

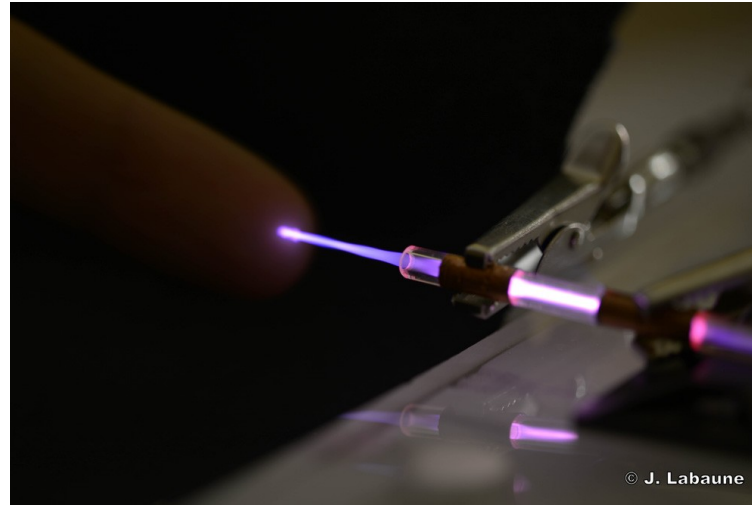
INTRODUCTION AUX PLASMAS ET À LA FUSION NUCLÉAIRE PAR CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

Cyrille Honoré

cyrille.honore@polytechnique.edu

Laboratoire de Physique des Plasmas

CNRS – Sorbonne Univ. – UPSaclay - ObsParis, École Polytechnique
91128 Palaiseau cedex, France



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY



Plan

- **1 Qu'est-ce qu'un plasma ?**
 - **Le 4ème état de la matière**
 - **Les plasmas de décharge**
- **2 Diversité des plasmas**
- **3 Quelques propriétés des plasmas**
- **4 La fusion nucléaire par confinement magnétique**
- **5 Historique de la fusion**

Qu'est-ce qu'un **plasma** ?

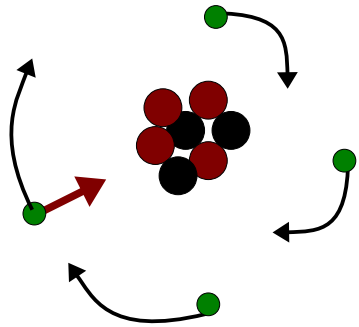
Où les trouve-t-on ?

À quoi peuvent-ils servir?

Une application particulière :
la fusion par confinement magnétique

La matière : noyaux et électrons

La matière est composée d'**atomes** :



Le noyau est composé de :

- neutrons (charge électrique nulle)
- protons (charge électrique positive)

Le noyau est entouré d'un nuage de :

- électrons (charge électrique négative)

Liaison noyau – électrons : force électrique :

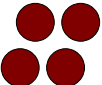
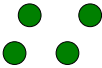
- les charges opposées s'attirent :



- les charges de même signe se repoussent :



La matière tend à être électriquement **neutre**.

 nombre de protons =  nombre d'électrons autour

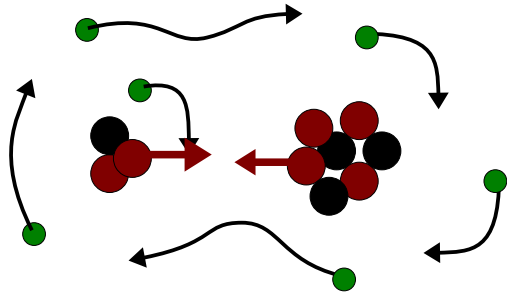
Énergie de liaison des électrons :

énergie nécessaire pour arracher un électron.

La matière : molécules et cristaux

Les molécules :

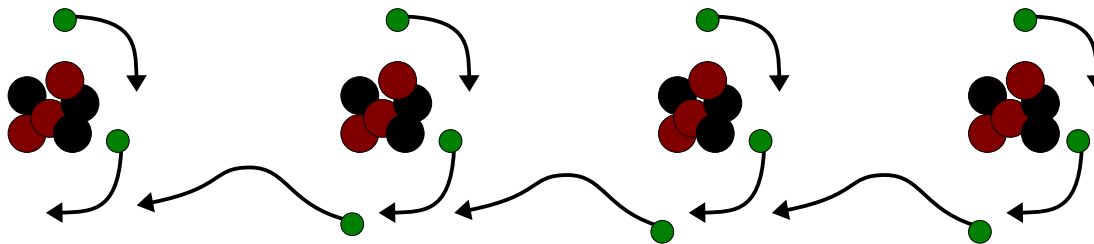
les atomes se lient entre eux en partageant des électrons :



Les 2 nuages se recouvrent :
l'attraction des noyaux par les électrons
est légèrement supérieure à la répulsion
des noyaux et des électrons entre eux
Les atomes sont alors liés entre eux

Les cristaux :

les liaisons chimiques sont telles que les noyaux s'organisent en une
structure rigide qui se reproduit sur de longues distances :



Parfois les électrons sont **libres** de circuler d'un noyau à l'autre : le cristal
est alors un métal : il conduit l'électricité.

Matière : chaleur et agitation

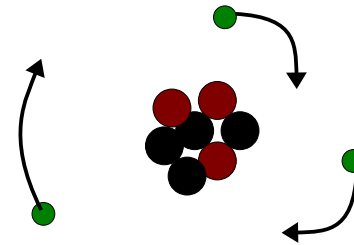
La matière se caractérise par sa température :

la température est reliée à l'énergie moyenne par molécule (ou atome du cristal).

Au **zéro absolu**

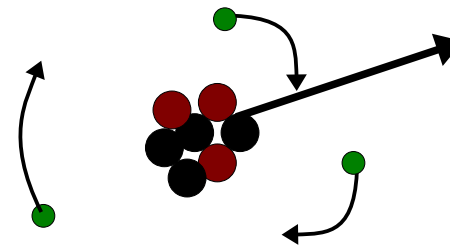
$T = -273,13^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{K}$ (Kelvin):

les noyaux sont immobiles



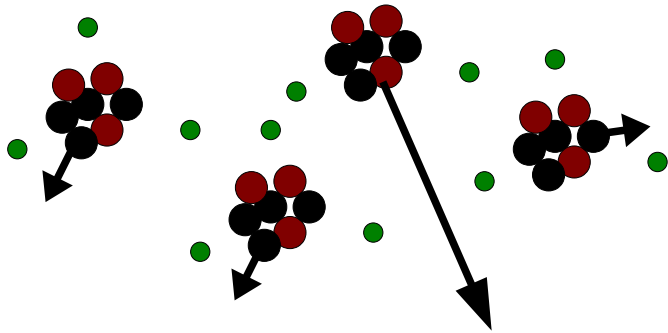
Plus on chauffe (en donnant de l'énergie), plus la température augmente :

les molécules ont une vitesse de plus en plus grande : c'est l'**agitation thermique**.

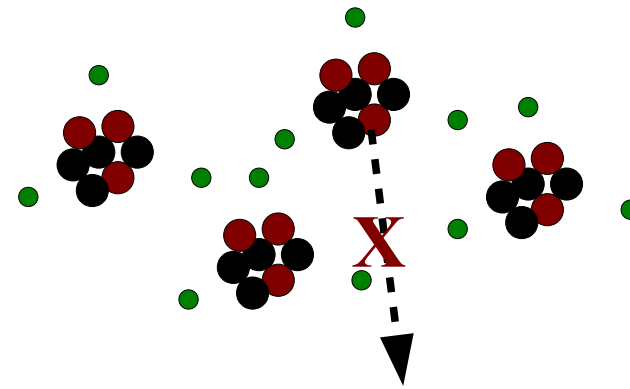


Les « 3 » états de la matière

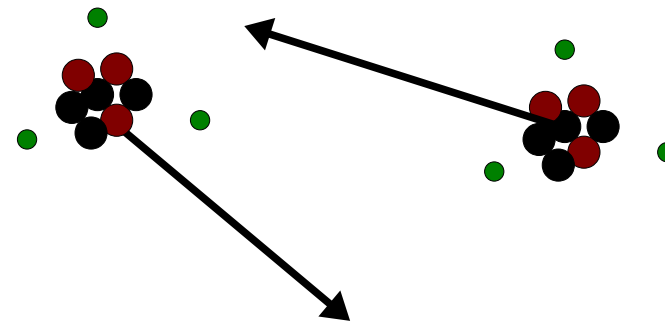
À faible température, la matière est **solide** : les molécules sont très proches les uns des autres et elles ne peuvent pas bouger les uns par rapport aux autres.



À plus haute température, la matière est **liquide** : les molécules sont toujours très proches les uns des autres mais elles peuvent bouger les uns par rapport aux autres.



À plus haute température, la matière est un **gaz** : les molécules sont éloignées les uns des autres et elles se déplacent librement.

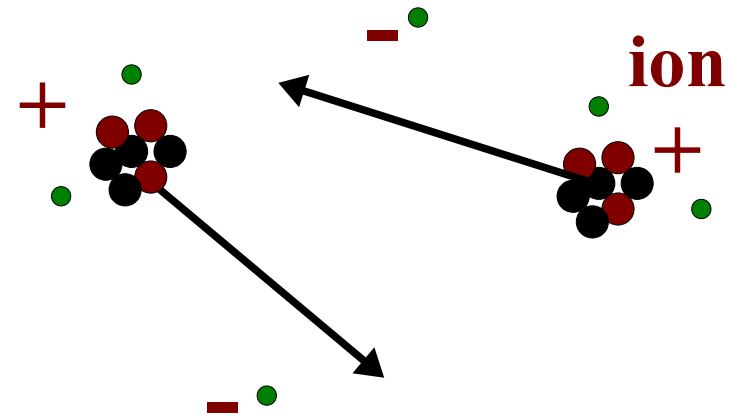


Plasma : le «4ème état», le plus chaud de la matière

À très haute température ($\gg 10\,000^\circ\text{C}$), la liaison noyau électrons est cassée, le gaz se transforme en gaz de particules chargées :

les **électrons libres** : charge négative

les **ions** (noyau + électrons en sous-nombre) : charge positive.



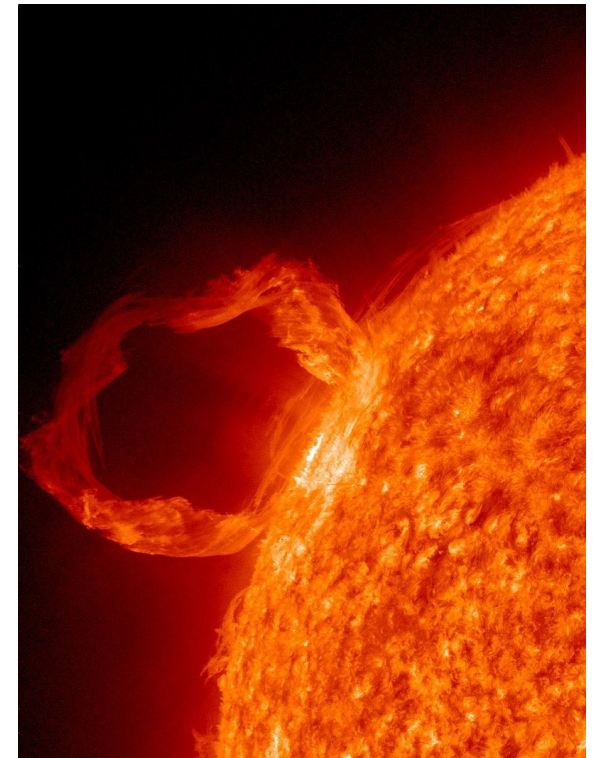
Comme les particules sont chargées électriquement, des forces électriques les relient : le gaz « ionisé » a un comportement très différent : c'est un **plasma**.

Le plasma est le «4è état» de la matière.

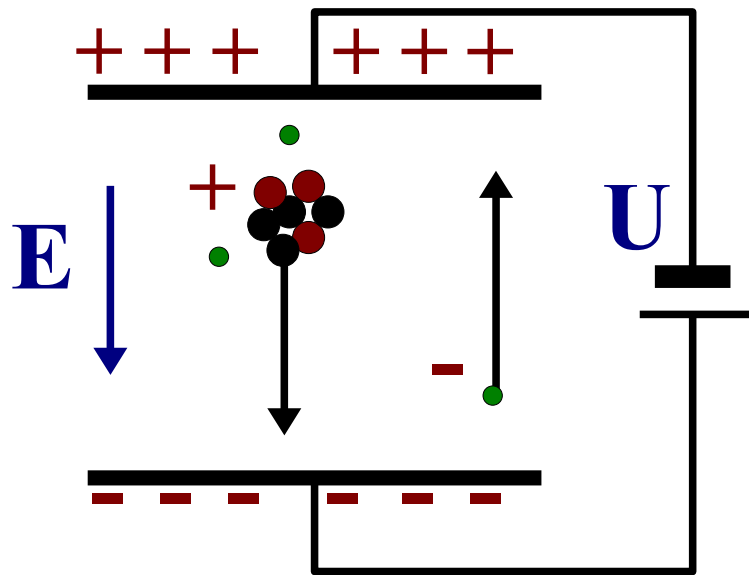
Potentiel de liaison des électrons : $U_{ionis} > 10\text{ V}$

Énergie d'ionisation : $q_e U_{ionis} > 10\text{ eV}$

Température électronique à atteindre pour que les électrons aient l'énergie suffisante : $T_e > 100\,000\text{ K}$



Plasma : Décharge DC



Une haute tension U crée une différence de potentiel entre 2 plaques.
cela un « champ électrique » E orienté vers les potentiels négatifs :

- les ions sont accélérés dans le sens du champ E ,
- les électrons sont accélérés en direction inverse.

