

A diagram illustrating nuclear fusion. It features a central cluster of four spheres (two red with a white plus sign and two blue) representing a fused nucleus. To the left, two separate spheres (one red with a plus sign and one blue) represent the initial reactants. To the right, a red arrow points away from the central cluster, accompanied by concentric yellow and green circles representing energy release. Several green arrows point from the reactants towards the central cluster. The background is a dark space with small white stars.

Fusion nucléaire : déconvenues, succès, espoirs.

Jean Louis Bobin
Sorbonne-Universités



La fusion nucléaire peut elle contribuer à la transition énergétique en cours ?

- **NON**
- mais...

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

- Quelques rappels
 - Réactions de fusion nucléaire
 - 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 »
 - Les hybrides



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)



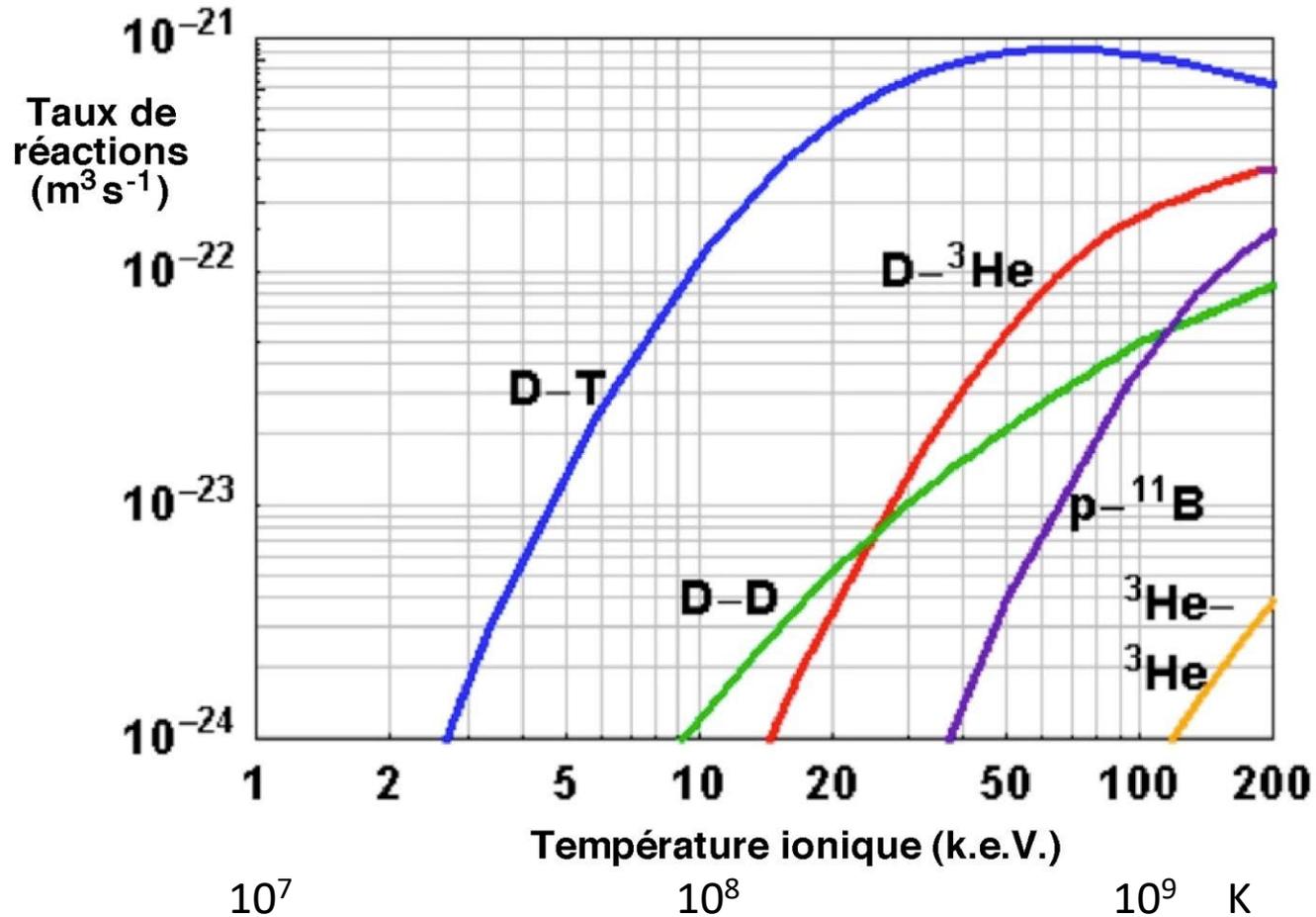
Réaction proton-bore (tri alpha)



} aneutroniques

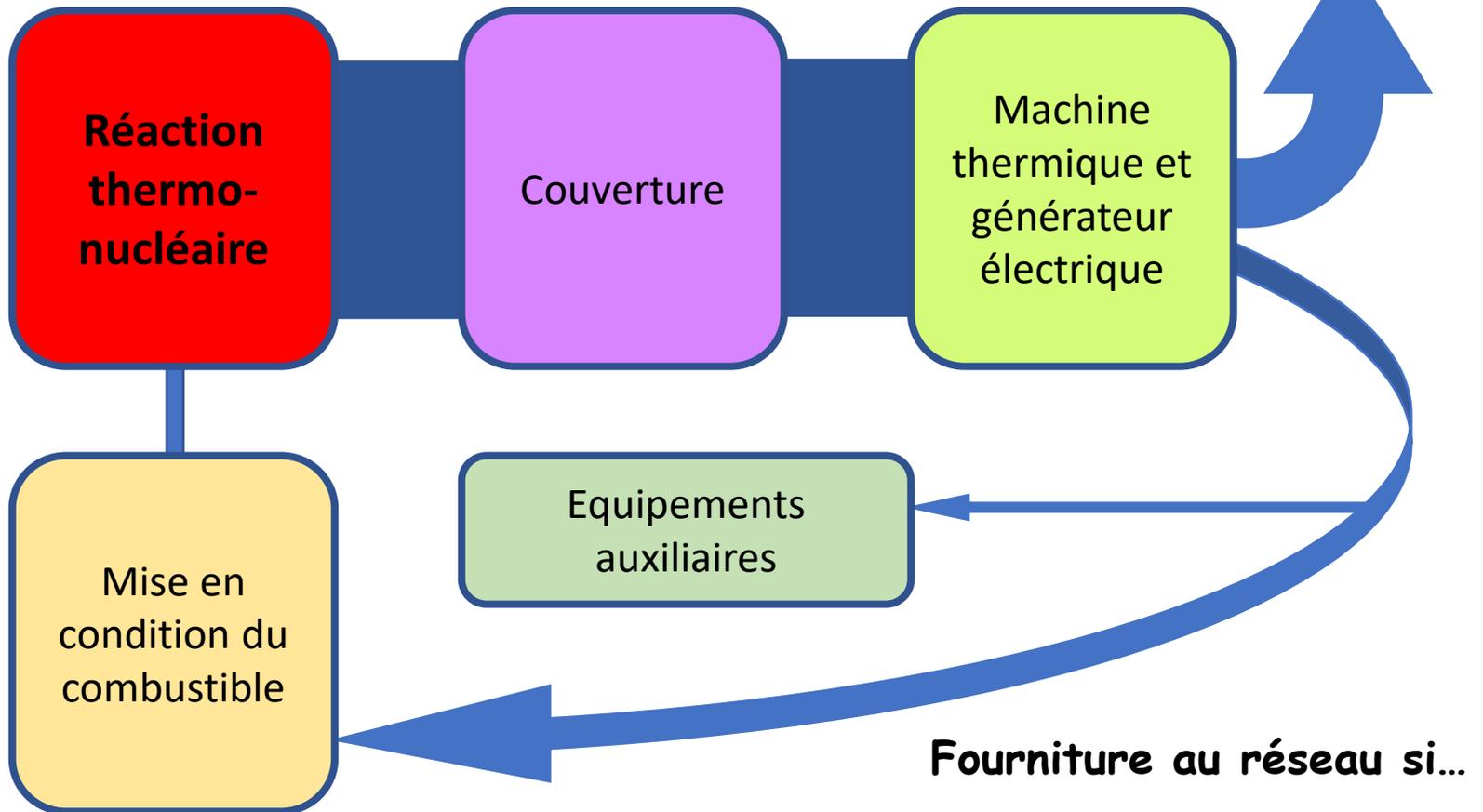
Taux de réactions en régime thermonucléaire

