

Prenons la clé des champs ... magnétiques !

Hubert Baty, Observatoire astronomique de Strasbourg

hubert.baty@unistra.fr

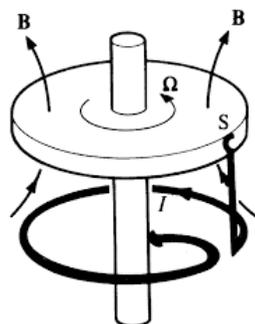


1. Les sources de champ magnétique
2. De l'expérience d'Oersted à la théorie d'Ampère
3. Champs magnétiques d'astres en rotation, et les colères du champ magnétique solaire
4. La fusion thermonucléaire par confinement magnétique

Sources de champ magnétique : cas d'astres en rotation (étoiles, planètes)

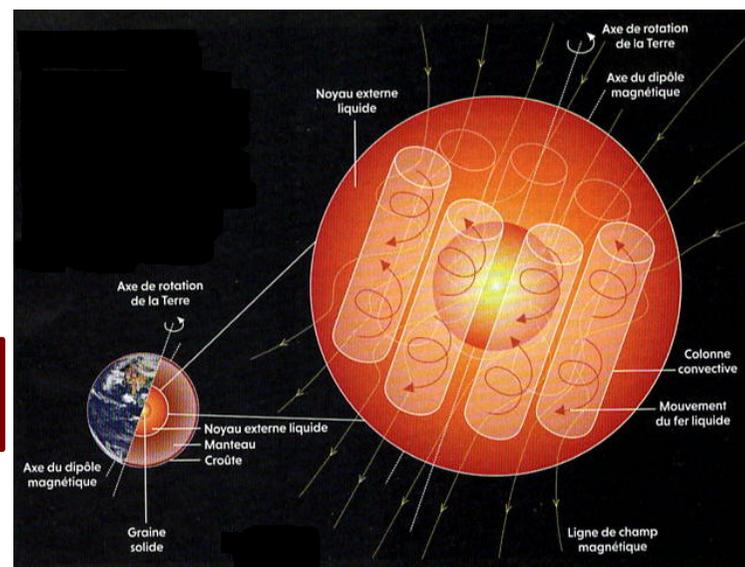
1. Effet Dynamo

- La rotation de l'astre et la convection thermique de la matière (liquide conducteur ou plasma) engendrent des courants électriques (sous la surface) par induction et donc un champ magnétique associé.
- Le champ n'est pas stationnaire et peut évoluer de façon périodique (Soleil) ou chaotique (la Terre) au cours du temps.



**Modèle de base:
dynamo auto-excitée (Bullard)**

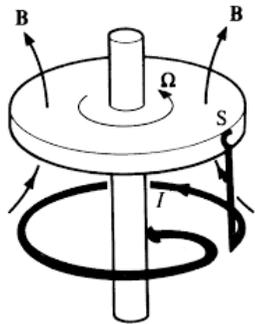
**La Terre
(noyau liquide conducteur)**



Sources de champ magnétique : cas d'astres en rotation (étoiles, planètes)

1. Effet Dynamo

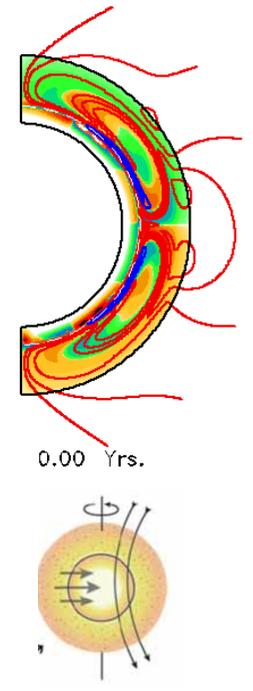
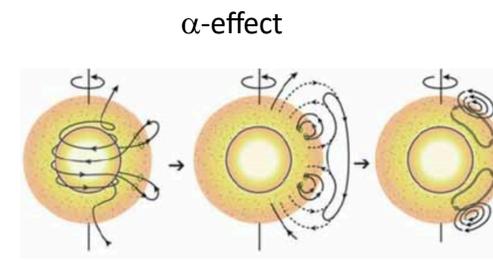
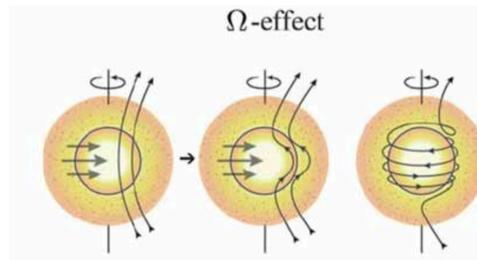
- La rotation de l'astre et la convection thermique de la matière (liquide conducteur ou plasma) engendrent des courants électriques (sous la surface) par induction et donc un champ magnétique associé.
- Le champ n'est pas stationnaire et peut évoluer de façon périodique (Soleil) ou chaotique (la Terre) au cours du temps.



Modèle de base:
dynamo auto-excitée (Bullard)

Le Soleil
(région convective)

Cycle solaire – 11 ans

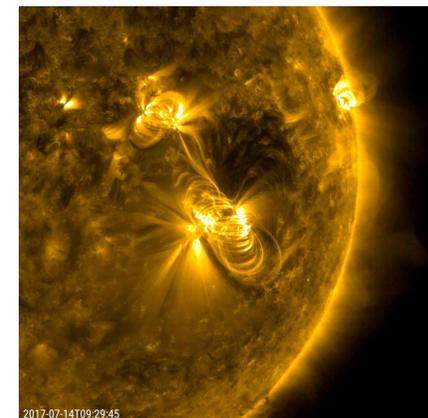


Sources de champ magnétique : cas d'astres en rotation (étoiles, planètes)

1. Effet Dynamo

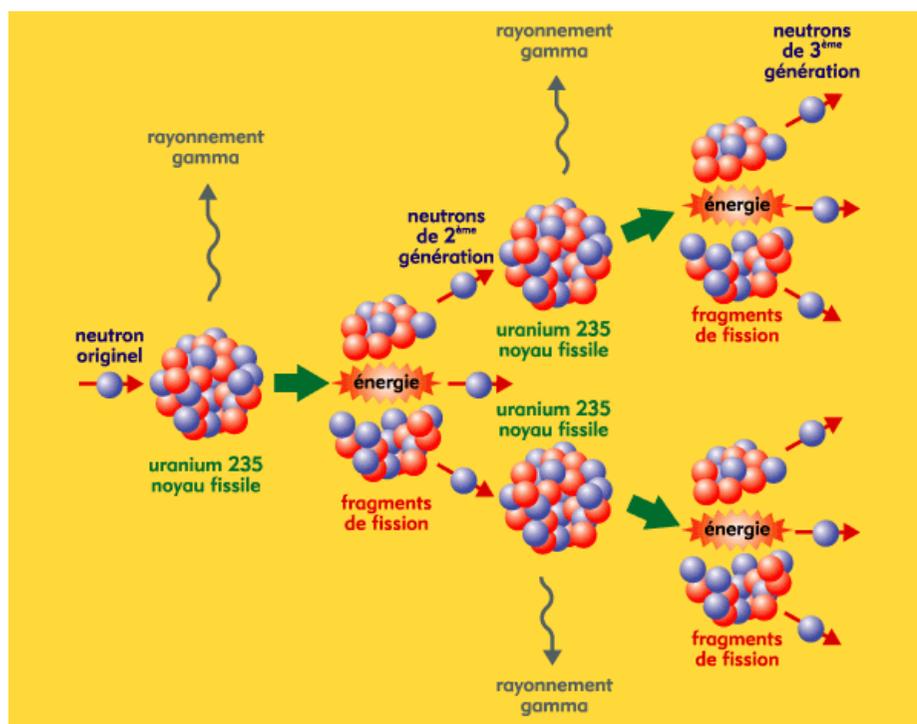
- La rotation de l'astre et la convection thermique de la matière (liquide conducteur ou plasma) engendrent des courants électriques (sous la surface) et donc un champ magnétique associé.
- Le champ n'est pas stationnaire et peut évoluer de façon périodique ou chaotique au cours du temps.

2. Dans la couronne des étoiles, le champ magnétique peut avoir une dynamique explosive (éruptions, éjections, ...) basée sur la reconnexion magnétique.



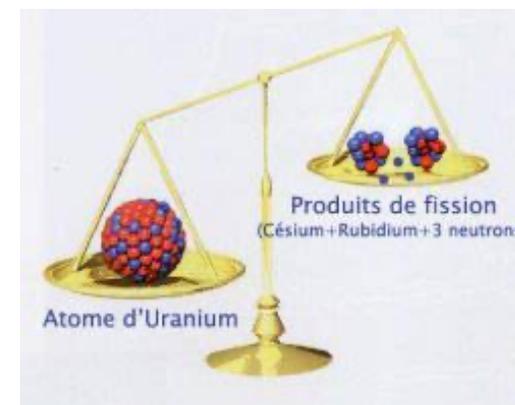
- 1. Fission ou fusion thermonucléaire, quelle différence ?**
- 2. La fusion thermonucléaire dans les étoiles**
- 3. Différentes voies pour la fusion en laboratoire**
- 4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences**
- 5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique**

1. Fission versus fusion thermonucléaire



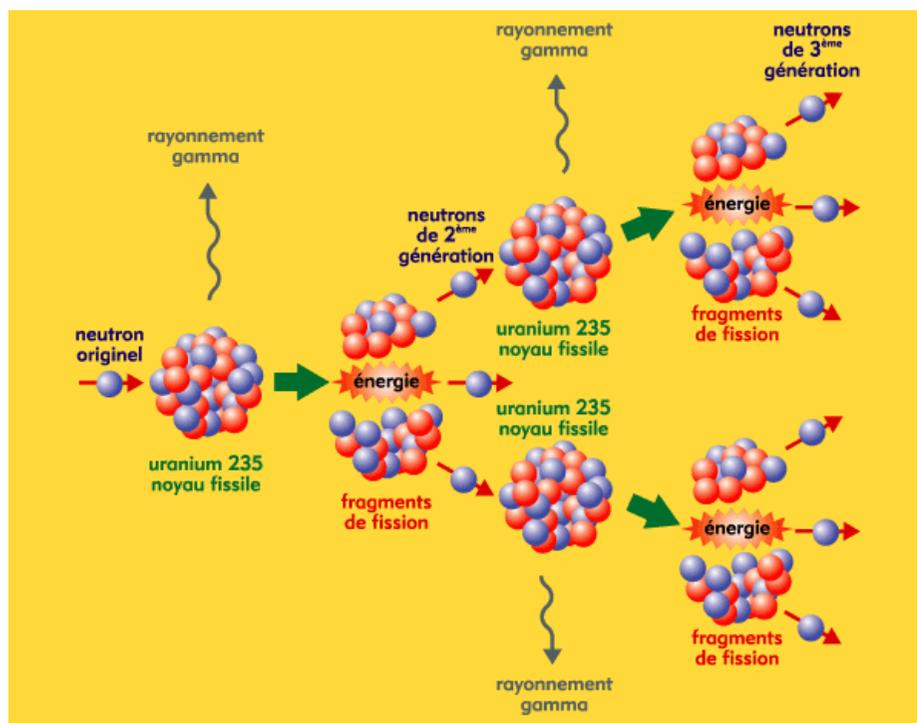
Fission de noyaux lourds

=> réactions en chaîne !
-> l'énergie dégagée croît de façon exponentielle au cours du temps.



