublé par rapport au mode ordinaire.

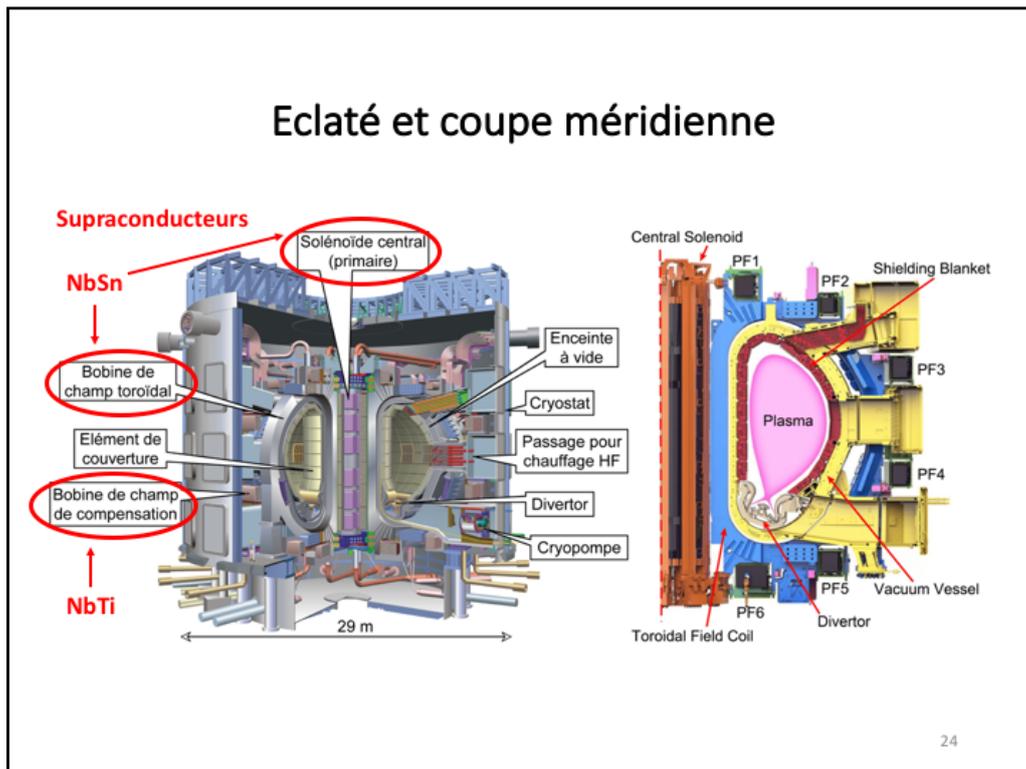
C'était le premier pas vers un *mode avancé* où la température et densité sont encore plus grandes avec des profils assez différents en raison de l'apparition d'une efficace *barrière thermique interne*.

Vérification de la loi d'échelle



23

En portant sur des échelles logarithmiques, en abscisses le temps de confinement de l'énergie prévu par la loi d'échelle et en ordonnées les mesures de cette même grandeur, la loi apparaît bien respectée par toutes sortes de tokamaks. Avec les caractéristiques prévues pour un réacteur, on attend pour ITER un temps de confinement de l'énergie dans une plage s'étendant de 1.5 à 5 s.



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. Les supraconducteurs ont fait leurs preuves à Tore Supra, les « divertors » 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



25

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.

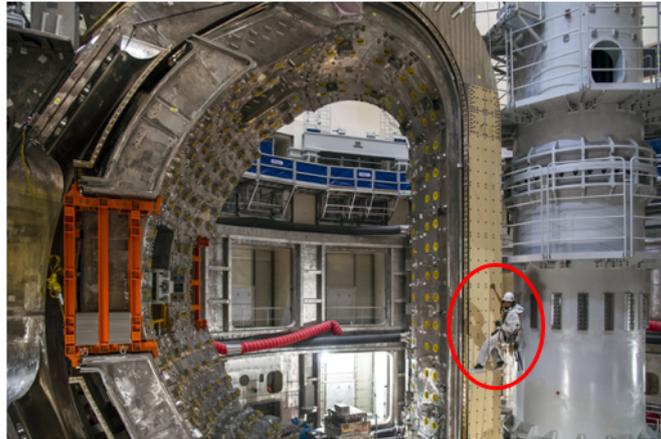
Le chantier en 2022



26

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.