Cette force électrique peut suffire à ioniser le gaz : arcs (éclairs) .
Si le gaz est déjà ionisé : l'accélération peut servir à graver un matériau ou à déposer un substrat.



Réaction d'ionisation



Plasma : décharge par ondes

Au lieu d'utiliser des champs constants, on peut aussi utiliser des champ oscillants à une fréquence **F** (nombre de cycle par seconde) :



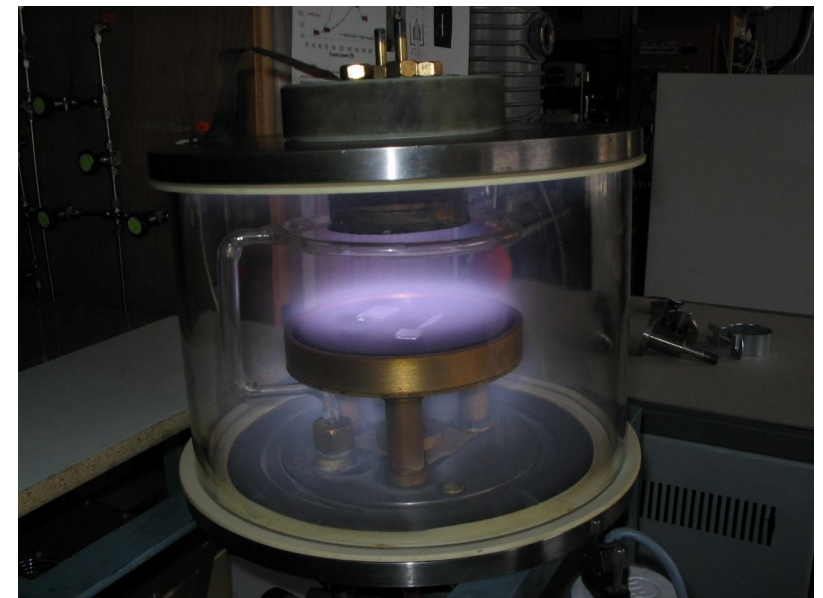
Les électrons oscillent à la même fréquence : ils peuvent gagner de l'énergie.
- cette énergie peut être suffisante pour les libérer : création d'un plasma par onde

- cette énergie peut accélérer l'électron libre : le plasma est chauffé

Les ondes électromagnétiques servent aussi à l'observation du plasma.

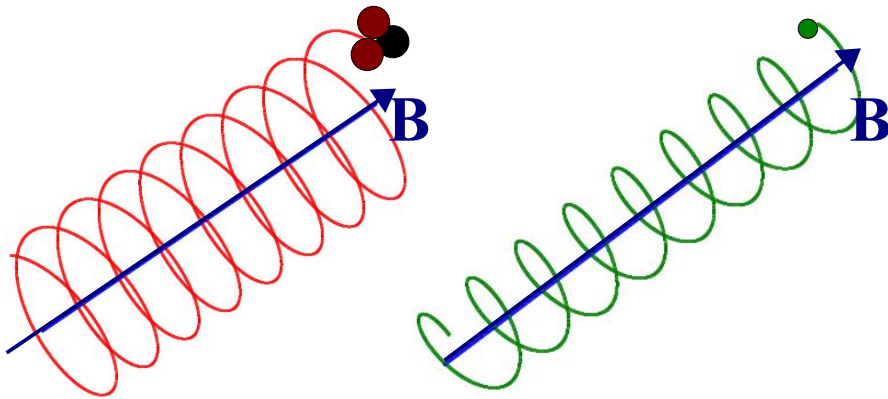
Les classes d'ondes électromagnétiques :

- ondes RF, radiofréquences $F = 10$ à 100 MHz (FM)
- micro-ondes $F = 1$ GHz à 1 THz
(mobiles, four, antennes satellites)
- lumière infrarouge (IR), visible et ultraviolette (UV)
- rayons X (imagerie corporelle)
- rayons gamma (réactions nucléaires)



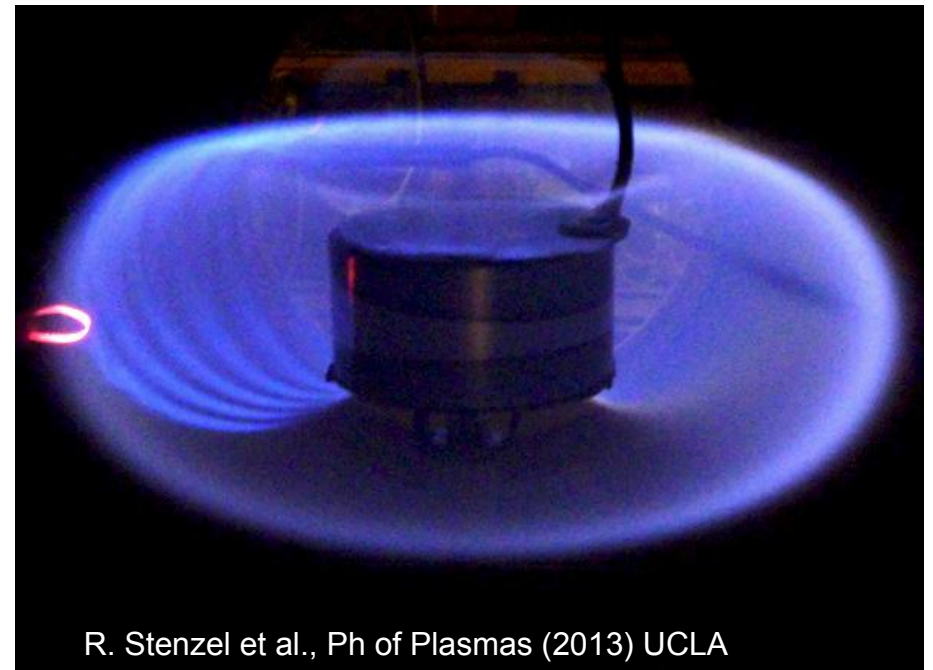
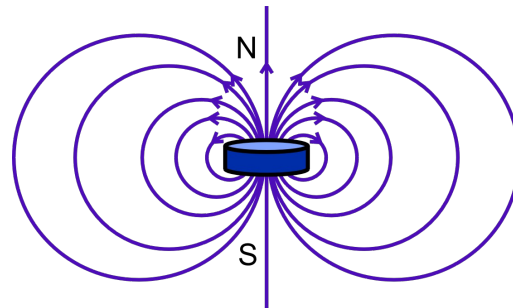
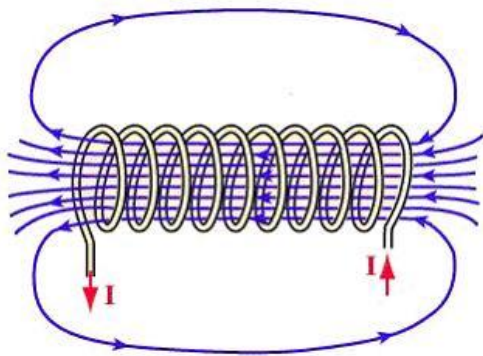
Plasma : 4ème état, le plus chaud de la matière

En présence de champ magnétique \mathbf{B} , les particules chargées ont un mouvement cyclotron les particules tournent autour des lignes du champ \mathbf{B} à la fréquence cyclotron



Le champ magnétique \mathbf{B} permet de confiner les particules dans 2 directions.

Le champ magnétique peut être créé par un aimant, une bobine, ou un solénoïde (bobine allongée)



R. Stenzel et al., Ph of Plasmas (2013) UCLA

Plan

- **1 Qu'est-ce qu'un plasma ?**
- **2 Diversité des plasmas**
 - **Plasmas spatiaux**
 - **Plasmas chauds de laboratoire**
 - **Plasmas froids de laboratoire**
 - **Plasmas industriels**
- **3 Quelques propriétés des plasmas**
- **4 La fusion nucléaire par confinement magnétique**
- **5 Historique de la fusion**

Plasmas : 99% de la matière connue

- **Cœur des étoiles :**

Le cœur des étoiles dense et chaud à cause de la gravité et de l'énergie produite par la fusion.

- **Couronne solaire :**

La matière est confinée dans la couronne par le champ magnétique solaire.

- **Vent solaire :**

Des jets de particules parviennent à s'échapper de la couronne solaire en direction entre autres, de la Terre.

- **Ionosphère (100 à 300 km d'altitude)**

l'interaction du vent solaire sur l'atmosphère, l'ionise partiellement en altitude.

- **Nébuleuses en émission**

chauffées par des photons émis par une étoile jeune à proximité, ou résidus d'une supernova.

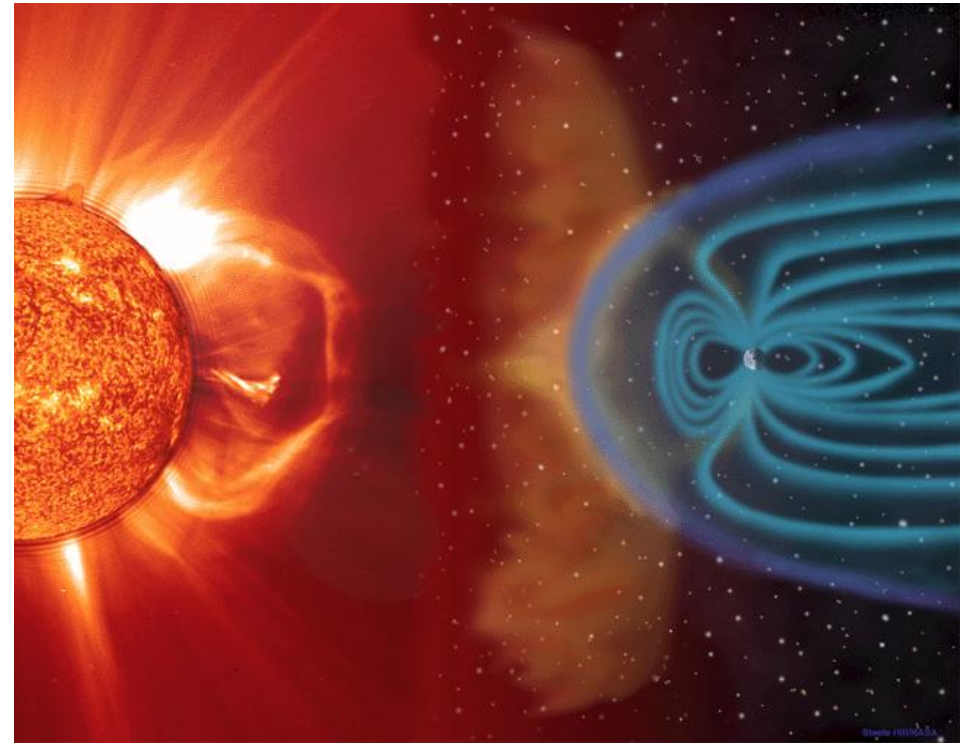
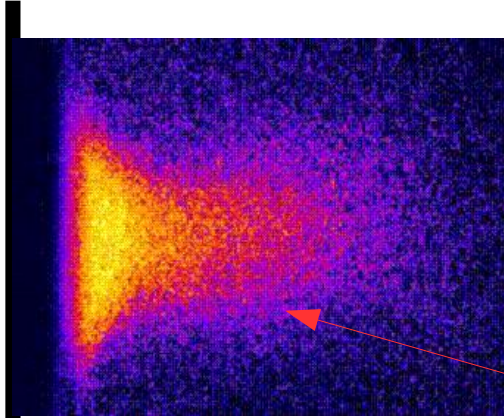


Photo depuis la navette, NASA



Nébuleuse du cygne, NASA

La fusion nucléaire en laboratoire : confinement inertiel



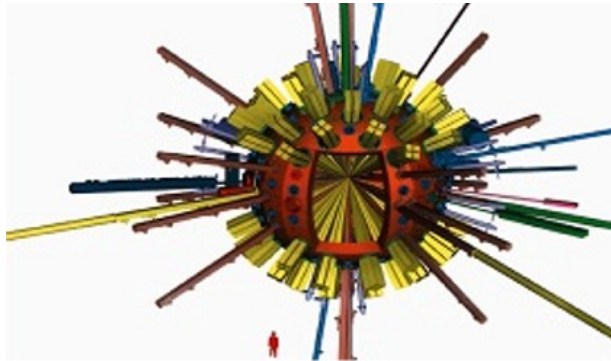
laser impulsionnel
intense :
1 kJ, 10ns ou 1 mJ, 1 fs



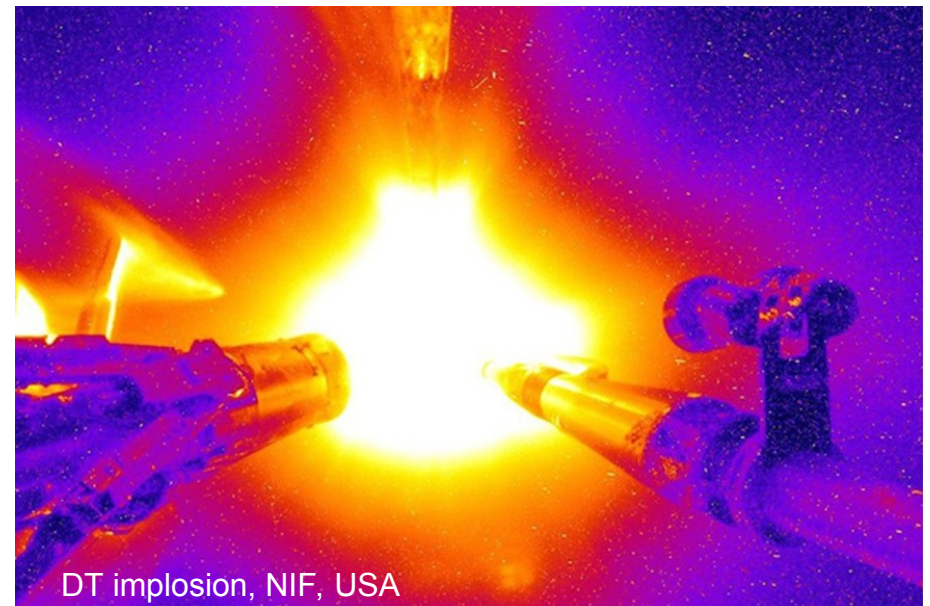
création de matière
dense et chaude

Cible solide

L'énergie d'une impulsion laser nanoseconde (voire femtoseconde) se dépose sur un temps très court sur un petit volume de matière qui peut atteindre des températures très élevées (10^6 K).