Réaction exothermique (énergie est libérée)

1. Fission versus fusion thermonucléaire



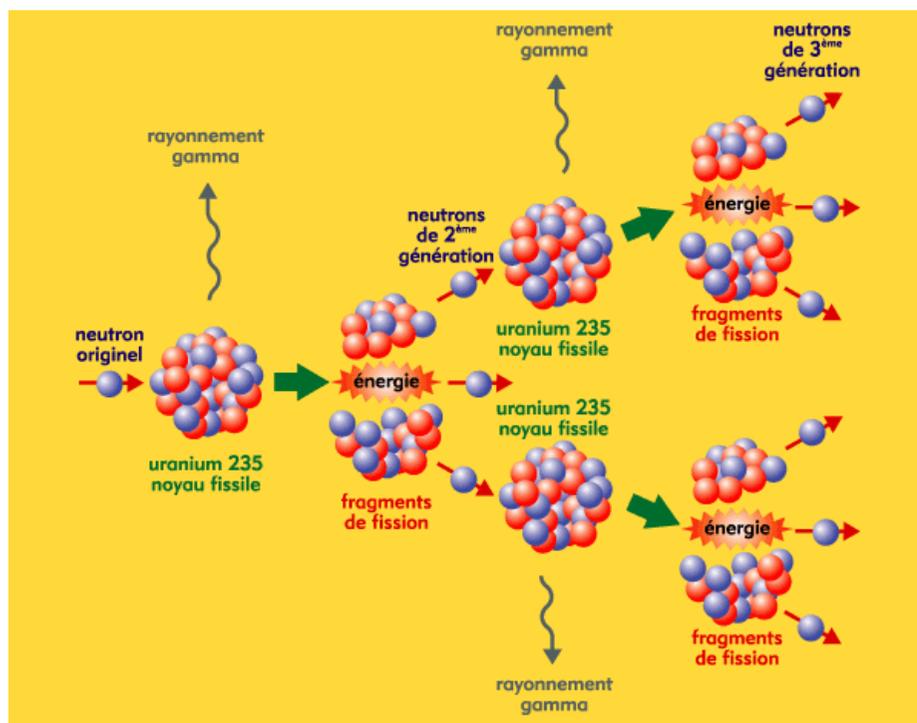
Fission de noyaux lourds

réactions en chaîne !

Incontrôlée => bombe



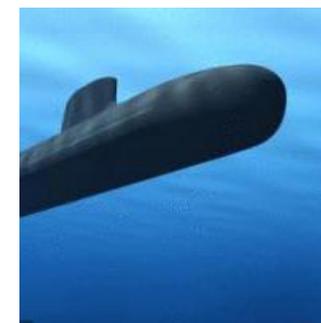
1. Fission versus fusion thermonucléaire



Fission de noyaux lourds

réactions en chaîne !

Contrôlée => centrale ou propulsion



1. Fission versus fusion thermonucléaire



Fission de noyaux lourds

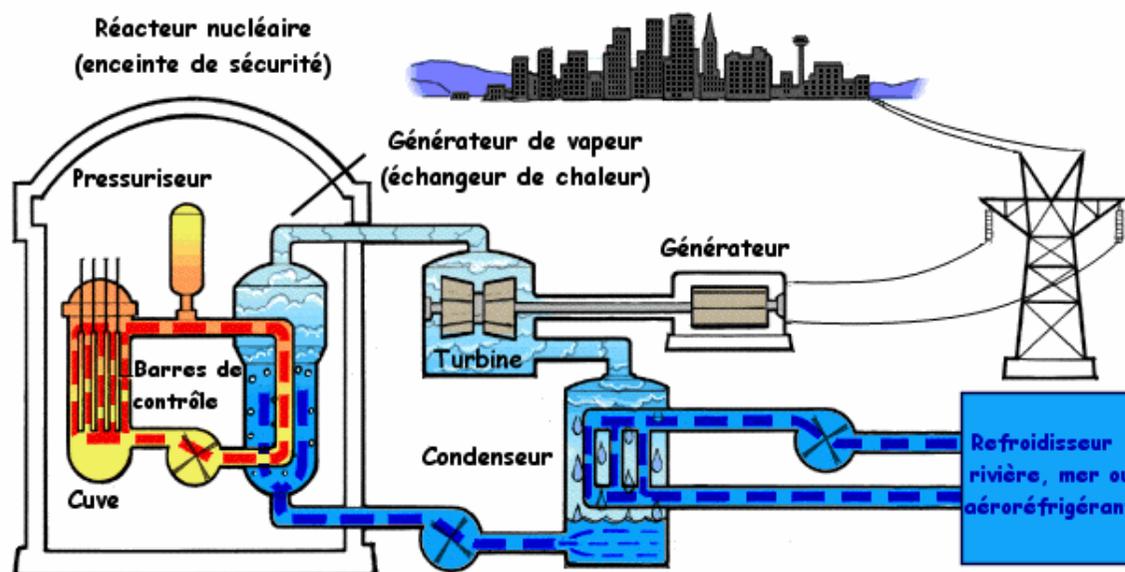


Schéma de principe d'une centrale nucléaire. Le cœur du réacteur contient les assemblages de **combustible étanches** et les **barres de contrôle**, dans de l'eau à l'état liquide (type REP).

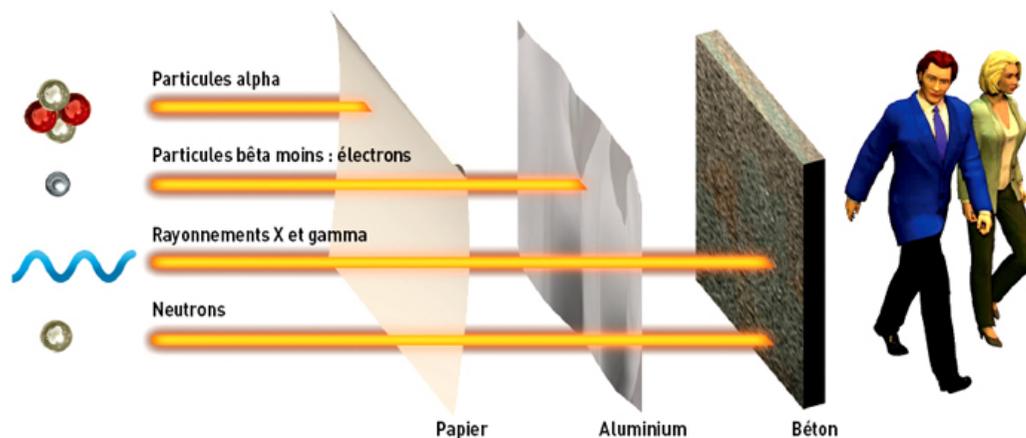
1. Fission versus fusion thermonucléaire

Fission de noyaux lourds : dangers du nucléaire actuels => emballement de la réaction (si mal contrôlée) & déchets nucléaires

Radioactivité des déchets : Pouvoir de pénétration de rayonnements ionisants

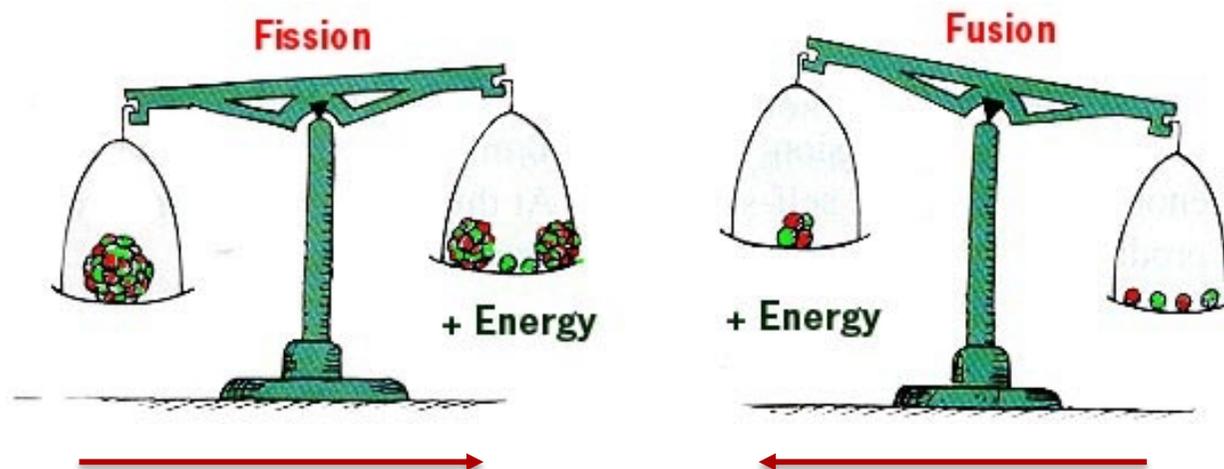


Fragments de fission sont hautement radioactifs, et certains pendant longtemps !



1. Fission versus fusion thermonucléaire

Et si on fusionnait des noyaux : il faut des noyaux légers pour récupérer de l'énergie !

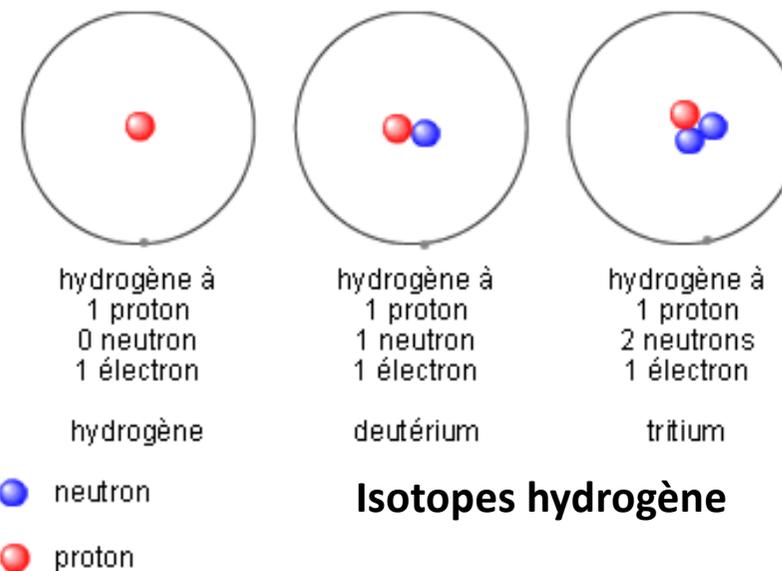
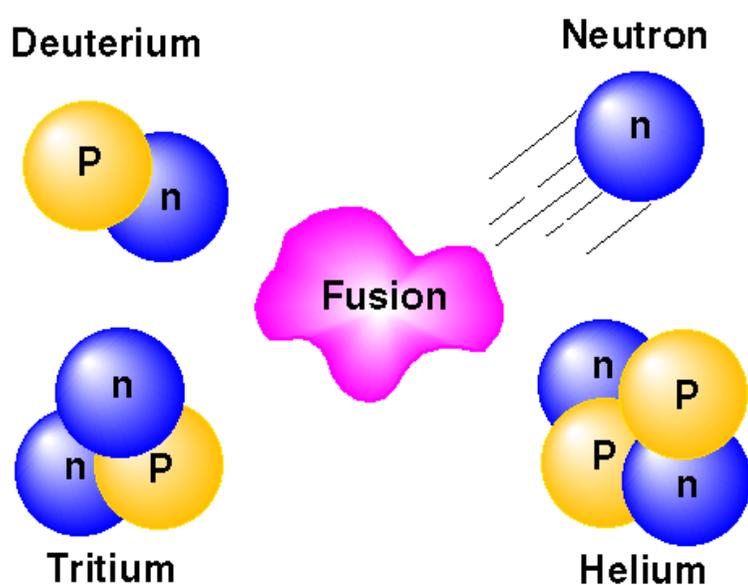


Séparer ou réunir, il faut choisir !