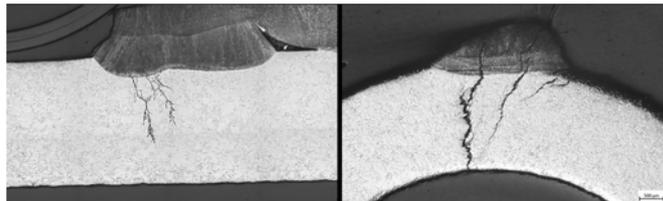
Montage



27

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.

Fissures



Annnonce de novembre 2022:

- Des fissures ont été découvertes en 2021 sur le bouclier thermique et la cuve à vide du projet ITER.
- Les dirigeants du projet expliquent que cela aura un impact important sur le coût et le calendrier. Les réparations vont pouvoir être effectuées sur place.

28

L'organisation Iter a déclaré qu'en novembre 2021, des tests à l'hélium ont permis de détecter une fuite sur un élément du bouclier thermique de l'enceinte à vide qui avait été livré en 2020. Il s'est avéré que la cause était un stress causé par le pliage et le soudage des tuyaux de fluide de refroidissement sur les panneaux du bouclier thermique « aggravé par une réaction chimique lente due à la présence de résidus de chlore dans certaines petites zones près des soudures des tuyaux ».

Des particules de chlore sont restées piégées sur le revêtement en argent et l'ont corrodé.

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

29

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.

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 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).

Quelques arguments des oppositions

Ecolos

- Grand projet inutile
- Dangereux : tritium, lithium, béryllium
- Risque d'explosion
- Faux nez de la bombe H
- Pauvre en emplois locaux
- Atteintes à l'environnement et à la biodiversité

Scientifiques

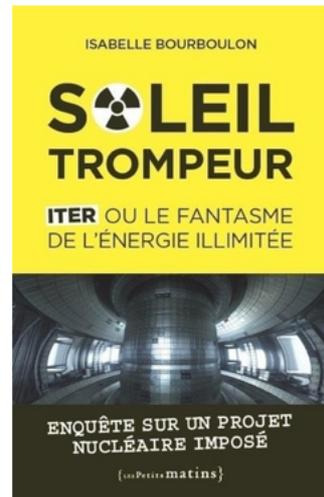
- Projet coûteux pour des résultats minces et incertains
- Sous évaluation des instabilités dont des risques de disruptions majeures
- A trop long terme pour justifier un programme d'une telle ampleur

30

Les détracteurs d'ITER sont d'abord des opposants par principe à tout ce qui relève de près ou de loin de l'énergie nucléaire. Leurs arguments reflètent les fantasmes habituels des écologistes autoproclamés. Depuis l'apparition des fissures, ils n'ont pas manqué de faire le rapprochement avec l'EPR de Flamanville ce qui renforce leurs convictions quant à une aventure technologique maléfique et menée par des nuls.

