

Fusion nucléaire : déconvenues et succès



Jean Louis Bobin
Sorbonne-Universités

AEIS

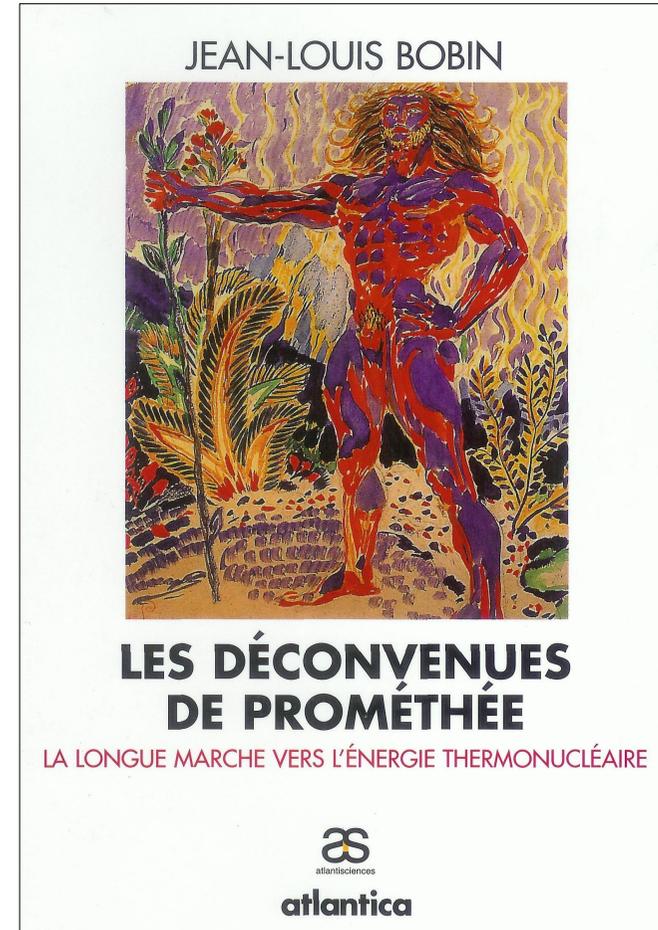
La fusion nucléaire peut elle contribuer
à la transition énergétique ?

- **NON**

- mais...

Une entreprise prométhéenne et de long terme (1953-20??)

- Quelques rappels
 - Feu doux (confinement magnétique, ITER),
 - Feu explosif (confinement inertiel, NIF, LMJ)
- Actualités de la fusion nucléaire
 - Les malheurs d'ITER
 - Les succès de National Ignition Facility (Livermore)
 - Les « start-ups »
- Quel avenir ?



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)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

$\times 6 \cdot 10^4$

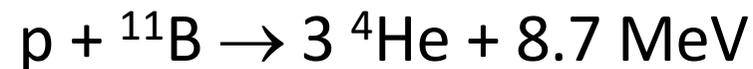
$\times 10^7$

Réactions envisagées

Réactions du deutérium (noyau stable mais peu lié)



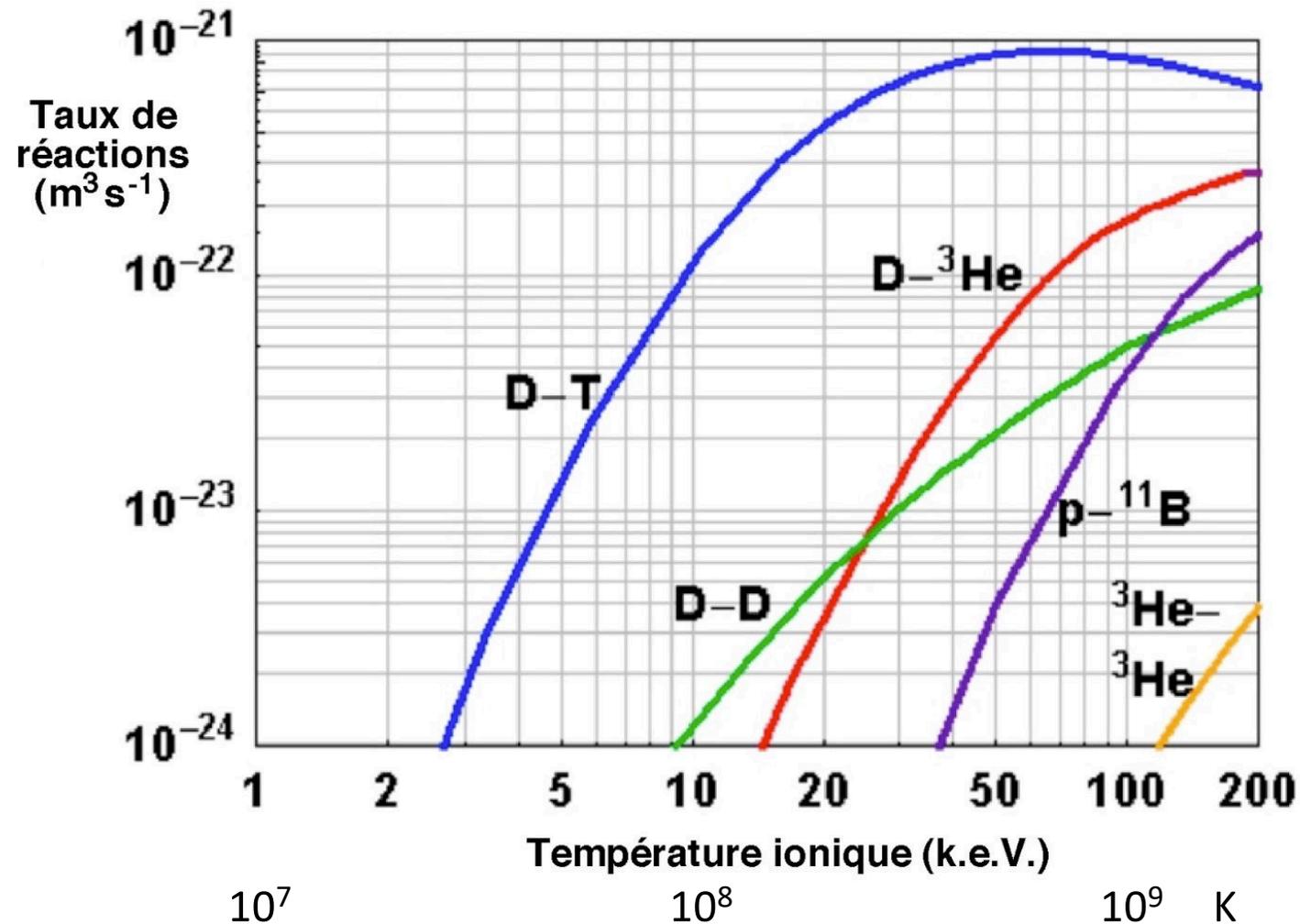
Réaction proton-bore (tri alpha)



} aneutroniques

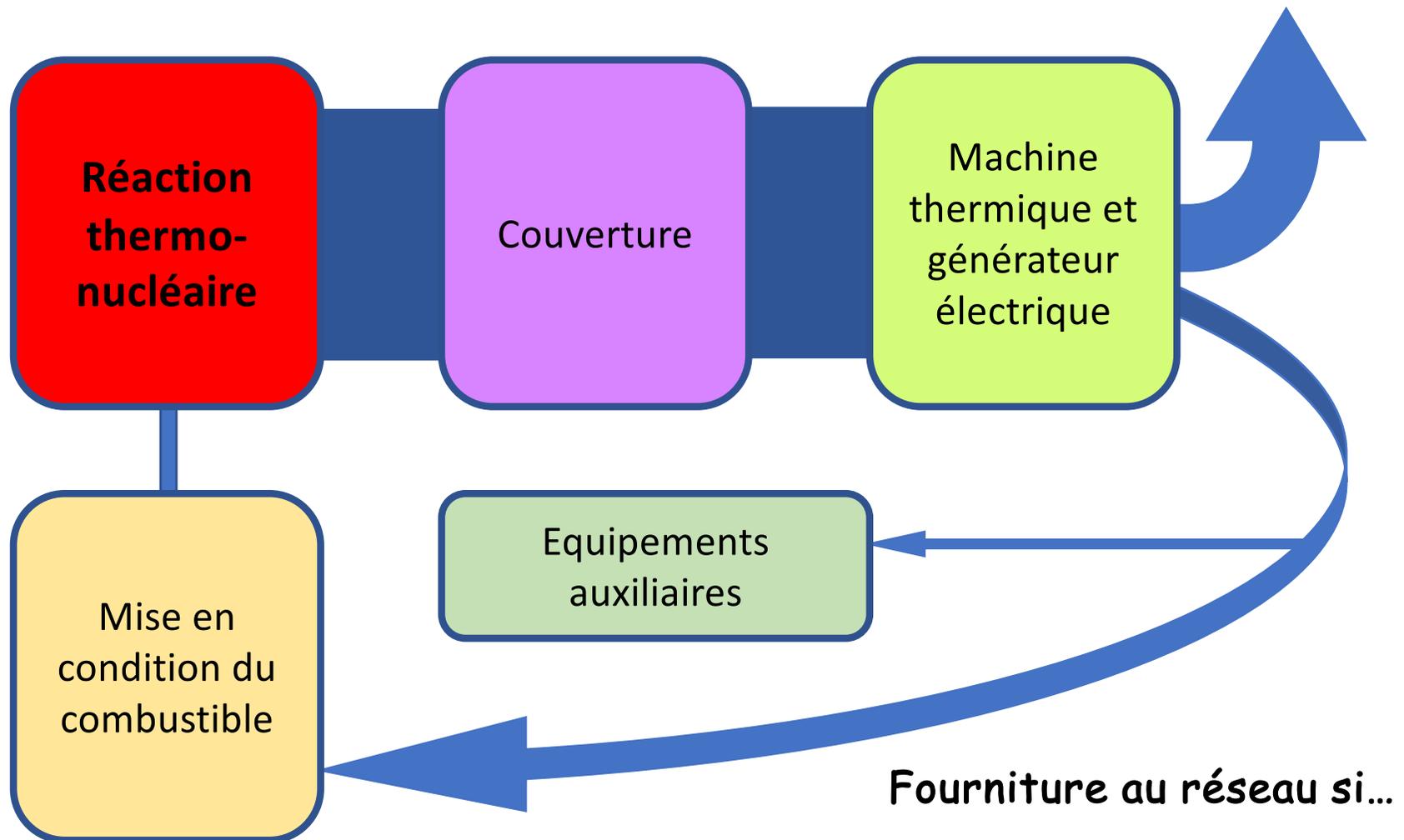
Taux de réactions en régime thermonucléaire

$$n^2 \langle \sigma v \rangle$$



Le réacteur dans la boucle

Amplification



Critère de Lawson (1957)

- Fonctionnement pulsé
- Durée d'un créneau actif : τ
- Densité particulaire du milieu en réaction : n

$$n\tau \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$$

$$T \approx 10^8 \text{ K}$$

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** ténu 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**

Éléments pour une feuille de route

Sciences de la fusion

- Réactions nucléaires
- Régime thermonucléaire
- Configurations magnétiques **acquis**
- Physique des plasmas
- Matière dense et chaude
- Instabilités

Technologies de la fusion

- Génération de champs magnétiques
- Supraconducteurs
- Radiofréquences
- Lasers et autres « drivers »
- Hautes puissance pulsées
- Méthodes numériques adaptées