1. Fission versus fusion thermonucléaire

Fusion de noyaux légers

Réaction la plus exothermique

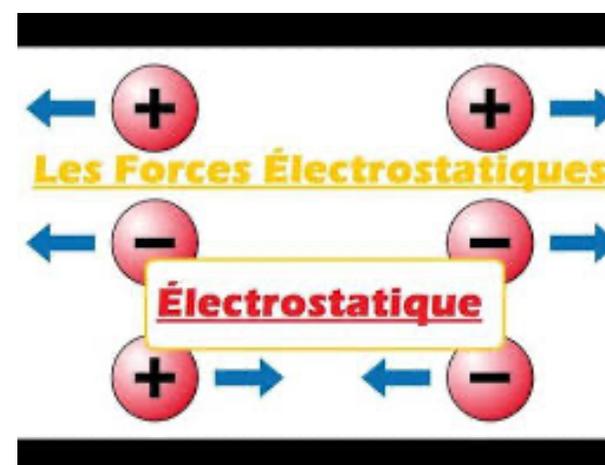
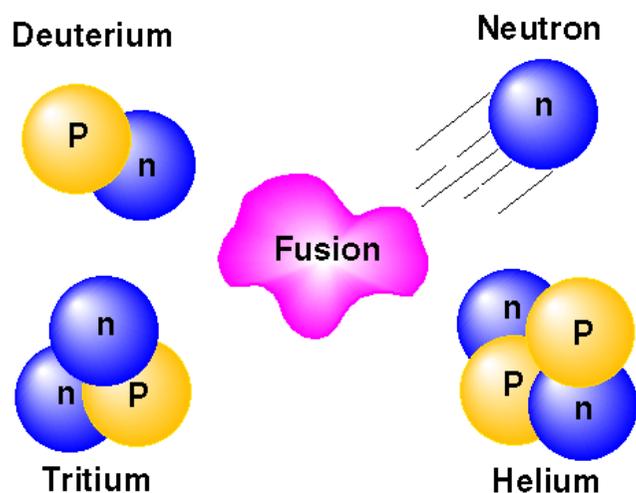


Isotopes hydrogène

1. Fission versus fusion thermonucléaire

Fusion de noyaux légers

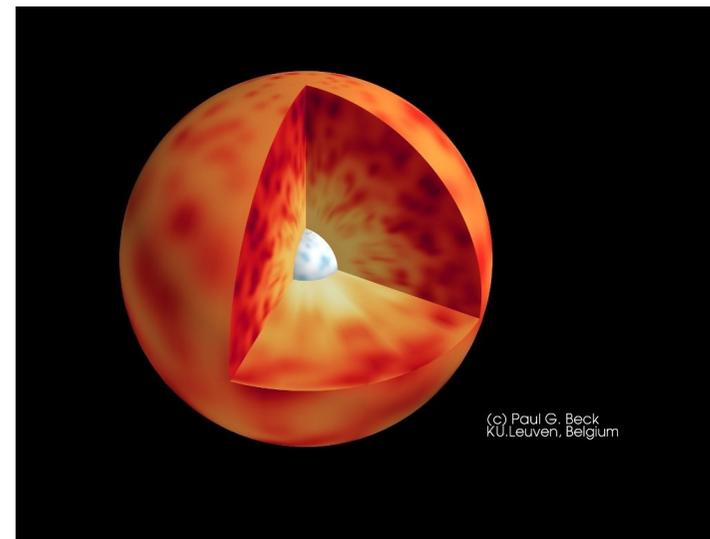
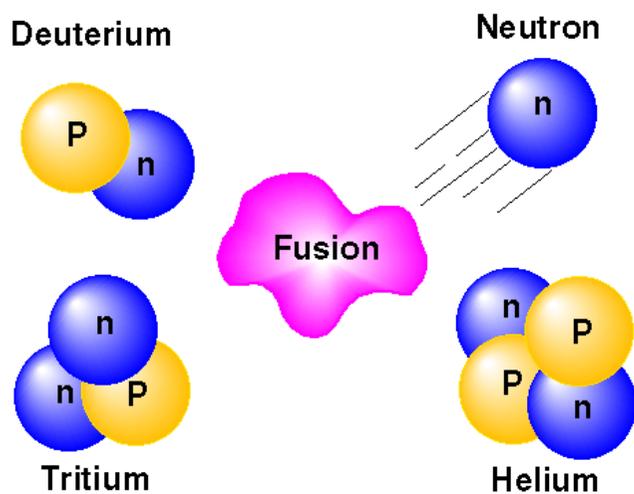
-> Il faut surmonter la force de répulsion électrostatique
force de coulomb qui varie comme $\rightarrow 1/\text{distance}^2$



2. La fusion thermonucléaire dans les étoiles

Fusion de noyaux légers

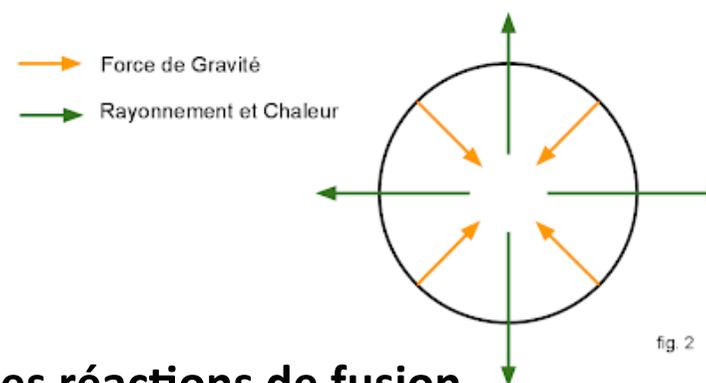
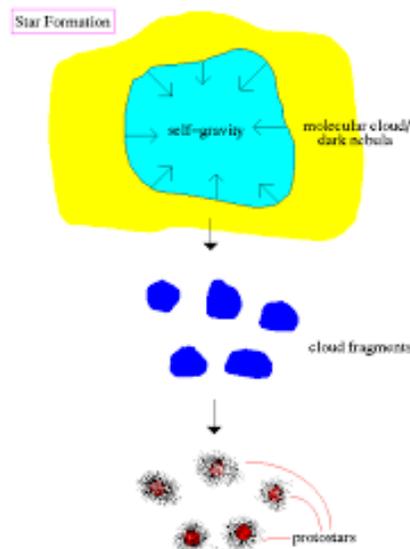
-> naturellement réalisée au centre (noyau) des étoiles !



2. La fusion thermonucléaire dans les étoiles

Fusion de noyaux légers

-> naturellement réalisée au centre des étoiles !



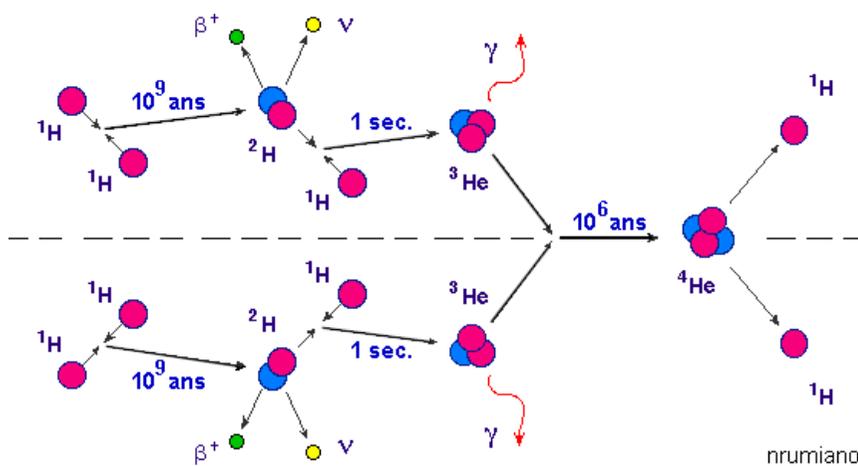
Une fois les réactions de fusion enclenchées => étoile est à l'équilibre !

Naissance de l'étoile par effondrement d'un nuage

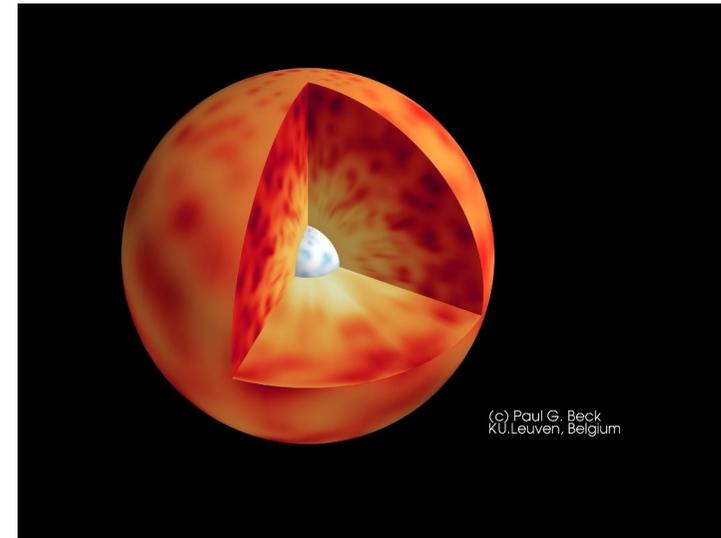
2. La fusion thermonucléaire dans les étoiles

Fusion de noyaux légers

-> naturellement réalisée au centre des étoiles !

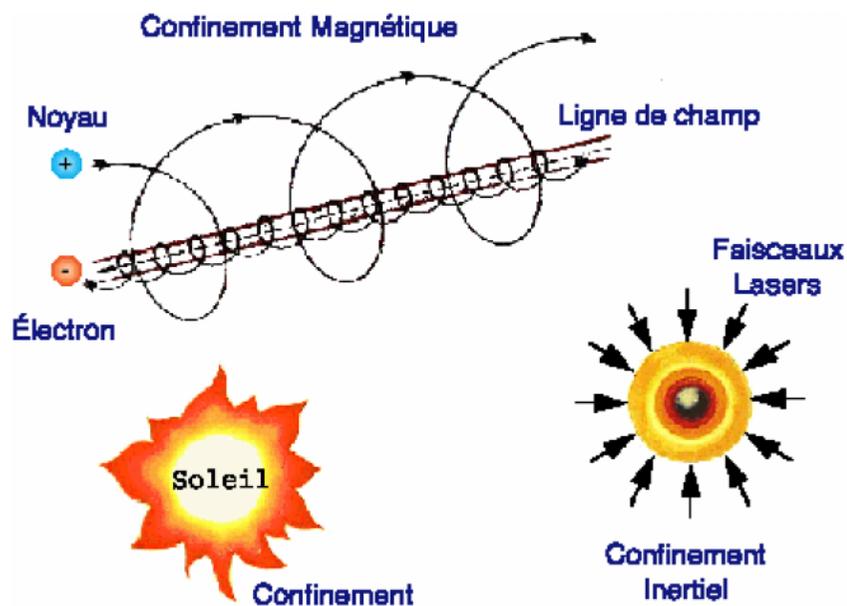


Cycle proton-proton à l'intérieur des étoiles



3. Différentes voies pour la fusion en laboratoire

Fusion de noyaux légers



-> Autres moyens de confiner !

-inertiel
-magnétique

3. Différentes voies pour la fusion en laboratoire

Fusion de noyaux légers: voie inertielle



LMJ (Laser Mega Joule à Bordeaux)

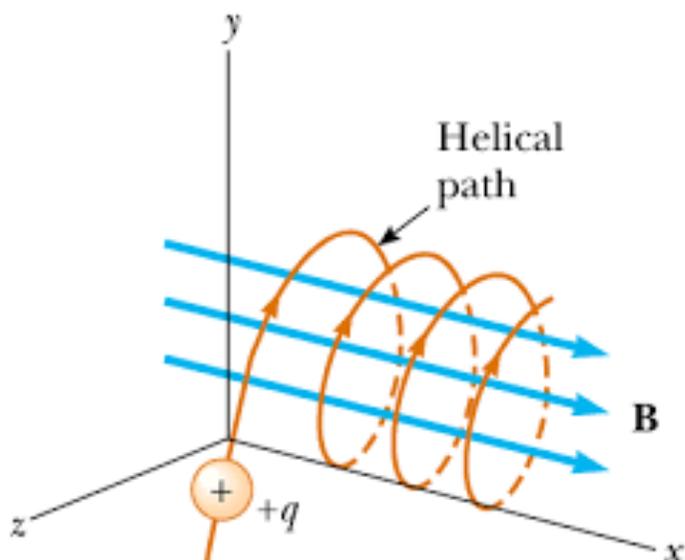
Laser de très haute énergie permettant de générer 1,2 petawatts de puissance soit plus de 1 million de milliards de watts

Il s'agit en fait d'un faisceau laser qui s'ajoute aux 176 du LMJ mais dont la puissance est 1.000 supérieure mais 1.000 fois plus brève que celle de chaque faisceau du LMJ.

