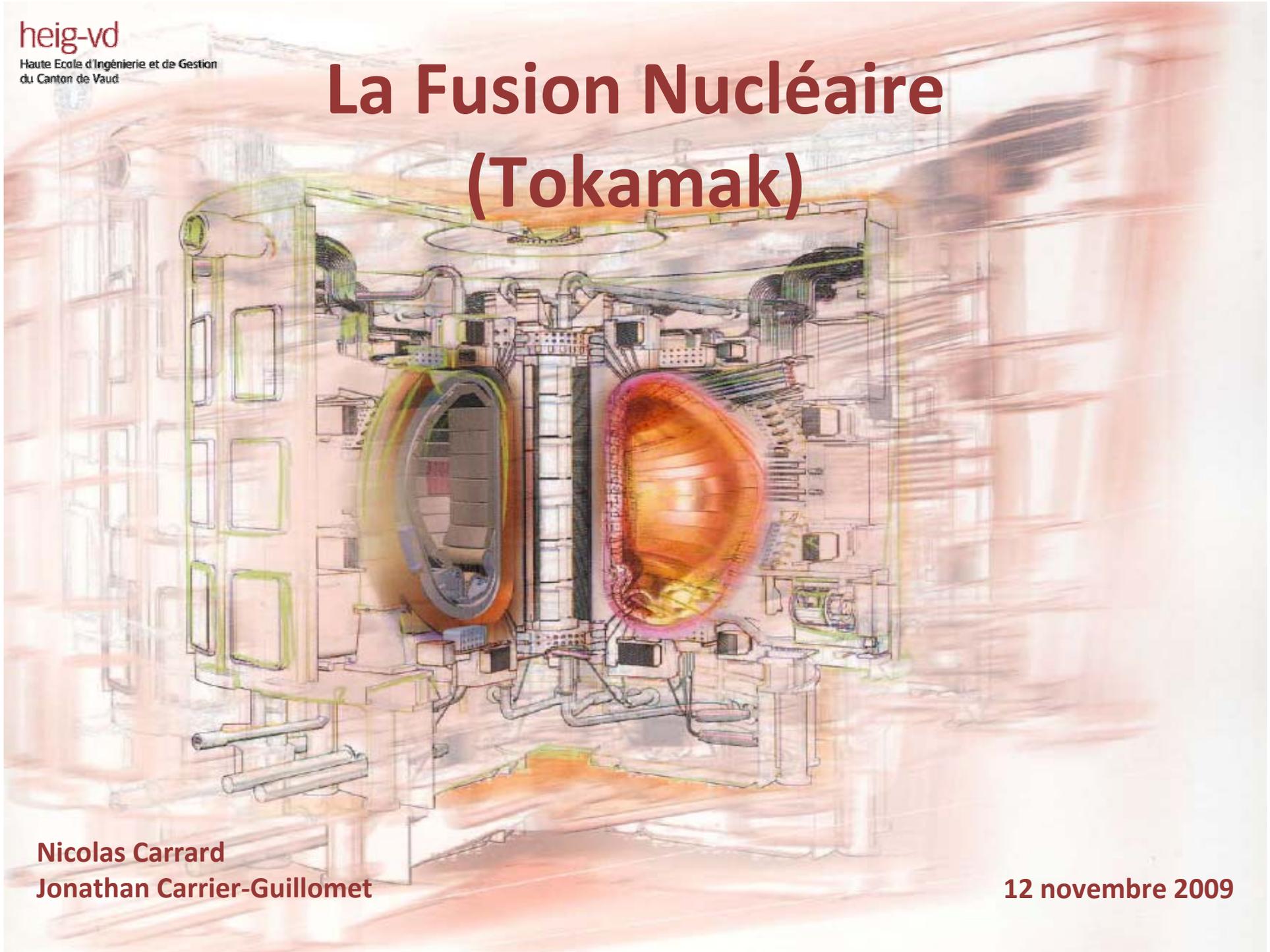


# La Fusion Nucléaire (Tokamak)



Nicolas Carrard  
Jonathan Carrier-Guillomet

12 novembre 2009

# Plan de l'exposé

## La matière

- L'atome
- Les isotopes
- Le plasma

## Réactions nucléaires

- La fission
- La fusion

## Le Tokamak

- Composition
- Principe de fonctionnement
- Production d'électricité

## La fusion nucléaire

- Avantages
- Chiffres comparatifs

## Centre de fusion dans le monde

- JET
- TCV
- ITER

## Bibliographie

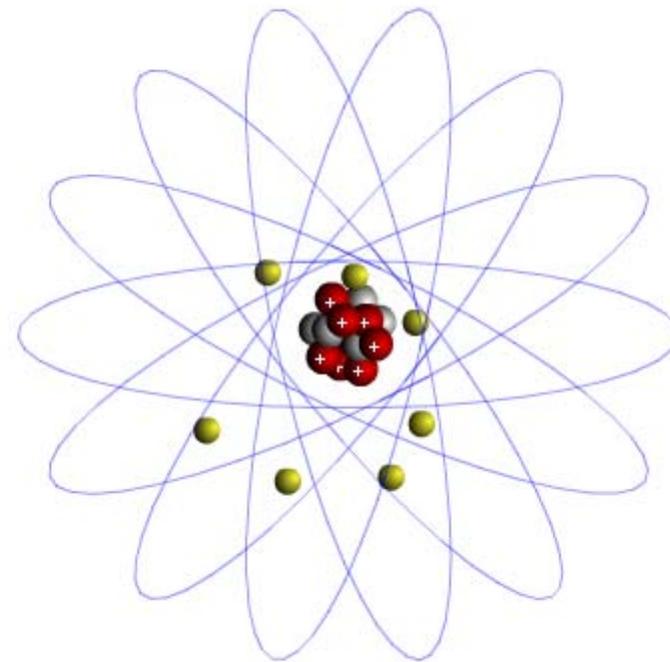
# La matière

## L'atome

L'atome est constitué d'un noyau central chargé positivement autour duquel tournent des électrons chargés négativement.

Le nombre de charges positives portées par le noyau est égal au nombre de charges négatives portées par tous les électrons.

L'atome est dit alors électriquement neutre.