Un milieu fantasque: le plasma

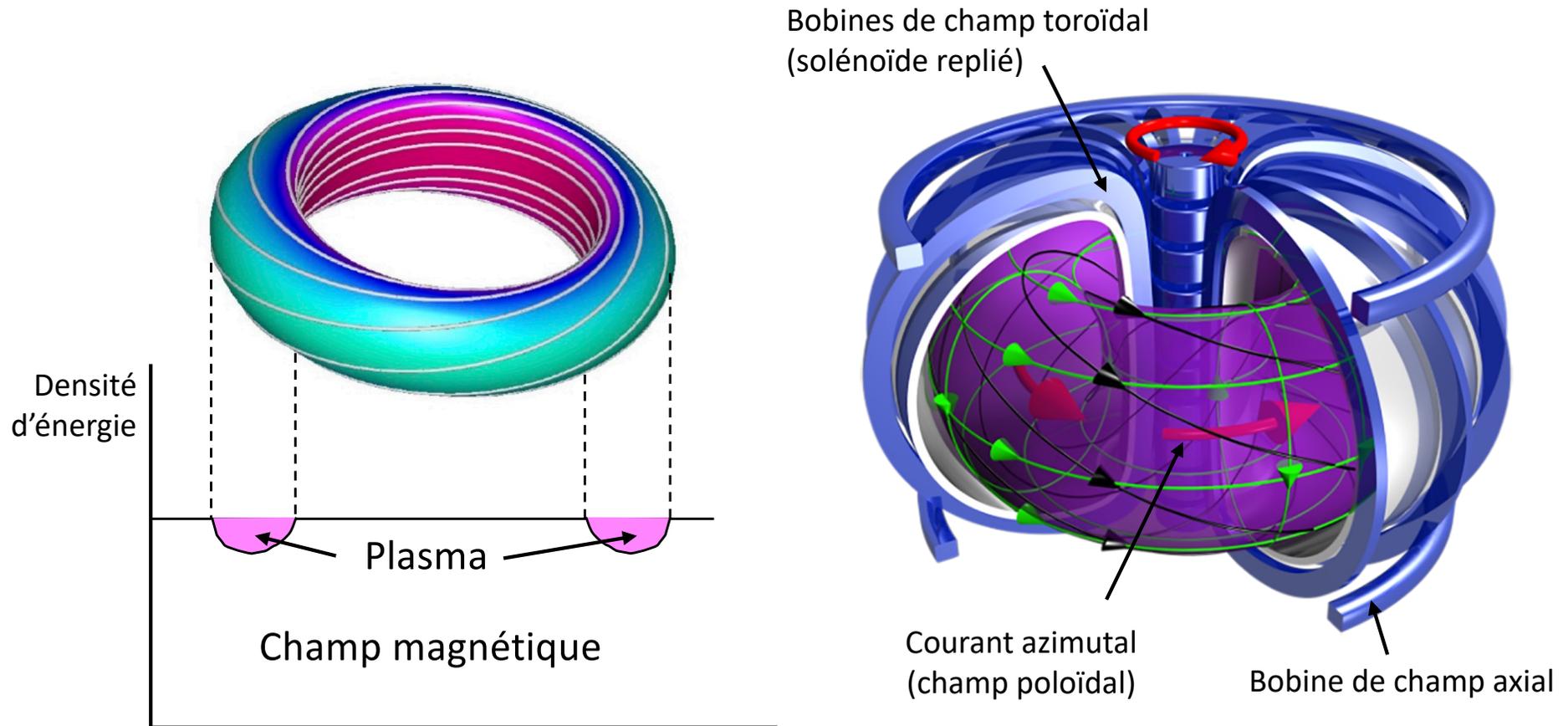
- Quatrième état (fluide ionisé) de la matière
- Extrême sensibilité, à toutes les échelles, aux champs électromagnétiques internes ou externes
- Excellent conducteur à haute température (comparable aux supra)
- Siège de multiples modes d'oscillation
- Instable
- Turbulent
- ...



Confinement magnétique :

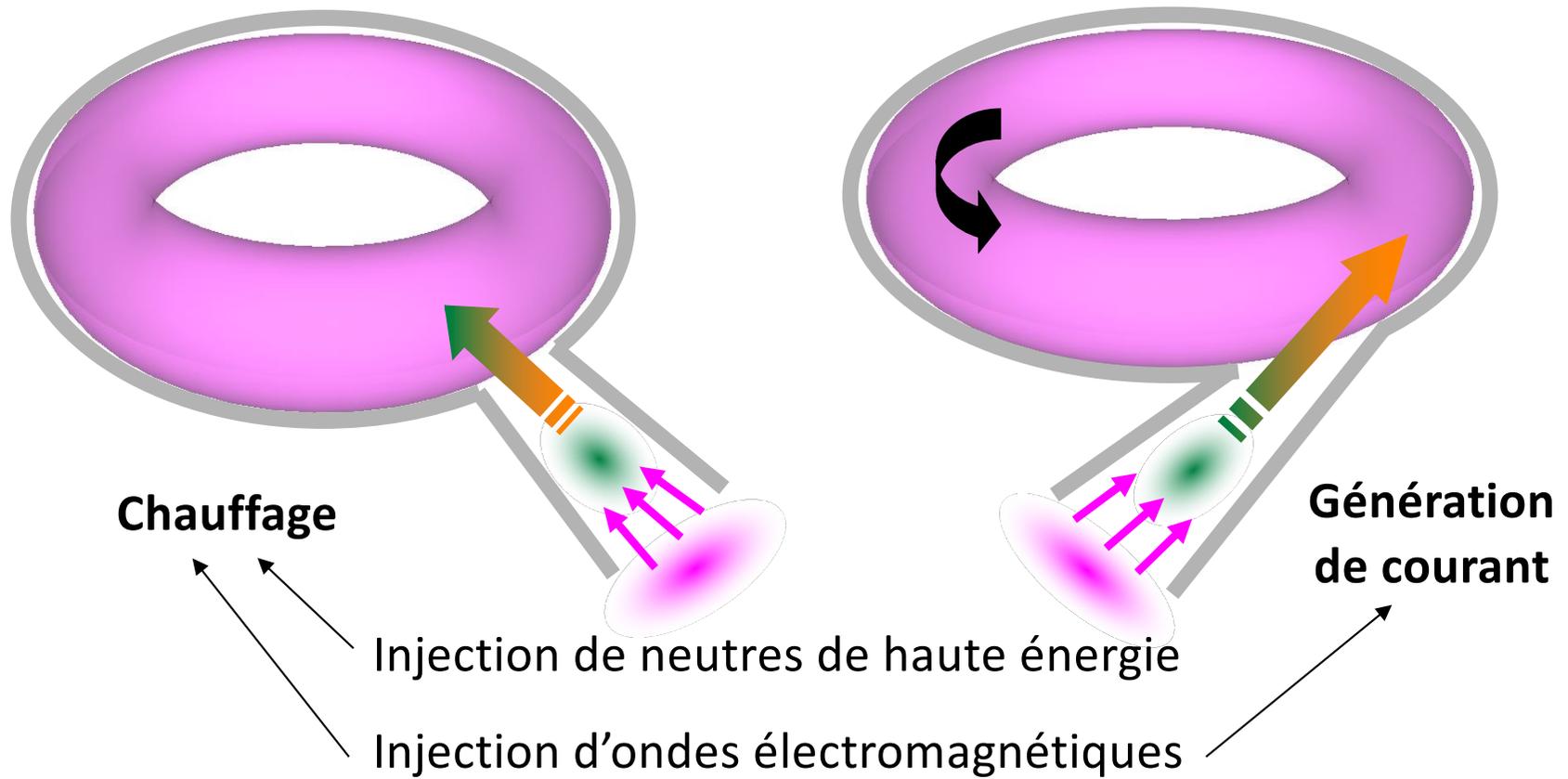
Tokamaks, ITER et ses malheurs

Le Tokamak



L'anneau de plasma constitue le secondaire à un tour d'un transformateur

Apports d'énergie



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

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

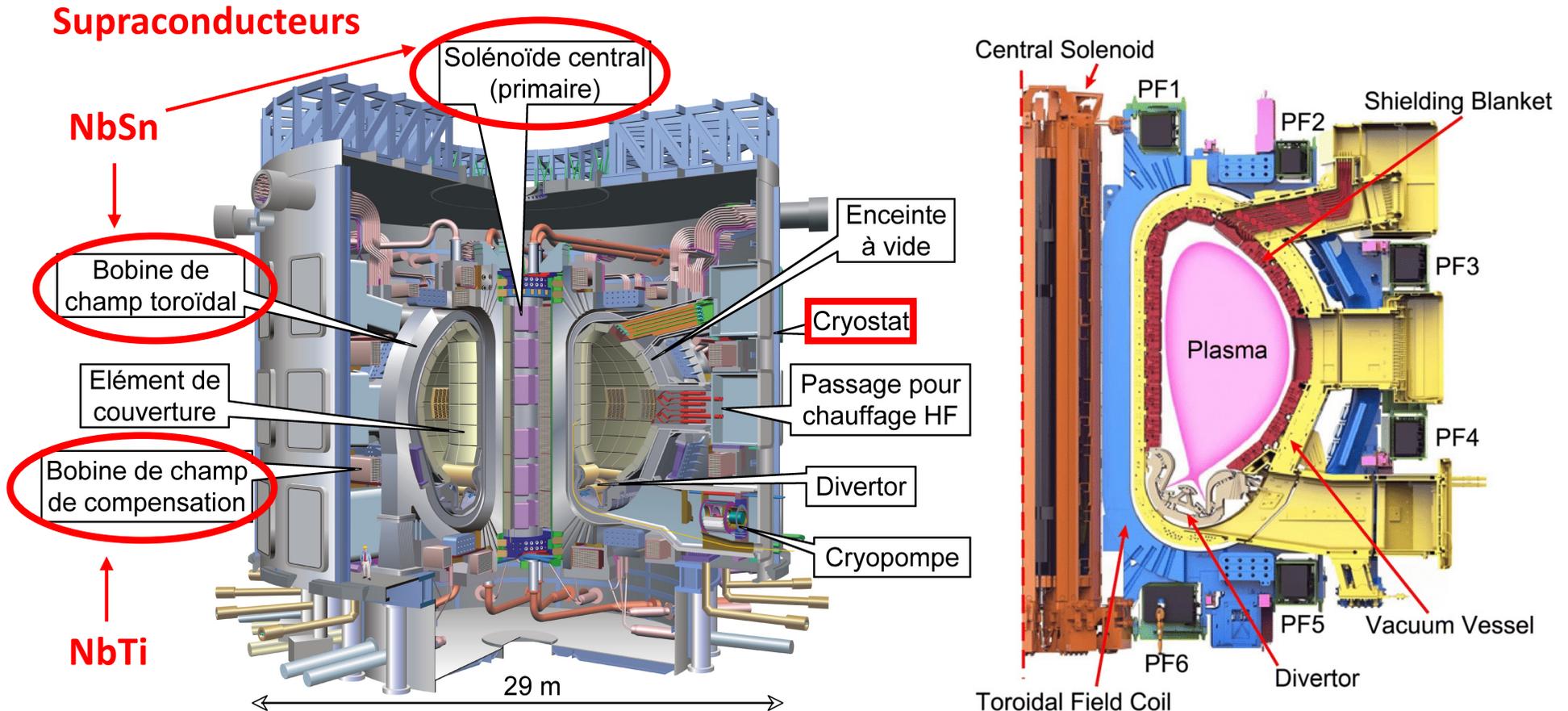
Ils ont donné en 1985 le coup d'envoi d'un grand programme



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		$R \approx 9 \text{ m}, a \approx 3 \text{ m}$ $V \approx 2\,000 \text{ m}^3$	6m, 2m 800 m³
Masse de DT dans le plasma		2 g	≤ 1 g
Puissance de fusion		≥ 1 GW	400 MW