Le PETAL, le laser le plus puissant du monde implanté sur le site du CEA-CESTA au sein du Laser Mégajoule (LMJ)

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Fusion de noyaux légers: voie magnétique



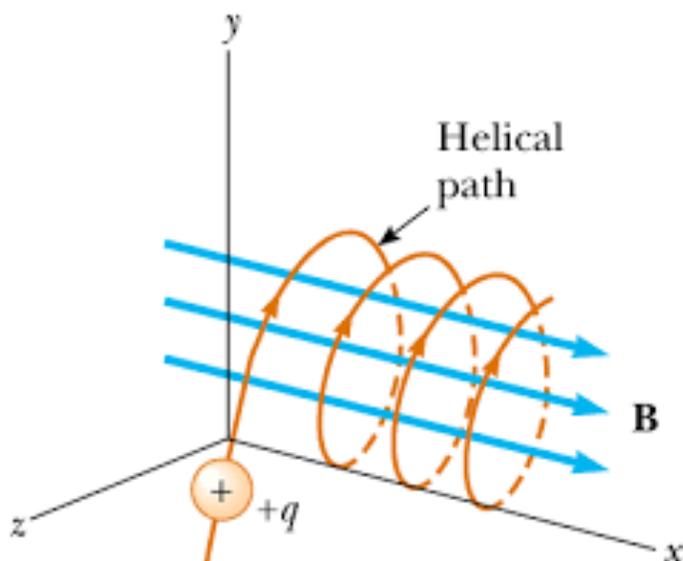
$$R_L = m V / (q B)$$

Rayon de Larmor

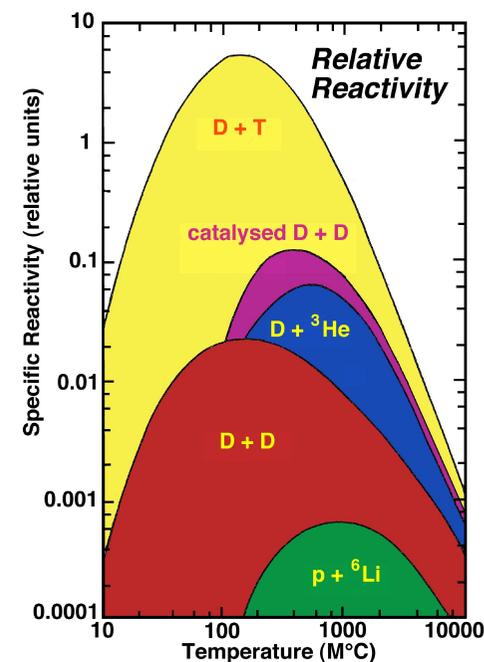
Idee : confiner les noyaux au voisinage du champ magnétique et les faire fusionner
⇒ Besoin d'un champ très fort !
(R_L petit)

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Fusion de noyaux légers: voie magnétique



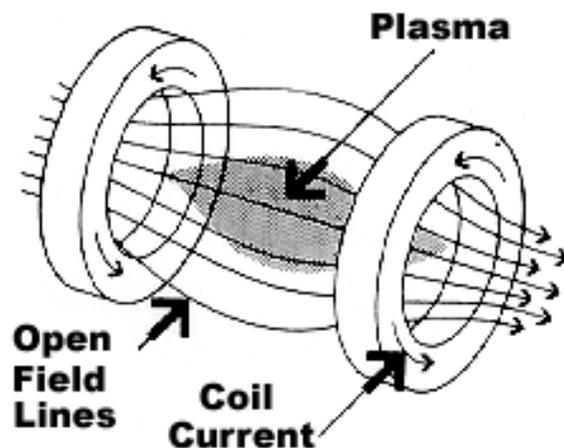
Il faut aussi chauffer à plus
de 100 millions de degrés
pour maximiser la
probabilité de fusionner !



4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Fusion de noyaux légers: voie magnétique

Quelle configuration choisir ?

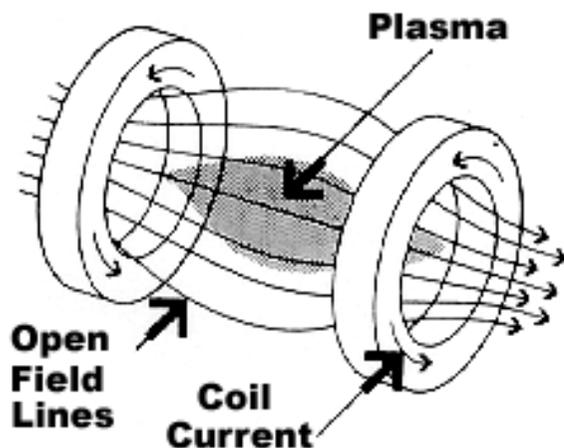


La bouteille magnétique
(perte partielle de plasma car ouverte)

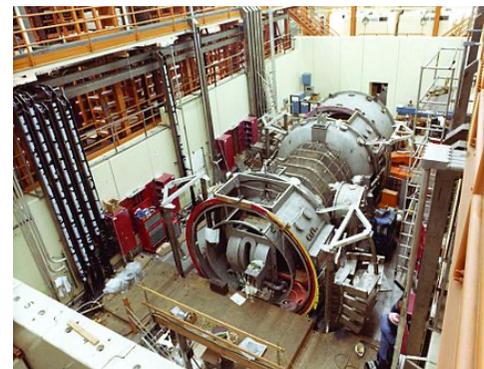
4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Fusion de noyaux légers: voie magnétique

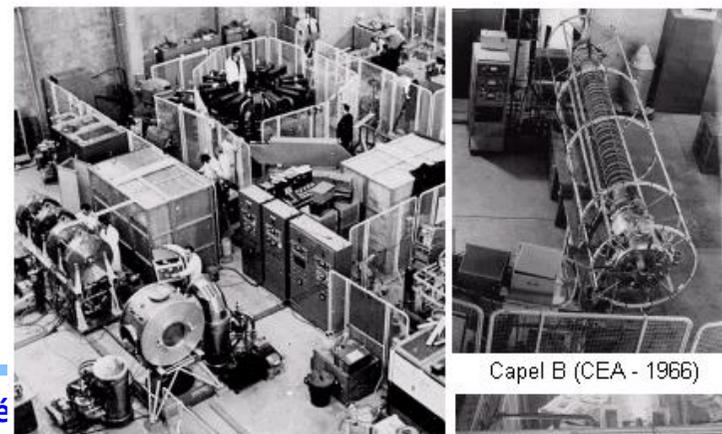
Quelle configuration choisir ?



La bouteille magnétique
(perte de plasma car ouverte)



The Tandem Mirror Experiment (TMX) in 1979



Capel B (CEA - 1966)

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Fusion de noyaux légers: voie magnétique

Quelle configuration choisir ?

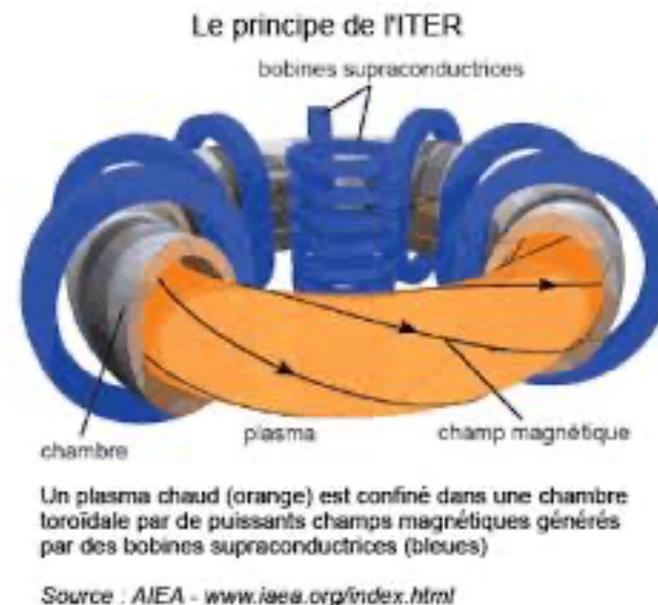
Toroidalnaja Kamera Magnetnaja Katuska
(Chambre toroïdale à confinement magnétique)

Le Tokamak:

Inventé au début des années 1950 par les Russes
Igor Yevgenyevich Tamm et Andreï Sakharov

-> le dispositif le plus prometteur pour une centrale !

(fermé pour éviter les fuites contrairement
à la bouteille magnétique)



4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

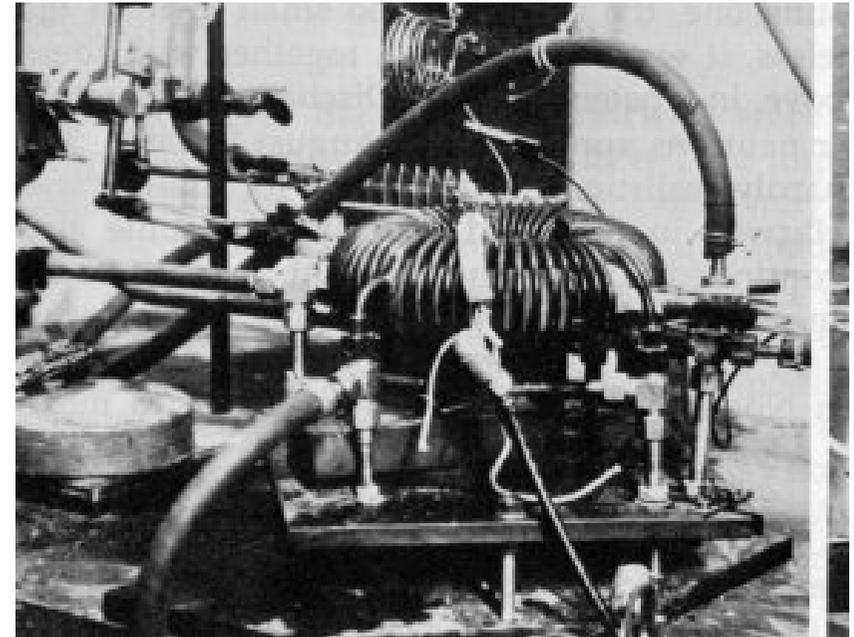
Le Tokamak:

Inventé au début des années 1950 par les Russes

Igor Yevgenyevich Tamm et Andreï Sakharov

-> le dispositif le plus prometteur pour une centrale !

(fermé pour éviter les fuites contrairement
à la bouteille magnétique)



1946 : les dispositifs de confinement magnétique testés par Thoneman
(tores en verre et en métal), au laboratoire Clarendon (Oxford, Royaume-Uni)

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Il y a 40 ans, le tokamak champion
du monde était français (1973)

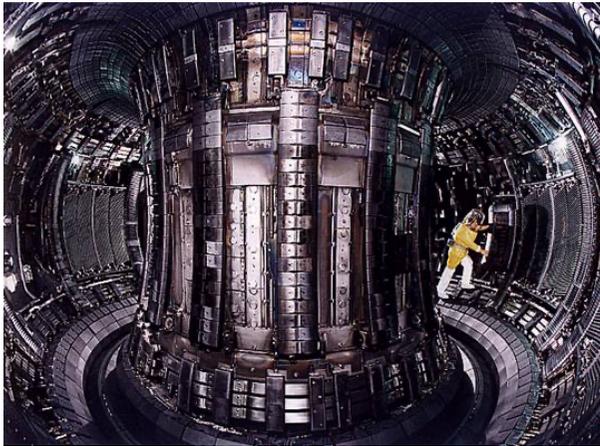


Vue générale de TFR -Tokamak de Fontenay-aux-Roses- (CEA-France)

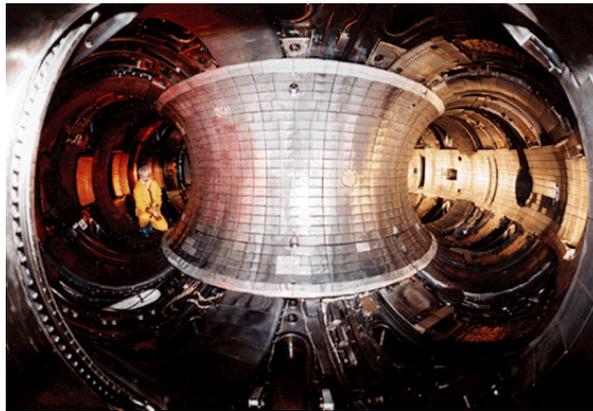
L'identification de Paul-Henri Rebut à sa machine était telle que, pour nombre de ses collaborateurs, TFR signifiait « Tokamak *façon Rebut* » plus encore que « *Tokamak de Fontenay-aux-Roses* »...

Le temps de confinement de l'énergie était de l'ordre de la milliseconde sur la meilleure des machines soviétiques (le tokamak T3), TFR allait le porter à quelques dizaines de millisecondes — un saut considérable, mais bien insuffisant encore pour permettre aux noyaux de fusionner.

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences



JET (UK)



TFTR (USA)

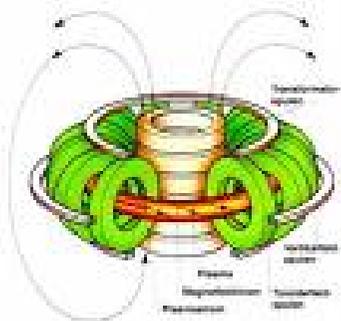


Tore-Supra (France)

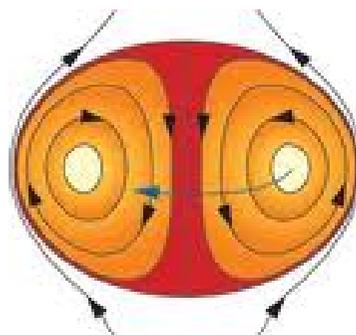
De nombreux tokamaks expérimentaux des années 1970 -> 2000
-> but: comprendre la physique des plasmas à très haute température et très magnétisés
100 MK et plusieurs Teslas
(en utilisant principalement la réaction Deutérium-Deutérium)

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

D'autres machines à confinement magnétique ...