# La matière

## Les isotopes

Ce sont des atomes qui se différencient uniquement par leur nombre de neutrons

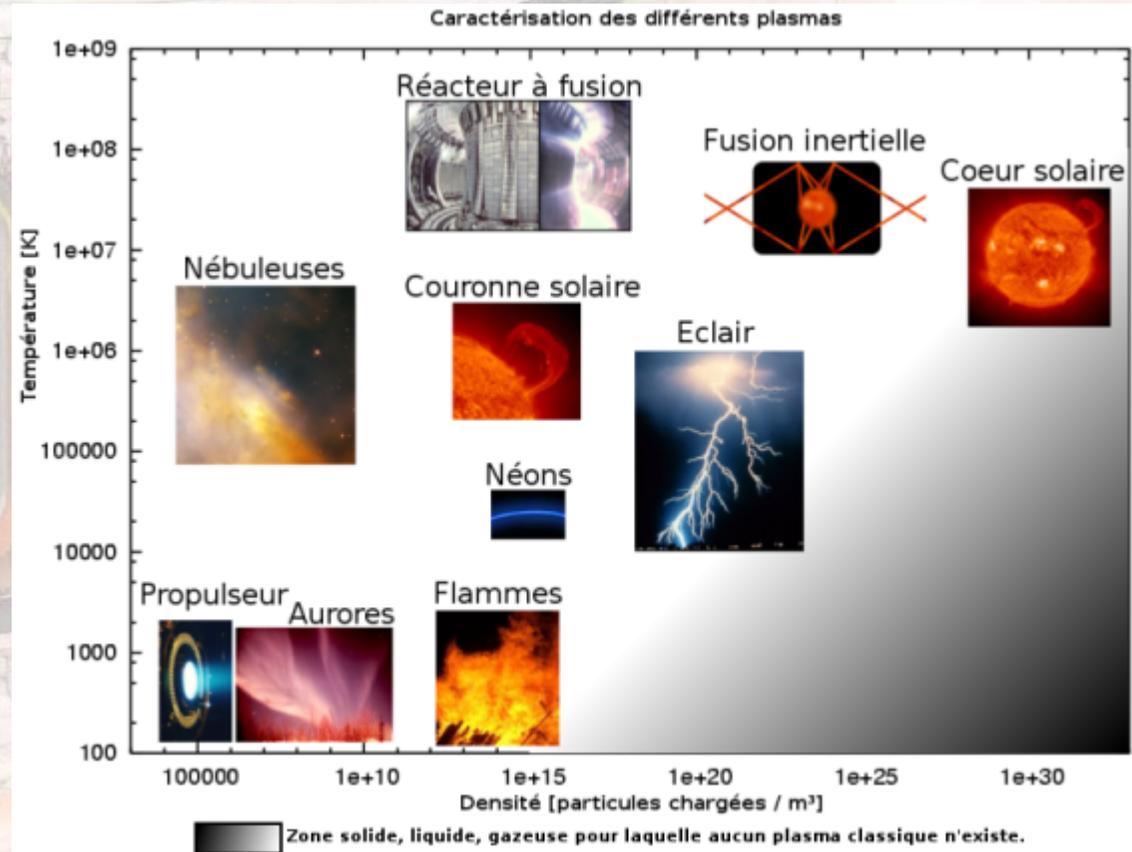
Les isotopes de l'hydrogène:

- Le **deutérium** (symbole  ${}^2\text{H}$  ou **D**)
- Le **tritium** (symbole  ${}^3\text{H}$  ou **T**)

# La matière

## Le plasma

4<sup>ème</sup> état de la matière.  
 Cette réaction n'est possible qu'à des températures très élevées (plusieurs dizaines de millions de degrés) où la matière est à l'état de plasma.  
 Durant l'état de plasma, les électrons se détachent complètement de leur noyau, on dit que l'atome se ionise.



# Réaction nucléaire

## La fission

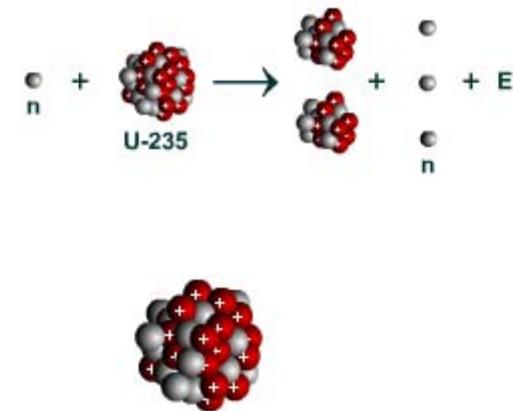
Le principe de fission d'un noyau consiste à casser un gros noyau afin que ce dernier se scinde en 2 parties. Lors de la fission, il se dégage des neutrons qui viennent à leurs tours percuter d'autres noyaux.

Il en résulte une réaction en chaîne qui peut être contrôlée en limitant la quantité de neutrons et en utilisant des matériaux adéquats.

Chaque fission du noyau s'accompagne d'une libération d'énergie.

On choisira bien évidemment des noyaux de grosse taille tels que l'uranium ou le plutonium.

Actuellement, les centrales nucléaires fonctionnent sur ce principe.



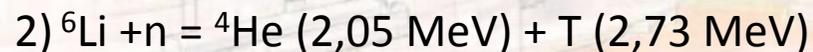
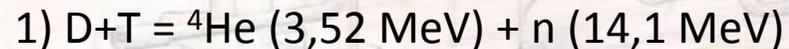
# Réaction nucléaire

## La fusion

La fusion nucléaire est un processus où deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd.

La fusion de noyaux légers dégage d'énormes quantités d'énergie.

L'intérêt de la fusion nucléaire est de pouvoir produire beaucoup plus d'énergie ( 3 à 4 fois plus que la fission nucléaire) pour une quantité égale de matière.