Eclaté et coupe méridienne



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

Actualité d'ITER

ITER NEWSLINE -
21 Nov, 2022
Machine assembly

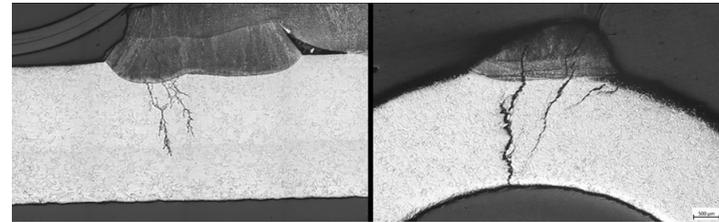
Key components to be repaired

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?>



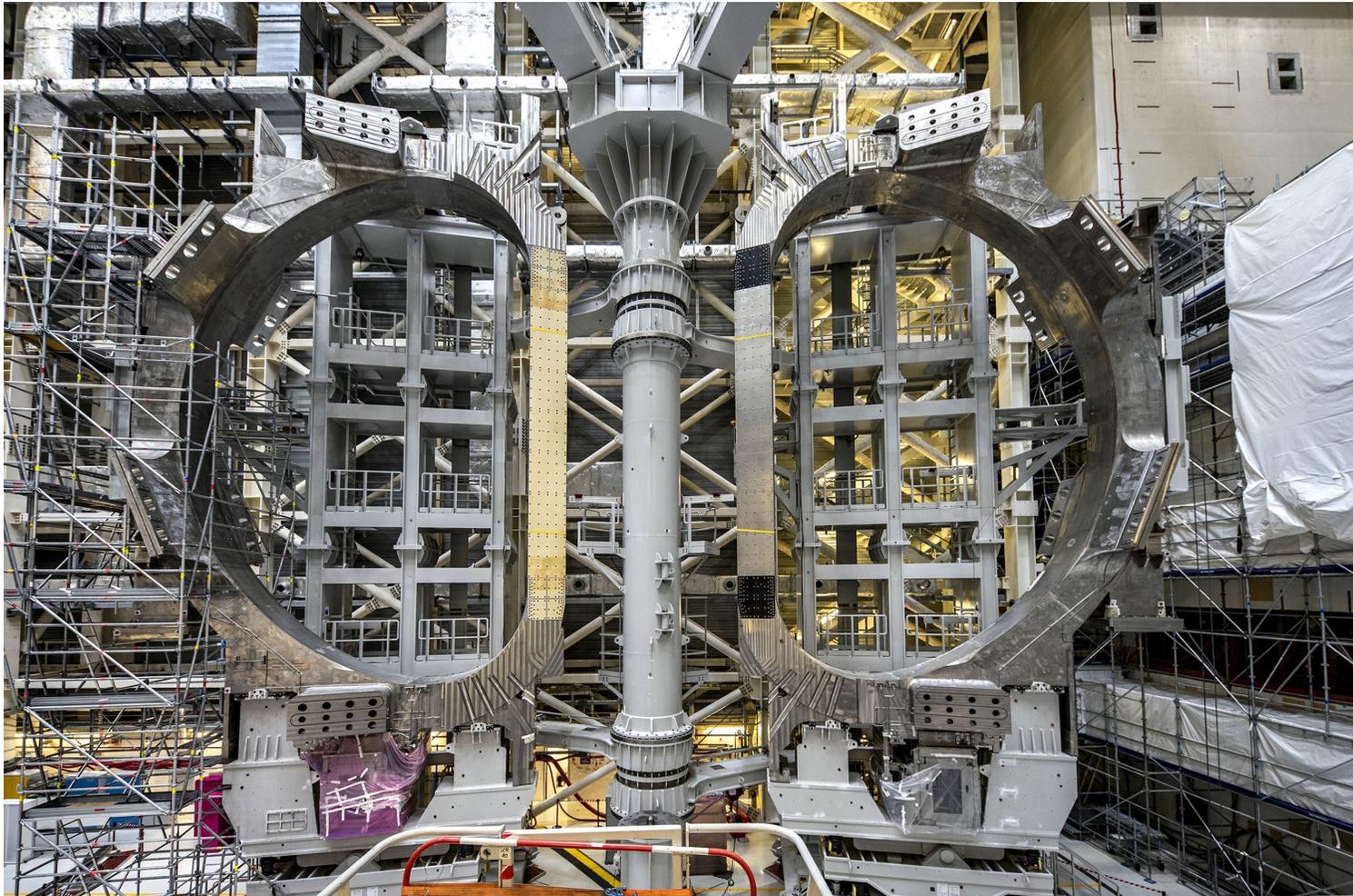
WORLD IN DEPTH

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

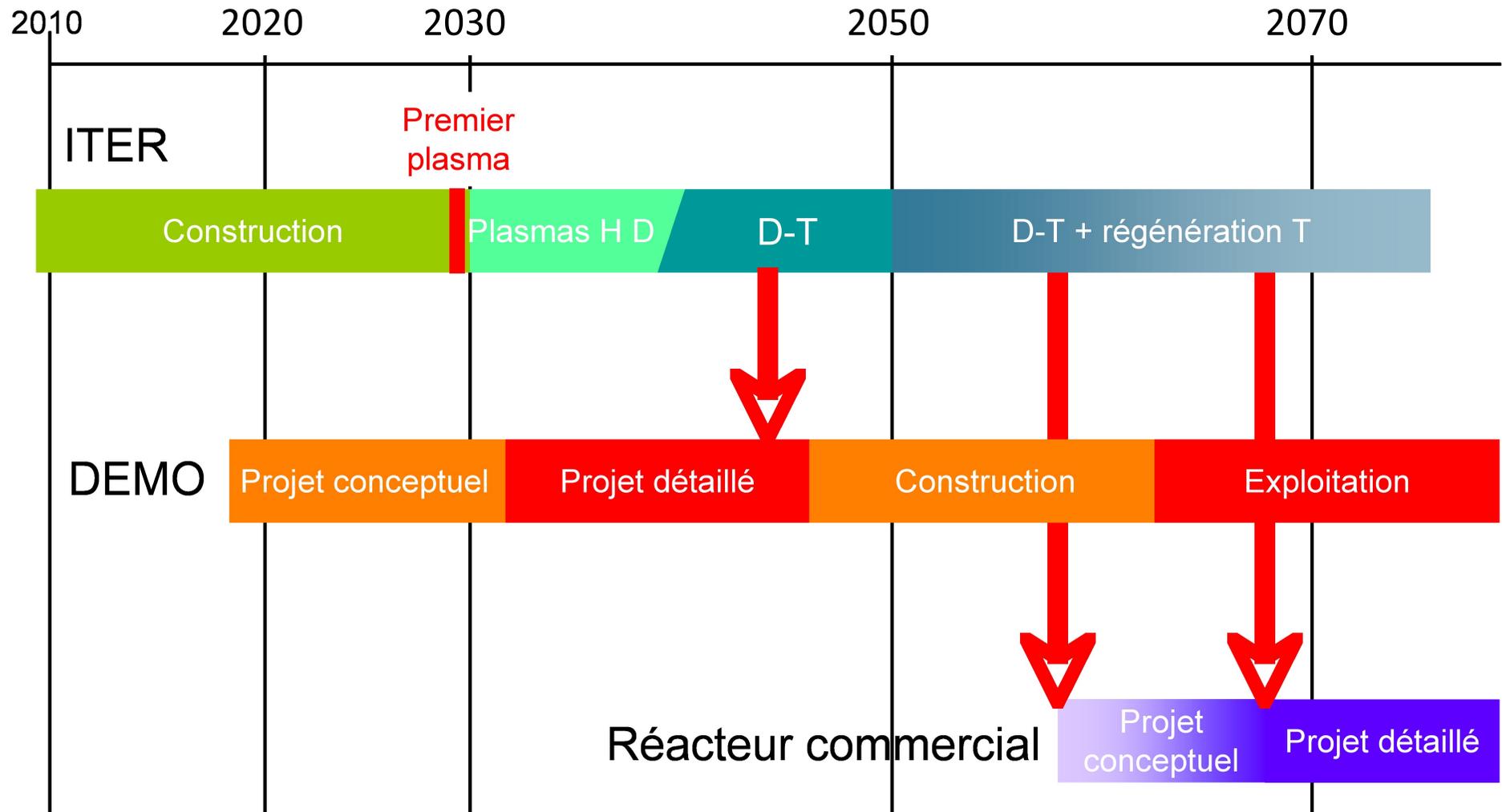
NEW

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

Prêt pour le colmatage des fissures



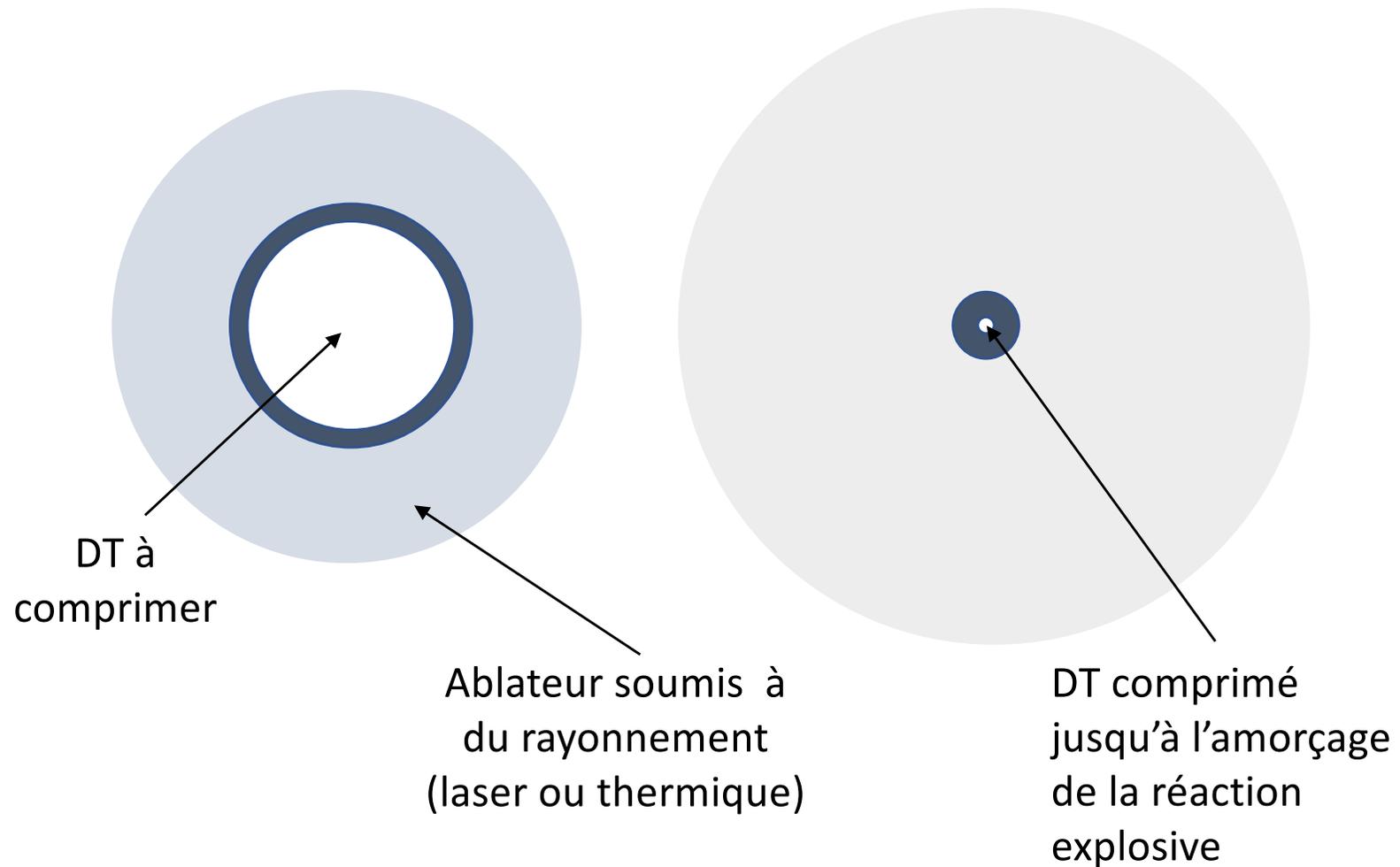
Un long fleuve tranquille ?



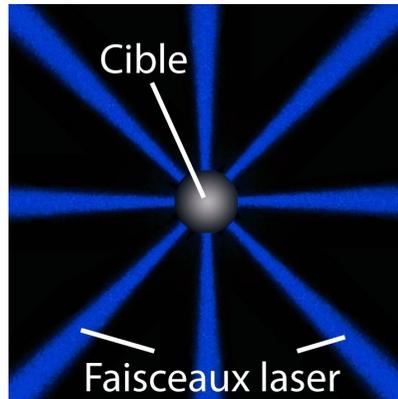
Confinement inertiel : lasers de la classe MEGAJOULE

En décembre 2022,
un seuil de parité énergétique a été franchi,
enfin ! au bout de 50 ans.