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



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
- Implosion **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

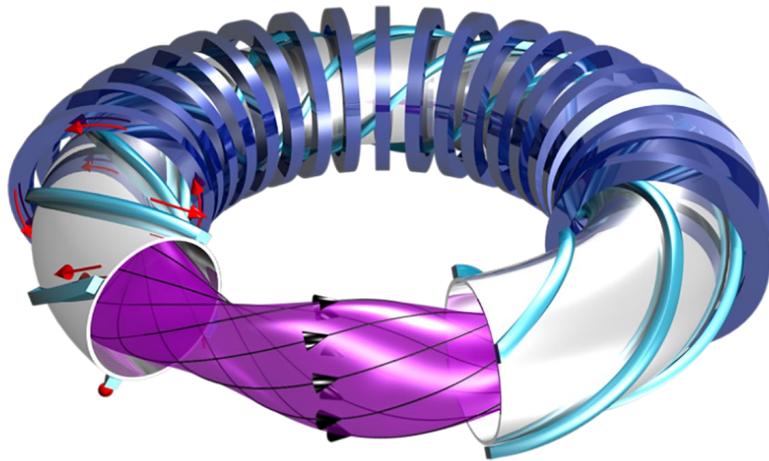
- Quatrième état (fluide ionisé) de la matière
- Extrême sensibilité, à toutes les échelles, aux champs électromagnétiques internes ou externes
- Excellent conducteur à haute température (comparable aux supra)
- Siège de multiples modes d'oscillation
- Instable
- Turbulent
- ...



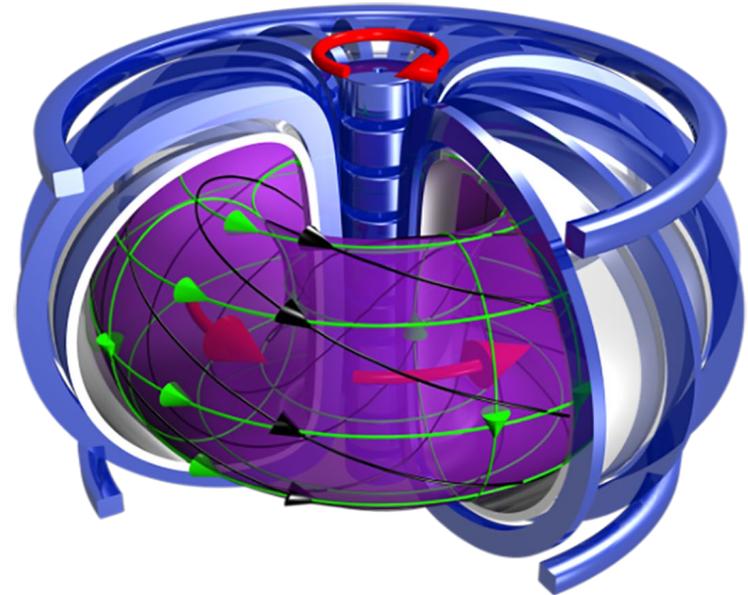


Confinement magnétique :