En concentrant plusieurs centaines de faisceaux laser sur une cible de 1g d'isotopes de l'hydrogène (D,T), on peut reproduire les conditions de la fusion thermonucléaire.



DT implosion, NIF, USA

Fusion nucléaire par confinement magnétique

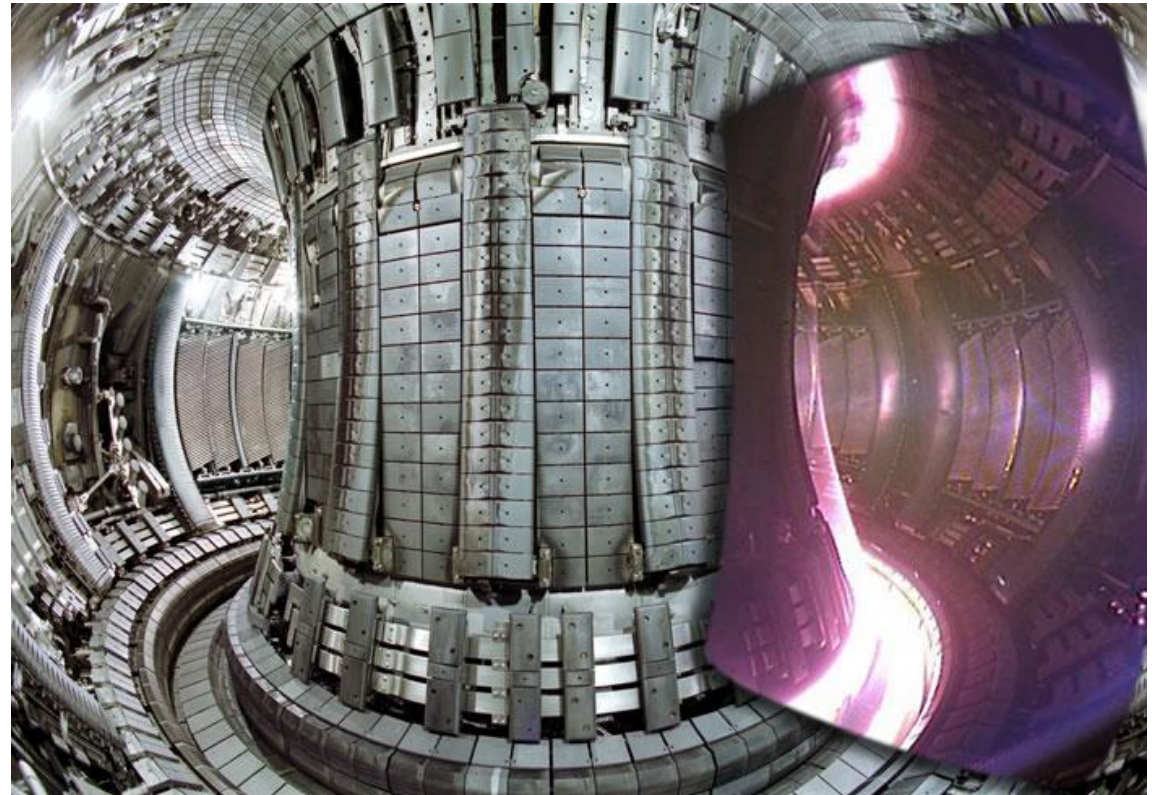
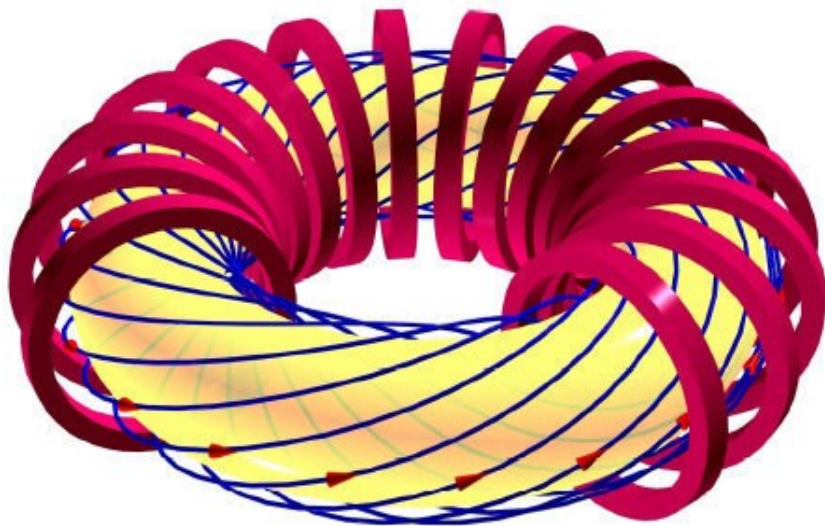
Il est possible d'atteindre en laboratoire les conditions de la fusion nucléaire. Le but est de produire de l'électricité à partir de cette réaction exothermique.

La densité électronique au cœur du plasma est de $n_e = 10^{20} \text{ m}^{-3}$

La température ionique est de $T_i = 100 \cdot 10^6 \text{ K}$.

L'enceinte a une forme d'anneau.

Ces conditions sont atteintes grâce la présence d'un champ magnétique qui suit la forme torique de l'enceinte.

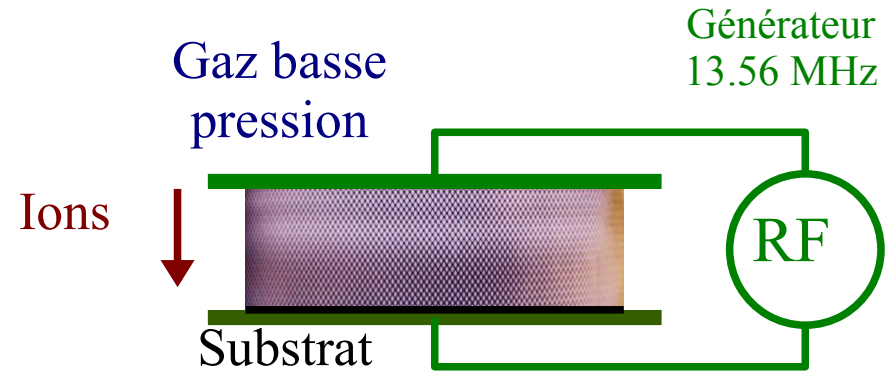


Décharges basse pression de laboratoire

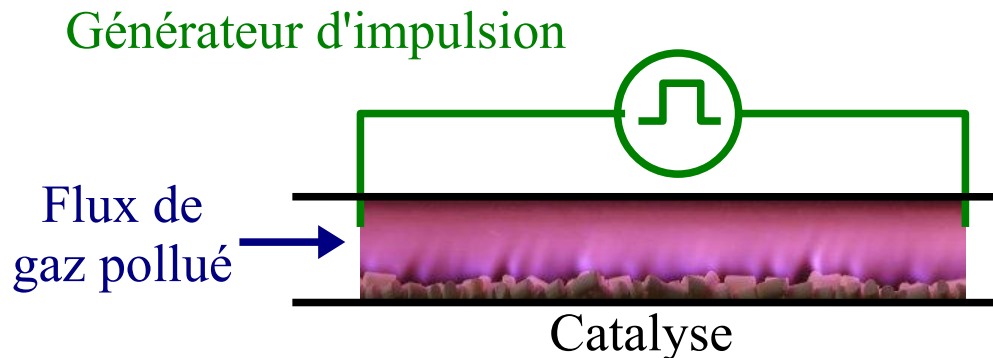
Plasmas de gravure et dépôt pour la micro-électronique :

Le champ électrique généré dans le réacteur accélère les ions vers le substrat.

Les réacteurs sont de différents types (capacitifs, inductifs, hélicon...).

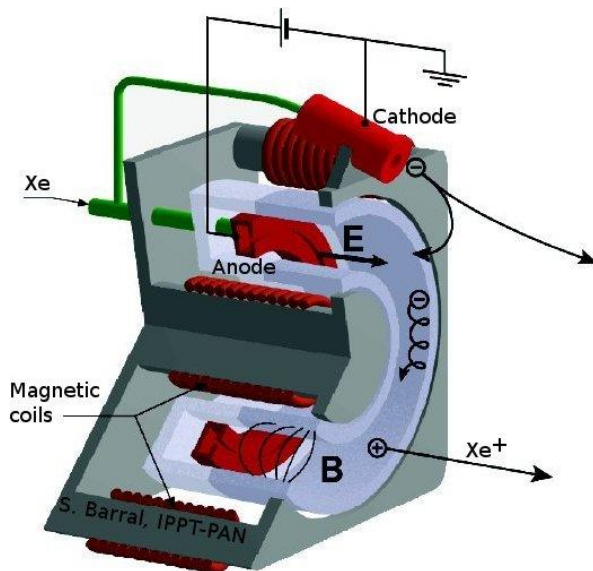
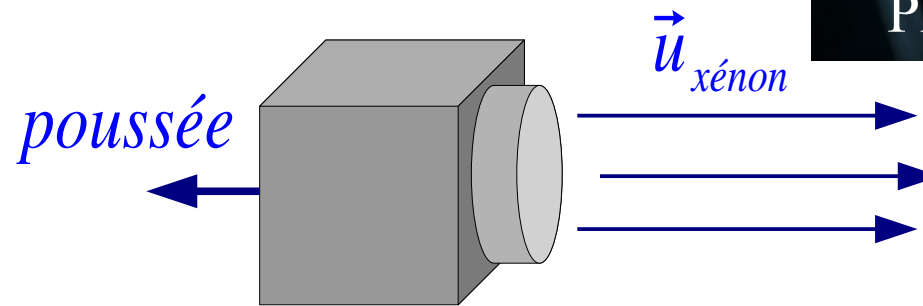


Plasmas pour la dé-pollution :
on cherche à éliminer les polluants par des réactions chimiques.
Le couplage plasma-catalyse permet une meilleure efficacité même à basse température.



Propulsion ionique

Dans l'espace, une poussée est obtenue en expulsant de la matière. L'efficacité de la poussée est proportionnelle à la vitesse des particules expulsées : elle est de l'ordre de 10 km/s pour les propulseurs à plasma.



Le propulseur à effet Hall permet des poussées faibles, mais très économes en matière :

Une tension de 300 V est mise entre une cathode extérieure et une anode en fond de canal. Le gaz xénon éjecté par l'anode est ionisé par les électrons venant de la cathode.

La présence d'un champ magnétique en sortie de canal permet de localiser dans cette zone, le champ électrique produit par la tension continue.

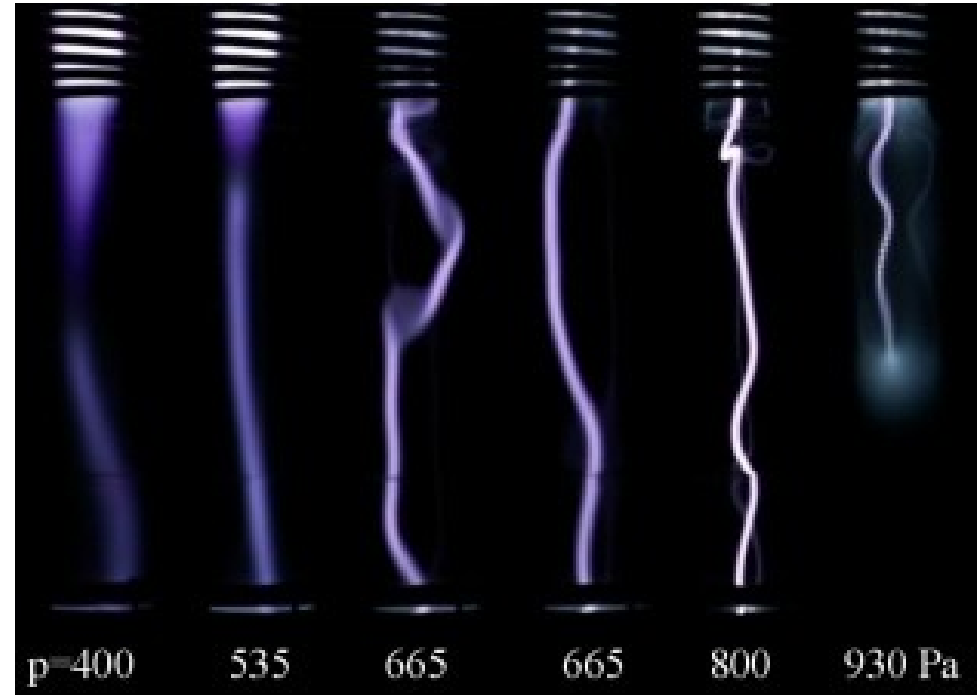
Les ions xénon atteignent des vitesses de l'ordre de 10 km/s.