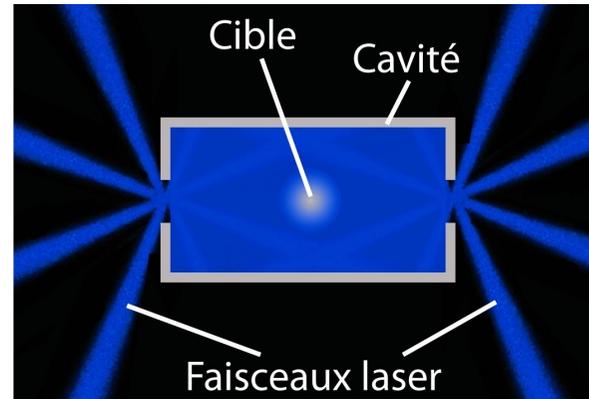
Le principe



Modes direct et indirect



Direct



Indirect

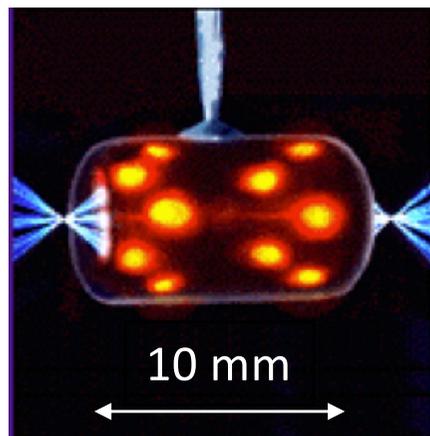
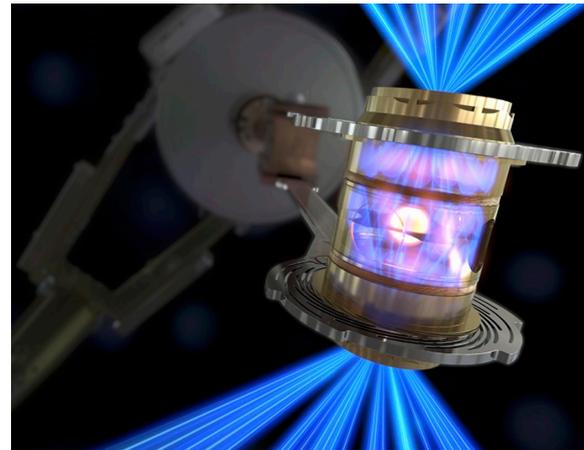
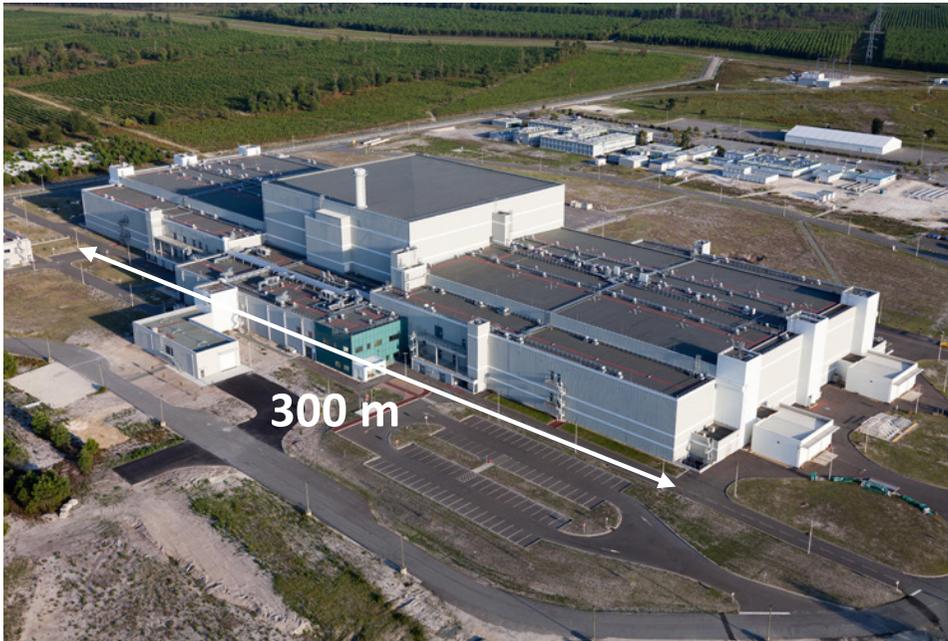


Image publicitaire

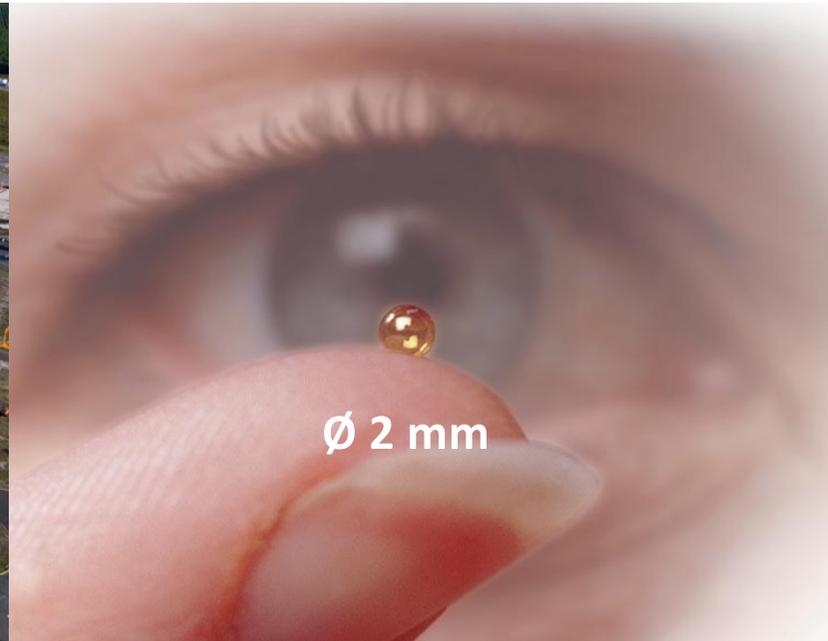


Cible cryogénique

Contraste



Laser mégajoule



Cible à comprimer

Actualité de NIF



13 décembre 2022 :

Annonce, au cours d'une conférence de presse organisée par les autorités du DOE, du franchissement d'un seuil de parité énergétique :

énergie de fusion \geq énergie laser irradiant la cible

Expérience reproduite en 2023. **Ignition prouvée.**

Actualité de NIF dans la presse (exemple)



Fusion nucléaire : comment les physiciens américains ont décroché le graal

Par [Franck Daninos](#)

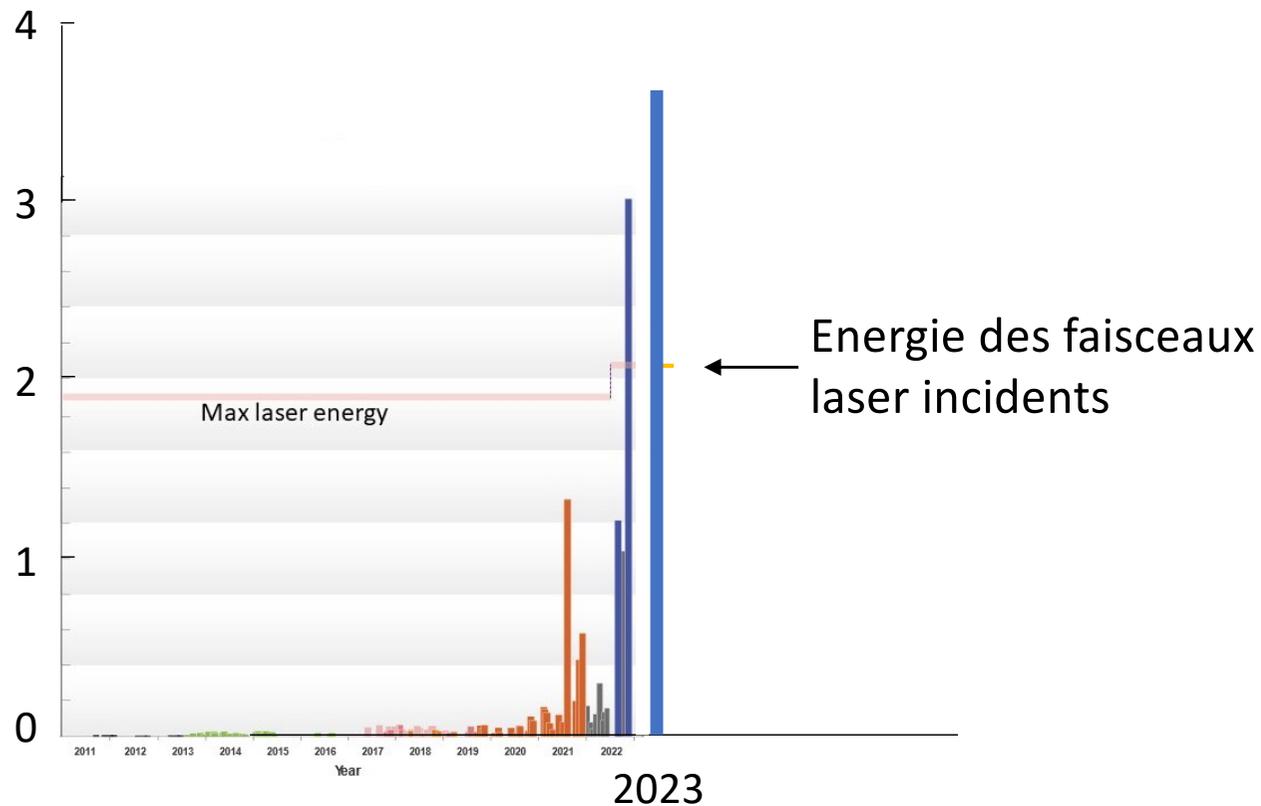
Publié le 16.12.2022 à 17h14

Après treize années d'efforts acharnés, les chercheurs américains du National Ignition Facility sont parvenus 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 dissuasion nucléaire des Etats-Unis.

Historique des expériences de fusion inertielle menées auprès de NIF.

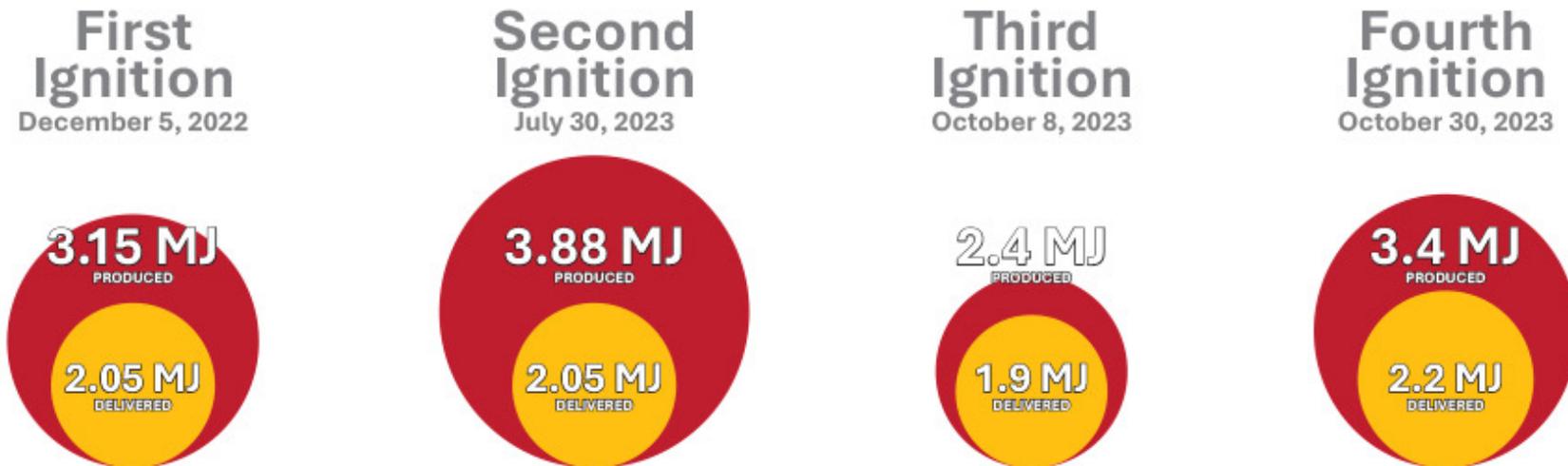
Les couleurs des barres d'historique correspondent à différentes architectures de cible. *D'après Mark Herrmann (LLNL), et Physics Today.*