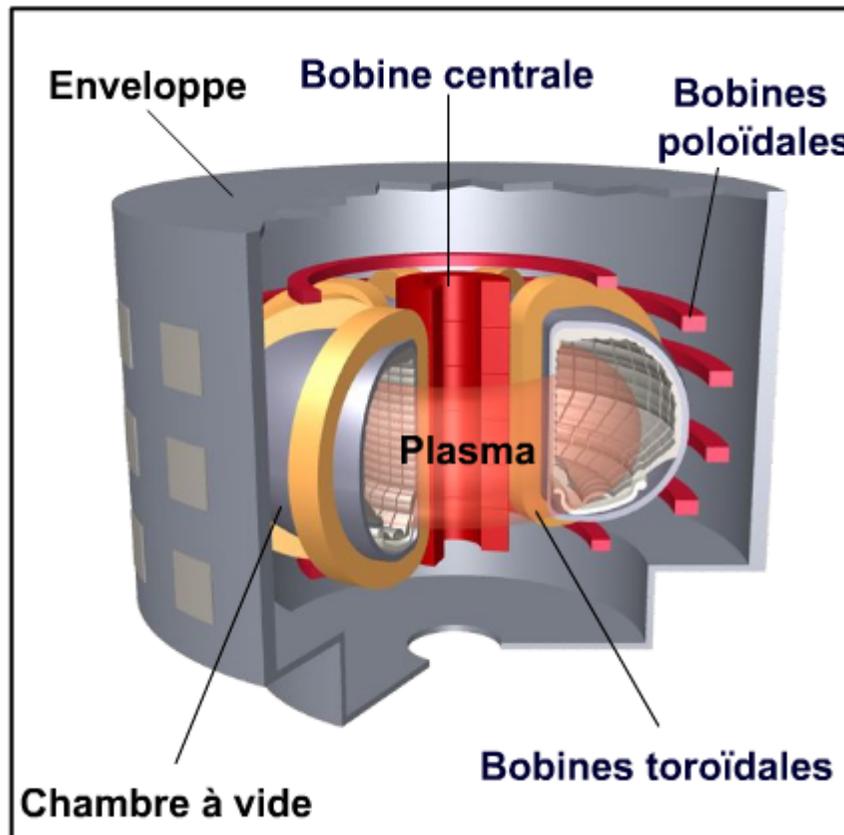


Dans un réacteur 1) + 2) conduit à l'équation =>  $D+{}^6\text{Li} = 2 {}^4\text{He} + \text{Énergie}$

# Le Tokamak

## Composition

Tokamak : terme émanant du russe « **toroidalnaja kamera magnetnaja katuska** »  
(en français : chambre toroïdale à confinement magnétique)



### Les principaux composants d'un Tokamak\*

Cliquer sur les légendes pour  
découvrir les différents  
composants et connaître leurs  
rôles.

*\*Tokamak = Acronyme russe :  
Machine avec une chambre  
magnétique en forme de tore.*

# Le Tokamak

## Principe de fonctionnement

### Rôle des trois bobines

#### a) Schéma global

L'enjeu consiste à contrôler le plasma au cœur du tokamak dans un volume limité afin qu'il ne touche pas les parois.

Comme le plasma est constitué de particules chargées, on peut confiner leurs trajectoires de déplacement à l'intérieur d'un tore au moyen de champs magnétiques.

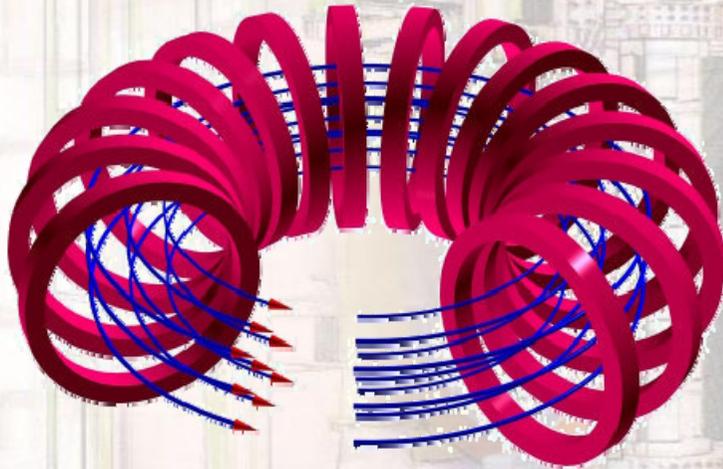


# Le Tokamak

## Principe de fonctionnement

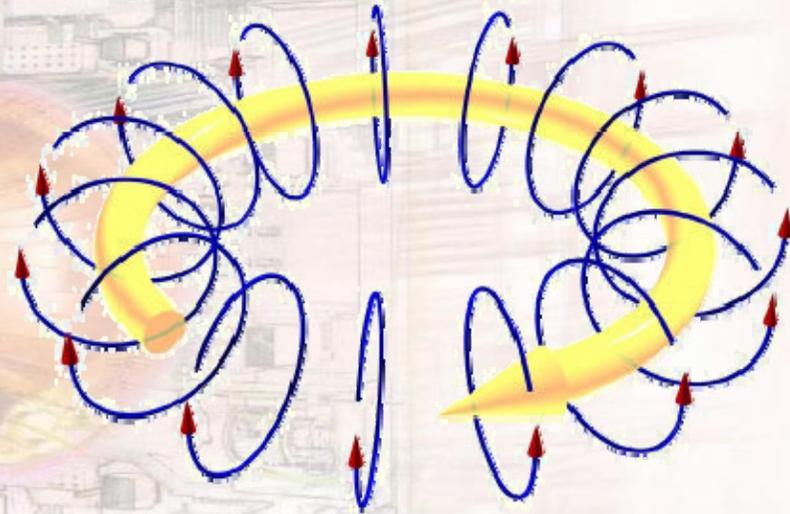
### Rôle des trois bobines

#### b) Champ toroïdal



Une série de bobines toroïdales d'axe horizontal, de distribution torique, créent un champ horizontal appelé champ toroïdal.

#### c) Courant plasma $I_p$ et champ poloïdal



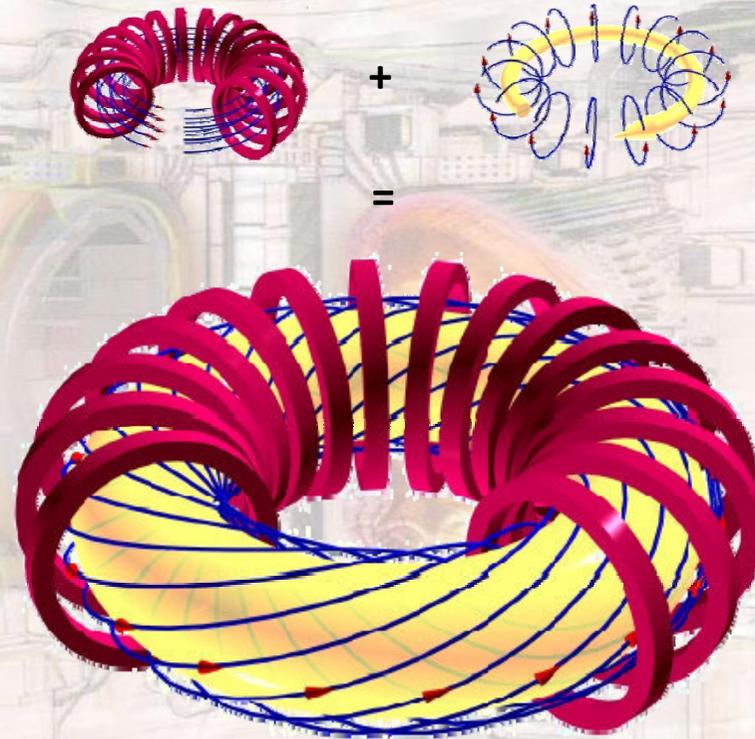
La variation de flux dans les bobines centrales d'axe vertical (bobines ohmiques) crée un anneau circulaire de plasma et induit un courant  $I_p$  ( $10^6$  A) à l'intérieur de cet anneau, ce qui engendre un champ poloïdal.