Stellarators, Tokamaks, ITER et ses malheurs

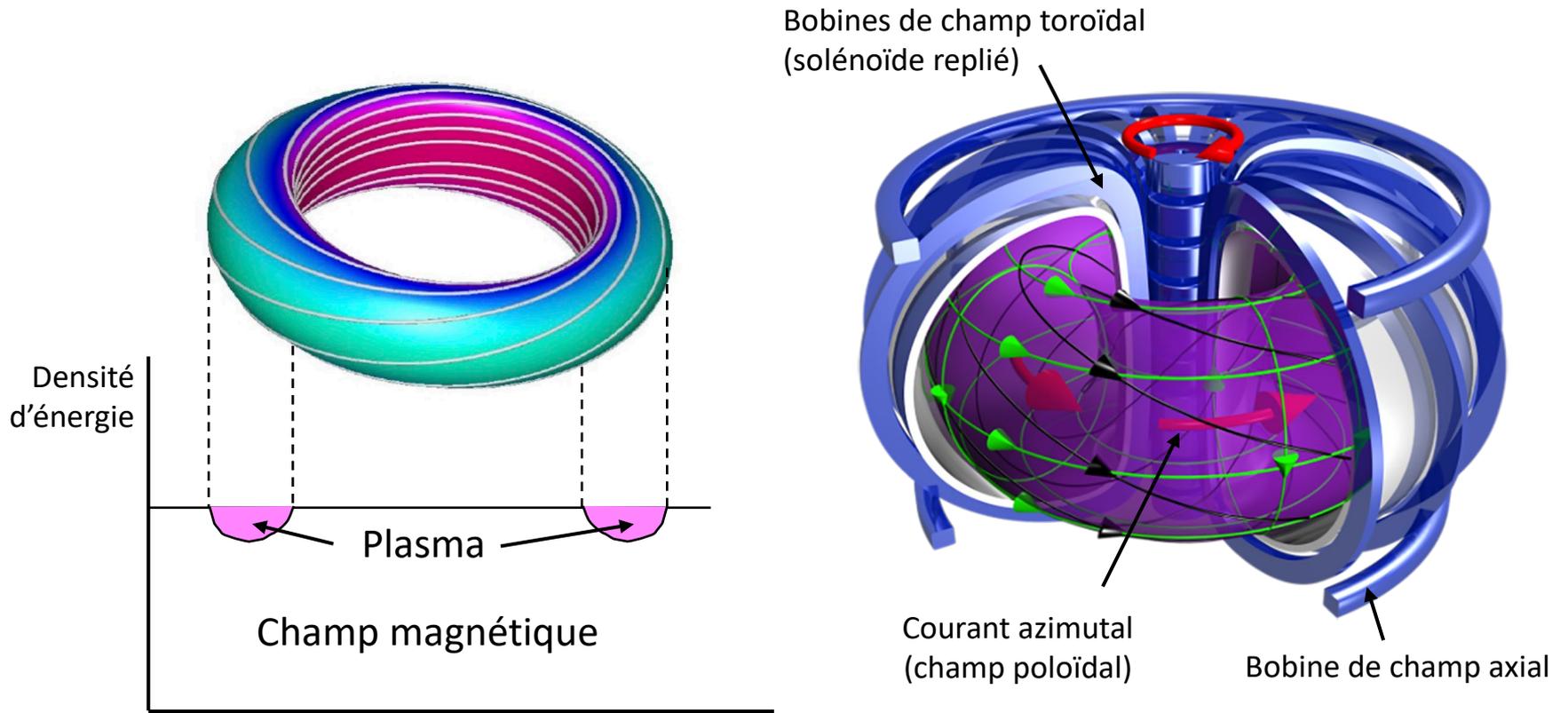


Stellarator



Tokamak

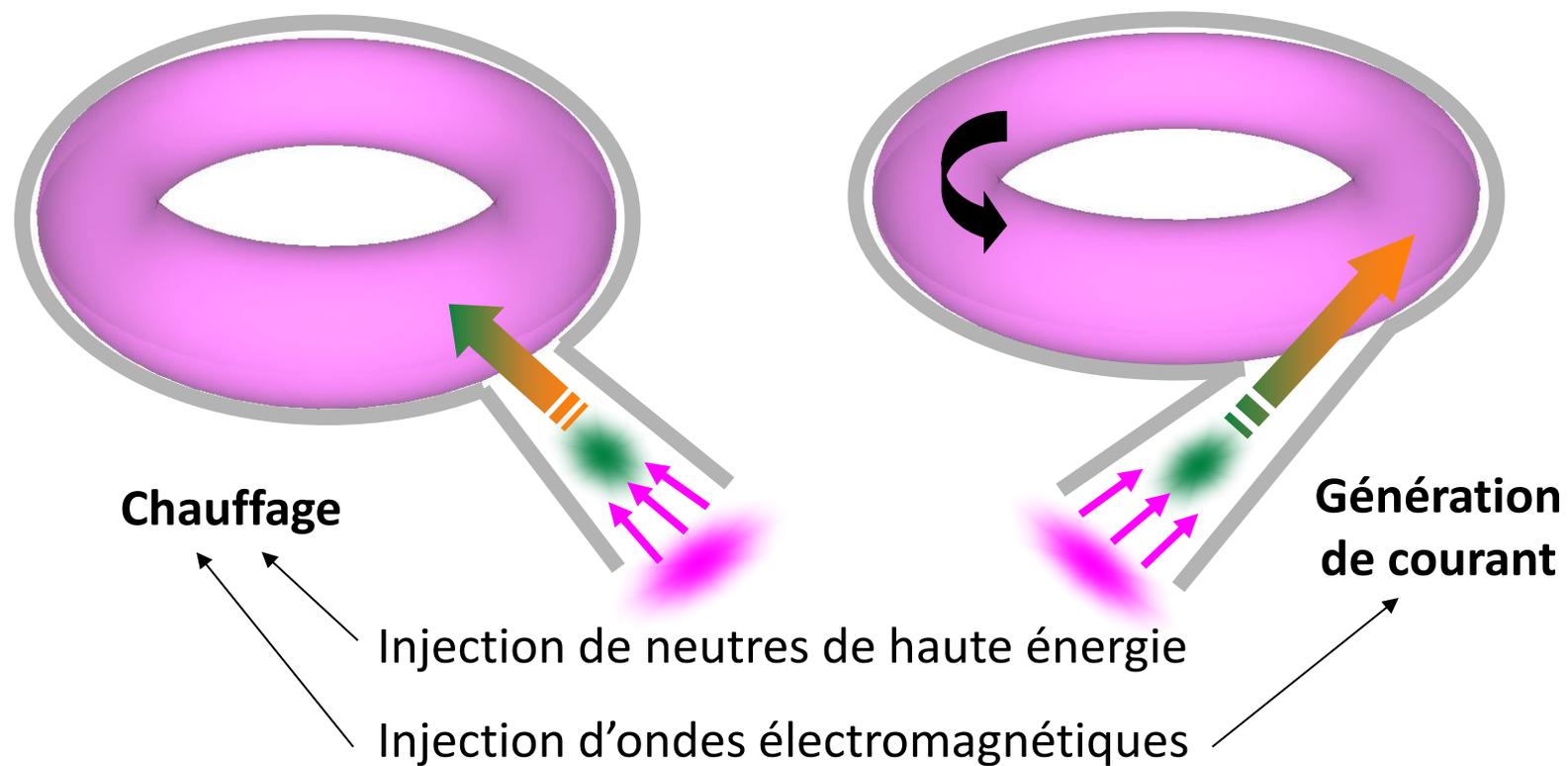
Le Tokamak



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

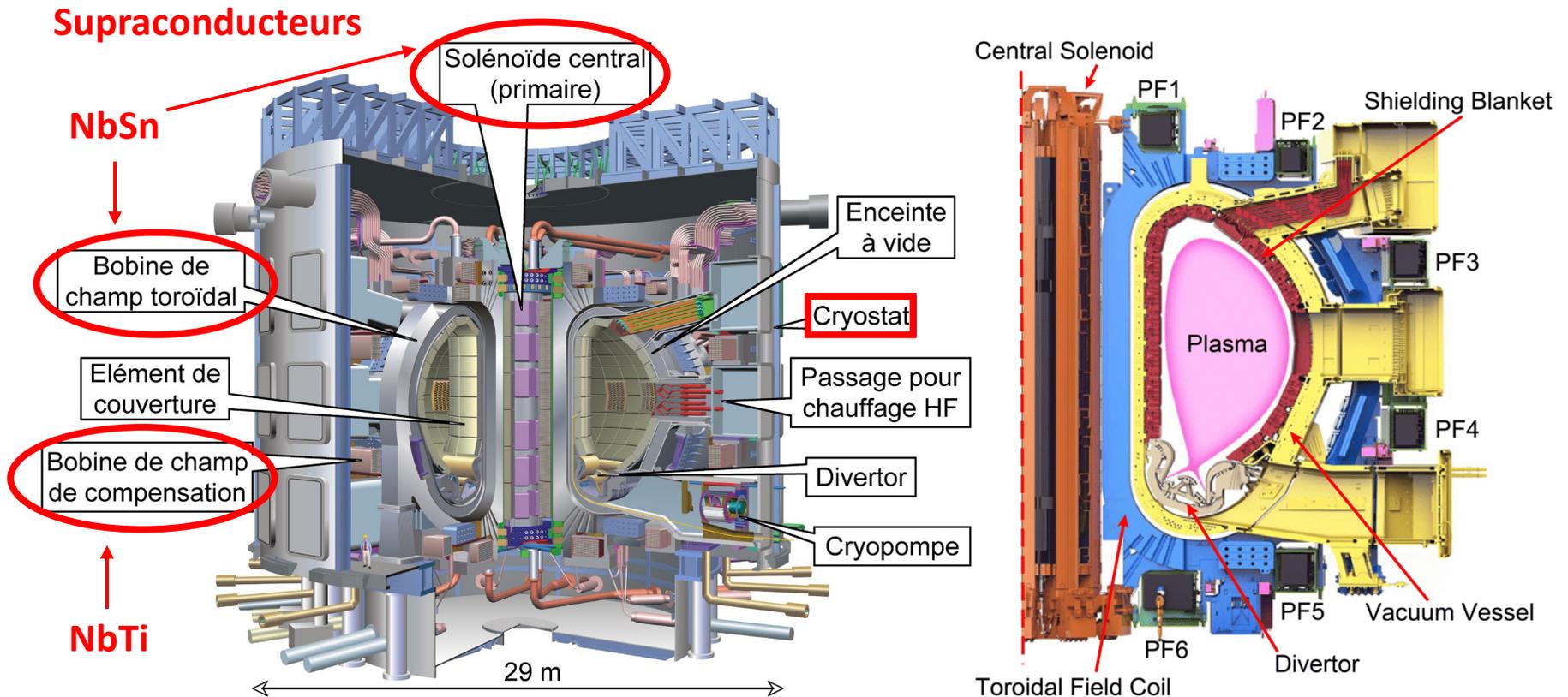




I.T.E.R. 1998/2001

		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		$\geq 1 \text{ GW}$	400 MW