Tokamaks



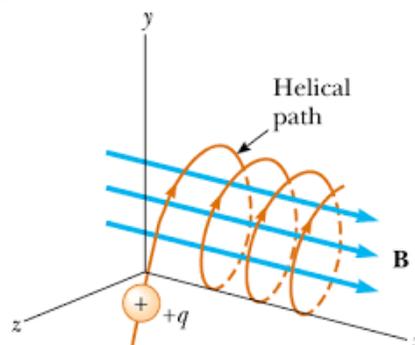
Spheromaks



Torsatrons

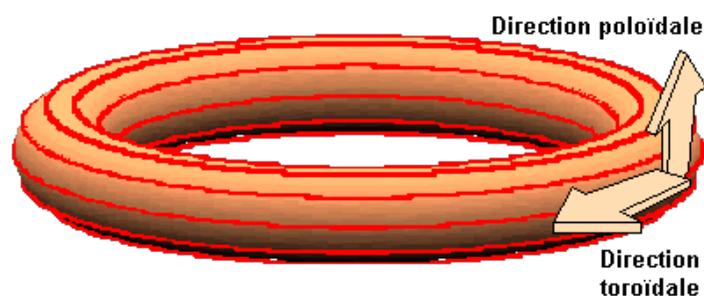
4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

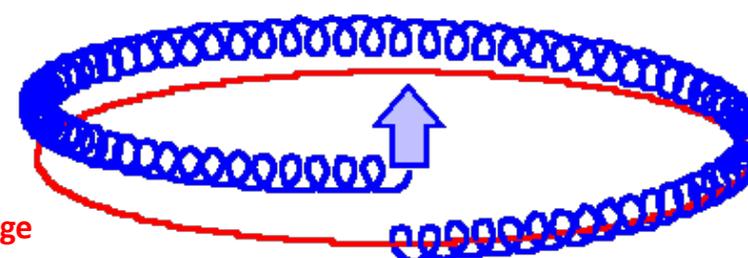


Ligne de champ droite

ou courbée



Lignes de champ en rouge

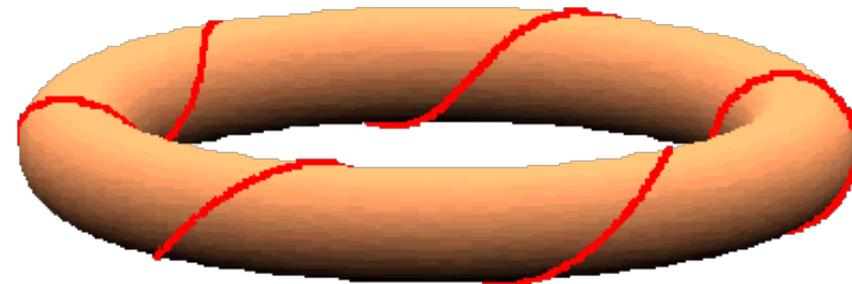


Si le champ magnétique était purement toroidal: on aurait un problème de dérive des particules (des noyaux) vers les parois = perte du confinement !

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

Meilleur confinement
des noyaux ... qui restent
au voisinage des lignes de champ !



Lignes de champ en rouge sur des surfaces
toriques emboîtées les unes dans les autres

Si le champ magnétique a deux courbures (structure en hélice enroulée sur un tore)
=> on retrouve le confinement des noyaux !

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

3 types de courants (solénoïdes) ?



Fil supraconducteur (refroidi à 4 K) -> ITER

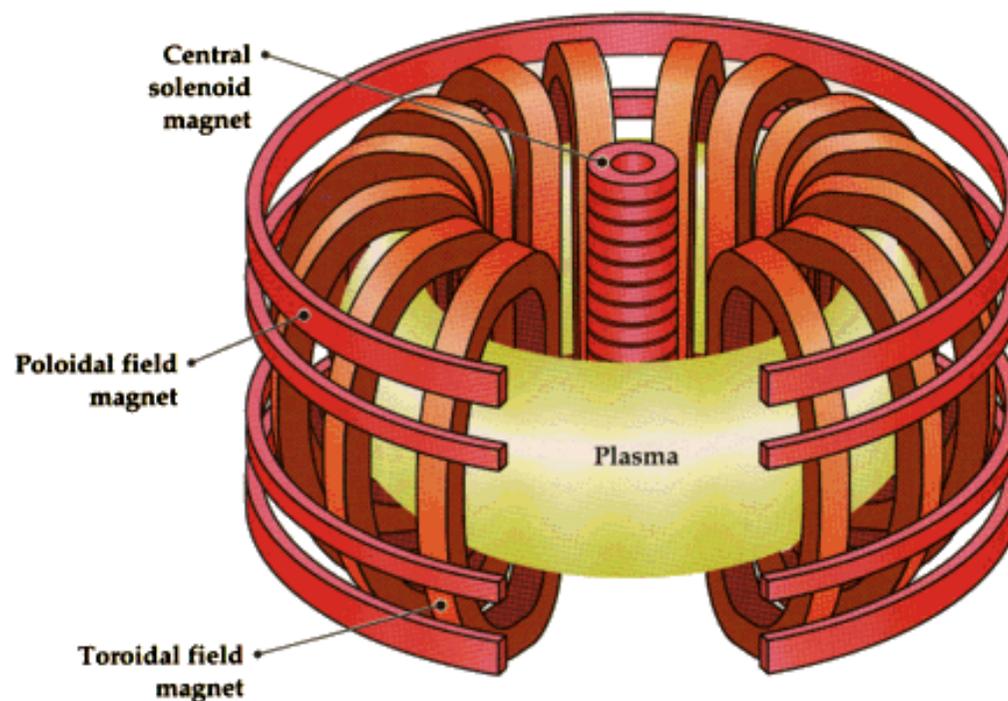
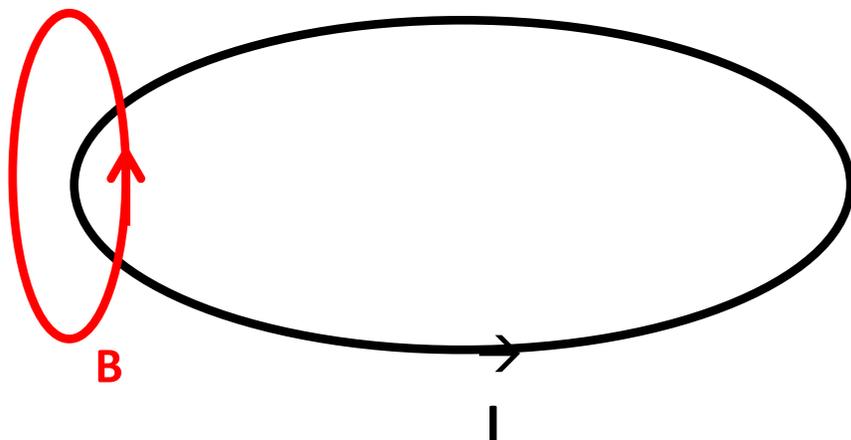


Schéma de fonctionnement du tokamak

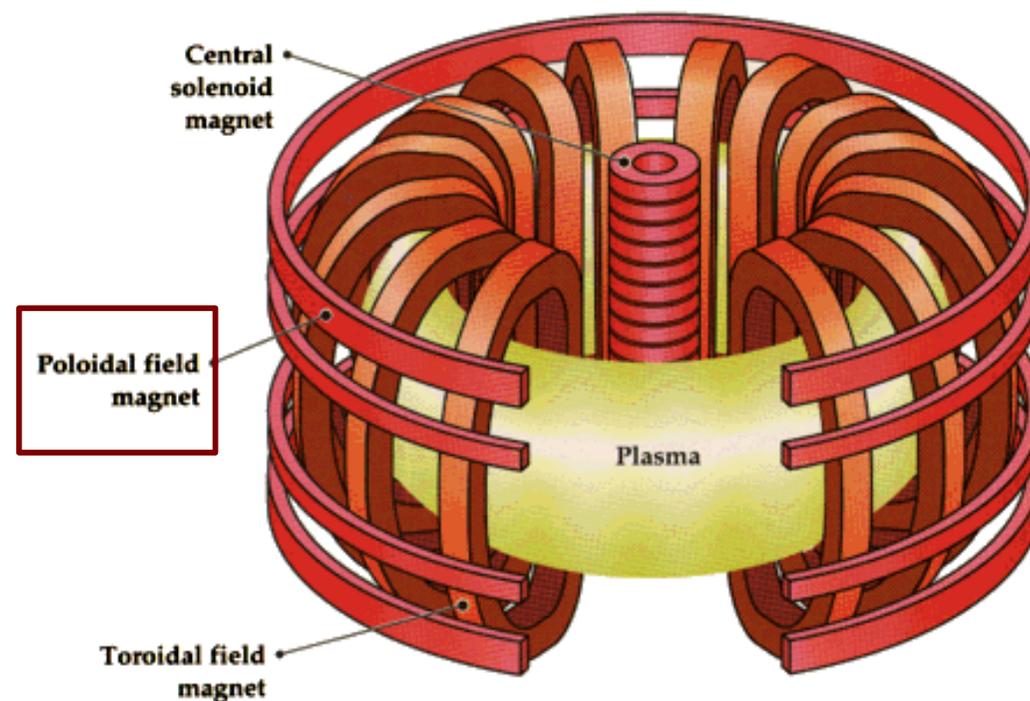
4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

-> Composante poloidale du champ



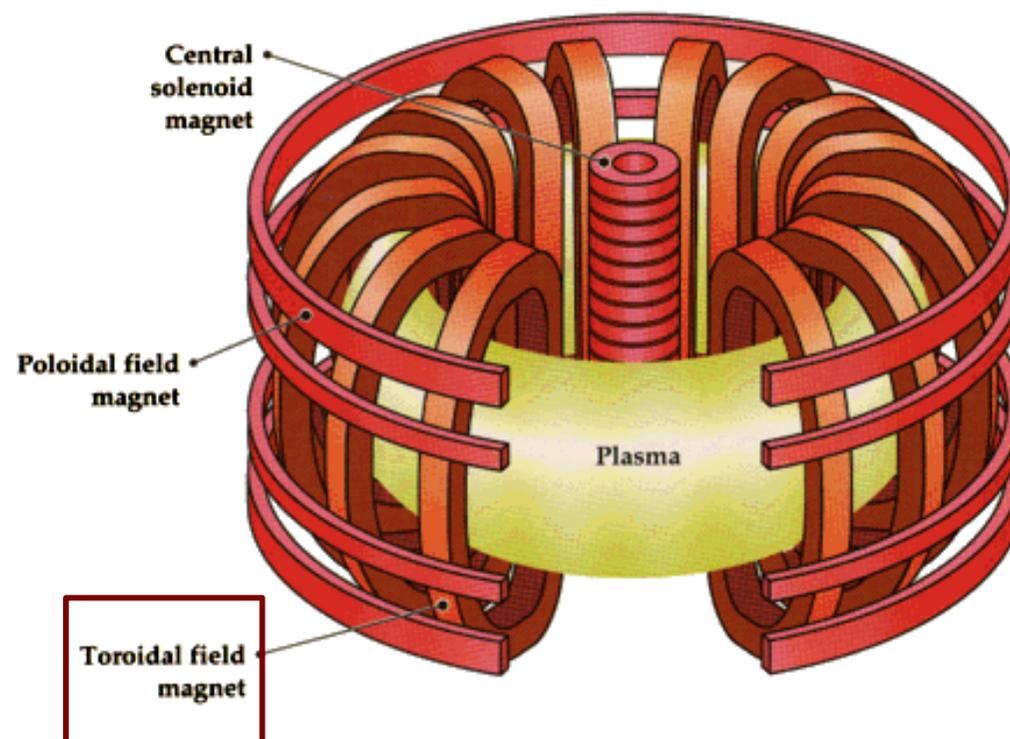
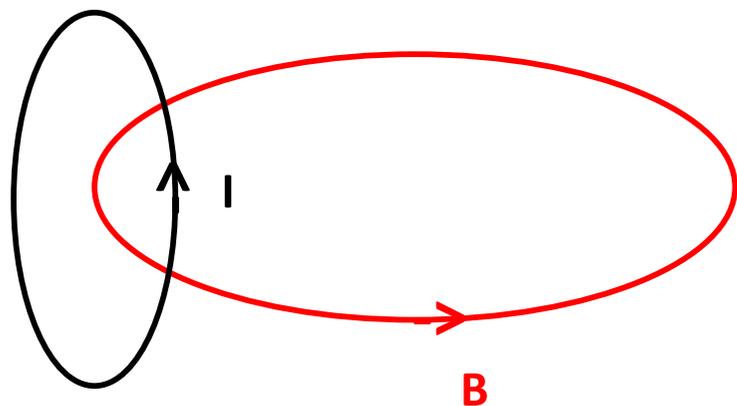
65 km de bobinage et 2100 tonnes pour ITER