Energie de fusion (MJ)



Dernières nouvelles de NIF

Charting the First Year of Ignition



Gains

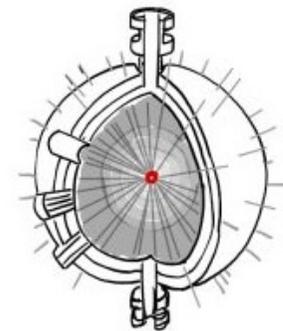
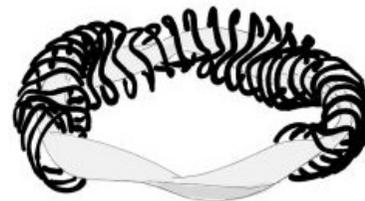
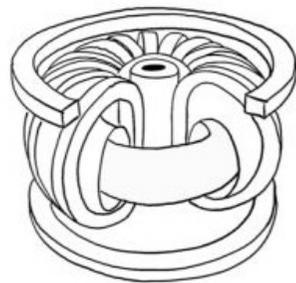
	Gain « scientifique »	Gain électrique
Confinement magnétique ITER	Attendu 10 En puissance par rapport aux sources servant au chauffage et au « <i>current drive</i> »	1 Par rapport à la puissance consommée sur le site
Confinement inertiel NIF	Obtenu 1.8 Espéré 10 à 100 en énergie par rapport aux faisceaux laser impactant la cible	0.02 Par rapport à l'énergie nécessaire au fonctionnement du laser

Quelques start-ups



En parallèle de grands projets

	Tokamak	Stellarator	Inertiel
Combustible	DT	DT	DT — pB ¹¹
	JET(UK) ITER(Fr)	Wendelstein 7X (De)	NIF (USA)
Gain obtenu	0.67		1.5
Start-ups	Kyoto fusion energy Commonwealth fusion Tokamak energy	Princeton stellarator Renaissance fusion Type one energy	Focused energy Marvel fusion HB11



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

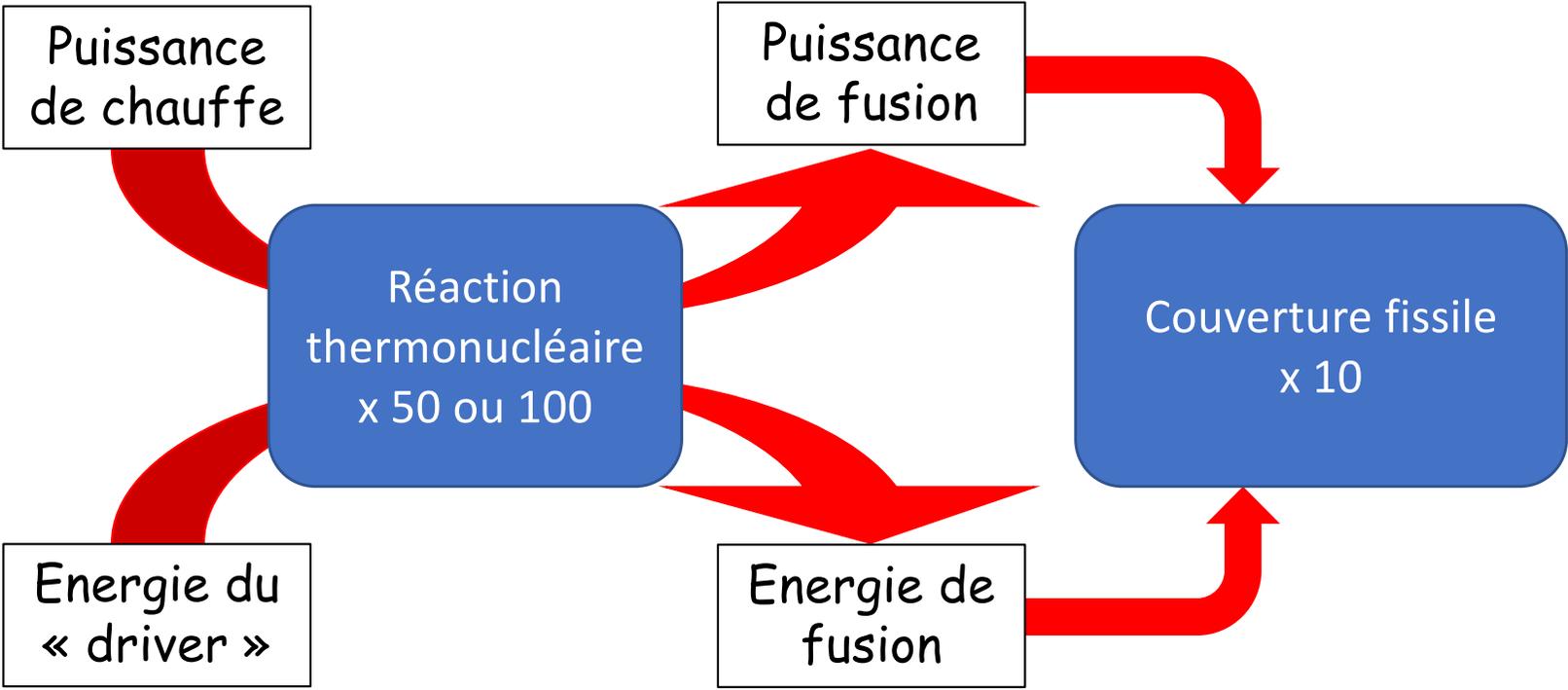
Comment les utiliser?

- Céder leur énergie à un caloporteur (faire bouillir de l'eau)
- 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"...

Hybrides fusion-fission

Amplifications successives : hybride fusion-fission



Hybrides : avantages et problèmes

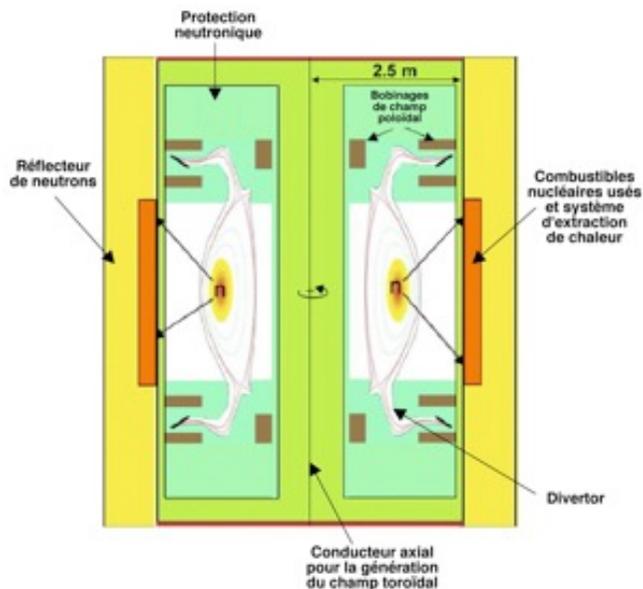
Perspectives :

- 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

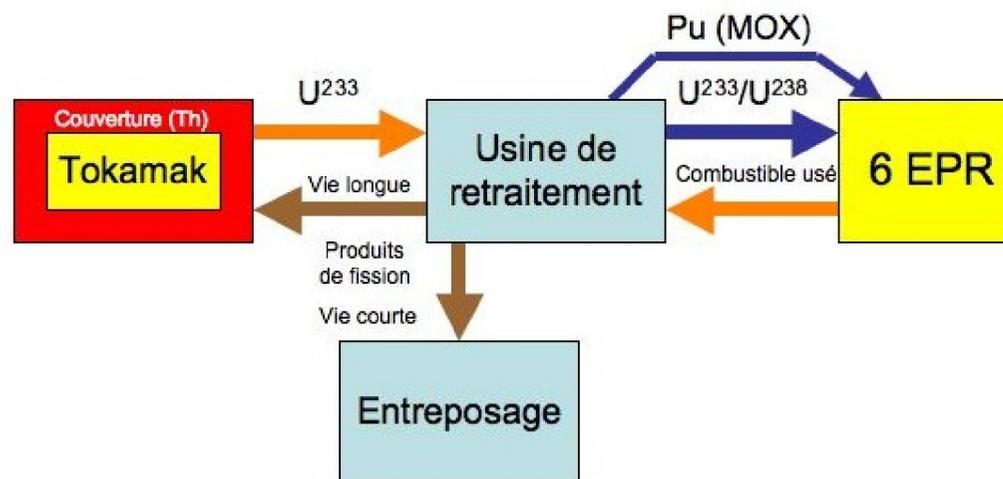
Mais :

- 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

Un rôle pour un hybride à confinement magnétique



Tore compact à couverture fissile



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



La quête du Graal continue

La fusion sera-t-elle prête quand la
société en aura besoin ?*

***d'après un propos prêté à Lev Artsimovitch**



Back up

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

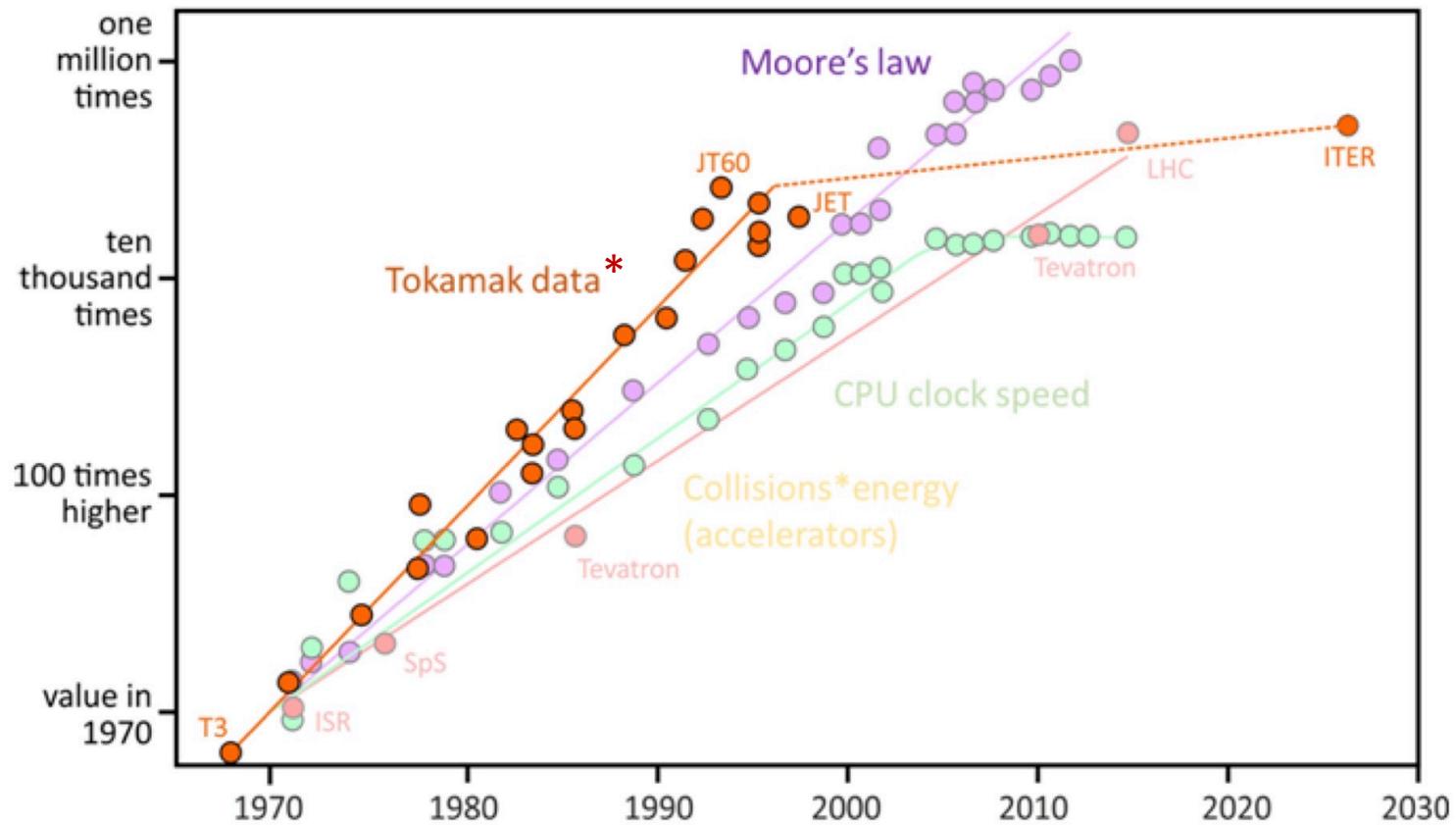
Fusion

- 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

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 $E_{\text{fusion}}/E_{\text{chauff}} \approx 10$	