# Le Tokamak

## Principe de fonctionnement

Rôle des trois bobines

d) Résultante

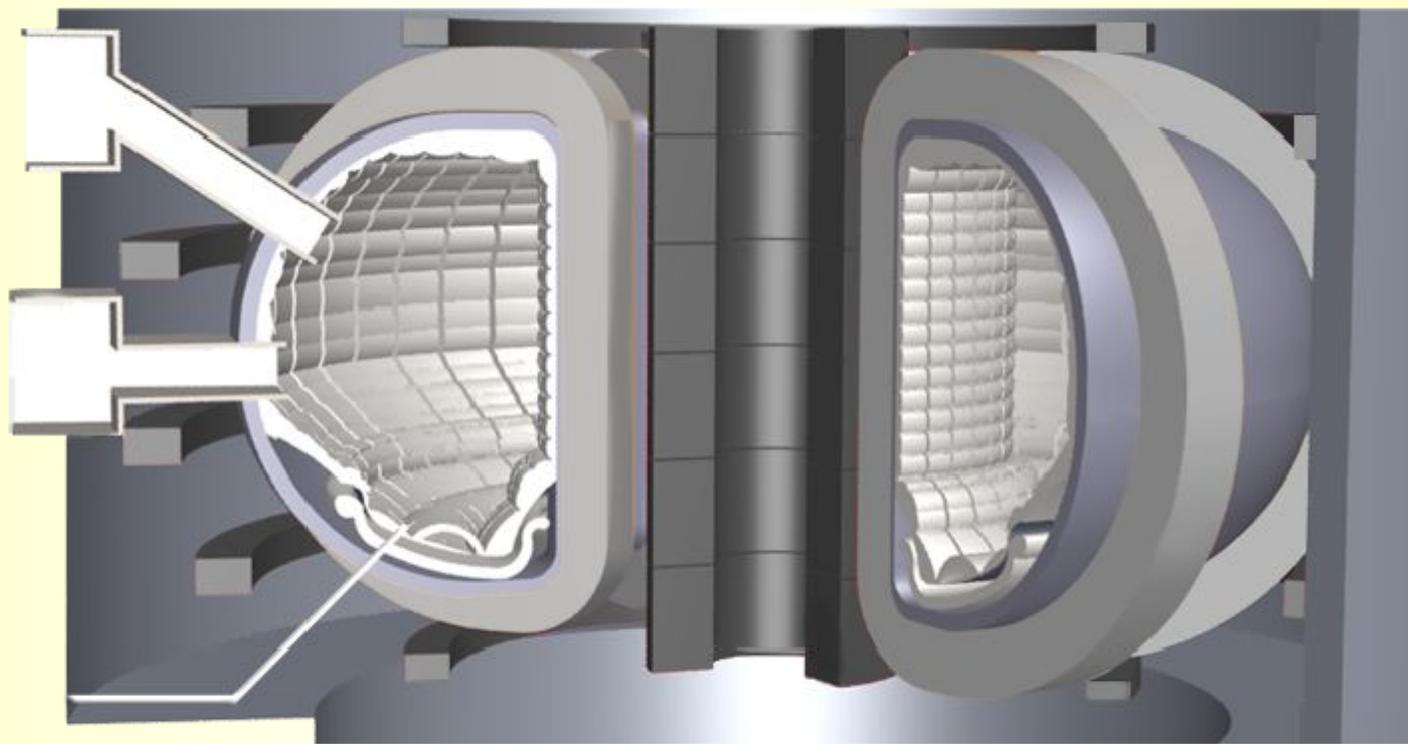


La réunion de ces trois champs magnétiques mène à des lignes de champ hélicoïdales.