Eclaté et coupe méridienne



Actualité d'ITER

ITER NEWSLINE -
21 Nov, 2022
Machine assembly

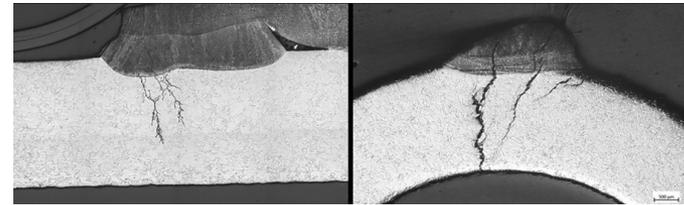
Key components to be repaired

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?>



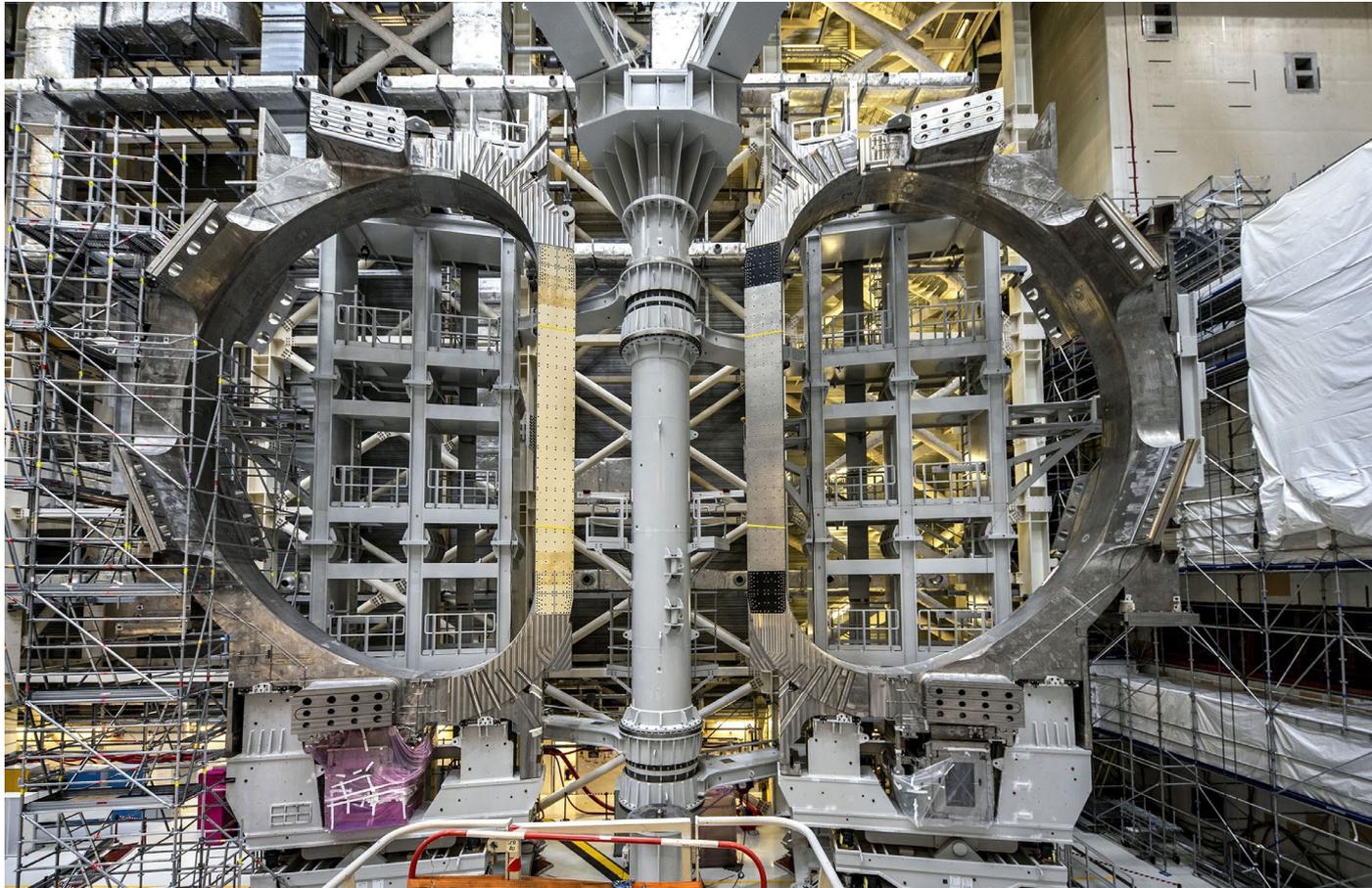
WORLD IN DEPTH

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



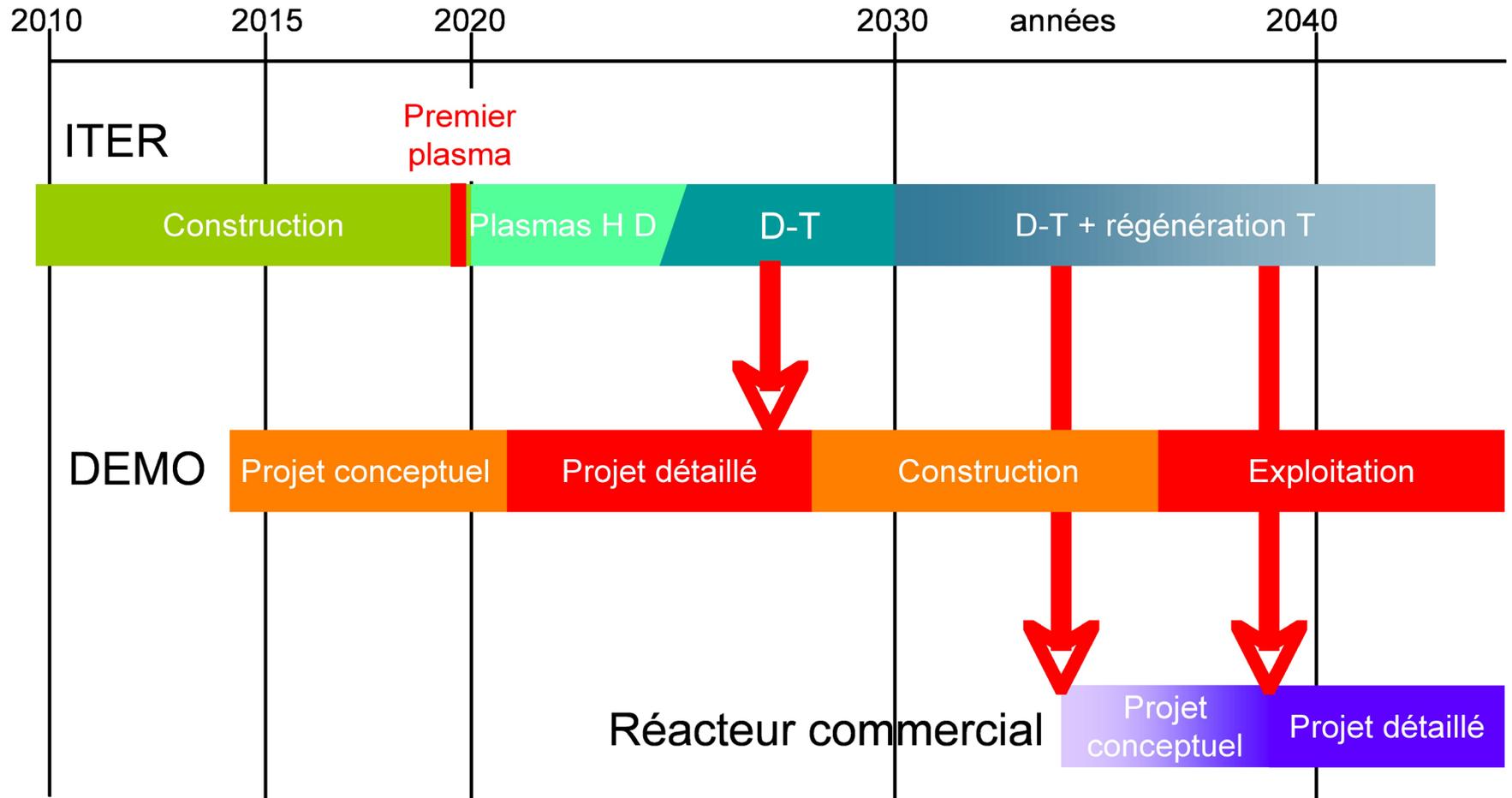


Les malheurs d'ITER

- 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 les destitutions successives 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
- 2024 Rééchelonnement du programme (Pietro Barabaschi)

...

L'avenir vu de 2010 : un long fleuve tranquille ?



A quand le premier plasma?