Décharges à pression atmosphérique

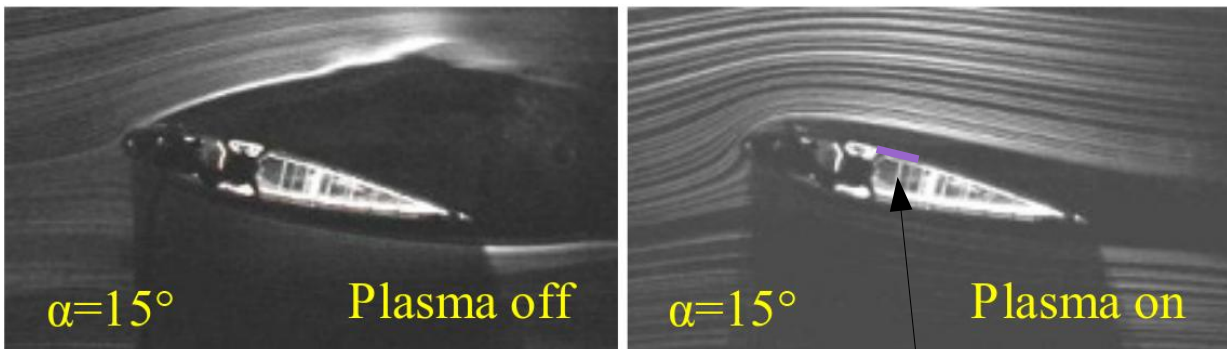
A haute pression de gaz, le plasma change de comportement. Plus la pression est haute, plus le plasma est filandreux.

- Arcs électriques (DC) : éclairs.
- Décharges AC (décharges coronale, décharges à barrière diélectrique).
- Jet à plasma (DC ou RF).

Décharges à barrière diélectrique (DBD) : Elles évitent la forme filandreuse du plasma. Elles sont capables de contrôler un écoulement aérodynamique à pression atmosphérique.

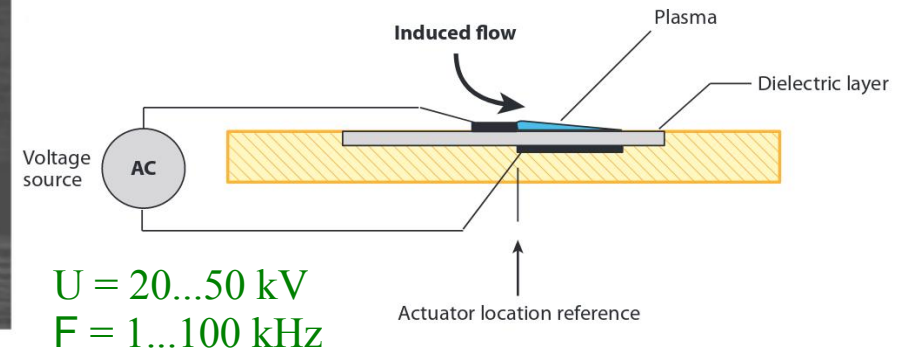


P. Boubert et al., Coria, plasmas.free.fr



Y. Akansu et al., Web of Conf. (2013)

DBD



T. Corke et al., Ann. Rev Fluid Mech. (2010)

Plasmas pour la médecine

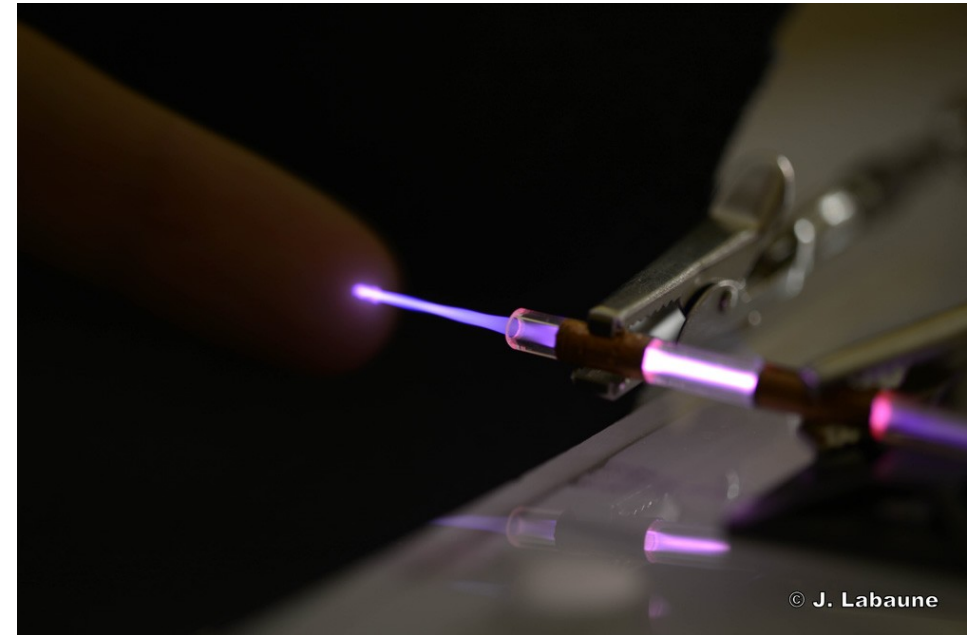
L'application des plasmas pour la médecine est un domaine de recherches en développement.

Plasmas pour **traitement direct** :

- jets plasmas (continus ou impulsionnels) :
 - diamètre : quelques mm,
 - longueur : plusieurs dizaines de cm,
- décharges à barrière diélectrique.

Applications :

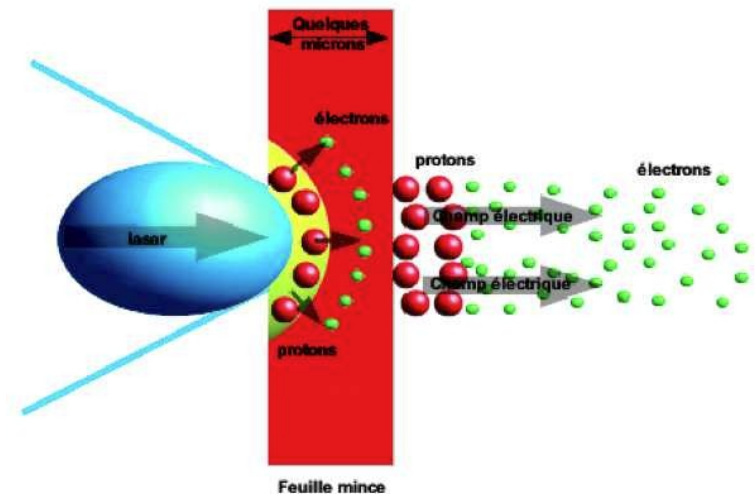
- désinfection,
- cicatrisation de la peau,
- traitement des cancers.



Plasmas utilisés comme **sources de rayonnement** utilisées pour le traitement et le diagnostic.

- rayonnement UV, X...
- accélération de proton par laser impulsionnel pour la protonthérapie (traitement des cancers).

...

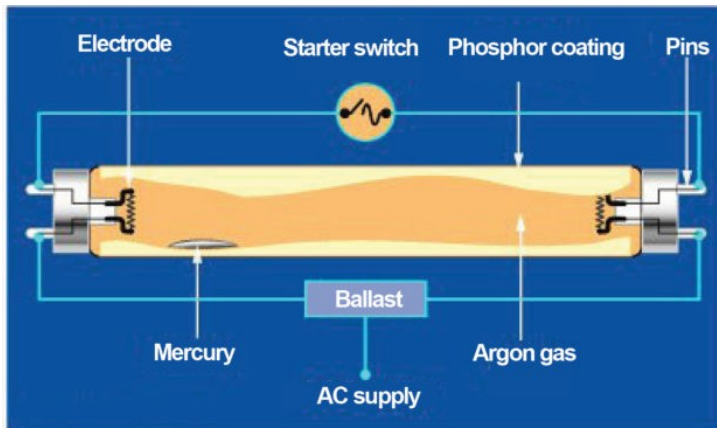
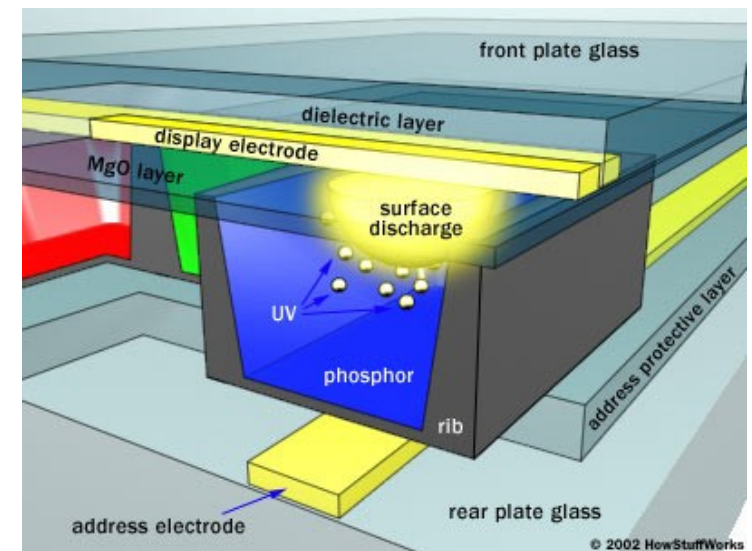


Plasmas issus de l'industrie



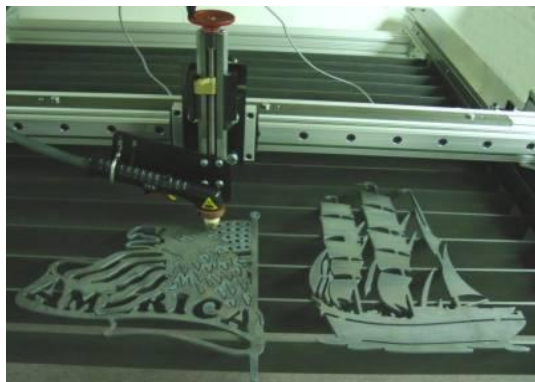
1^{er} écran à plasma, Fujitsu (1995)

Écrans à plasmas :
la lumière est produite par une décharge à barrière diélectrique.

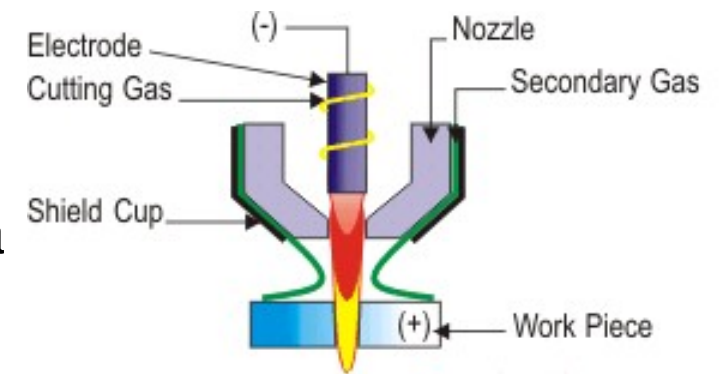


EE Publishers (2017)

Lampes fluorescentes :
La lumière est produite par une décharge AC dans un gaz rare. La lumière UV produite est transformée en lumière visible par une couche de phosphore



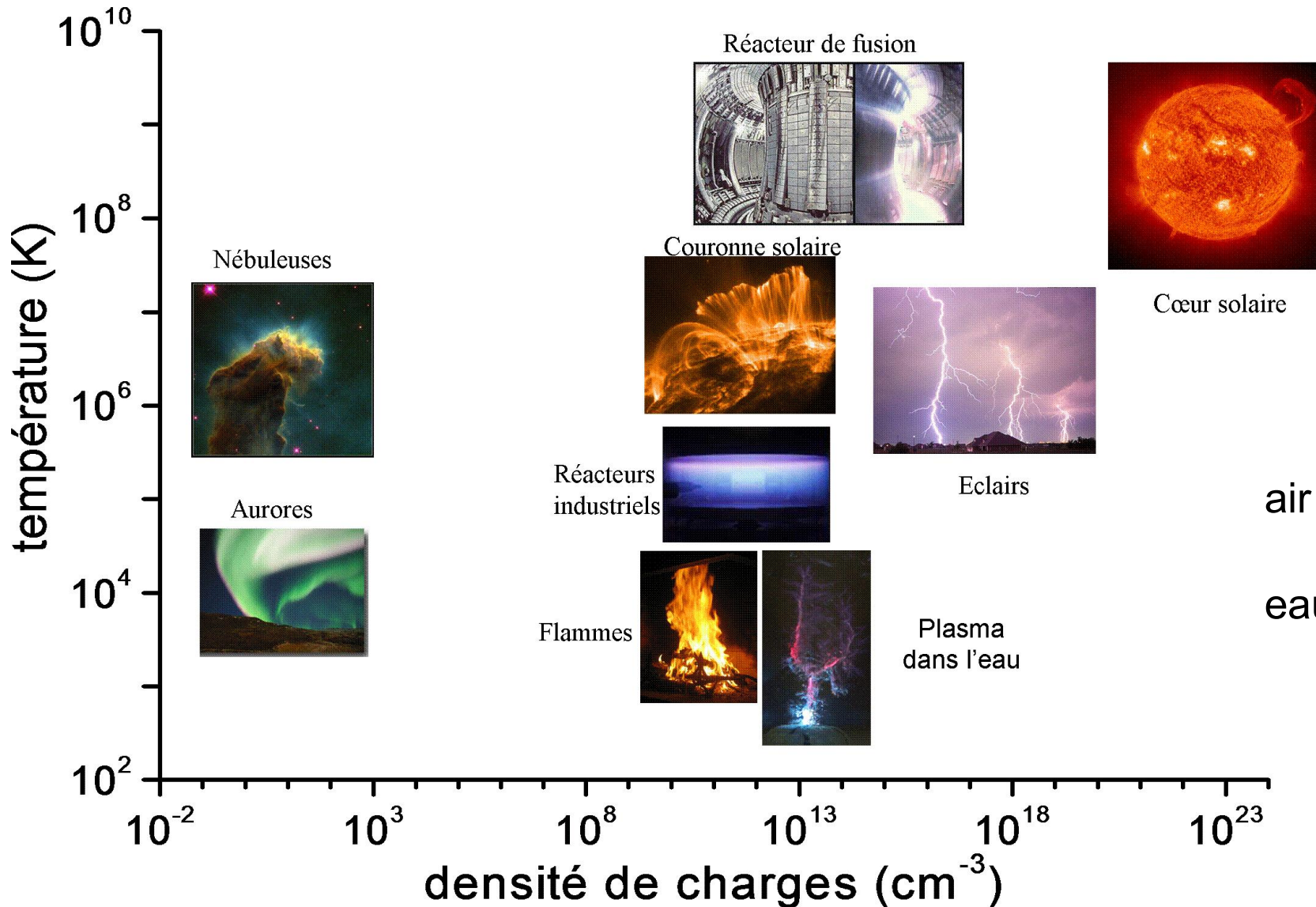
Découpe par plasma
La découpe est obtenue par un jet à plasma. La matériau découpé sert de seconde électrode.