Comparaisons



* Triple product

Précurseurs, régime thermonucléaire

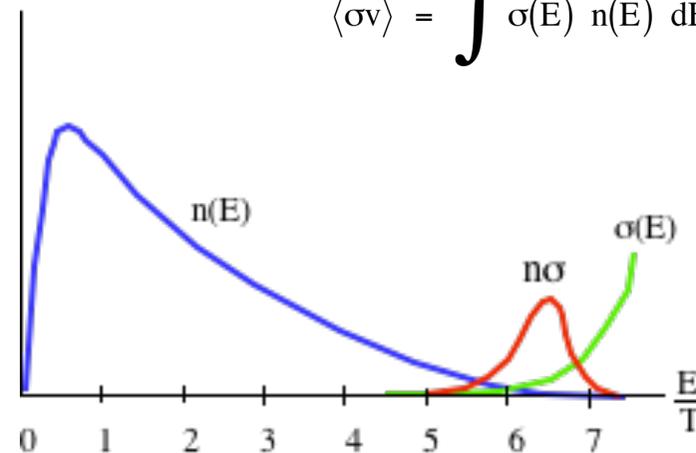
En 1919, Jean Perrin postule que le Soleil tire son énergie de réactions nucléaires de fusion.



En 1938, George Gamow et Edward Teller imaginent le régime thermonucléaire et effectuent les premiers calculs (à la main).

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

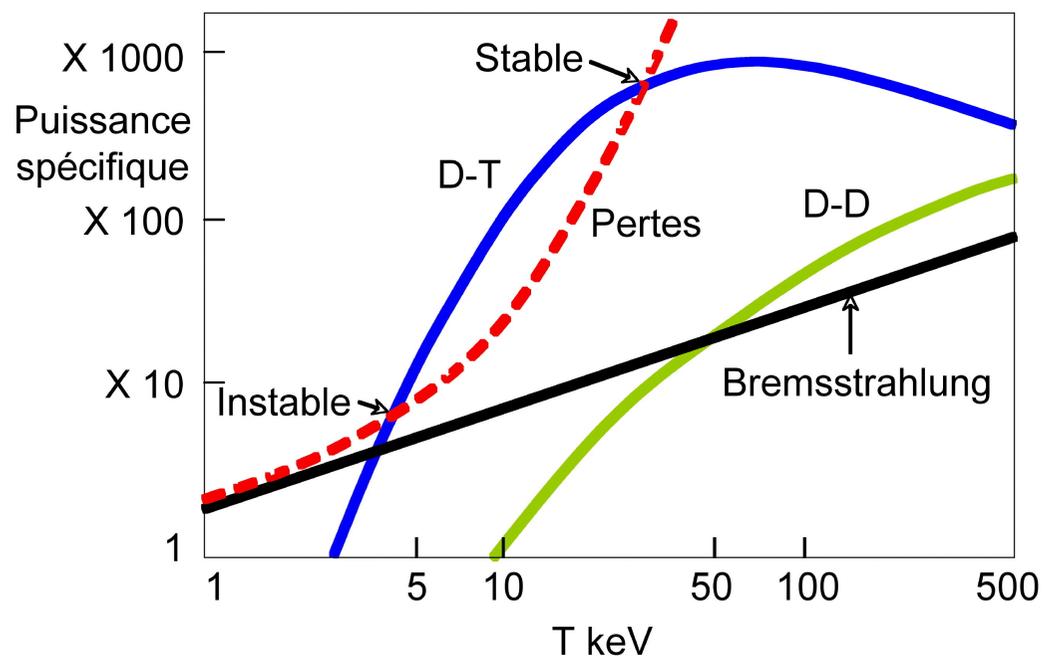
$$\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(E) n(E) dE$$



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)

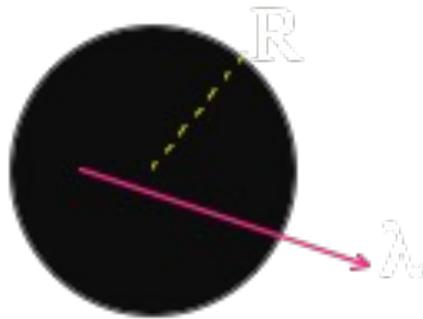
la température doit être supérieure à 4.4 keV

la température doit être supérieure à 48 keV

Rendements

$$\lambda = 1/n\sigma$$

Inertiel

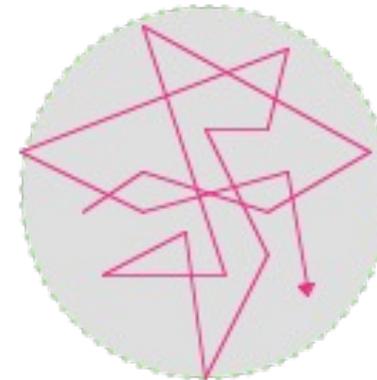


$$T = 10^8 \text{ K}$$

$$\eta_i = R/\lambda = \sigma (nR)$$
$$\rho R (\propto nR) > 2 \text{ gcm}^{-2}$$

$$\tau_\lambda = \lambda/v$$

Magnétique



$$\eta_m = \tau/\tau_\lambda = \sigma v (n\tau)$$
$$n\tau > 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s.}$$

(Lawson)



Au plus haut niveau

1985

R. Reagan
A. Trivelpiece

M. Gorbatchev
E. Velikov

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

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

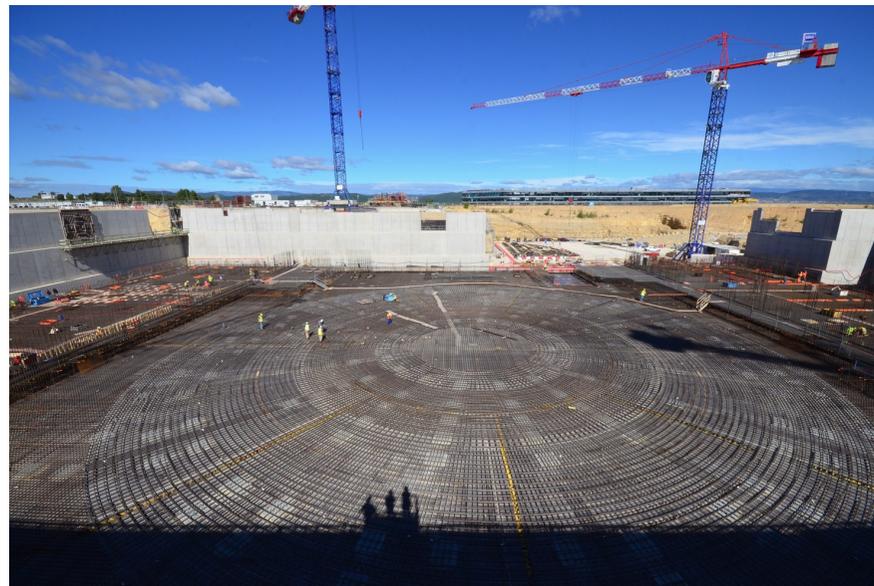
Le programme ITER



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

Etapes importantes du chantier

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



Le chantier en 2022



Quelques arguments des oppositions à ITER

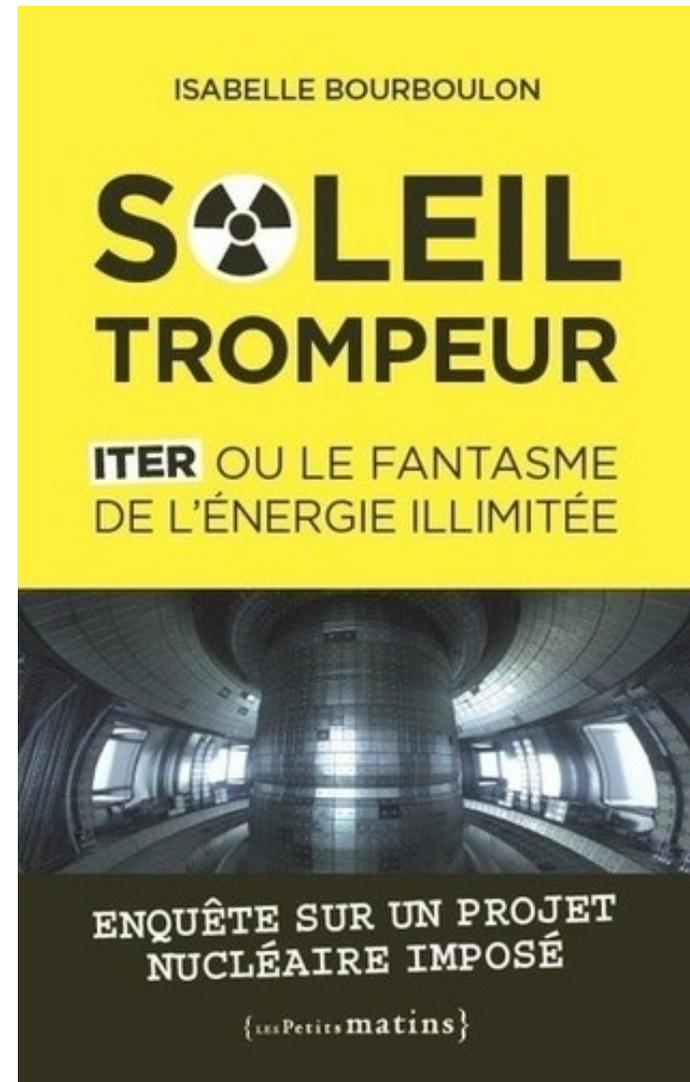
Ecolos

- 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
- A trop long terme pour justifier un programme d'une telle ampleur
- Sous évaluation des instabilités dont des risques de disruptions majeures

Tract (2005) et pamphlet (2020)



Un élu (vert) à la mairie de Marseille en 2022

:



Sebastien Barles

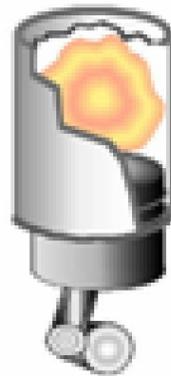
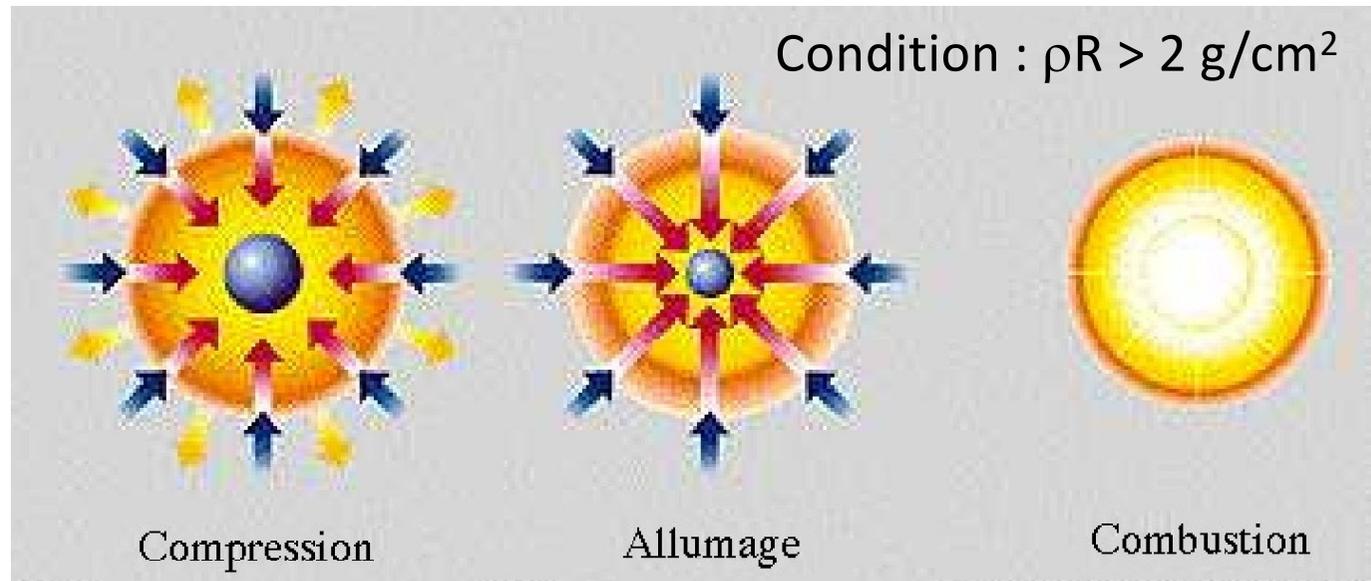
30 déc. 2022 · 🌐