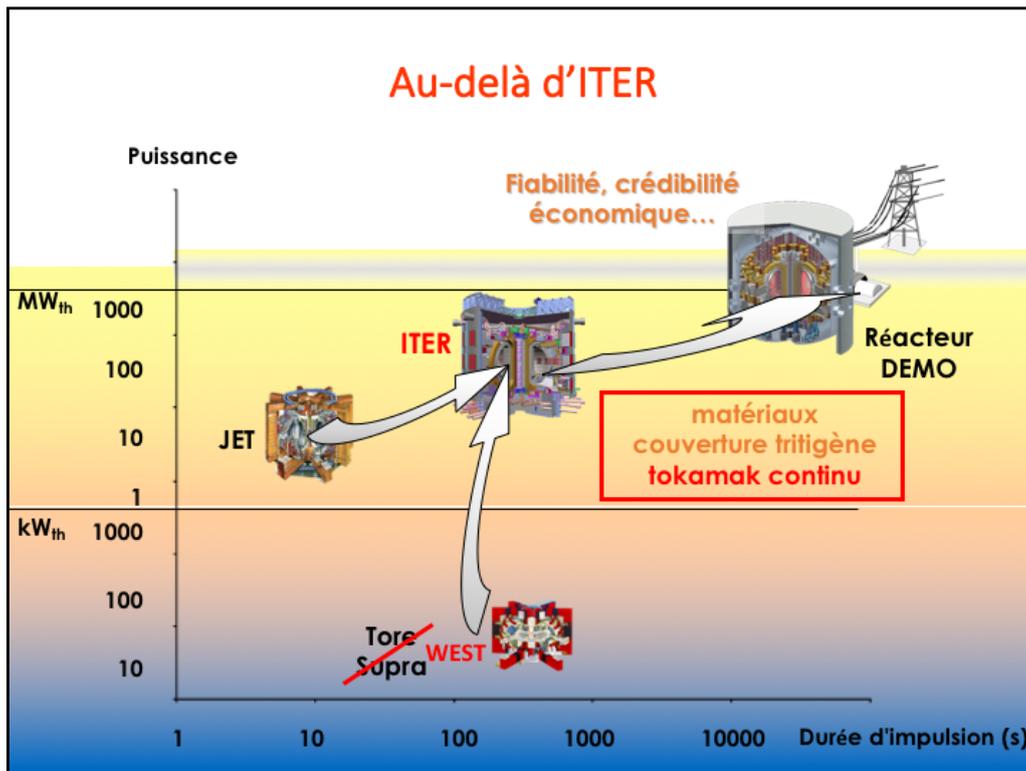
Mais on en trouve aussi parmi les scientifiques dont des physiciens : de Gennes qui de toute façon n'aimait pas les grands projets, Sébastien Balibar et d'autres. Leurs arguments ressemblent à ceux qui à la fin du siècle dernier avaient convaincu le congrès des Etats Unis d'interrompre définitivement la construction de l'accélérateur de particules SSC.

Tract (2005) et pamphlet (2020)



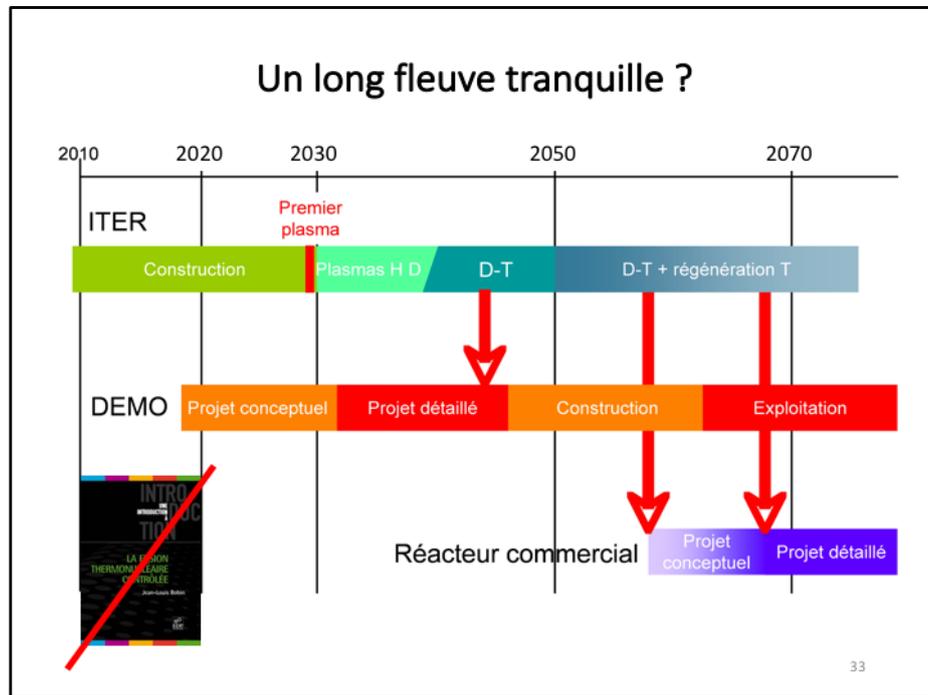
31

L'opposition militante à ITER se concrétise par des manifs, des tracts et des pamphlets. Elle s'intègre dans la grande mobilisation antinucléaire permanente.