Azom.com™

Diversité des plasmas

Les plasmas prennent des formes très diverses en fonction de leur densité de charge ou de leur température électronique.



air ambiant :

$$n_n \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

eau liquide ou solide :

$$n_n \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Plan

- **1 Qu'est-ce qu'un plasma ?**
- **2 Diversité des plasmas**
- **3 Quelques propriétés des plasmas**
 - **Un milieu quasi neutre et conducteur à basse fréquence**
 - **Un milieu transparent à haute fréquence**
- **4 La fusion nucléaire par confinement magnétique**
- **5 Historique de la fusion**

Propriétés des plasmas

Le plasma est un **gaz ionisé** (au moins partiellement).

Il est généralement obtenu par **chauffage** ou par **décharge** électrique dans un gaz.

Le plasma est composé de particules chargées. les ions et les électrons. Mais les forces électriques sont très intenses : il est très difficile de séparer les charges positives et négatives : **un plasma est presque partout quasi-neutre** (sauf aux petites échelles). Les dynamiques des ions et des électrons sont fortement liées par les forces électriques.

Le plasma contient des charges électriques libres : le plasma se comporte comme un **conducteur** pour des fréquences inférieures à la fréquence plasma (qui dépend de la densité du plasma).

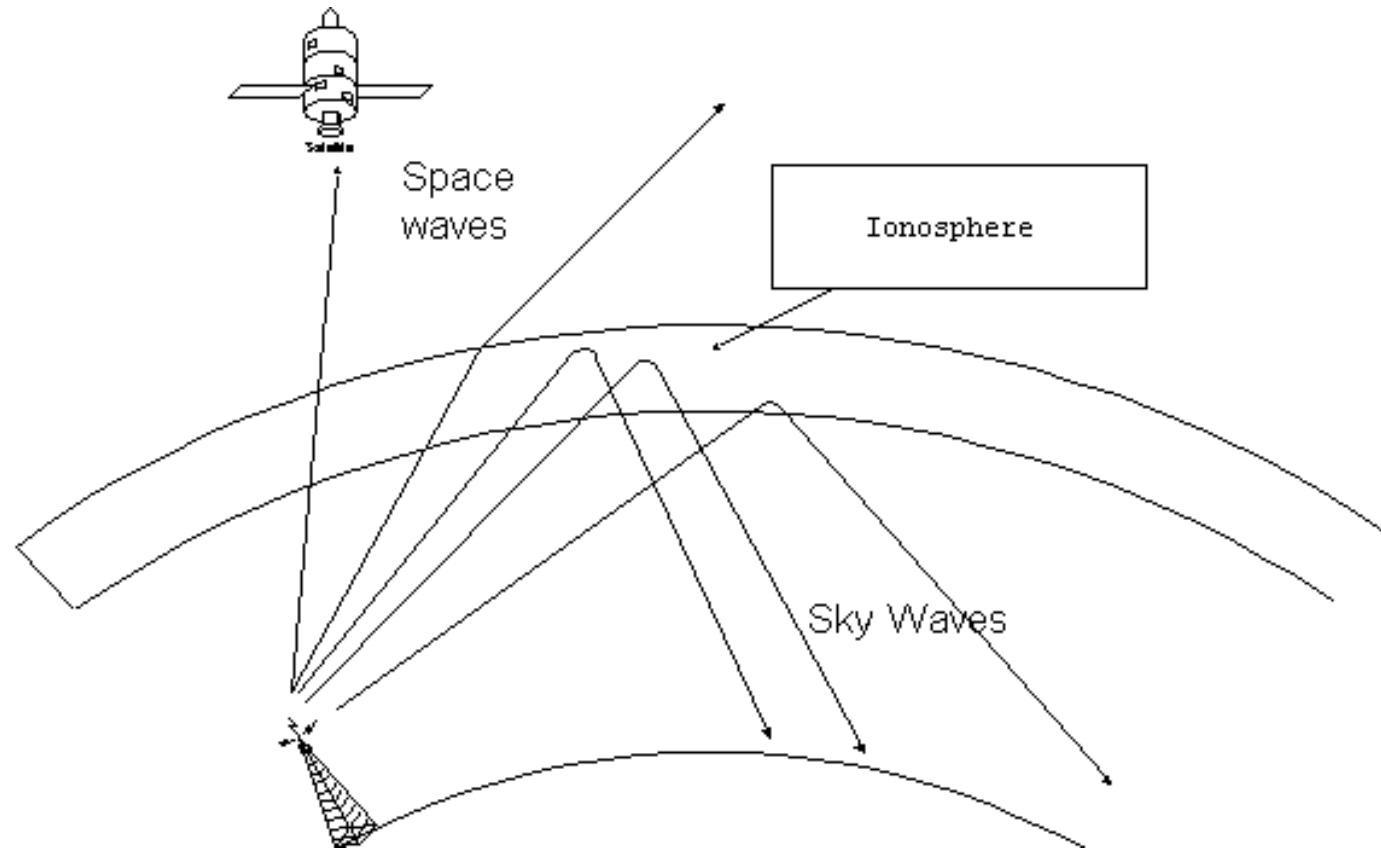
Pour des fréquences supérieures à la fréquence plasma, le plasma se comporte plus comme un gaz : il est transparent à la lumière.

Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma

L'ionosphère laisse la plupart des ondes électromagnétiques (UV, visible, infrarouge, micro-ondes).

Elle laissera aussi passer une grande partie des ondes radio.

Seules les ondes courtes seront réfléchies : $F \leq 9 \text{ MHz}$



Plan

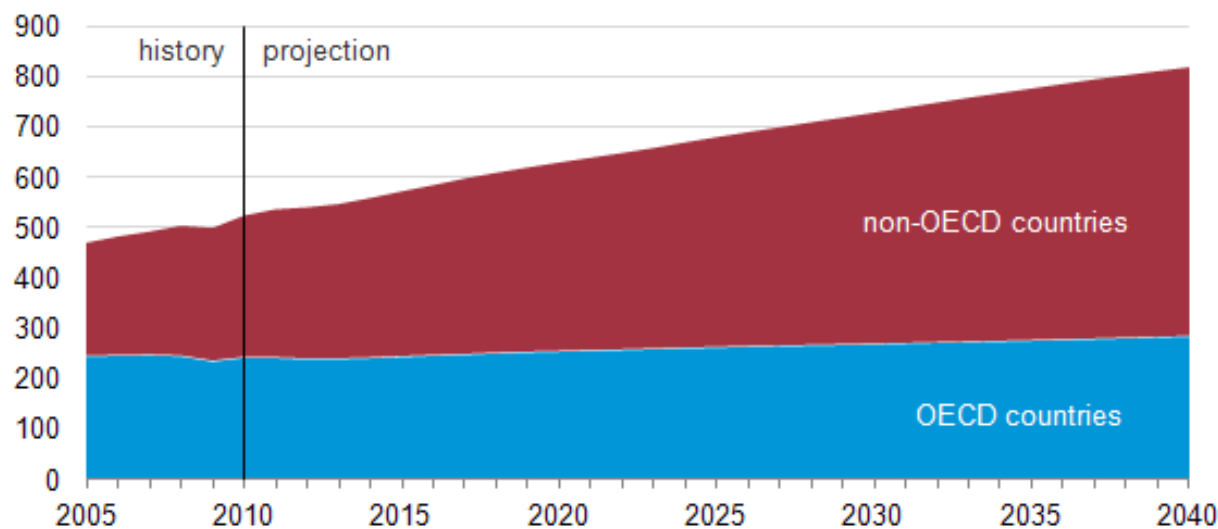
- **1 Qu'est-ce qu'un plasma ?**
- **2 Diversité des plasmas**
- **3 Quelques propriétés des plasmas**
- **4 La fusion nucléaire par confinement magnétique**
 - **Le contexte de la fusion**
 - **la réaction de fusion**
 - **le confinement magnétique**
- **5 Historique de la fusion**

Contexte de la fusion : besoins en énergie

L'intérêt pour la fusion contrôlée par confinement magnétique vient du besoin de développer de nouvelles sources d'énergies pour répondre à l'**augmentation des besoins en énergie** : la population mondiale continue d'augmenter, et le développement économique s'accompagne d'une augmentation de la consommation par habitant.

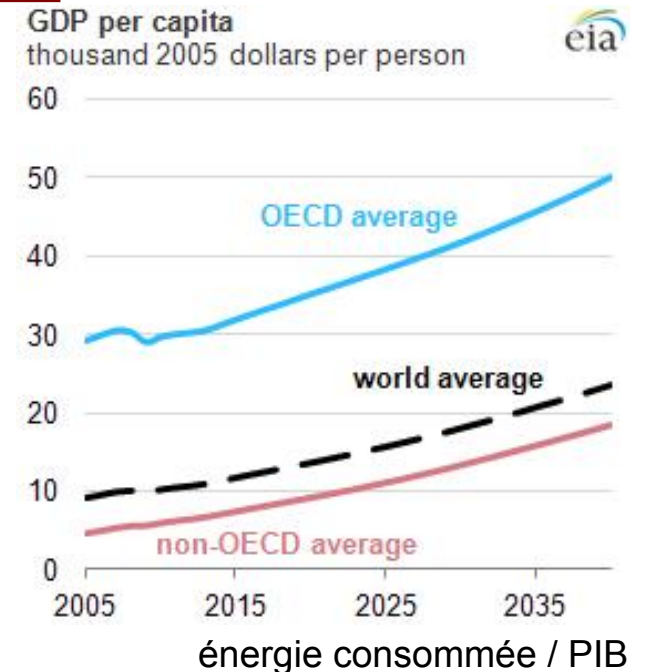
Les efforts pour réduire la consommation d'énergie ne suffisent à contrecarrer l'accroissement de l'activité.

Projected world primary energy consumption
quadrillion Btu

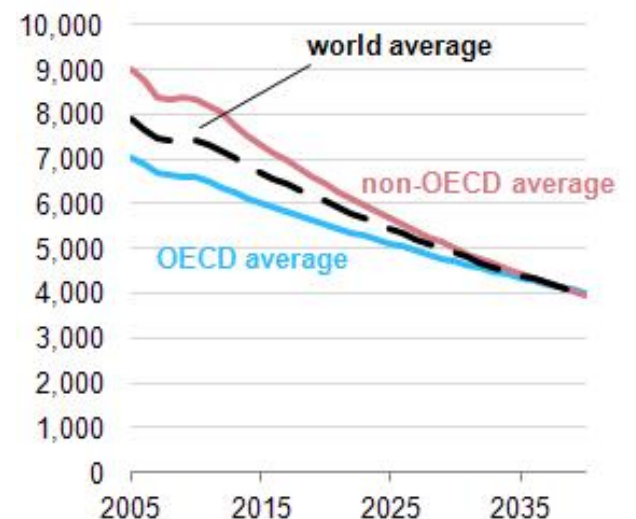


US Energy Information

PIB / habitant



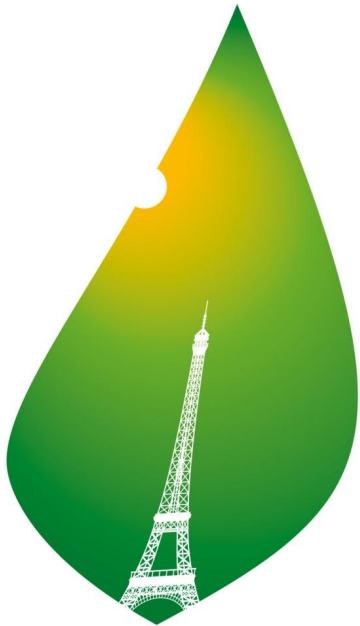
Delivered energy use per unit GDP
Btu per 2005 dollar