💥 Le prométhéen projet **#ITER** a du plomb dans l'aile. Après l'explosion du budget pour l'orgasme le plus cher de l'humanité (400 secondes de fusion pour 20 milliards d'€), les conditions de travail des salariés avec des morts sur le chantier, c'est la conception même du Tokamak qui fait défaut 😞

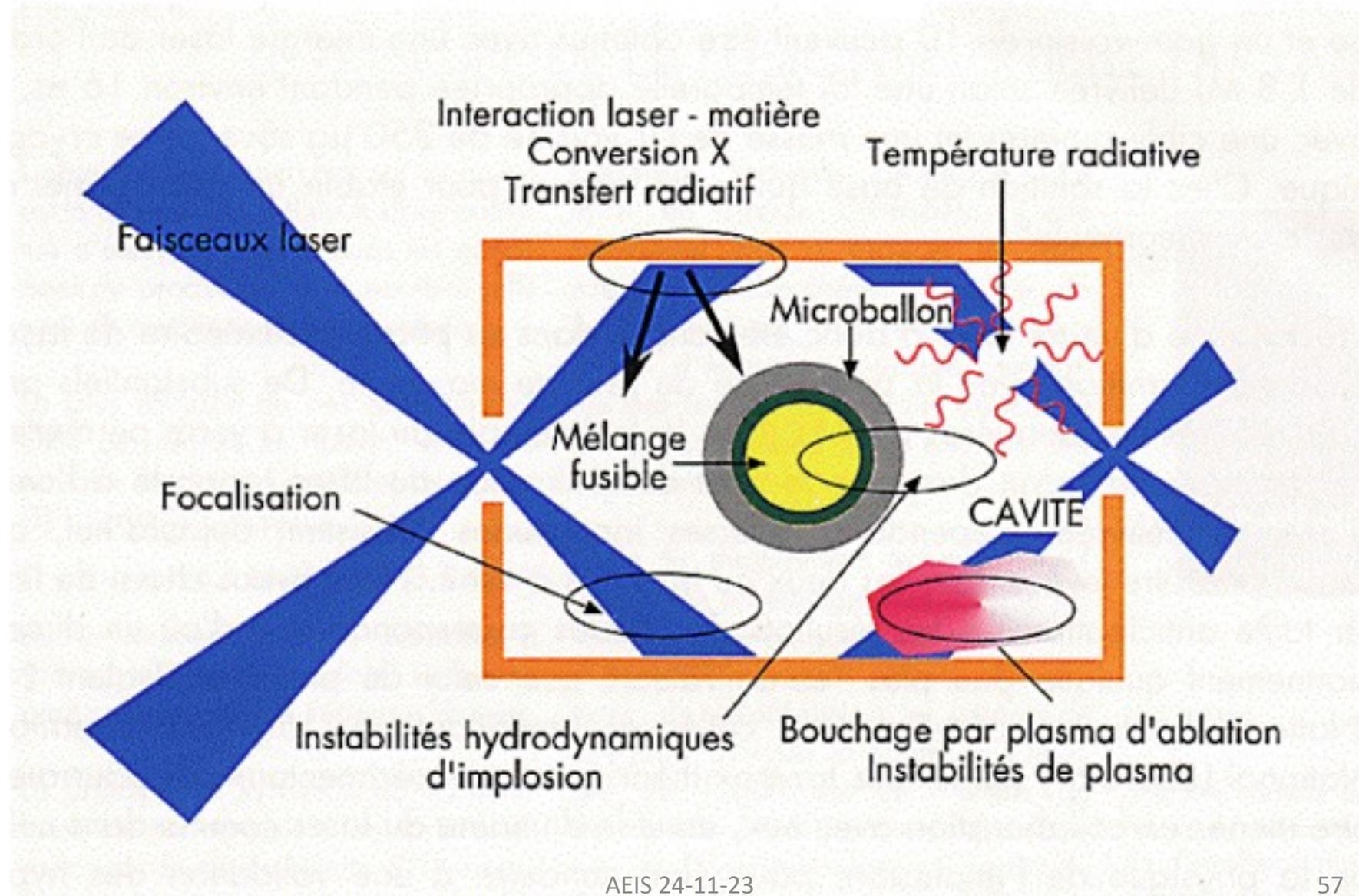
Iter participe de surcroît au mythe de l'énergie infinie et d'un modèle de production énergétique ultra centralisé. Combattre ce projet de recherche comme étant non prioritaire est une nécessité quand on se revendique écologiste.

De plus, ce projet n'a jamais été validé par le monde scientifique (cf les prix Nobel Charpak and co l'ayant combattu).

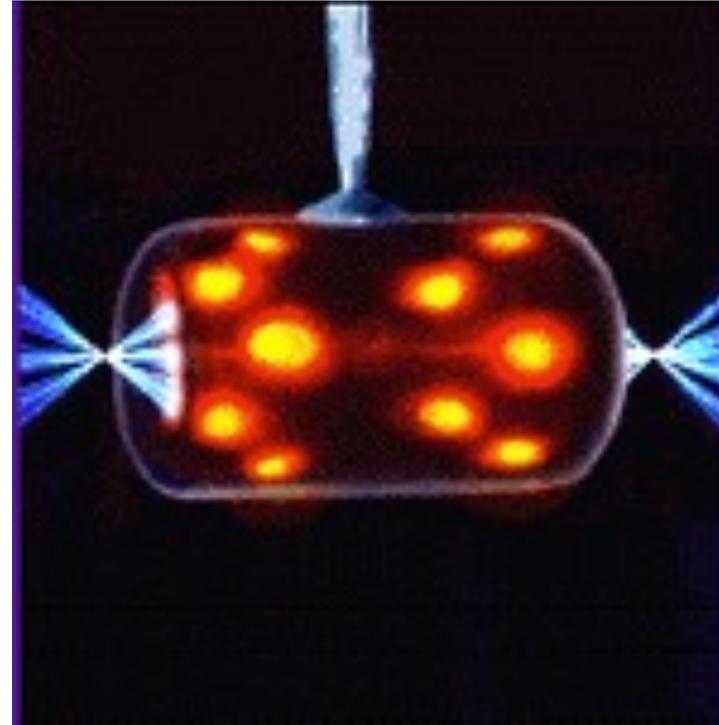
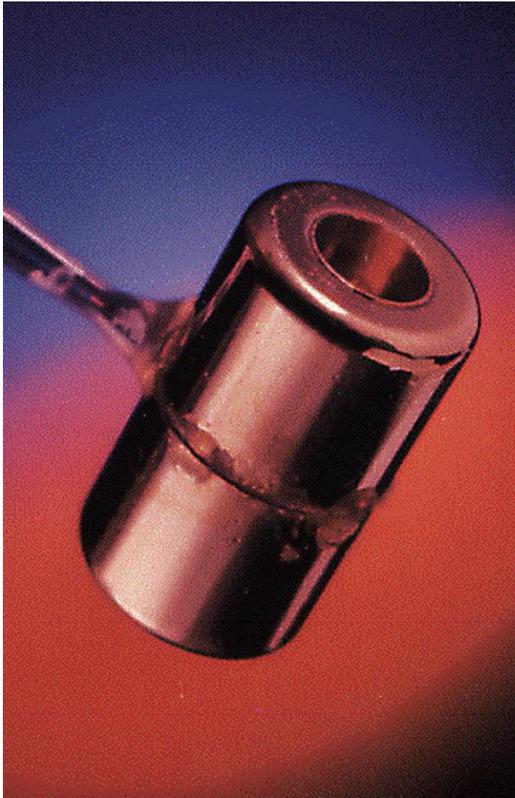