4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

-> Composante toroidale du champ

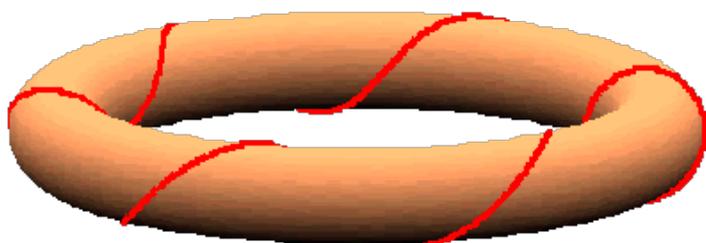


88 km de bobinage et 6500 tonnes pour ITER

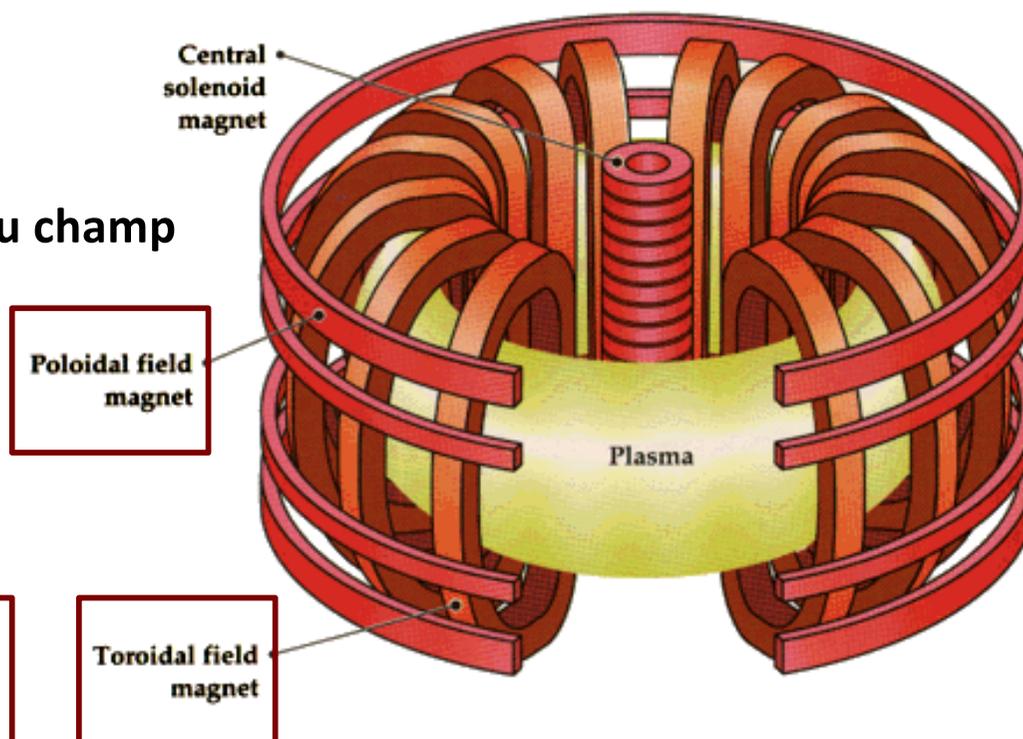
4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

-> Composantes poloidale + toroidale du champ



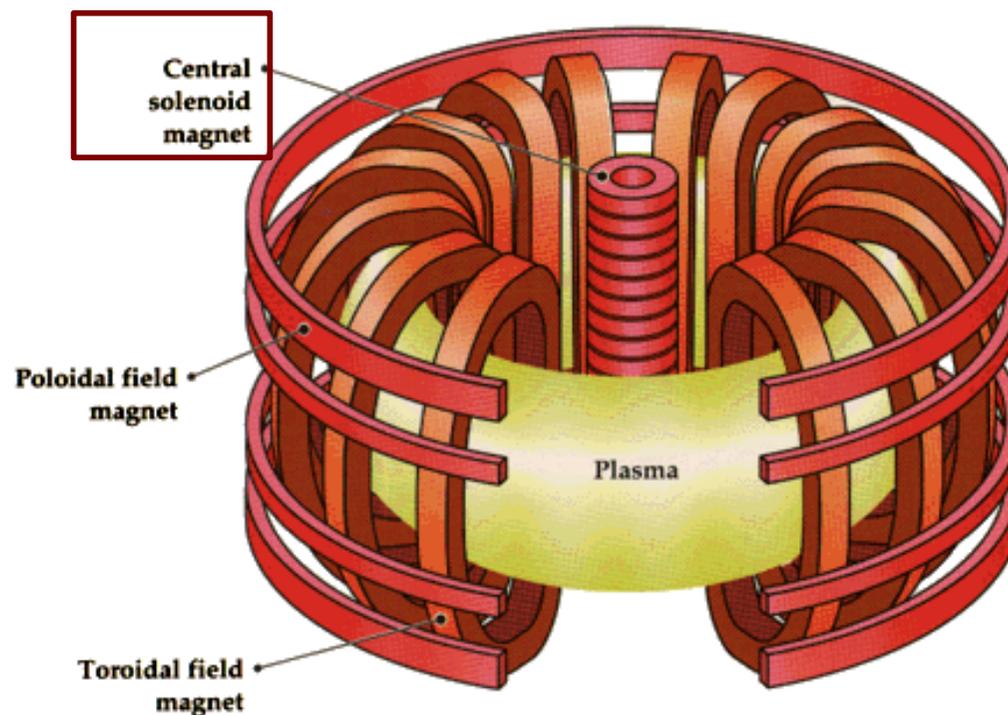
Le champ magnétique produit par des aimants supraconducteurs confine le plasma et le maintient à l'écart des parois de la chambre à vide.



4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

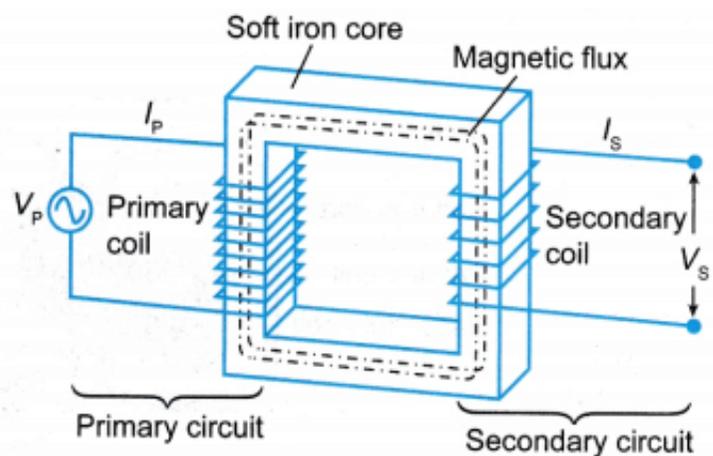
A quoi ça sert ?



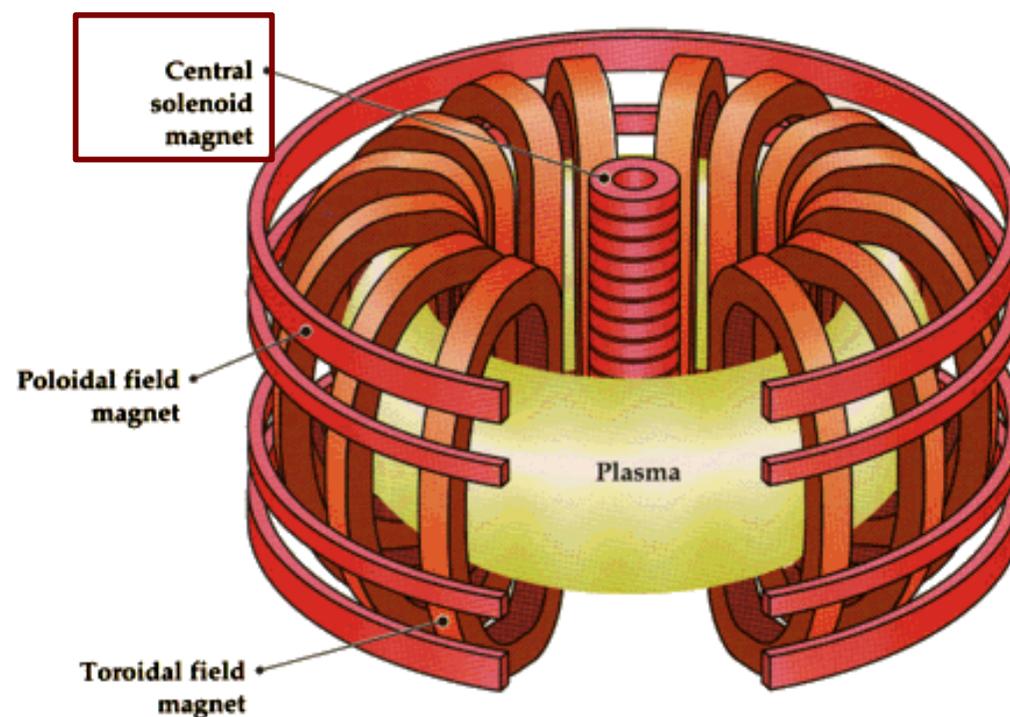
42 km de bobinage et 970 tonnes pour ITER

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

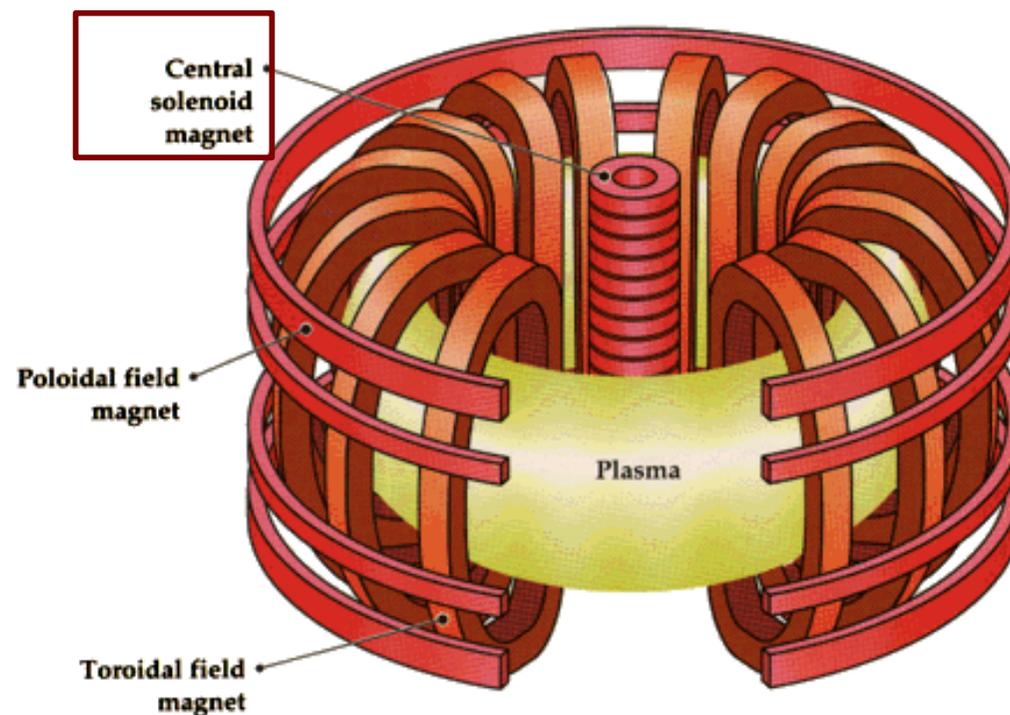
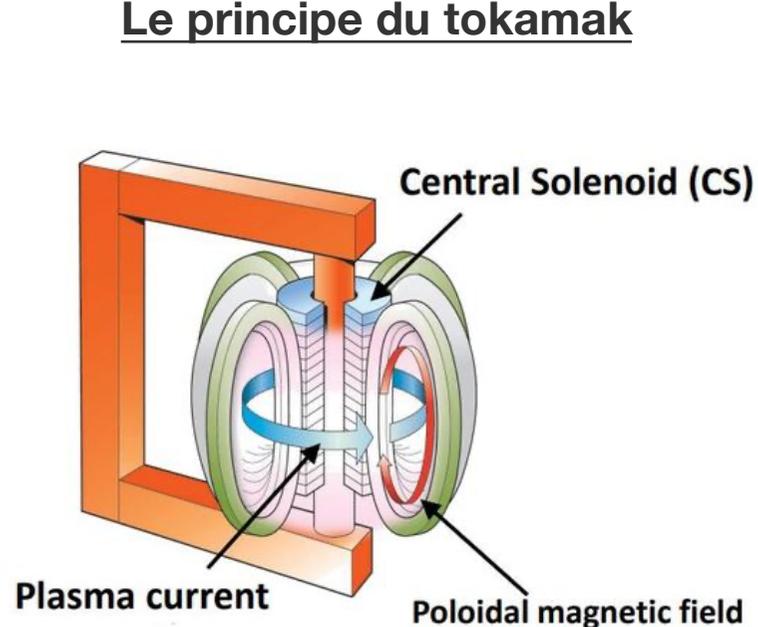