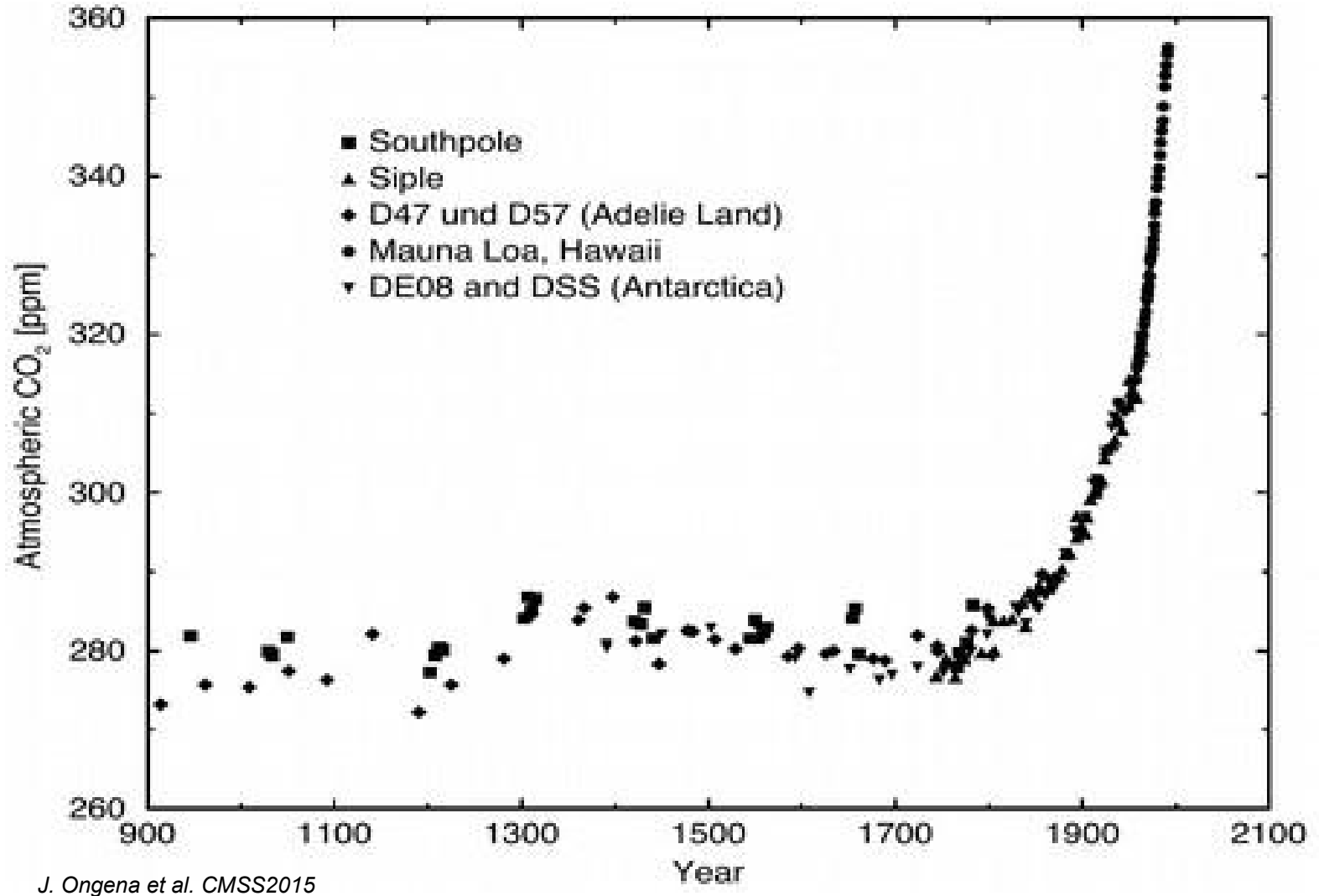
Réduction des énergies fossiles

Le réchauffement climatique impose en plus de **réduire la consommation des énergies fossiles** :

- le charbon
- le pétrole
- le gaz



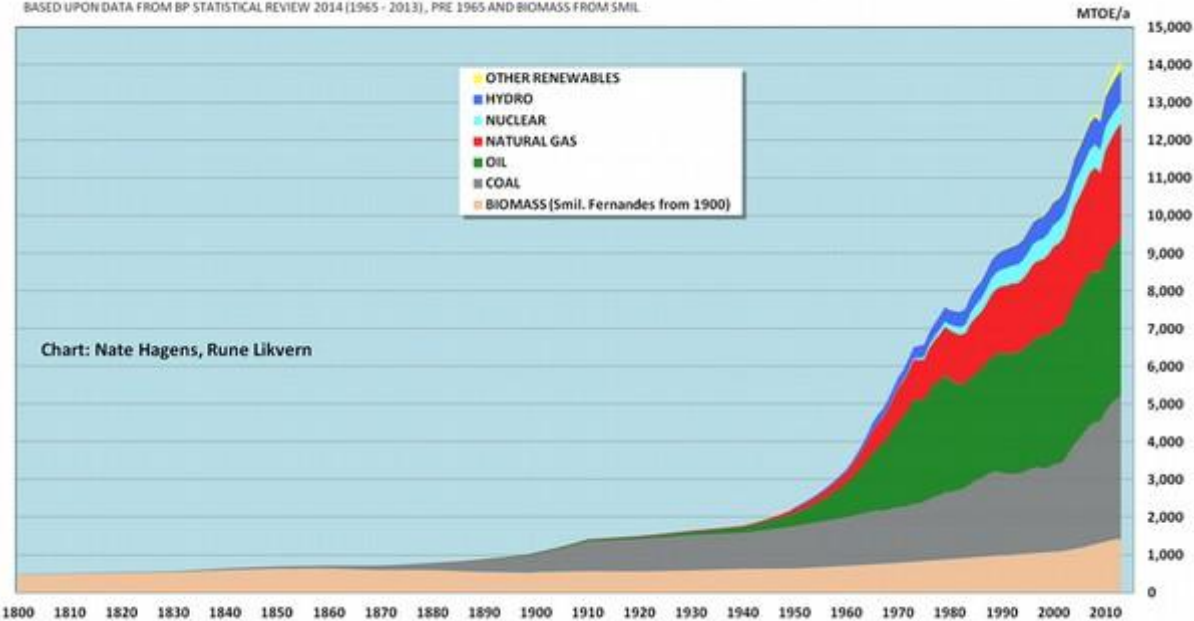
COP21 • CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE



Développement des énergies renouvelables

GLOBAL ENERGY CONSUMPTION AND MIX 1800 - 2013

BASED UPON DATA FROM BP STATISTICAL REVIEW 2014 (1965 - 2013), PRE 1965 AND BIOMASS FROM SMIL



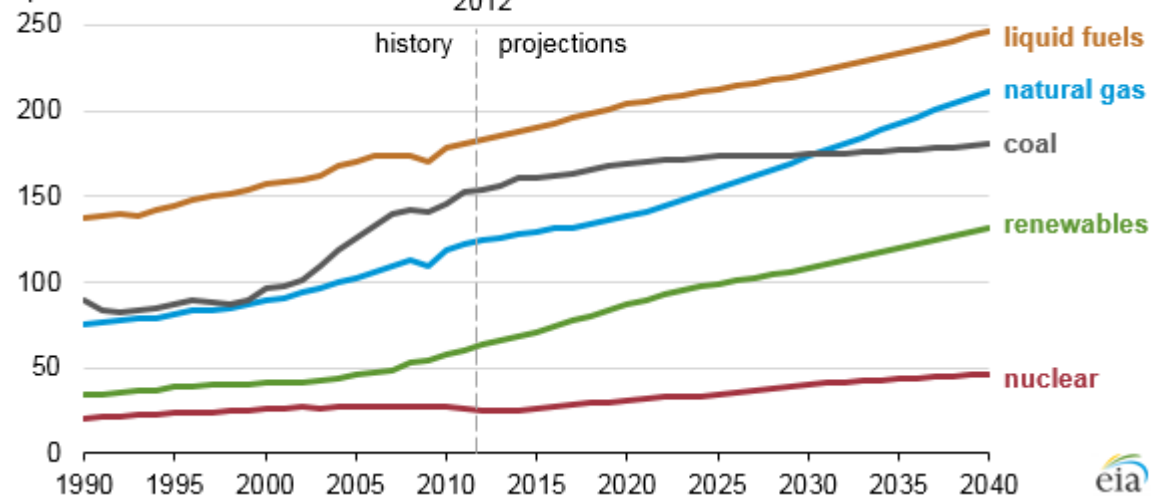
L'augmentation de la consommation d'énergie au cours du 20^e siècle s'est surtout fait grâce aux énergies fossiles.

La réponse à l'augmentation de la demande en énergie au 21^e siècle passe par **une augmentation très importante des énergies renouvelables.**

Les projections actuelles indiquent que les énergies renouvelables ne suffisent pas à compenser la réduction de la part des énergies fossiles.

World energy consumption by source, 1990-2040

quadrillion Btu



Fission nucléaire

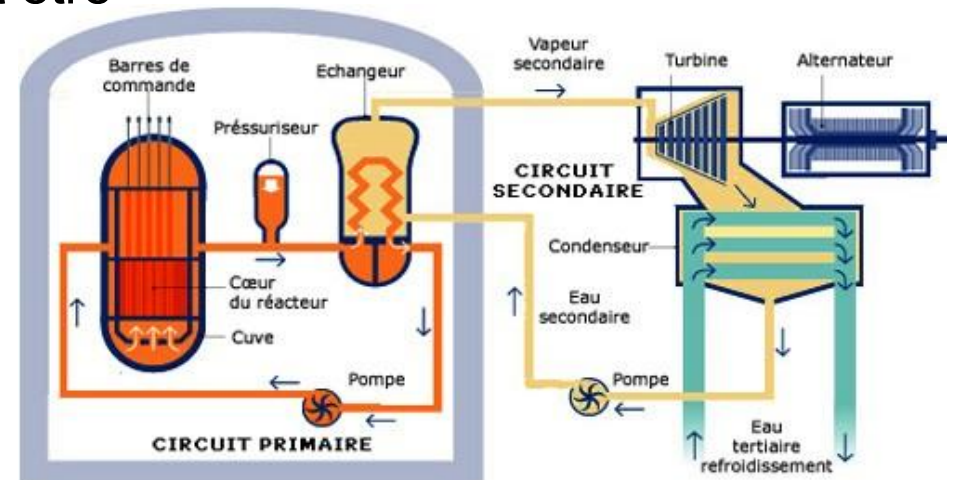
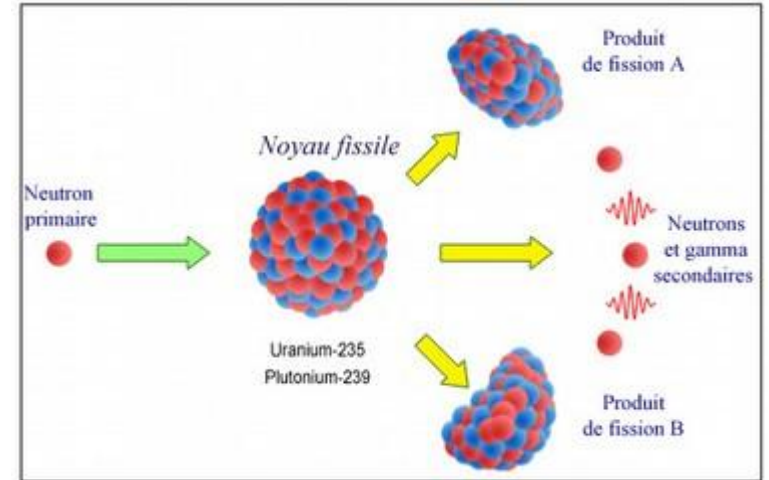
Une source d'énergie utilisée est la fission nucléaire de noyaux lourds.

La plupart des centrales nucléaires actuelles utilisent l'uranium 235.

La fission nucléaire a l'avantage de ne pas produire de CO₂.

Elle présente des inconvénients :

- la réaction est une **réaction en chaîne** : il y a un risque d'emballement.
- Même quand les barres de contrôle sont descendues, le cœur continue de produire de la chaleur et doit être refroidi.
- certains produits de fission sont des éléments **radioactifs à très longue durée de vie**.
- il y a un risque de **prolifération**.



laradioactivite.com

Fusion nucléaire

L'alternative est la fusion nucléaire.

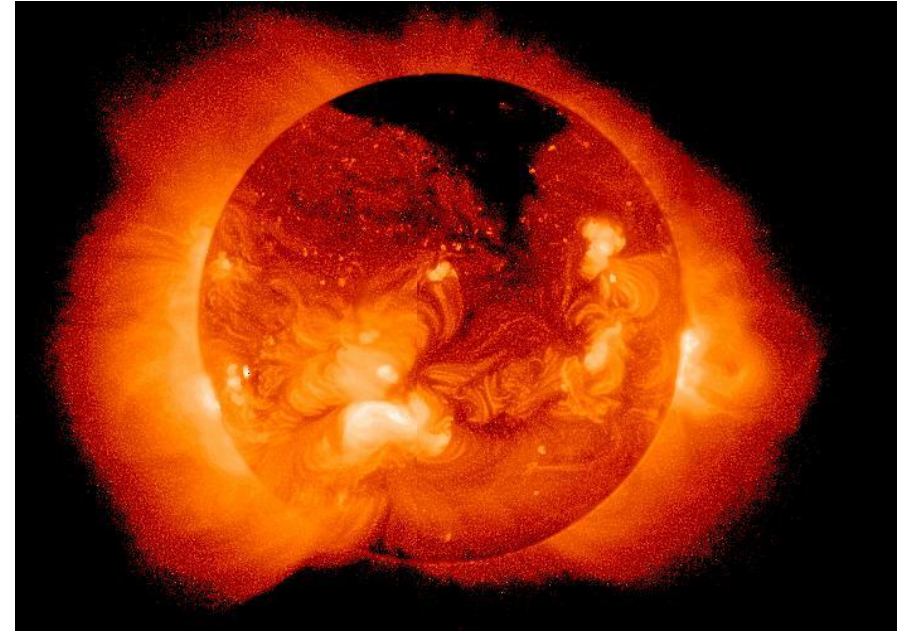
La réaction est essentielle dans l'univers : c'est le moteur des étoiles.

Le soleil est composé de 70% d'hydrogène et 30% d'hélium. À cause de sa masse (et de la gravité), sa température centrale est 15 000 000 K, et sa densité est de 150.