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).

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

Comment les utiliser?

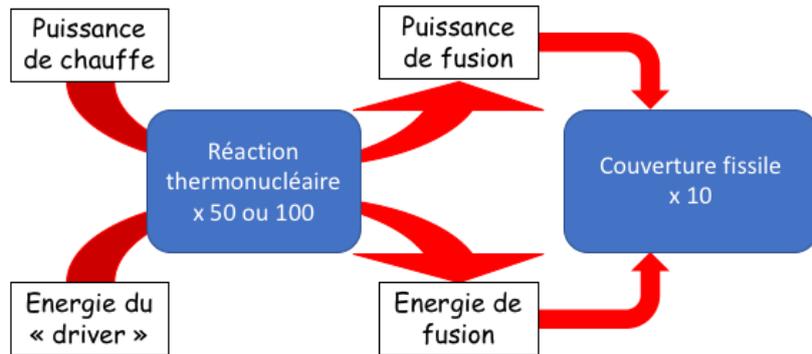
- Céder leur énergie à un caloporteur
- Régénérer le Tritium
- Fissionner des noyaux lourds: U^{238} , Pu, Th, actinides
- Fabriquer des noyaux fissiles: U^{233}
- Induire des transmutations : produits de fission, actinides mineurs et contribuer à leur élimination*

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

34

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



35

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

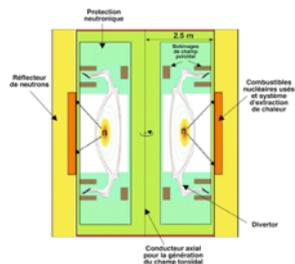
Mais :

- Coût et pour LIFE et InZinerator, (inertiels) difficulté d'obtenir des cadences élevées
- Fin de l'argument d'une énergie nucléaire « propre »
- Communautés séparées à réunir

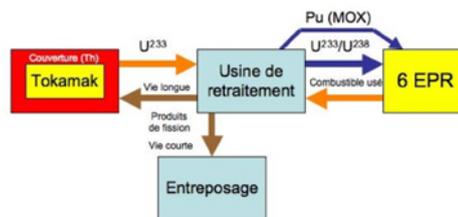
36

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.

37

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).