ITER

CFETR (Chinese Fusion
Engineering Testing Reactor)

En
2010
2020
2024

C'était pour
avant 2020
2030
2035

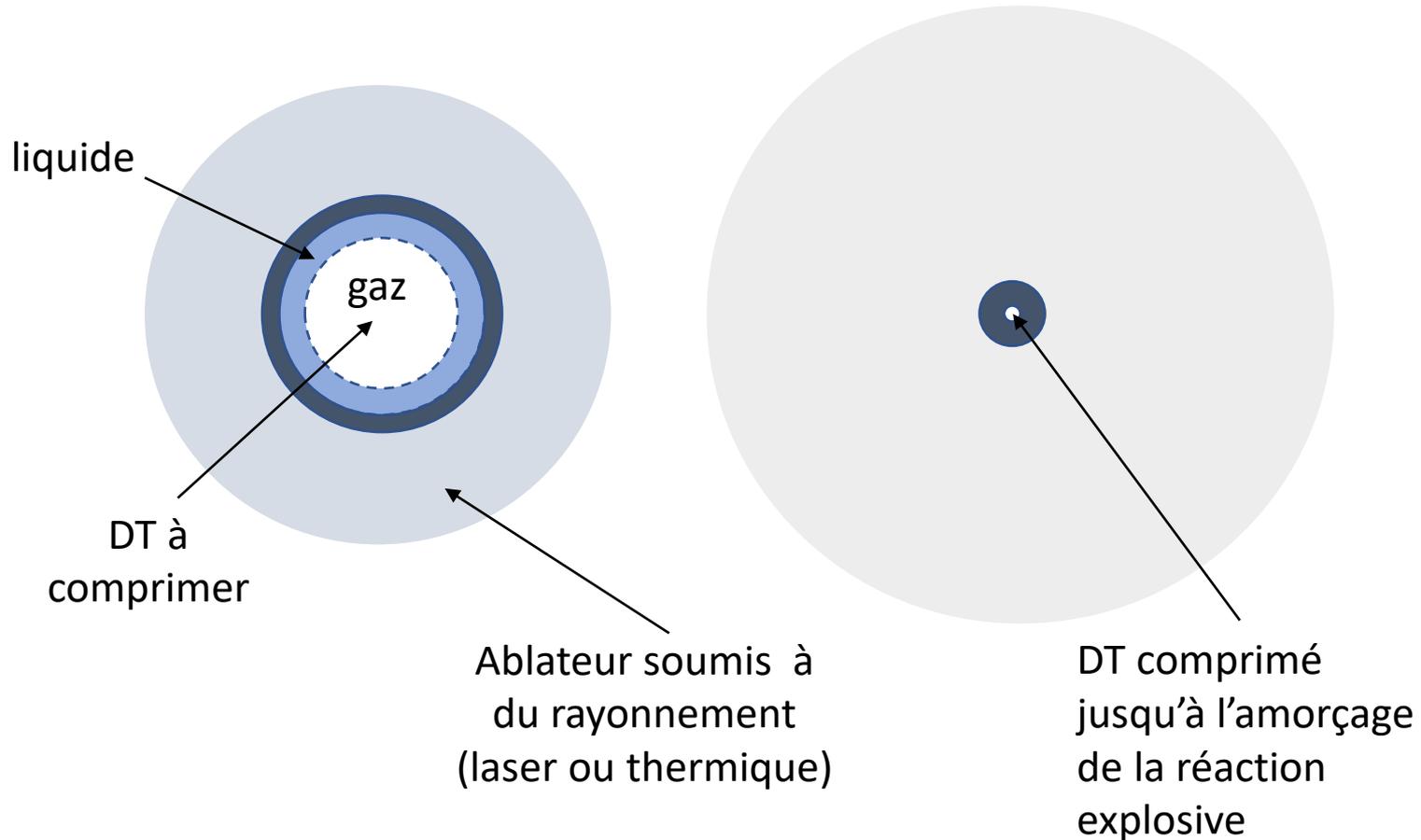
ITER en deux fois moins
puissant
2027



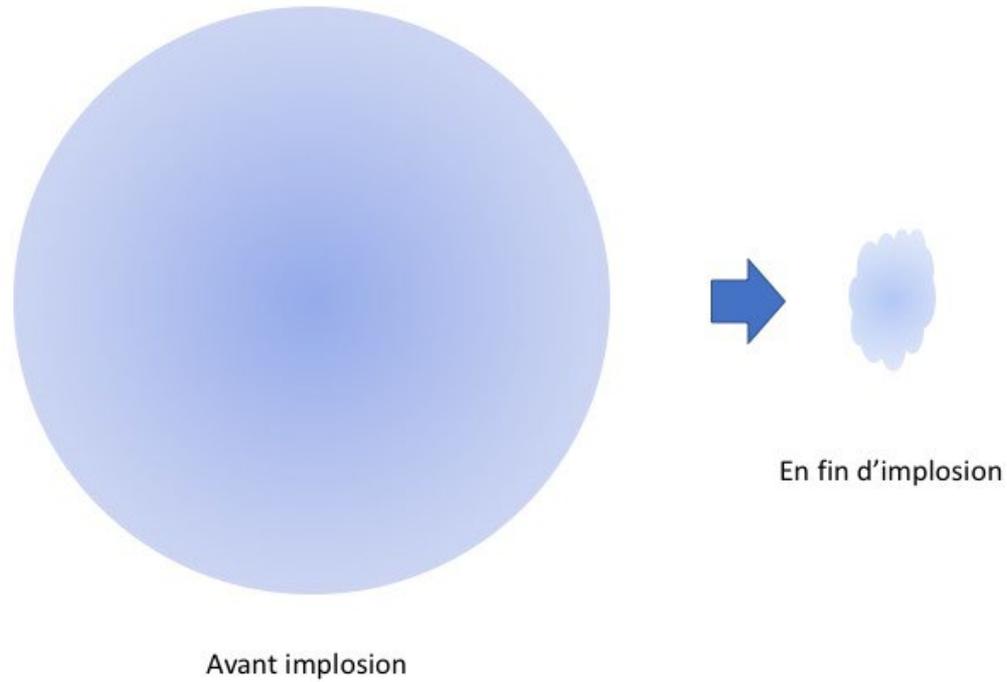
Confinement inertiel : lasers de la classe MEGAJOULE