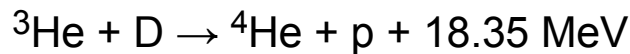
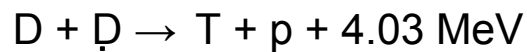
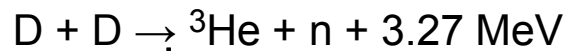
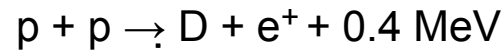
Ces conditions suffisent à engendrer la **fusion de l'hydrogène**.

Cette réaction est néanmoins très difficile à provoquer : le soleil produit $8\text{W}/\text{m}^3$ grâce à la fusion.

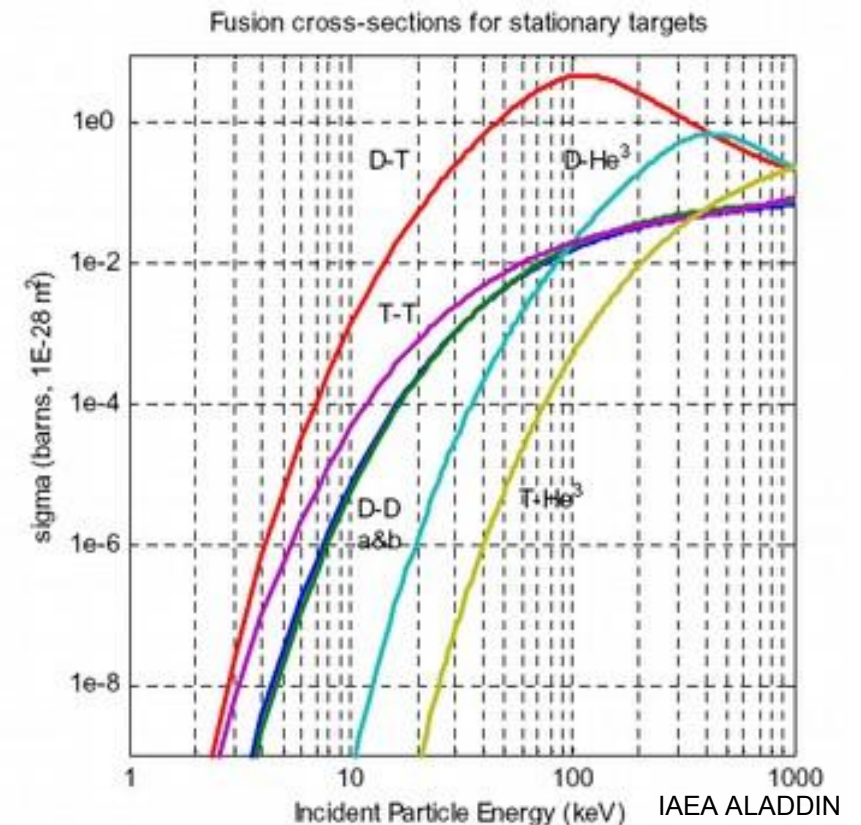
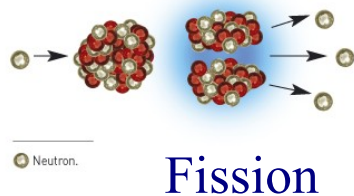
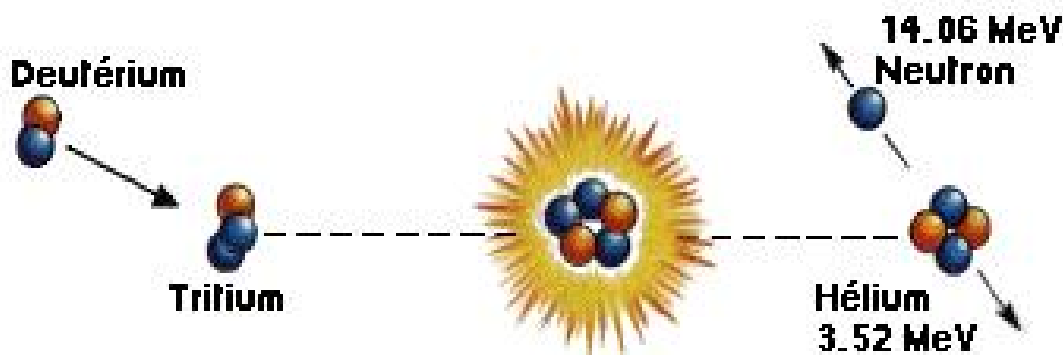
Ce faible niveau de production d'énergie suffit à équilibrer la pression due à la gravitation, et garantir une durée de vie de 10 milliards d'année.



Section efficace des fusions de noyaux légers



La réaction de fusion n'est possible que si l'énergie des noyaux incidents est suffisante pour **s'opposer à la répulsion électrique**. La réaction avec la section efficace la plus favorable est la réaction D-T.



Quantité de ressources nécessaires

La limite des ressources en matière première pour l'énergie est une question cruciale. La densité d'énergie libérable par unité de masse de combustible est 1 000 000 de fois supérieure pour la fusion nucléaire, que pour les sources d'énergie par réaction chimique, comme le charbon, le pétrole et le gaz.

Le fonctionnement d'une centrale thermonucléaire de 1 GW pendant 1 an ne nécessiterait que 250 kg de deutérium et tritium.

Fuel	Energy density (MJkg ⁻¹)
Nuclear fusion of hydrogen	300,000,000
Nuclear fission of uranium 235	77,000,000
Liquid hydrogen	143
Natural gas (compressed to 200×10 ⁶ Pa)	54
Petrol	46

L. Colangelo et al. Pitt.edu

METHOD	ANNUAL FUEL CONSUMPTION FOR 1000MW,el. (typical size of a single large electric power plant)
Coal	2 700 000 tonnes
Oil	1 900 000 tonnes
Fission	28 tonnes of U
Fusion	100 kg D and 150 kg T

J. Ongena et al. CMSS2015

Ressources de la fusion

La réaction envisagée nécessite du deutérium et du tritium.

Le deutérium est stable et abondant dans l'eau de mer.

Le tritium est instable : sa durée de vie est de 12,3 ans.

Les stocks existants, produits par les réacteurs à fission actuels, ne suffiront que pour les réacteurs expérimentaux (comme ITER).

Le tritium devra être produit dans le réacteur : les neutrons produits par la fusion serviront à sa production, par réaction sur du lithium. **Une couverture de lithium** entourera le plasma de fusion pour produire le tritium. La couverture comportera aussi un composant multiplicateur de neutrons, pour compenser les neutrons perdus.

La part des neutrons produits par la fusion qui n'interagira pas avec la couverture de lithium sera principalement arrêtée par l'enceinte à vide entourant le plasma.

Le lithium est stable et abondant sur terre.

La cendre : l'hélium est stable et inerte.



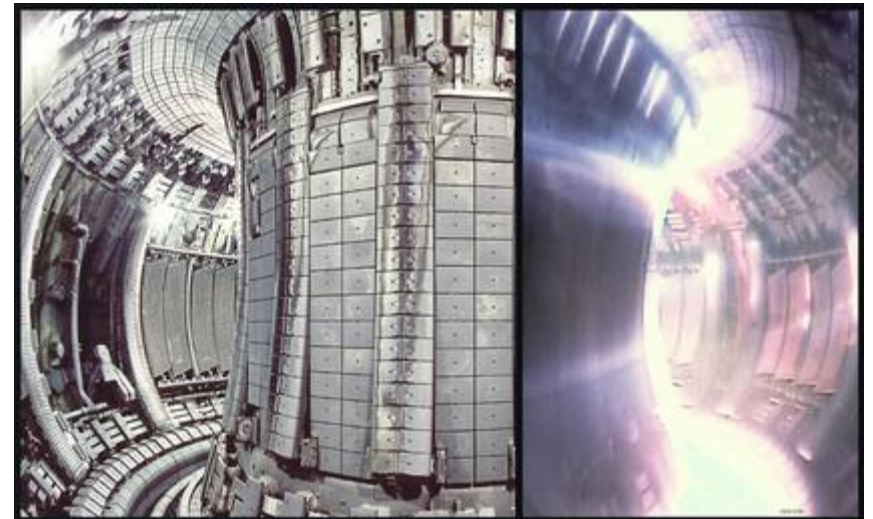
FUSION FUEL	ENERGY CONTENT (TWyr)	YEARS OF USE TO SUPPLY WORLD ELECTRICITY NEEDS (AT 2006 LEVELS)
D	5×10^{11}	100 billion yr
Li (known reserves)	2.4×10^4	5000 year
Li (in sea water)	1.7×10^8	35 million yr

Sûreté de la fusion

Un réacteur de fusion ne présente pas les mêmes risques qu'un réacteur de fission.

- **La réaction de fusion n'est pas une réaction en chaîne** : il n'y a pas de risque d'emballement.
- Le réacteur à l'arrêt ne continue pas de produire de la chaleur.
- **La quantité de combustible dans l'enceinte correspond à quelques secondes seulement de fonctionnement** : la quantité d'énergie présente dans l'enceinte ne risque de produire des endommagements considérables.
- **Le risque de prolifération nucléaire n'est pas présent** : le réacteur ne produit pas d'éléments intéressants pour les militaires.

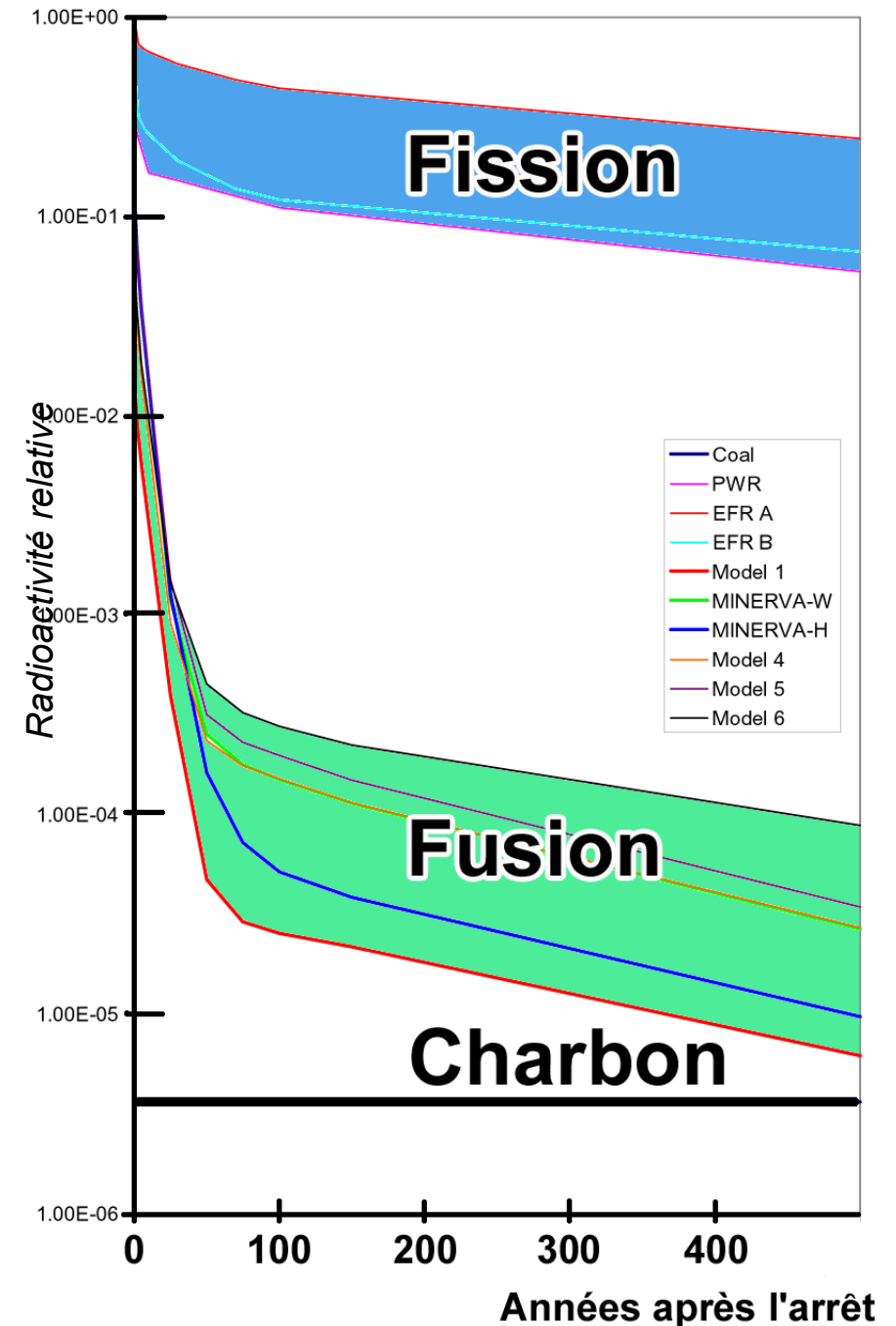
Le principal enjeu de sûreté nucléaire pour la fusion est **le confinement du tritium** dans l'enceinte et son traitement en dehors de l'enceinte.



Déchets radioactifs

Après la période opérationnelle du réacteur, **l'enceinte sera activée** : les neutrons non convertis en lithium feront muter certains éléments de l'enceinte.

L'enceinte est composée d'un acier spécial pour limiter son activation par les neutrons. L'enceinte restera radioactive sur une durée de l'ordre de 400 ans.



Critère de Lawson

Les particules deutérium et tritium doivent être **très énergétiques** pour aller contre la force de répulsion électrique entre les 2 noyaux, et fusionner : le mélange deutérium-tritium sera un plasma très chaud (température des ions : T_i).

Le plasma doit être chauffé pour atteindre les conditions de la fusion, par une puissance additionnelle P_{add} .

Le mélange doit être **suffisamment dense** pour que les collisions entre noyaux soient fréquentes, et ainsi que les réactions de fusion soient abondantes (densité n_e).