Fission et fusion : chronologies comparées

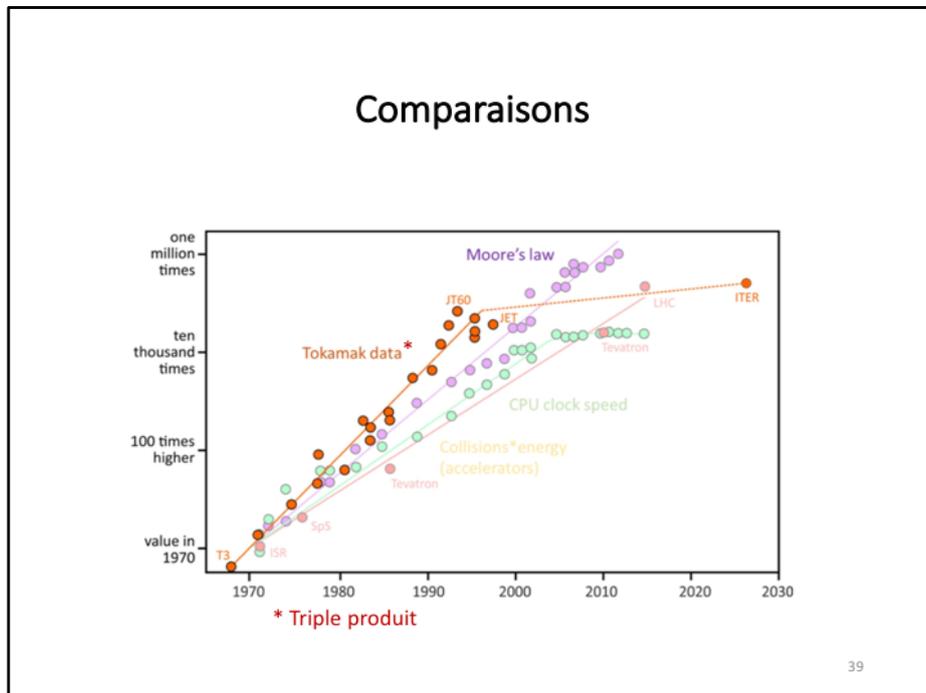
	Fission	Fusion	
		Confinement magnétique	Confinement inertiel
1938	Découverte de la fission	Théorie du régime thermonucléaire	
1942	Première réaction en chaîne		
1945	Bombe A		
1952		Bombe H	
1953	Réacteur électronucléaire		
1958		Exposition à Genève	
1960			Premier laser
1968		Tokamak	
1969			Neutrons 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	
2021			$E_{\text{fusion}}/E_{\text{laser}} \approx 0.7$ (NIF)
?		ITER : DT $E_{\text{fusion}}/E_{\text{chauff}} \approx 10$	

38

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
- ...

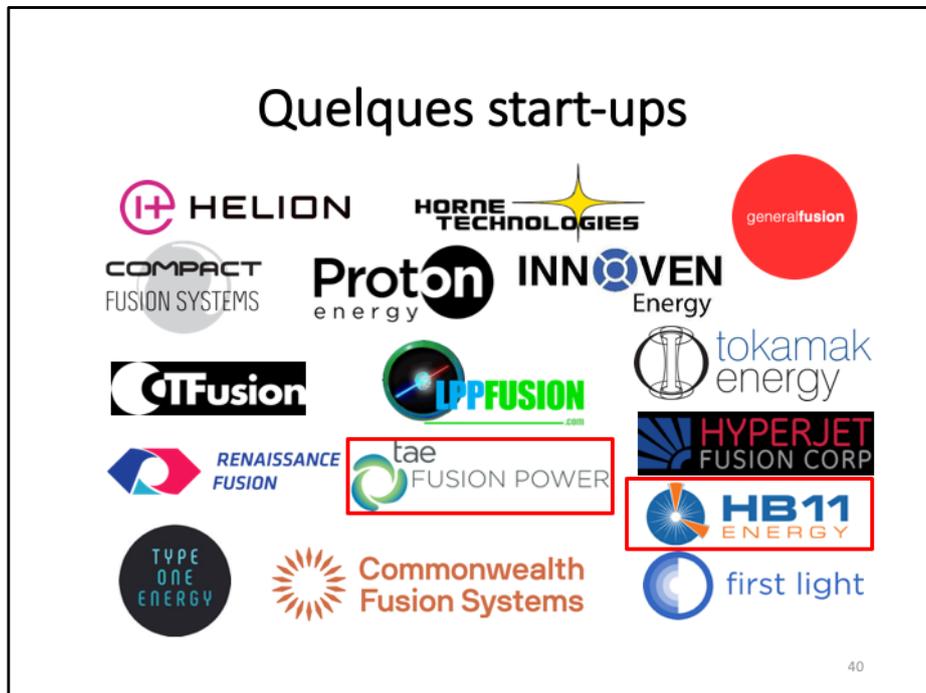
Comparaisons



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.

Quelques start-ups



On assiste depuis quelques années à une floraison de start-up sur des projets de taille assez modestes qui ne sont pas tous dans la filière Tokamak. Bill Gates ou le MIT soutiennent de telles entreprises. Il en existe même une en France : "renaissance fusion" à Grenoble. 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.

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).

Cette vitalité est plutôt bon signe en vue de la poursuite de cette quête du Graal.