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

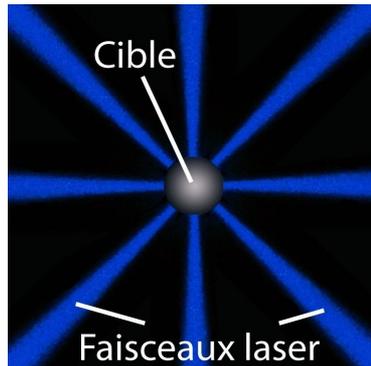
Le principe



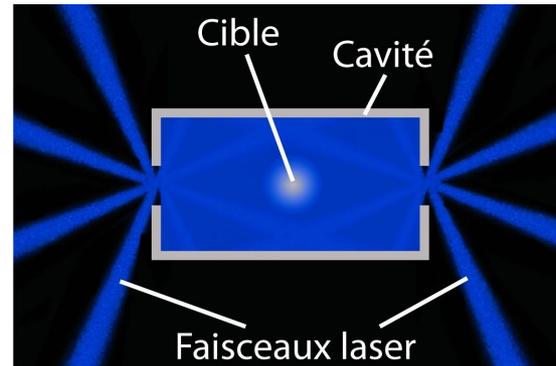
Le problème



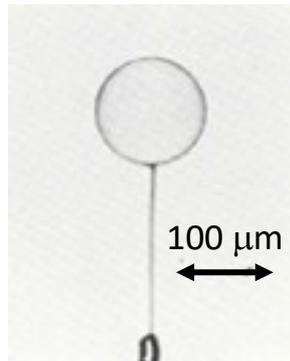
Modes direct et indirect



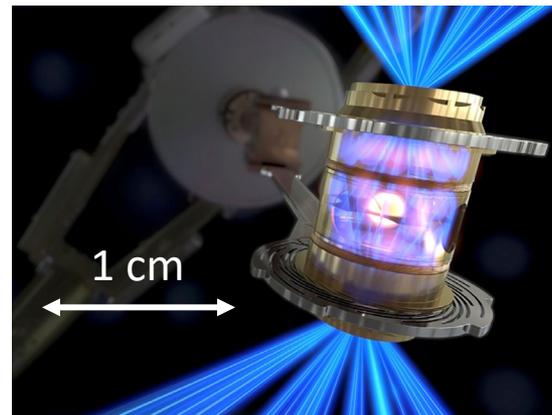
Direct



Indirect

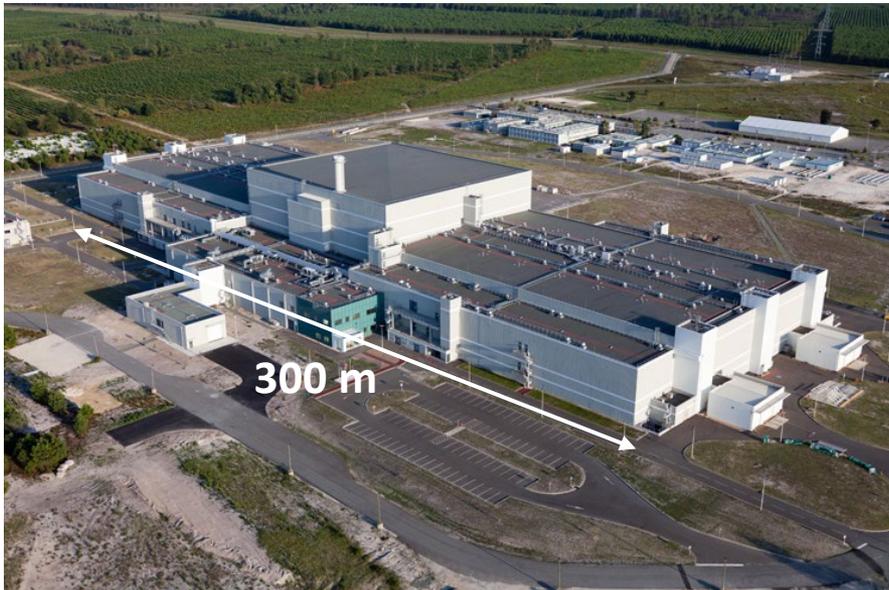


Microballon KMS
(1973)

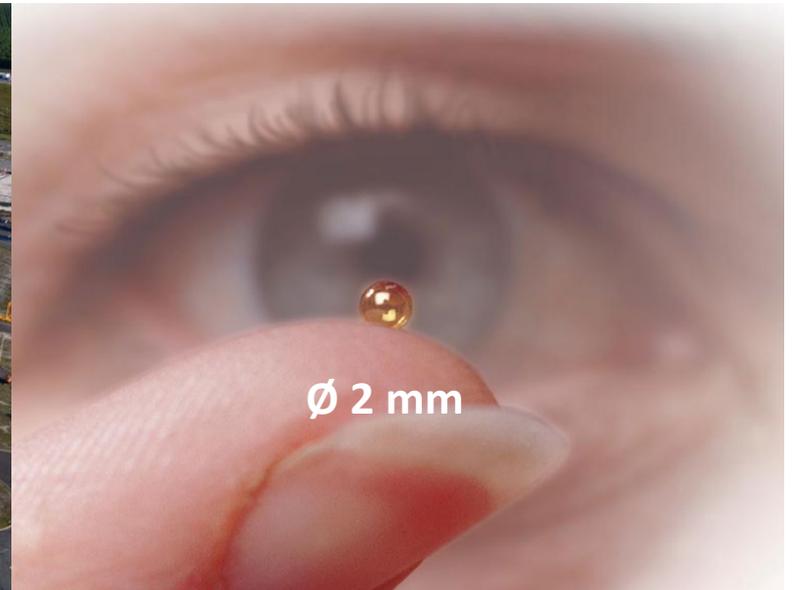


Cible cryogénique
(1990...)

Contraste



Laser mégajoule



Cible à comprimer

Actualité de NIF



13 décembre 2022 :

Annnonce, 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 et 2024. **Ignition prouvée.**

Actualité de NIF dans la presse (exemple)



Fusion nucléaire : comment les physiciens américains ont décroché le graal

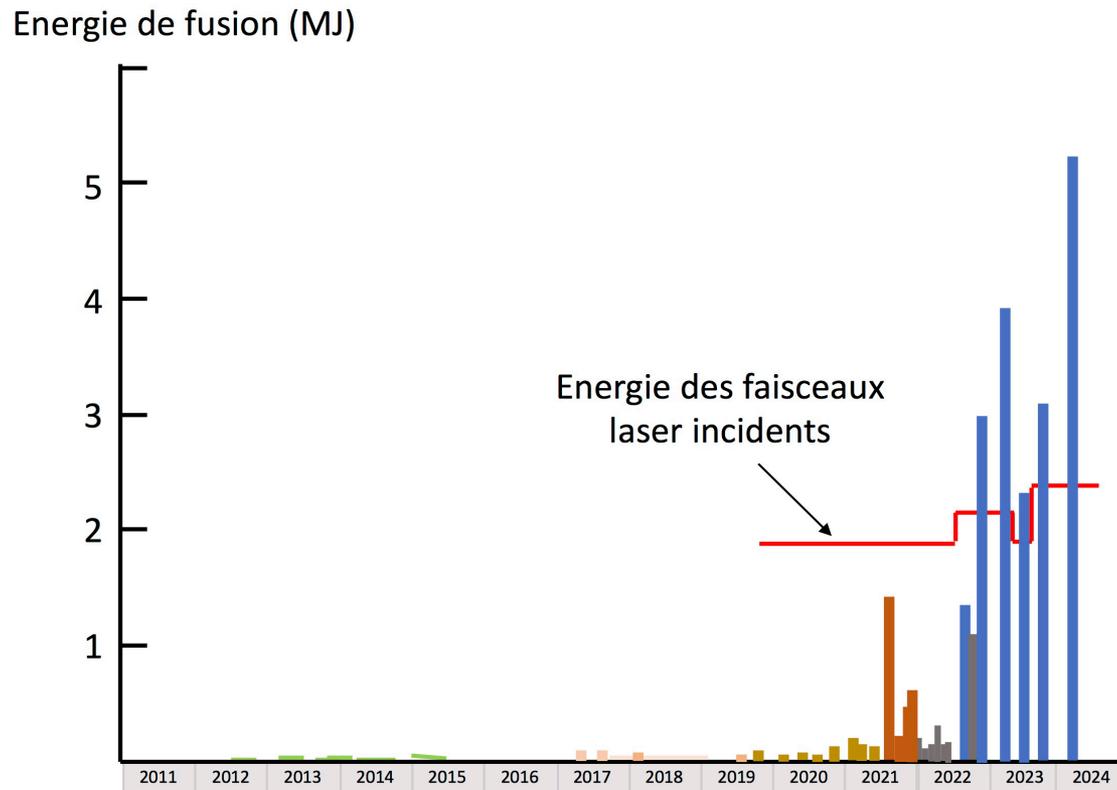
Par [Franck Daninos](#)