Principe du transformateur



4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak

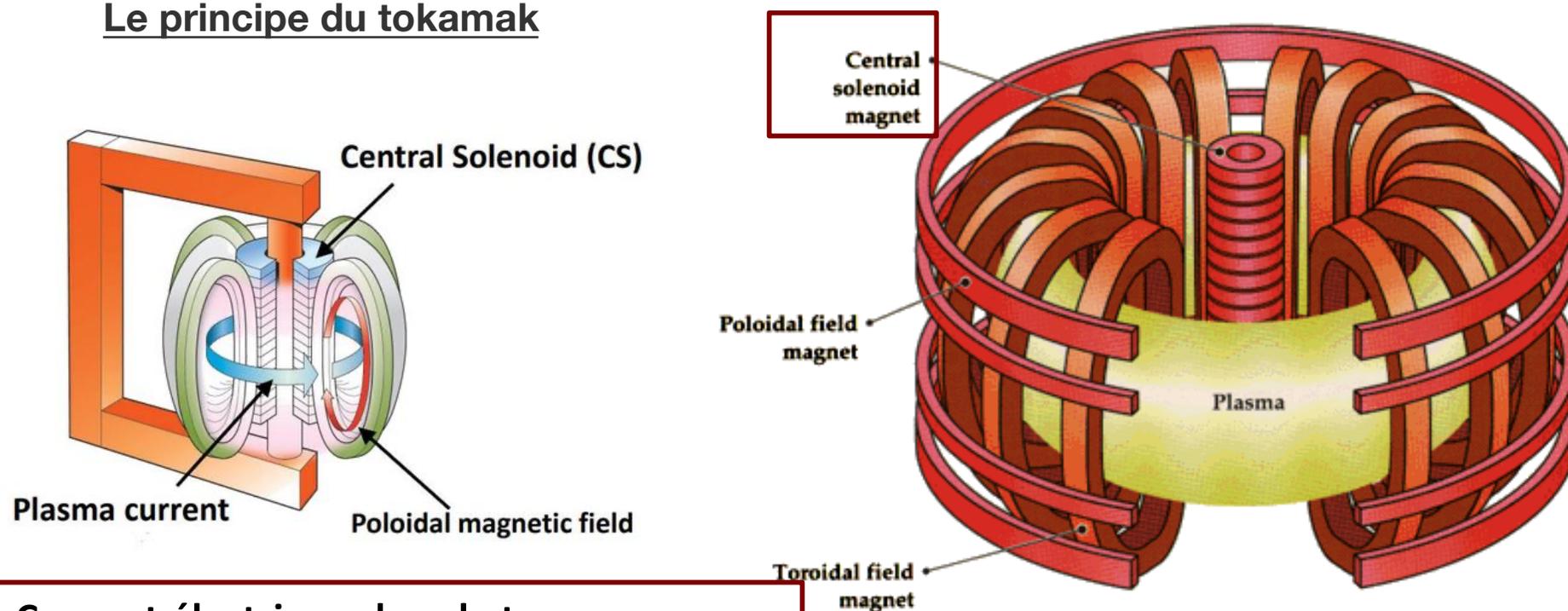


Courant électrique dans le tore

-> qui participe aussi à la composante poloidale du champ magnétique

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

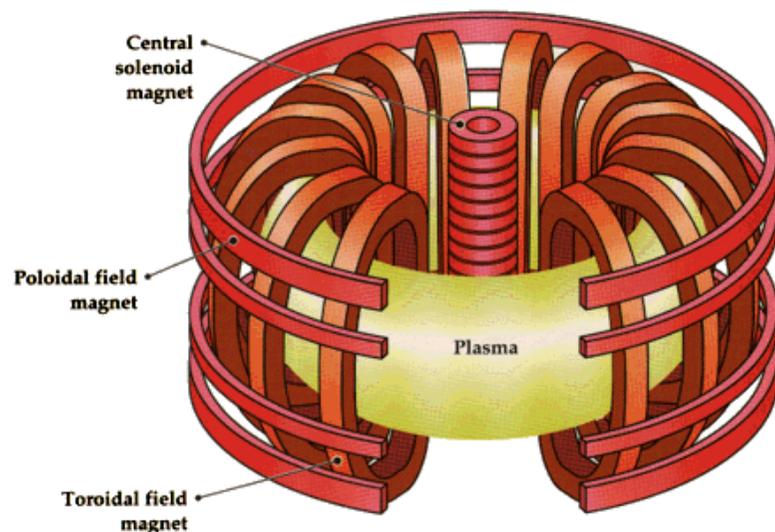
Le principe du tokamak



**Courant électrique dans le tore
-> qui permet surtout de chauffer (effet Joule)**

4. Principe de la fusion par confinement magnétique et premières expériences

Le principe du tokamak : du chauffage annexe est nécessaire



**Effet de résonances sur les noyaux et électrons par ondes ...
(fréquences qui permettent de chauffer les particules)**



5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

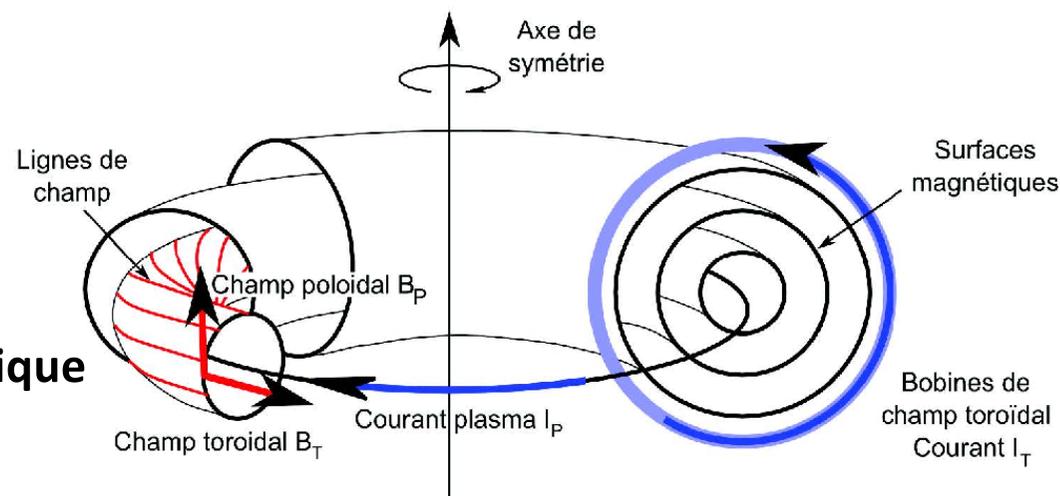
Pourquoi ça ne fonctionne pas bien ?

Equilibre → surfaces magnétiques
toriques emboîtées et à différentes
températures.

(plus chaud au centre)

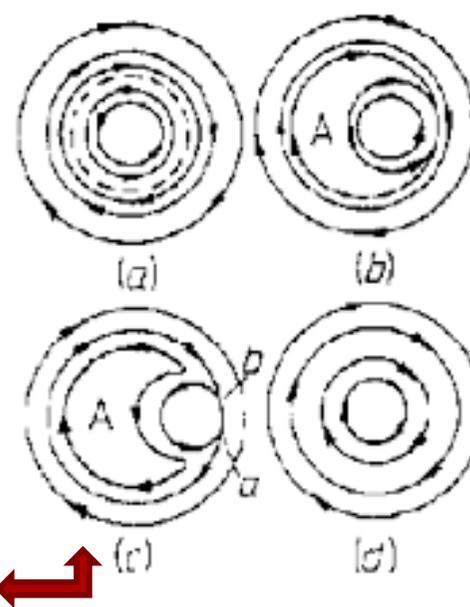
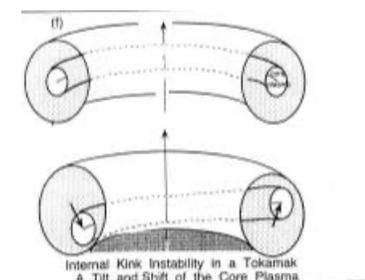
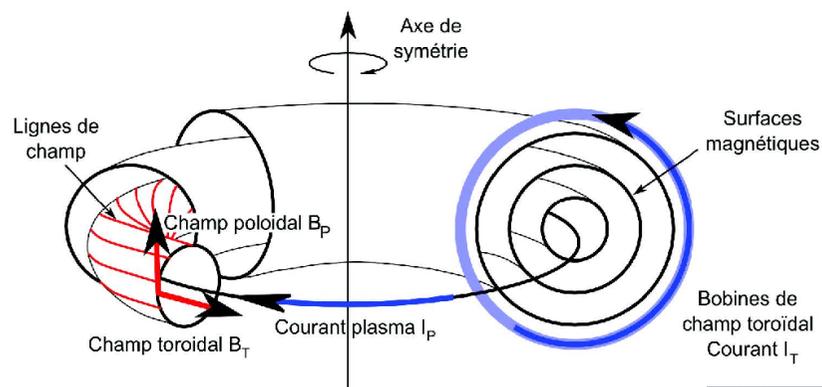
-> Pour chaque surface: le champ magnétique
est en hélice, mais le pas de l'hélice
varie d'une surface à l'autre.

-> Certaines surfaces sont problématiques => instabilités !



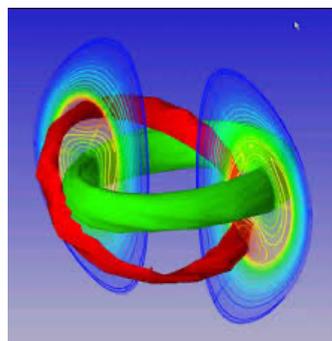
5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

Pourquoi ça ne fonctionne pas bien ?



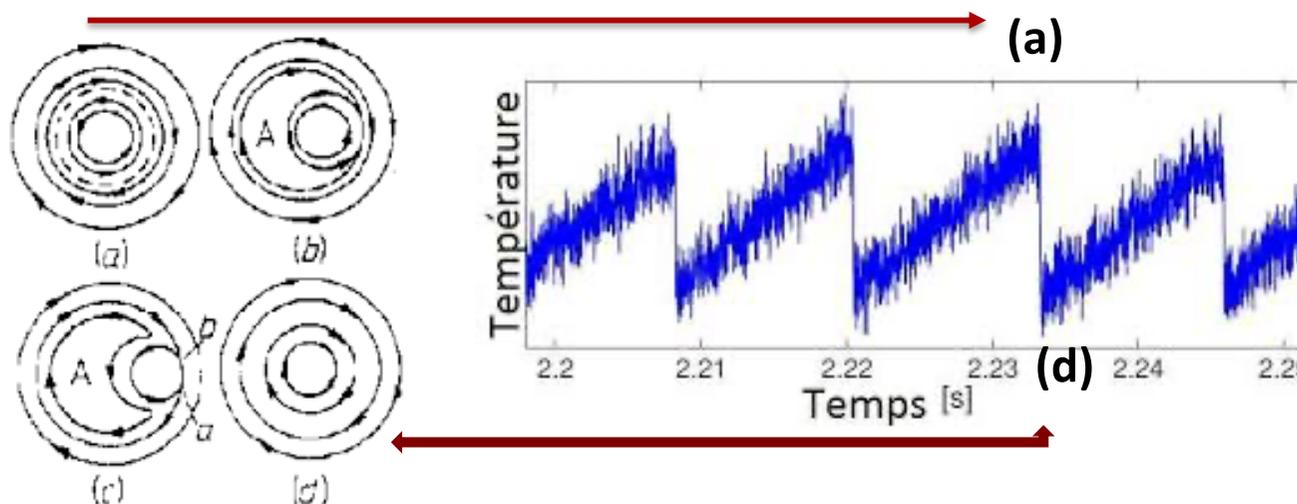
Après un certain temps on retrouve -> (a)

Exemple d'instabilité:
disruption interne (instabilité de kink) avec reconnexion magnétique ...