# Le Tokamak

## Principe de fonctionnement

**Machine en veille**



**Cliquer sur la flèche pour commencer ->**

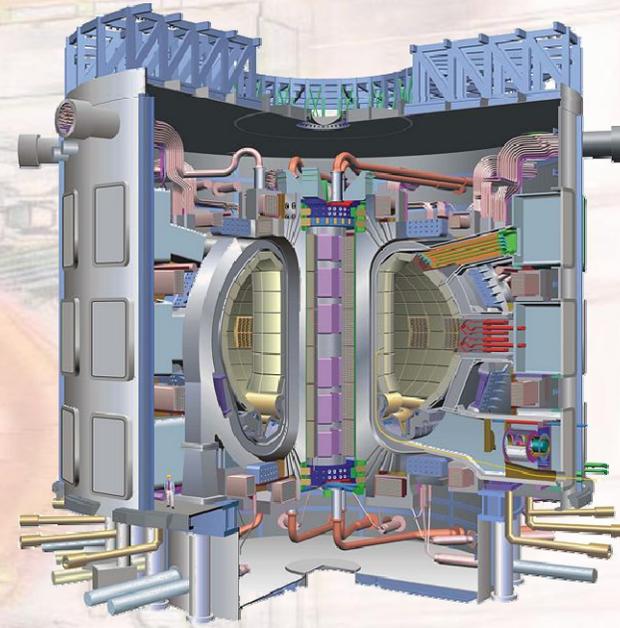


# Le Tokamak

## Principe de fonctionnement



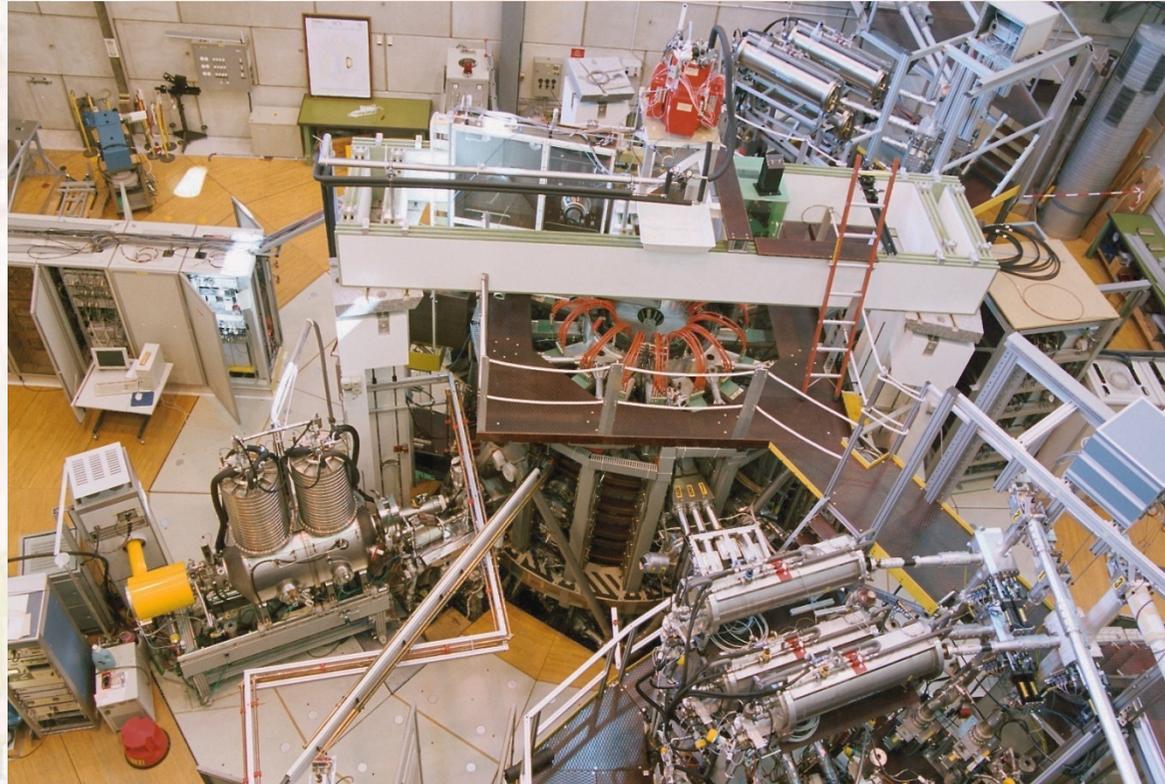
*Intérieur de la chambre à vide d'un Tokamak*



*Tokamak projet ITER*

# Le Tokamak

## Principe de fonctionnement



*Tokamak expérimental de l'EPFL*

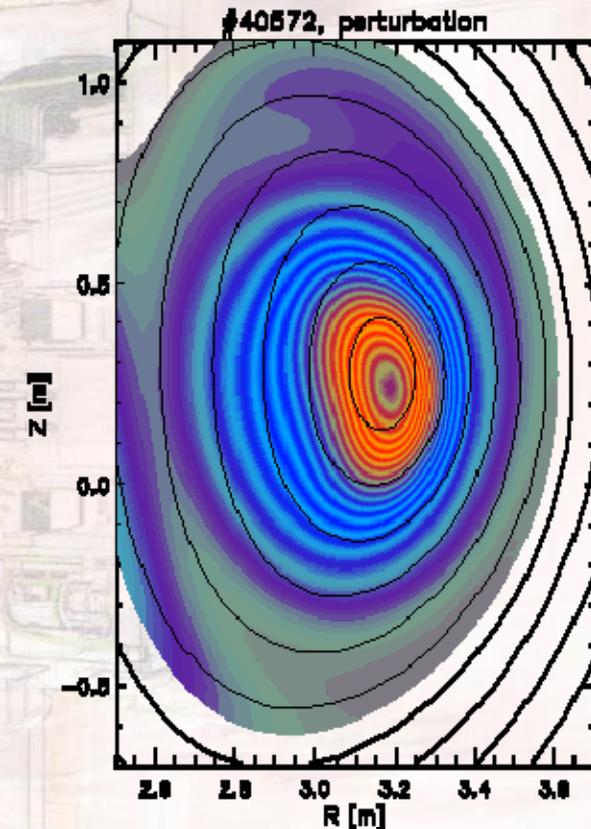
# Le Tokamak

## Principe de fonctionnement

### La disruption

Le piège magnétique qui confine les particules n'est pas si simple à mettre en œuvre : le plasma n'apprécie pas et cherche à contrer le champ magnétique qui lui est imposé

Un tel équilibre, peut devenir instable, c'est à dire qu'une petite perturbation est susceptible de croître au cours du temps, et de conduire dans certains cas à la perte complète du confinement : c'est ce qu'on appelle une **disruption**.



# Le Tokamak

## Production d'électricité

- **Le Break-even:**  $Q = P_{\text{puissance apportée par les réactions de fusion}} / P_{\text{puissance apportée de l'extérieur}}$   
Lorsque  $Q=1$  on dit que l'on atteint le break-even.
- **Ignition:** L'ignition constitue un second palier à atteindre. Cela est réalisé lorsqu'il n'est plus nécessaire d'apporter de l'énergie au système. Il est alors dans un régime de fonctionnement auto-entretenu. Cela revient à dire que