Fusion inertielle

Implosion indirecte par laser



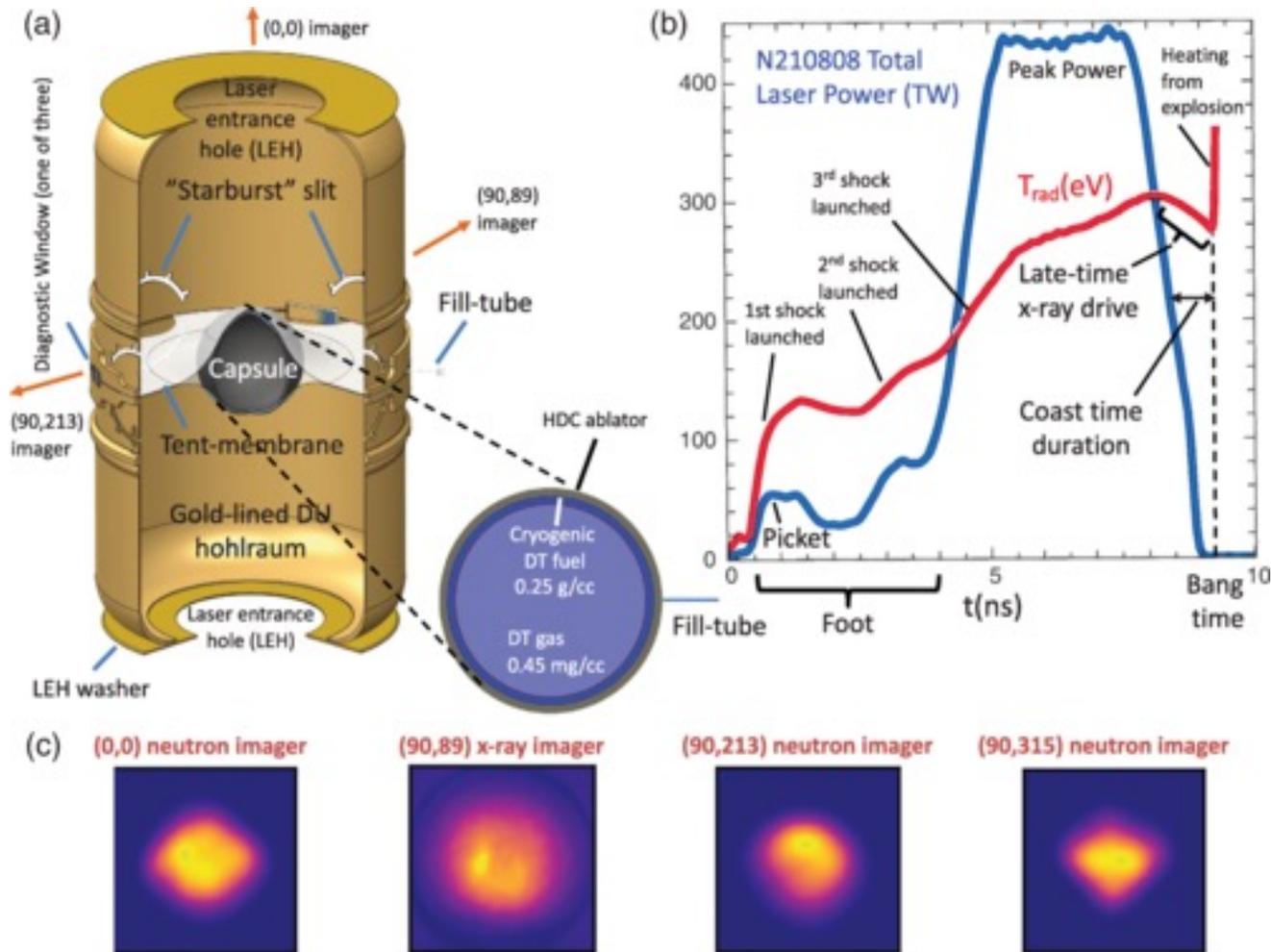
Capsule pour implosion indirecte



10 mm

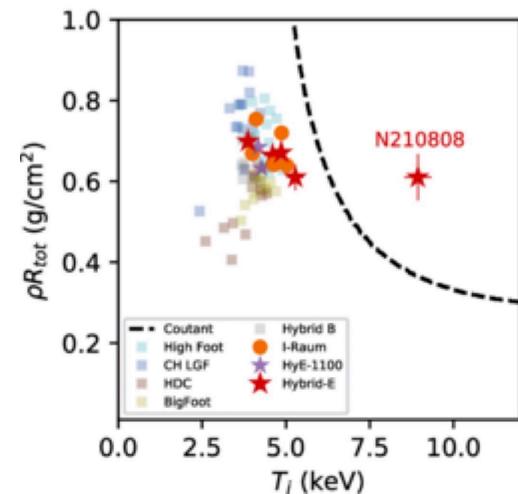
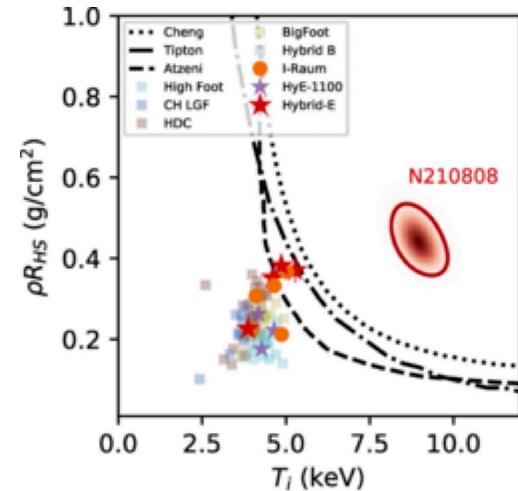


8 août 2021



8-8-2021 et la suite

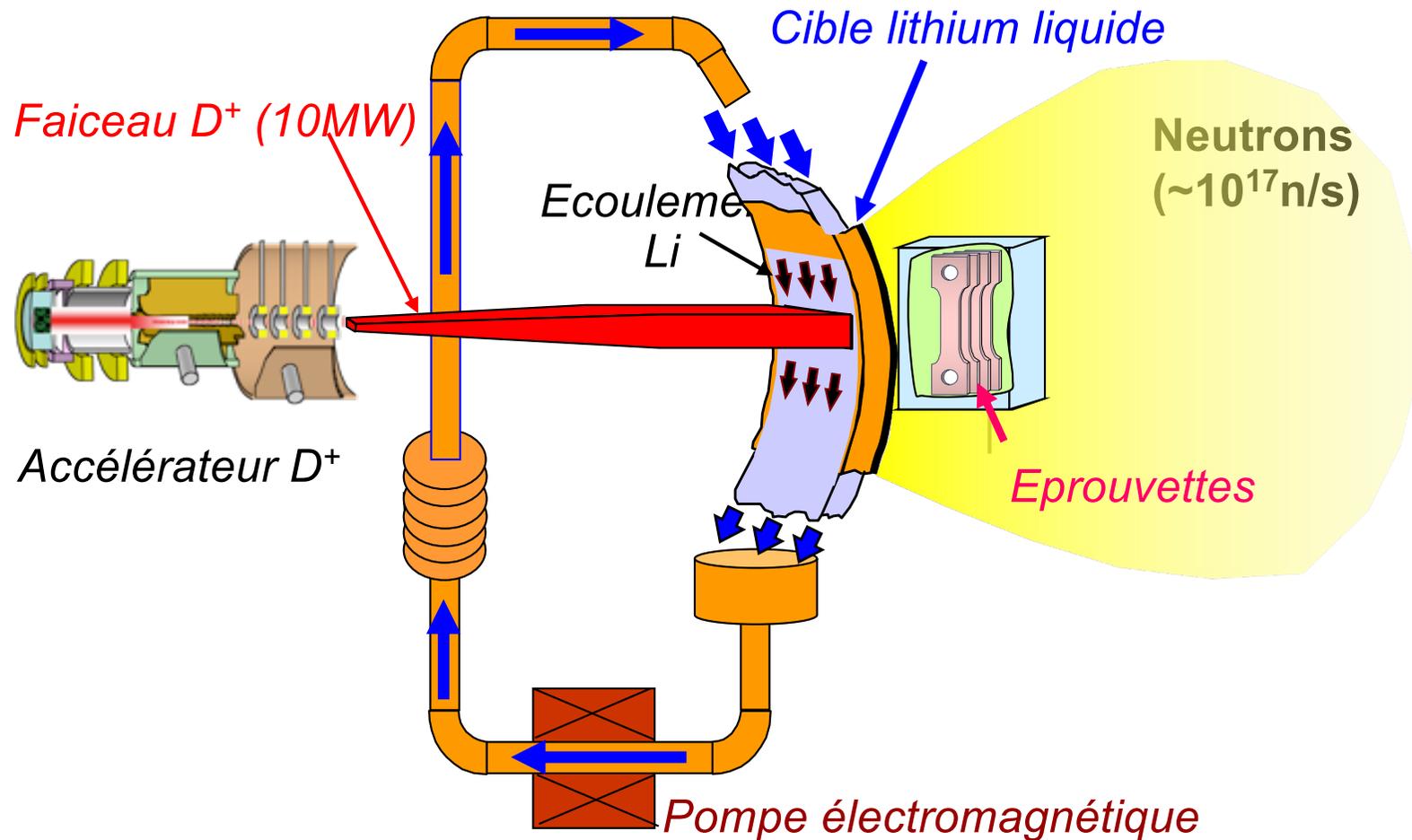
- 1.3 MJ de fusion pour 1.9 MJ d'énergie laser.
- Une petite fraction, **point chaud** ("*hot spot*" *HS*), de la cible comprimée a été portée à l'ignition.
- Mais celle-ci ne s'est pas propagée au reste du combustible.
- Ce premier résultat encourageant, analysé en détails a entraîné des améliorations 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, 3.5 contre 2.05 en 2023)**. On attend que l'exceptionnel devienne la routine !
- L'application d'un champ magnétique a des effets bénéfiques sur la production d'énergie de fusion (prouvé avec du D₂ en 2022)



Qu'en est-il des matériaux ?

Problème	La tenue des matériaux au flux de neutrons de 14 MeV générés par un TOKAMAK dans les conditions du réacteur thermonucléaire (ITER n'a pas ce problème, les flux restent au niveau de l'ILL).
1985-1993	Etude de différents concepts de sources de neutrons. Accord sur un dispositif accélérateur/cible (D/Li)
1994-2004	Elaboration du projet IFMIF (<i>International Fusion Material Irradiation Facility</i>) pour une réalisation au Japon (compensation du choix de Cadarache)
2012	Essai réussi de l'injecteur de D+
2017 +	Phase de construction IFMIF-EVEDA (150 M€ sur 6 ans)

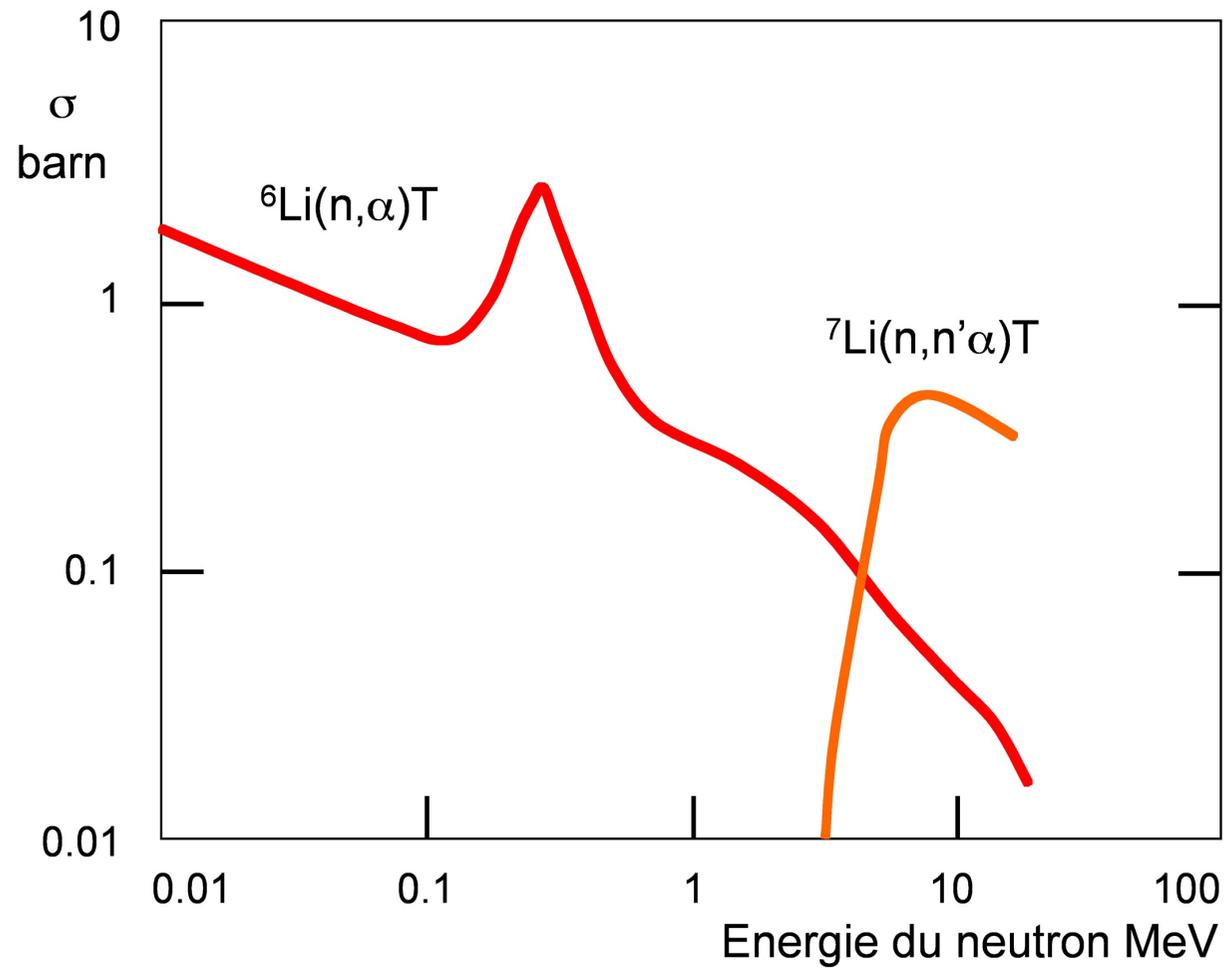
Test matériaux sous neutrons de 14 MeV: IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility)



Ressources pour la fusion

- Deutérium océans: 1 m³ d'eau de mer contient 1 verre d'eau lourde
- Hélium 3
 - 1) sol lunaire > 10⁶ tonnes: accumulation par impact du vent solaire;
 - 2) atmosphères de Saturne et d'Uranus 10²⁰ tonnes

Régénération du tritium



Les océans, réservoirs de combustibles nucléaires? ou comment le nucléaire peut être durable

<i>Deutérium</i>	<i>33</i>	<i>g/m³</i>	<i>45.200</i>	<i>milliards de tonnes</i>
<i>Lithium</i>	<i>0.17</i>	<i>g/m³</i>	<i>233</i>	<i>milliards de tonnes</i>

Océans 1,37 10¹⁸ m³