Publié le 16.12.2022 à 17h14

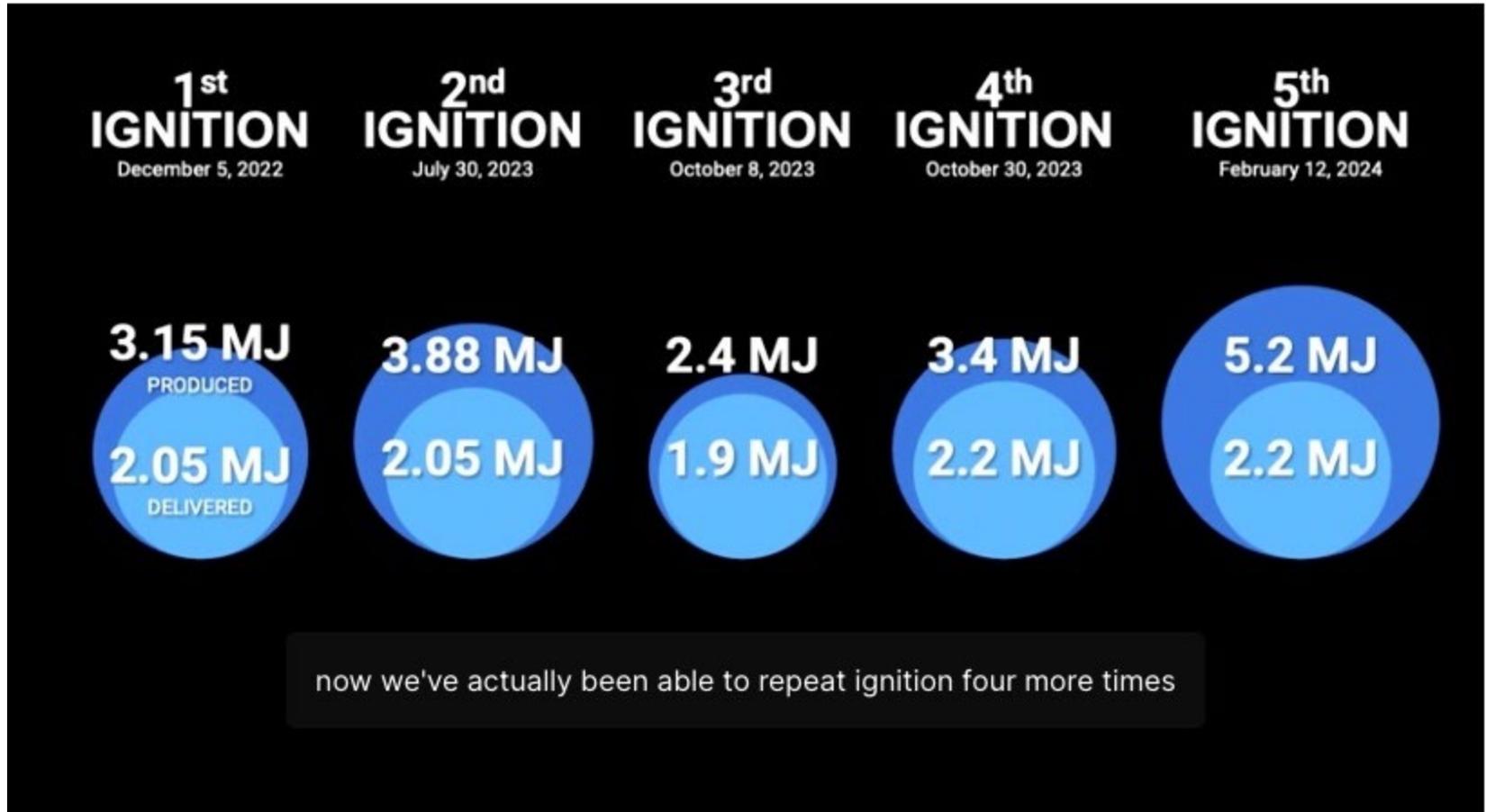
Après treize années d'efforts acharnés, les chercheurs américains du National Ignition Facility sont parvenus atteindre l'ignition, processus où la fusion de noyaux atomiques produit davantage d'énergie qu'il n'en consomme. Le tout grâce au laser le plus puissant au monde, construit pour les besoins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



Dernières nouvelles de NIF



Gains : mise en perspective

	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 2.4 Attendu 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



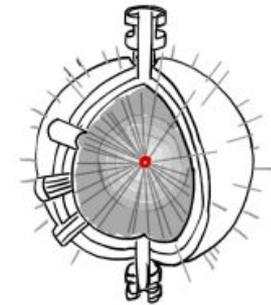
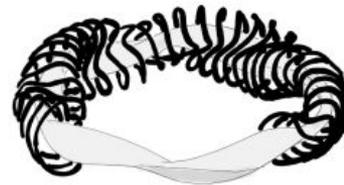
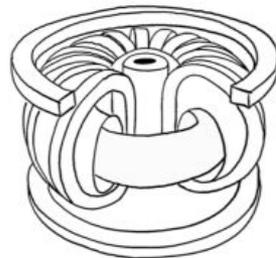
Quelques start-ups

Energy singularity



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			2.4
Start-ups	Kyoto fusion energy Commonwealth fusion Tokamak energy		Princeton stellarator Renaissance fusion Type one energy	Focused energy Marvel fusion HB11 GenF



Objectifs des start-ups

A. Holland (Fusion Industry Association — FIA)

- Mettre des réacteurs à fusion sur le marché de l'électronucléaire
- Calendrier :
 - Premier réacteur commercial 2030
 - Part de marché vers 2050
(fusion pure affranchie de la réglementation de sûreté nucléaire)
- Investissements : 6.2 giga\$ pour 43 entreprises

3 steps project

INCREMENTAL PROJECT

2027

2035

...

Fusion scheme

- In house fusion reaction model
- Calibration by experimentation on existing laser facilities
- Operating point definition
- Cost model for the output energy
- Design of the functional mock up

Proof of concept

- Ignition : energy production
- demonstration (Gain>1)
- Single shot Efficiency demonstration
- Subassembly mock ups of key technologies
- FOAK Design

First of a Kind (FOAK)

- Increased power (Gain >100)
- increase in repetition frequency (up to 10Hz)
- First Mwh deliveries

Réf GenF : GenF_2024004_P_O_Ed1 Eng

This document may not be reproduced, modified, adapted, published, translated, in any way, in whole or in part, or disclosed to a third party without the prior written consent of GenF © 2024 GenF. All rights reserved.