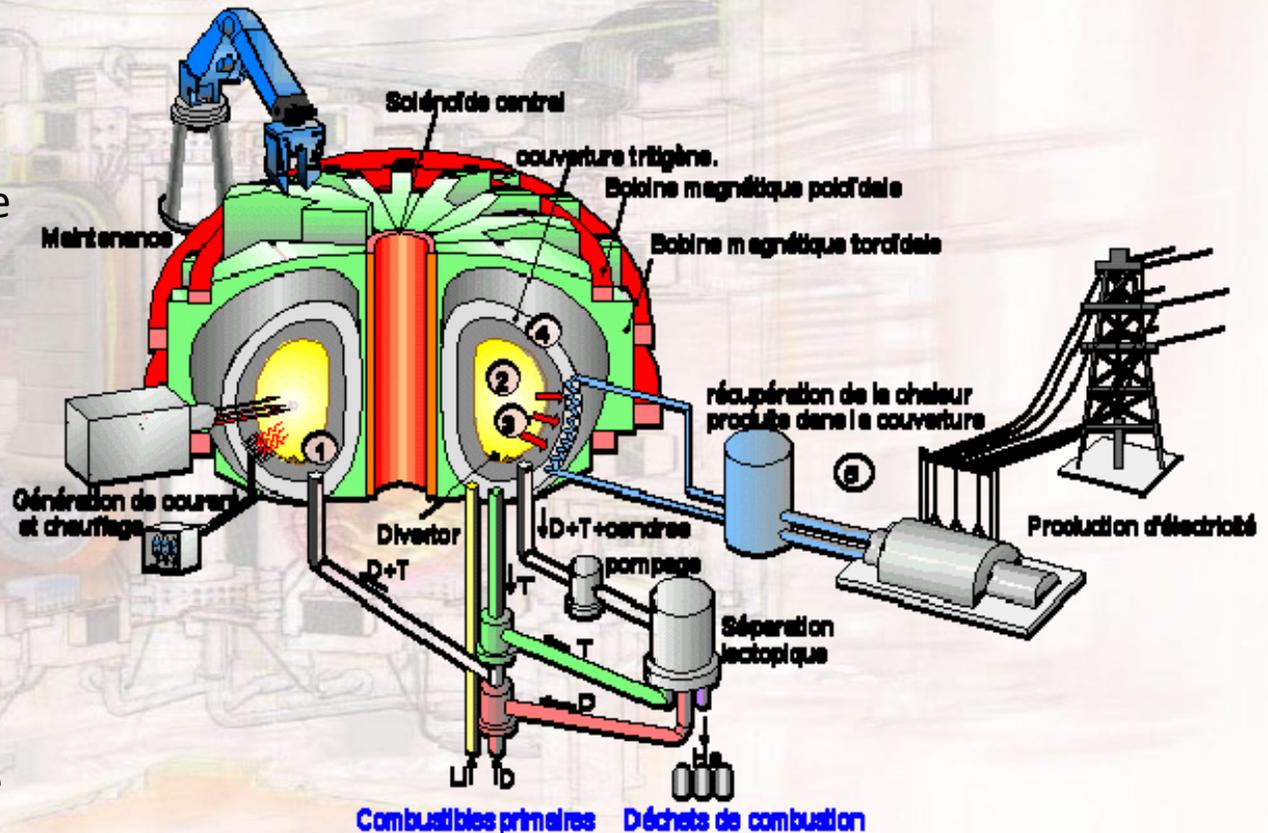
$$P_{\text{puissance apportée de l'extérieur}} = 0 \text{ d'où } Q \rightarrow \infty$$

Le record actuel est détenu par JET et date de 1997 avec  $Q=0,64$  (16 MW récupérés sur 25 MW injectés).

# Le Tokamak

## Production d'électricité

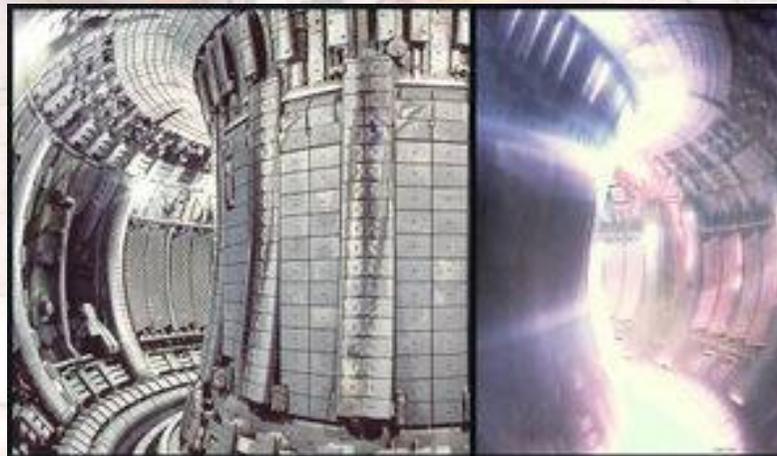
1. Récupération des « cendres » de la réaction : particules déconfinées. Leur extraction se réalise via le divertor et un système de pompage.
2. Plasma.
3. Flux de chaleur qui atteint la paroi.
4. Couverture tritigène génératrice de Tritium.
5. Système de production d'électricité via une turbine entraînée par de l'eau gazeuse.



# La fusion nucléaire

## Avantages

- **Une grande quantité de combustible** disponible: On trouve le deutérium et le lithium en abondance sur notre terre . ( Deutérium 33 mg/l d'eau).
- Si l'on parvenait à **réintroduire le tritium** produit par la réaction de fusion du réacteur, le réacteur celui-ci autoproduirait ainsi une partie de son combustible.
- **Une production d'éléments radioactifs à vie courte** : le tritium est un combustible faiblement radioactif . Sa production reste confinée dans l'enceinte du réacteur. (~12 ans). Les parois internes du tokamak bombardées par les neutrons deviennent radioactifs.
- **Un faible risque d'accident nucléaire majeur** : étant donné les conditions strictes nécessaires à la fusion, toute anomalie dans l'état de la réaction provoquerait l'arrêt immédiat des réactions en cours. Il n'y aurait donc pas de risques d'emballement de la réaction.



# La fusion nucléaire

## Chiffres comparatifs

Sources d'énergie	Quantités de combustibles nécessaires pour produire 1000 MW
Photovoltaïque	100 km <sup>2</sup>
Éolien	5600 éoliennes de 600 kW
Charbon	3 600 000 tonnes de charbon
Pétrole	1 800 000 tonnes de pétrole
Fission	25 tonnes d'Uranium enrichi à 4%
Fusion	<b>100 kg de Deutérium et 150 kg de Tritium</b>

# La fusion nucléaire

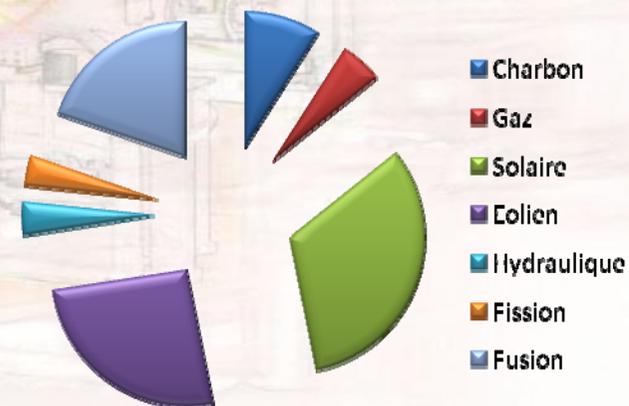
## Chiffres comparatifs

Sources d'énergie	Émission de CO <sup>2</sup> (en gramme de CO <sup>2</sup> par kWh)	Coût (en CHF par kWh)
Charbon	1000	0.23
Gaz	410	0.13
Solaire	75	0.82
Éolien	22	0.65
Hydraulique	30	0.10
Fission	12	0.09
Fusion	12	0.50