5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

Pourquoi ça ne fonctionne pas bien ?



Exemple d'instabilité:
disruption interne (instabilité de kink)

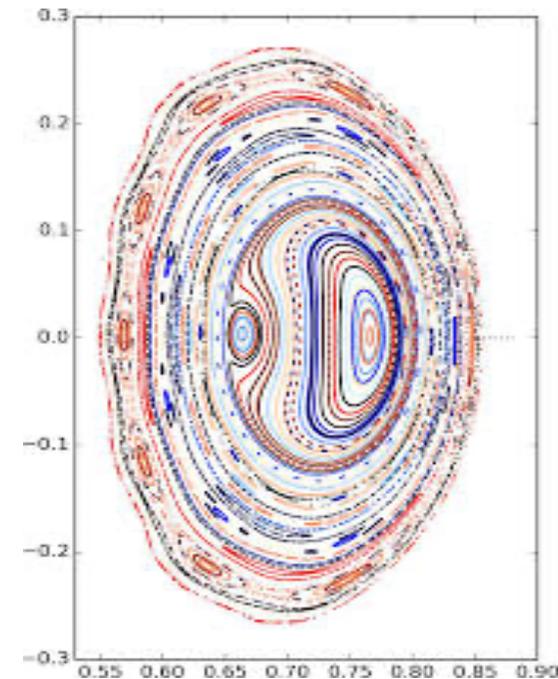
Oscillations en dents de scie
de la température centrale
=> Perte partielle de confinement

5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

Pourquoi ça ne fonctionne pas bien ?

Les lignes de champ magnétique sont chaotiques

Turbulence magnétique qui favorise le transport de l'énergie thermique vers les parois ... donc diminue l'efficacité des réactions au centre



Ilôts magnétiques

5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

Est on loin d'un fonctionnement industriel ?

Critère de Lawson

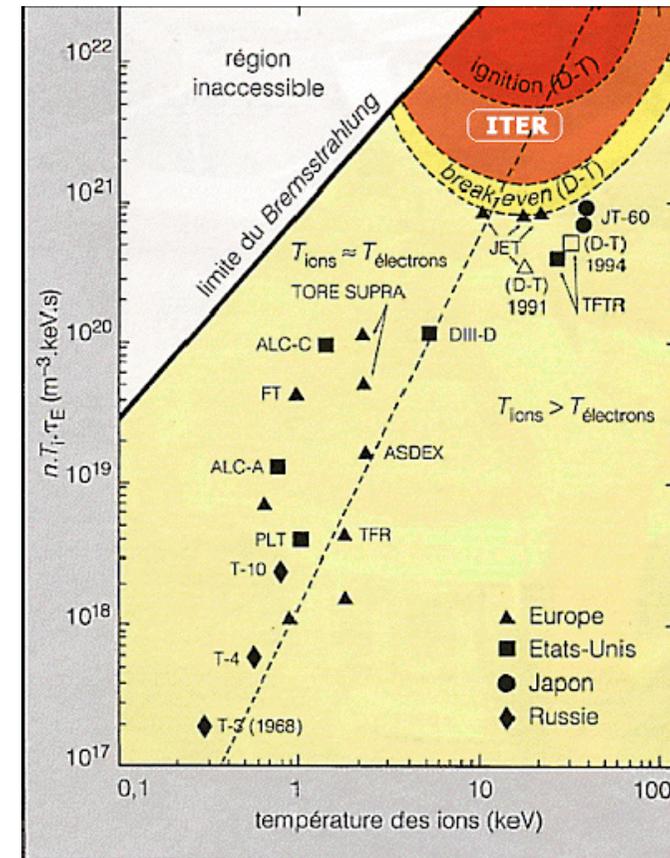
Densité * Temps confinement * Température = f (Température)

Obtenir le 'break-even':

- Plus d'énergie produite que d'énergie injectée pour alimenter
- > objectif du réacteur ITER

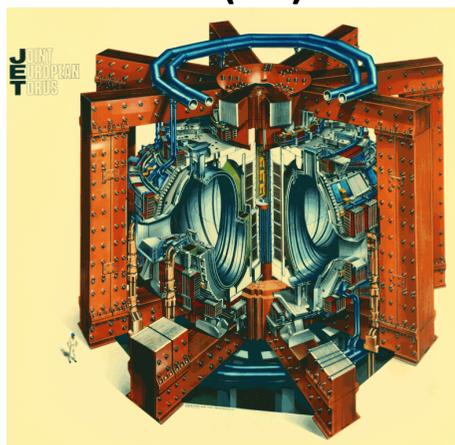
Obtenir l'ignition:

- réactions auto-entretenues
- > objectif du réacteur industriel DEMO



5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

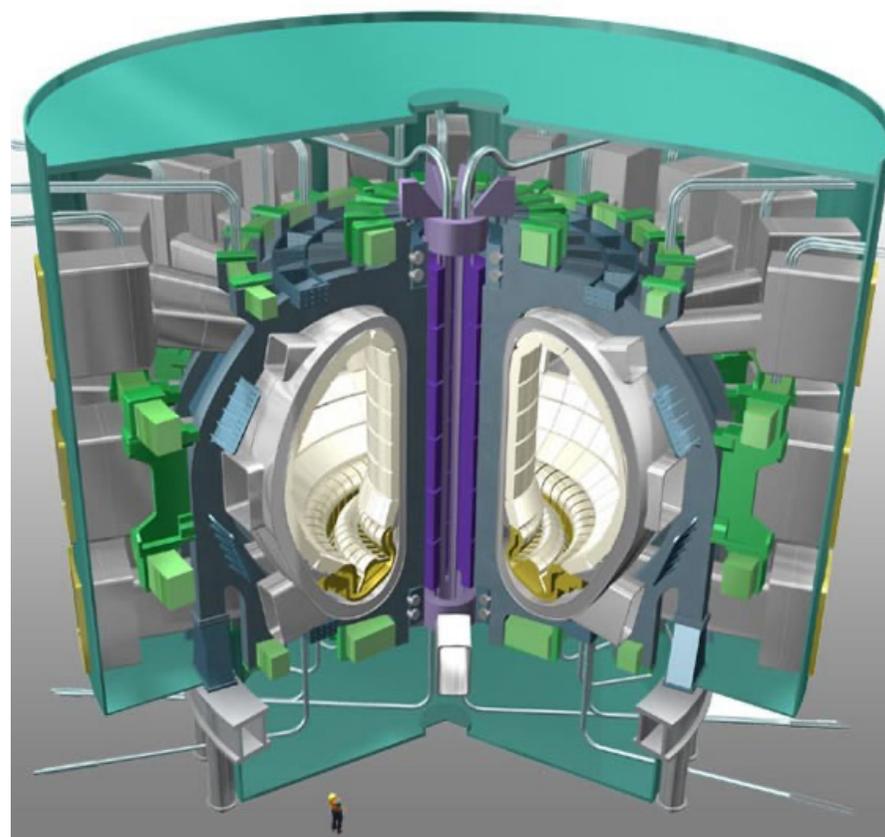
JET (UK)



ITER (futur tokamak)
à Cadarache - France

*International
Thermonuclear
Experimental Reactor*

en construction
10 ans de retard
opérationnel -> 2025



5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

ITER

<https://www.iter.org/fr/accueil>

Quelques chiffres

petit rayon du plasma : 2 m
grand rayon du plasma : 6,20 m
hauteur du plasma : 6,80 m
volume plasma : 840 m³
23000 t = 3,5 fois Tour Eiffel

(bâtiment -> 60 mètres de haut, 97 mètres de long,
60 mètres de large)

Champ magnétique -> 10 Tesla environ
Courant plasma -> 15 MA

En chantier depuis 2010

Il y a 3 ans



Premier objectif: 500 Méga-Watts thermiques

5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

ITER

<https://www.iter.org/fr/accueil>

Iter entame l'assemblage du réacteur de tous les superlatifs

Toujours plus spectaculaire. Après avoir reçu le 26 juin, un aimant électro-magnétique de 400 tonnes, le projet de réacteur de fusion nucléaire Iter réceptionne ce 20 juillet au port de Fos-sur-Mer un colis encore plus énorme: 600 tonnes. Partie d'Ulsan en Corée du sud, cette section de la chambre à vide du réacteur expérimental est débarquée ce lundi 22 juillet. Elle sera ensuite posée avec son berceau sur une remorque de 280 tonnes et 342 roues, le convoi de 800 tonnes -le plus lourd de l'histoire du démonstrateur mondial de fusion nucléaire- va parcourir dans les jours qui suivent les 104 kilomètres qui séparent l'étang de Berre du site d'Iter à Cadarache



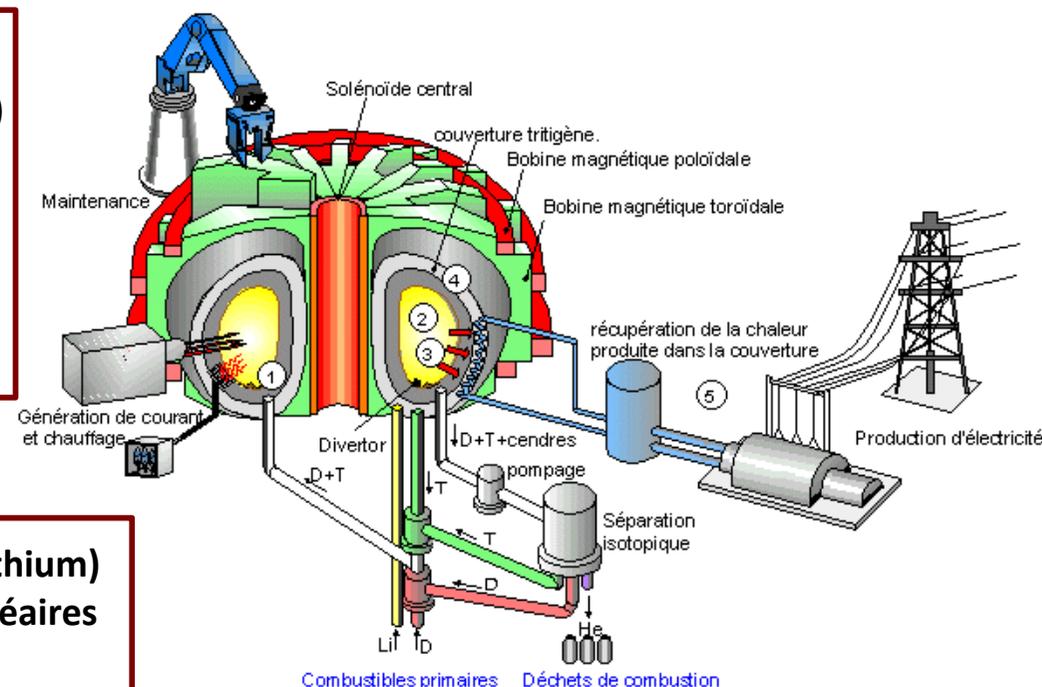
Extrait article

5. Etat actuel de la recherche sur la fusion par voie magnétique

Serait on loin d'un fonctionnement industriel ?

- Faisabilité de générer le Tritium à partir du Lithium (Tritium se désintègre et est radioactif à période courte)
- Deutérium extrait à partir de l'eau
- Faisabilité d'extraire l'Hélium

- Matière première -> importantes réserves (eau et Lithium)
- Pas de risque d'explosion comme dans centrales nucléaires
- Peu/pas de déchets radioactifs



MERCI C'EST FINI !

Merci à Thierry pour l'organisation