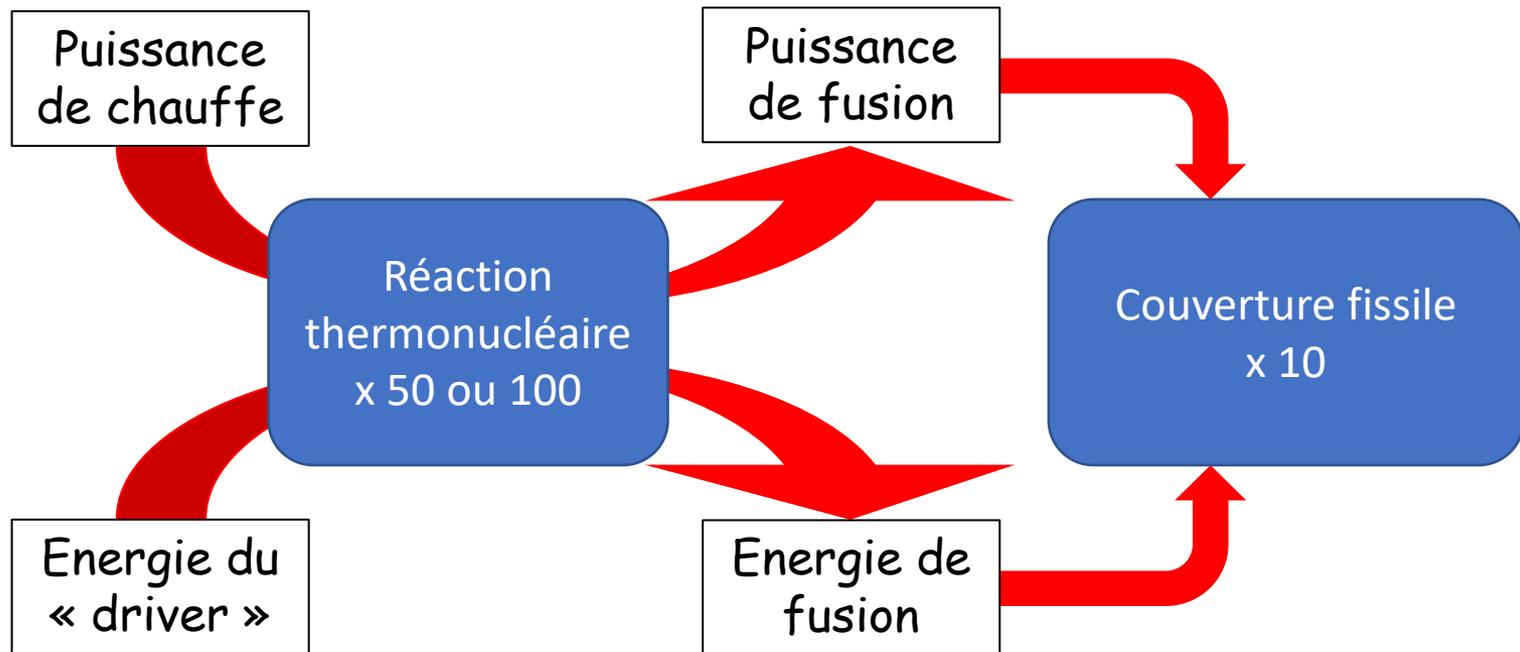


Un réacteur de fusion est d'abord une énorme source de neutrons de 14 MeV. Comment les utiliser?

- 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





Hybrides : avantages et problèmes

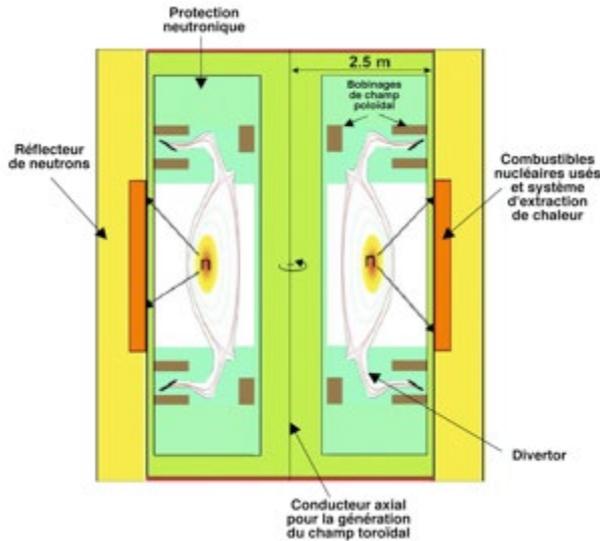
Perspectives :

- 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

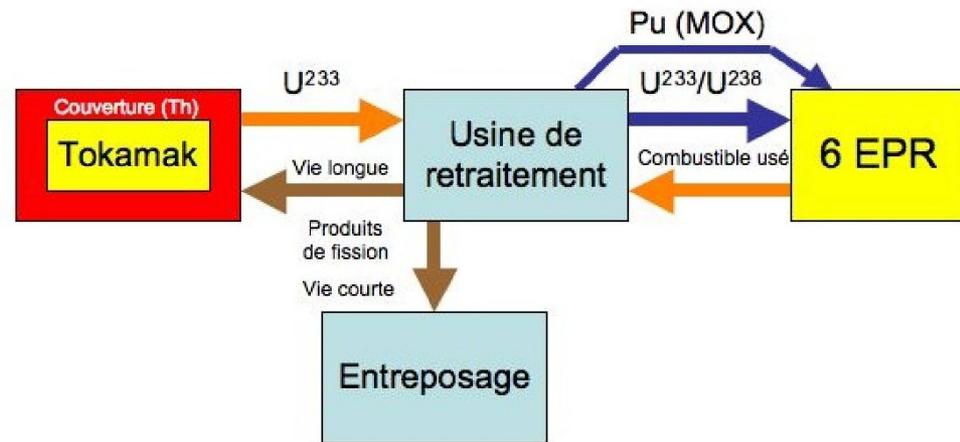
Mais :

- 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.

Projet chinois (2022)





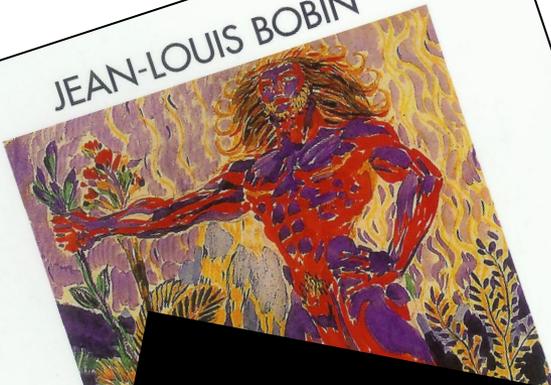
La quête du Graal continue

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

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

SFEN-Lyon-09-10-24

JEAN-LOUIS BOBIN



Jean Louis Bobin

Controlled Thermonuclear Fusion



 World Scientific

Insaisissable Graal

La fusion nucléaire par laser au temps des pionniers (1962-1975)

Jean-Louis Bobin

 edp sciences

Six (6) Companies Have Publicly Stated That They Will Be Able to Provide Power to the Grid by the Early 2030s or Sooner

[Links to Corporate Statements on Target Dates](#)

Company	Founded	Funding to Date	Fusion Technology
 Commonwealth Fusion Systems	2018	\$1.8B	Tokamak Reactor Magnetic Confinement
 tae TECHNOLOGIES	1998	\$1.3B	Field Reversed Configuration Hydrogen Boron Reactor
 HELION	2013	\$607.6M	Magneto Inertial Reactor Pulsed Heating
 general fusion	2002	\$440.5M	Magnetized Target Liquid Metal Compression
 ZAP ENERGY	2017	\$327M	Z-Pinch Reactor Shear Flow Stabilized
 Tokamak Energy	2009	\$142M	Spherical Tokamak Reactor Magnetic Confinement

Note that all six (6) Technologies are different

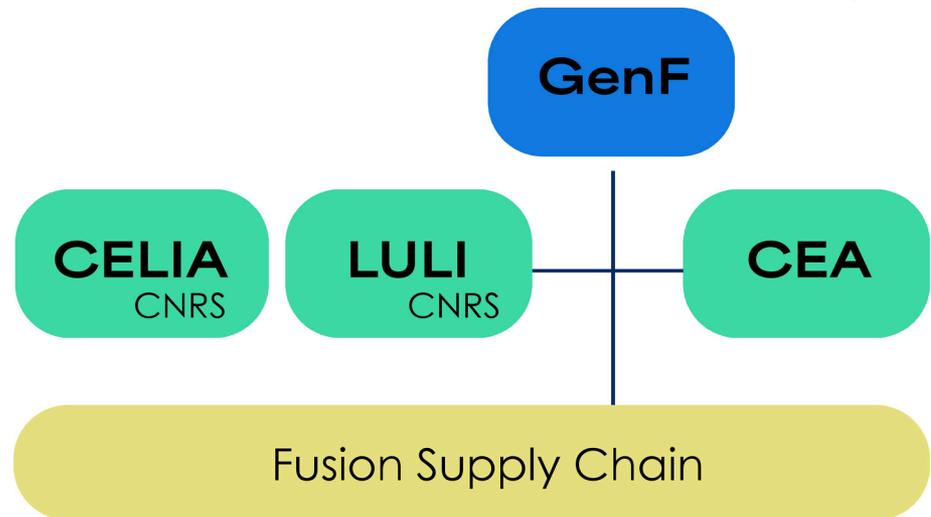
Funding amounts published by CrunchTech September 4th, 2024, except Tokamak Energy from Crunch Base

Team France of the Inertial Fusion Energy

GENF-CNRS-CEA COOPERATION



The team organisation gathers and optimizes intellectual properties, investments and talents for fusion energy industry



Réf GenF : GenF_2024004_P_O_Ed1 Eng

This document may not be reproduced, modified, adapted, published, translated, in any way, in whole or in part, or disclosed to a third party without the prior written consent of GenF © 2024 GenF. All rights reserved.