**Emission de CO<sub>2</sub> (en gramme de CO<sub>2</sub> par kWh)**



**Coût (en frs par kWh)**



# Centre de fusion dans le monde

## JET

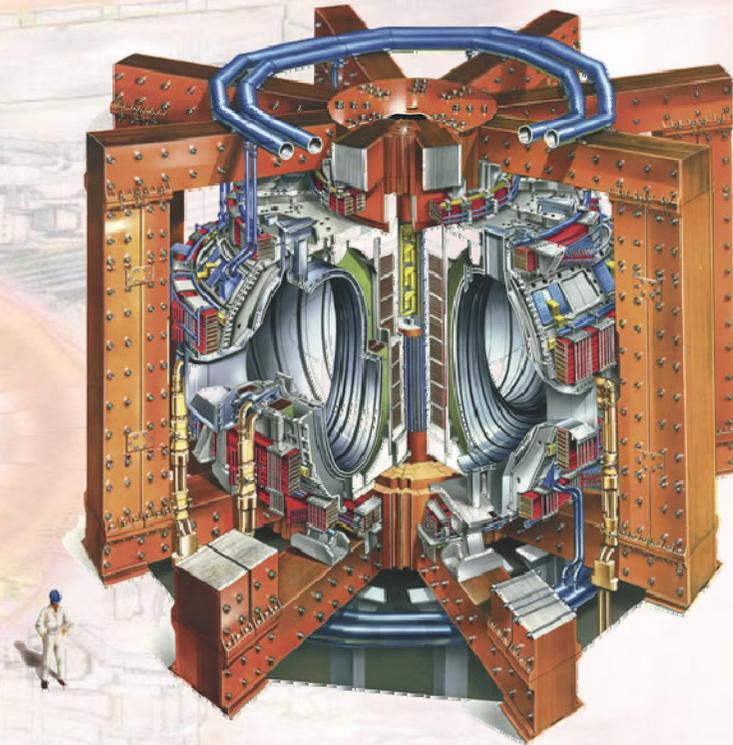
Le **JET** (*Joint European Torus*, littéralement *Tore commun européen*) est le plus grand tokamak. Situé près d'Oxford au Royaume-Uni.

Construit en 1979, il a généré son premier plasma en 1983.

En 1997, le **JET** réalise 3 records:

- 22 MJ produits par l'énergie de fusion en une impulsion.
- une pointe de puissance de 15 MW produite par fusion nucléaire
- il réalisa aussi le "meilleur" rapport entre puissance produite et puissance induite par la fusion nucléaire, qui est de  $Q = 0.65$

Depuis 2004, **JET** subit des travaux de mise-à-jour dans le but d'augmenter encore ses capacités et ainsi de pouvoir participer au développement du projet ITER.



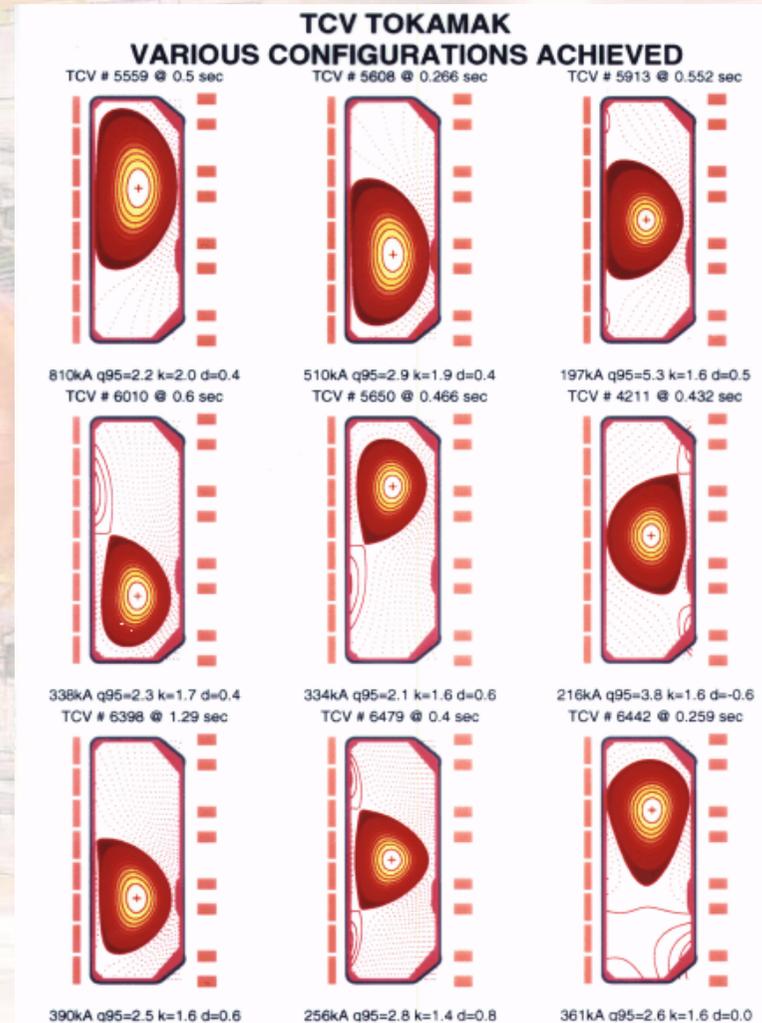
# Centre de fusion dans le monde

## TCV

TCV qui signifie (*Tokamak à configuration variable*) est situé à l'EPFL, mis en service en 1992.

Sa particularité est d'avoir une chambre des plasmas 3x plus haute que large.

Son but est d'étudier les différentes formes de plasma (liées avec les performances du réacteur).



# Centre de fusion dans le monde

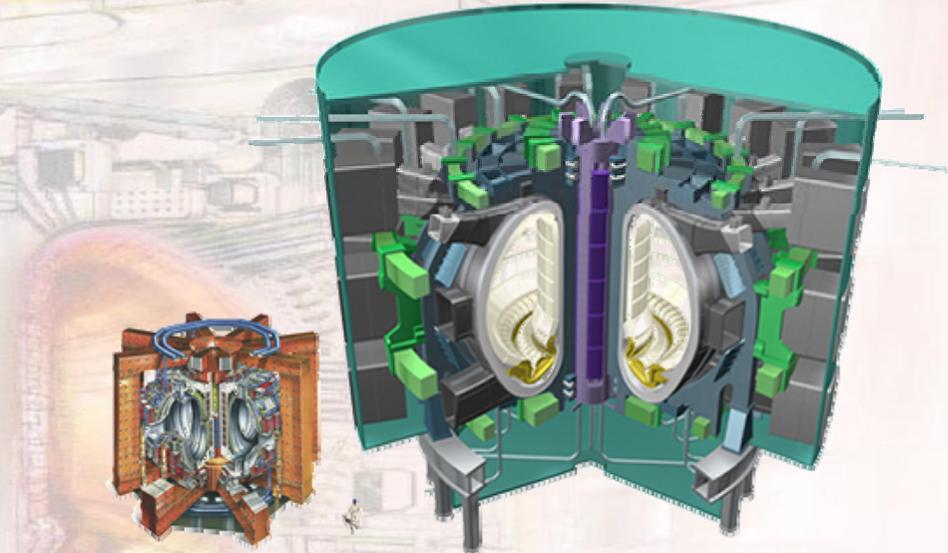
## ITER

ITER (*réacteur expérimental thermonucléaire international*) est un prototype de réacteur nucléaire à fusion actuellement en construction à Cadarache en France. Ce projet réunit de nombreux pays (UE, Russie, Chine, USA, Corée Sud, Japon, Inde) .

Ce prototype est destiné à vérifier la « faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire comme nouvelle source d'énergie.

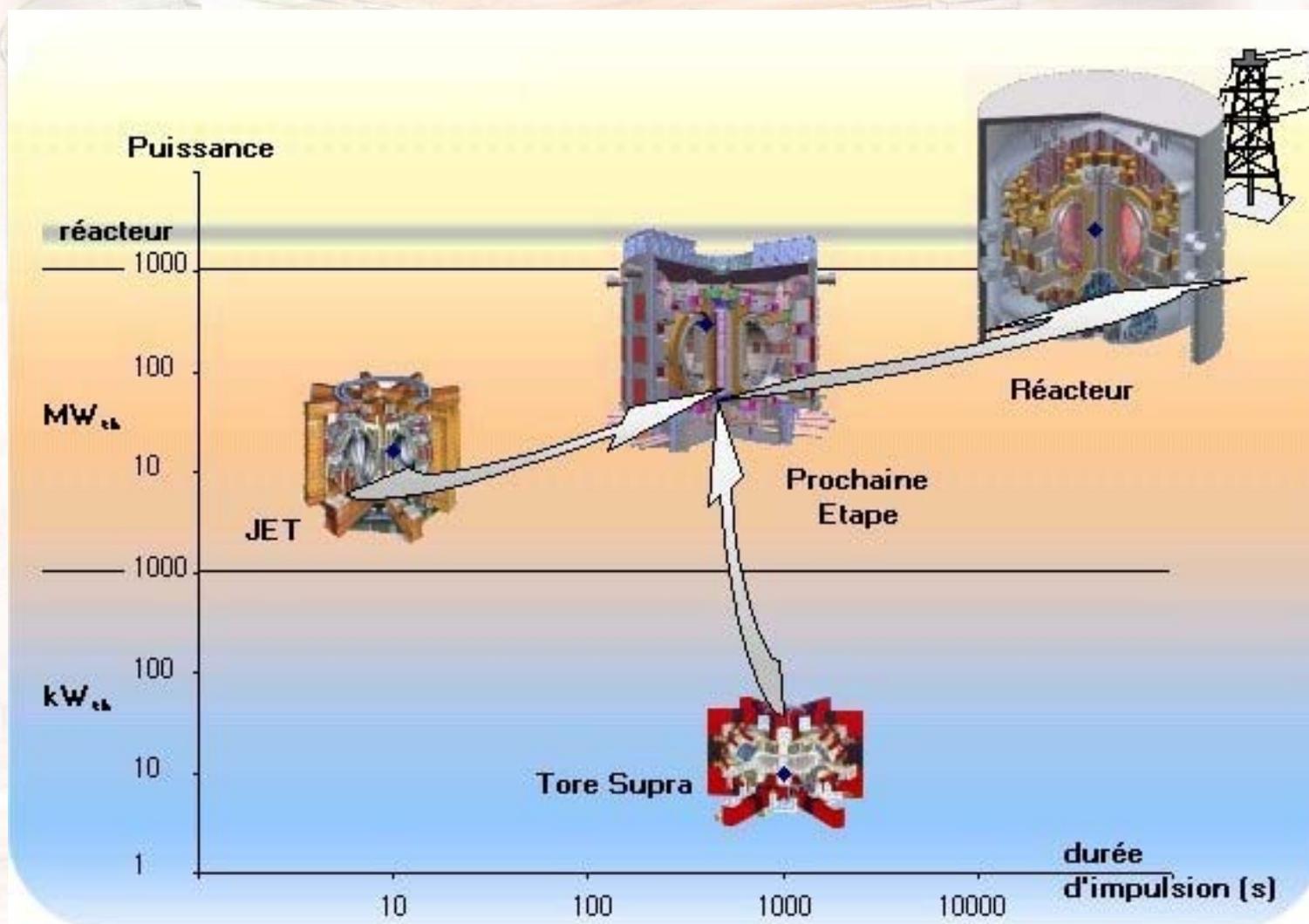
Prévu pour 2018 son budget initial est estimé à 10 milliard d'euros.

**Futur** : si les résultats sont concluants un autre réacteur expérimental de puissance identique pourra être créé. **DEMO** (*central électrique de démonstration*) pas avant 2050



# Centre de fusion dans le monde

## ITER



# Centre de fusion dans le monde

## Chiffres comparatifs

### Comparatif par rapport aux autres Tokamaks

#### Principaux paramètres de TCV, JET, ITER

Paramètres	TCV	JET	ITER
Grand rayon du plasma (m)	0.88	3	6.21
Petit rayon du plasma (m)	0.25	1.25	2.0
Volume du plasma (m <sup>3</sup> )	-	155	837
Courant plasma (MA)	1.2	5-7	15
Champ magnétique (T)	1.43	3.4	5.3
Durée des impulsions (s)	2s	10	> 300 s
Type de Plasma	-	D-D / D-T	D-T
Puissance thermonucléaire (P récupérée)	~ kW	50kW/ 10MW	500 MW
Q = P récupérée / P injectée	~ 0	~1	>10
Puissance neutronique au bord	-	60 kW/m <sup>2</sup>	0.57 MW/m <sup>2</sup>

# Bibliographie

## Site internet:

- Encyclopédie libre <http://fr.wikipedia.org>
- European Fusion Development Agreement <http://www.efda.org>
- Nucléaire Info <http://www.nucleaire-info.com>
- Tokamak de l'EPFL <http://crppwww.epfl.ch>
- Tokamak du futur <http://www.iter.org>
- Bibliothèque centrale de Lyon <http://bibli.ec-lyon.fr>

## Documentations:

- Plasmas: des étoiles ...au quotidien  
Fusion:... énergie du 21 ième siècle , EPFL CRPP, Mai 2003
- Energie plus propre pour l'avenir , EFDA, 2008

# MERCI POUR VOTRE ATTENTION