Si on veut que la puissance produite par la fusion P_{fus} serve à maintenir le plasma à la même température, il faut que l'énergie produite n'aille pas trop rapidement vers les parois. Cette capacité est exprimée par le **temps de confinement** τ_e , rapport entre l'énergie thermique contenue dans le plasma W_{th} , et la puissance perdue par le plasma P_p :

$$\tau_e = \frac{W_{th}}{P_p}$$

Le critère de Lawson exprime la condition pour la puissance produite par fusion suffise à maintenir le plasma à haute température, chauffé uniquement par les réactions de fusion, sans chauffage additionnel ($P_{add} = 0$) :

$$n_e T_i \tau_e \geq 3 \cdot 10^{21} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$$

L'efficacité du réacteur est donnée par le rapport : $Q = \frac{P_{fus}}{P_{add}}$

Confinement inertiel et confinement magnétique

Le critère de Lawson peut être atteint de 2 manières différentes :

Fusion inertielle



Plus de 200 impulsions laser d'1 MJ sur 1 ns concentré une cible solide d'1 g de DT :

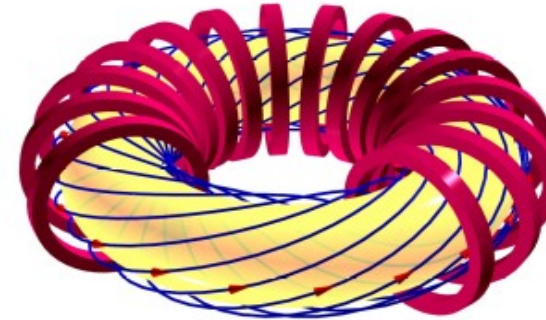
$$n_e \sim 10^{29} m^{-3}$$

$$T_i \sim 10 keV$$

$$\tau_e \sim 10^{-9} s$$

Pas réellement de confinement : la difficulté réside dans la capacité à concentrer efficacement l'énergie sur un temps court.

Fusion par confinement magnétique



Un plasma DT est confiné par un champ magnétique dans une enceinte torique :

$$n_e \sim 10^{20} m^{-3}$$

$$T_i \sim 10 keV$$

$$\tau_e \sim 1 s$$

La densité est 100 000 fois plus faible que celle de l'air.

Le confinement magnétique doit être suffisant pour atteindre un temps de confinement aussi long.

Configuration Tokamak

Le champ magnétique **B** confine les particules suivant 2 dimensions.

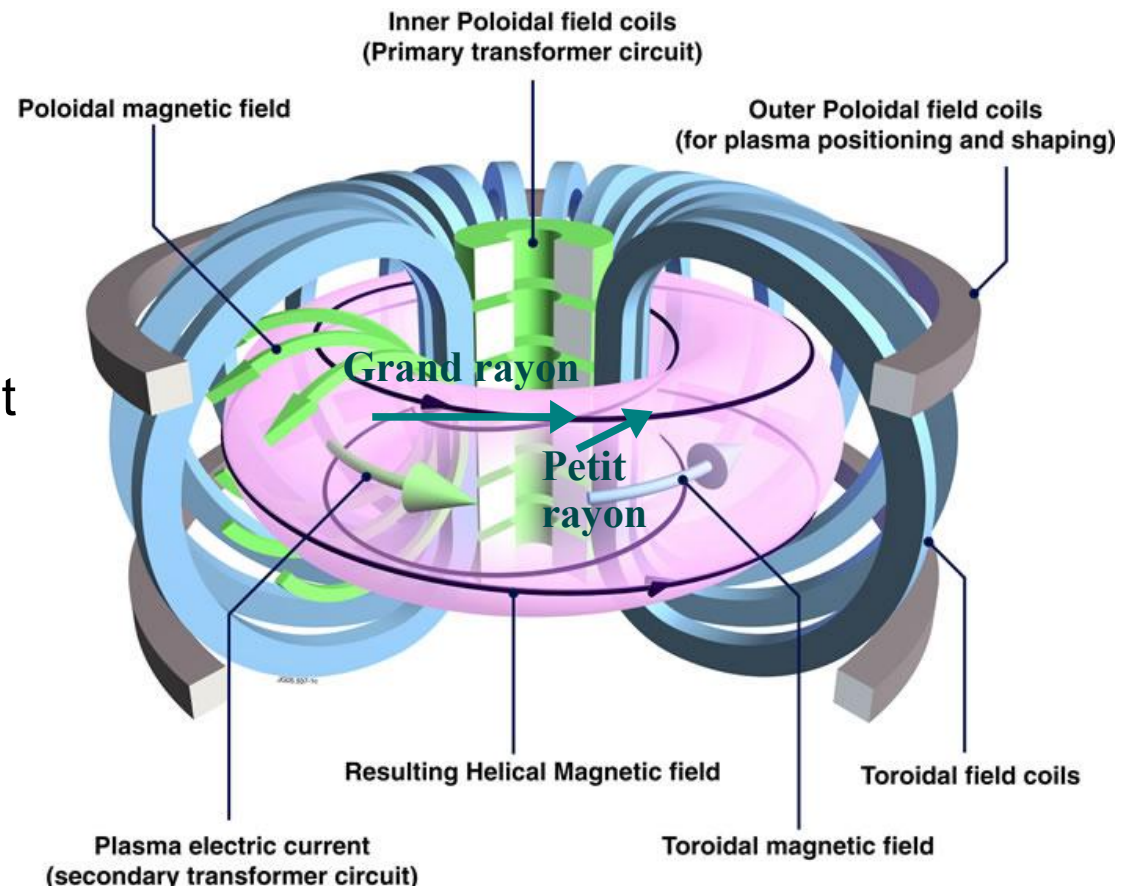
On confine suivant la 3ème dimension en refermant le champ en forme de tore (comme une bouée).

Problème : à cause de la courbure du champ magnétique, les particules dérivent par rapport aux lignes de champ : on ajoute un 2ème champ magnétique qui compense cette dérive : c'est le principe du **tokamak**

Le champ magnétique secondaire est créé par un courant induit dans le plasma.

Les trajectoires des particules s'enroulent sur tores emboîtés les uns dans les autres.

Pour atteindre 10^8 °K, on **chauffe** avec des ondes électromagnétiques (quelques dizaines de MW) ou par injection de particules neutres rapides.



Plasma de tokamak

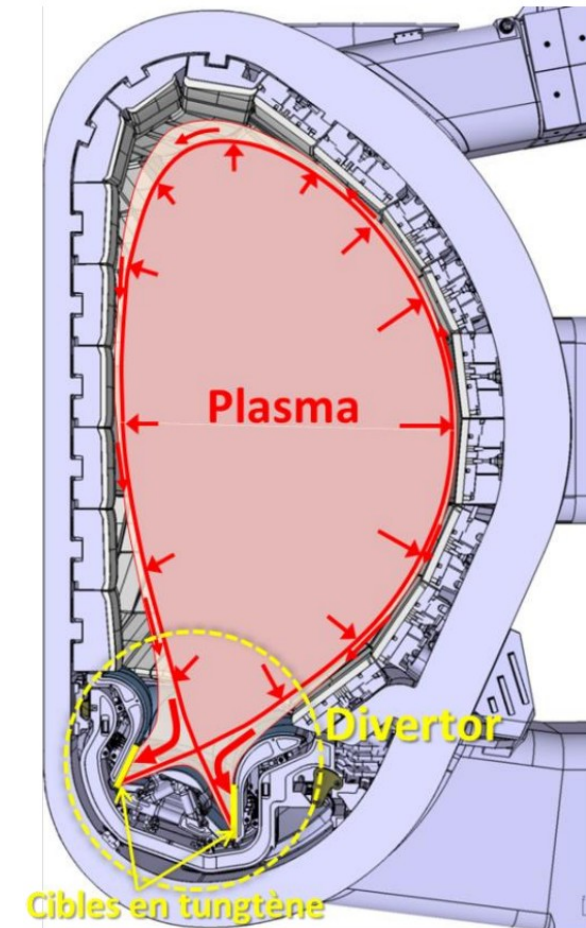
Des bobines toroïdales peuvent donner une forme déterminée au plasma.

La forme est choisie pour optimiser le confinement des particules.

L'ensemble des surfaces magnétiques qui ne touchent pas le bord forme le cœur du plasma où la température est la plus chaude.



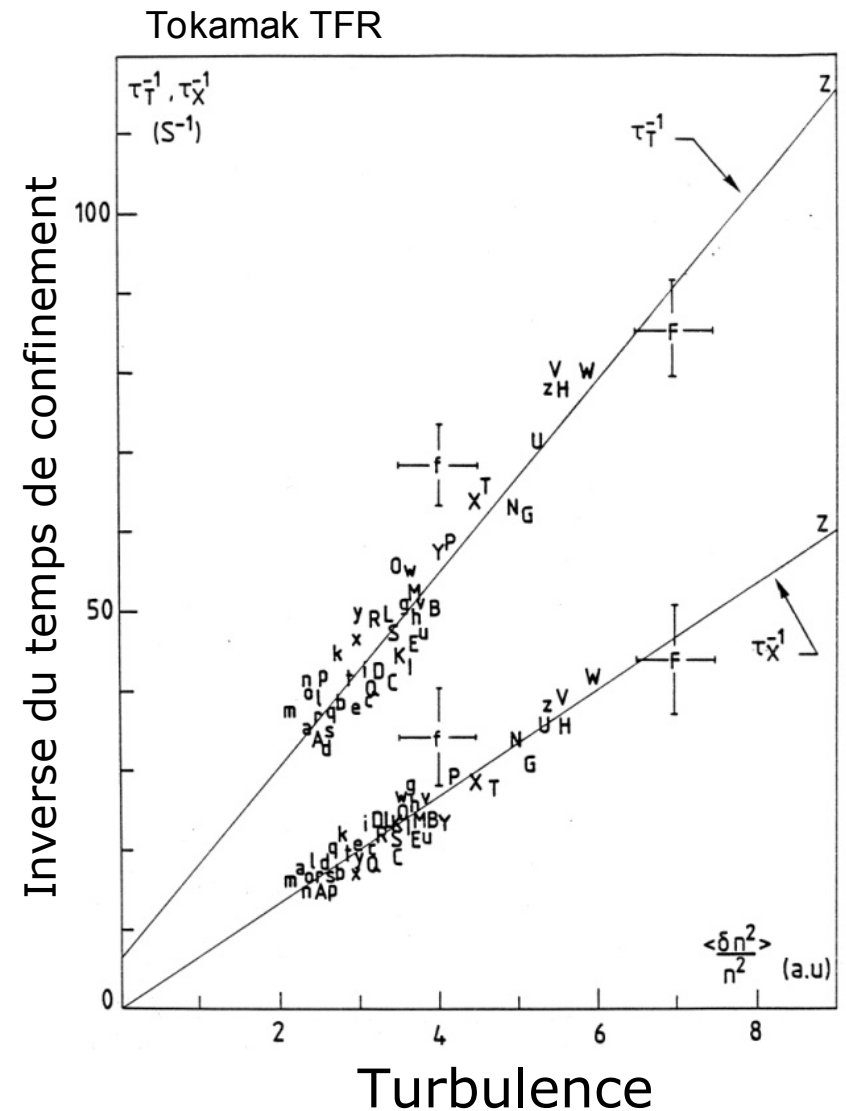
Coupe verticale de la machine



Temps de confinement et turbulence : mesures

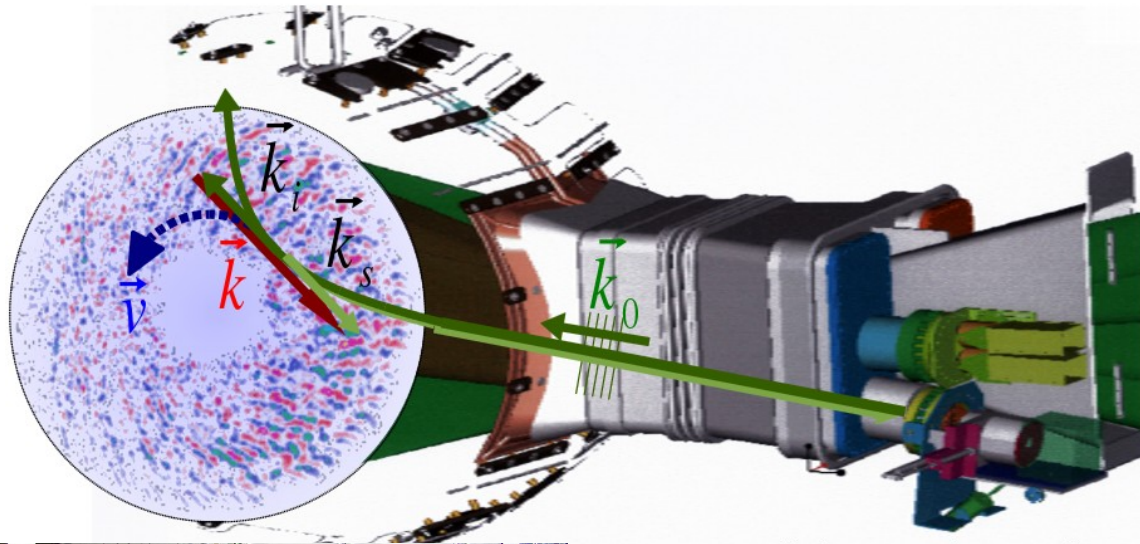
Les particules sont confinées par le champ magnétique, mais néanmoins, l'énergie est rapidement sortie du tokamak :

- les particules changent de ligne magnétique par collisions. Mais les collisions ne suffisent pas à expliquer les pertes.
- Une turbulence apparaît à l'échelle du centimètre

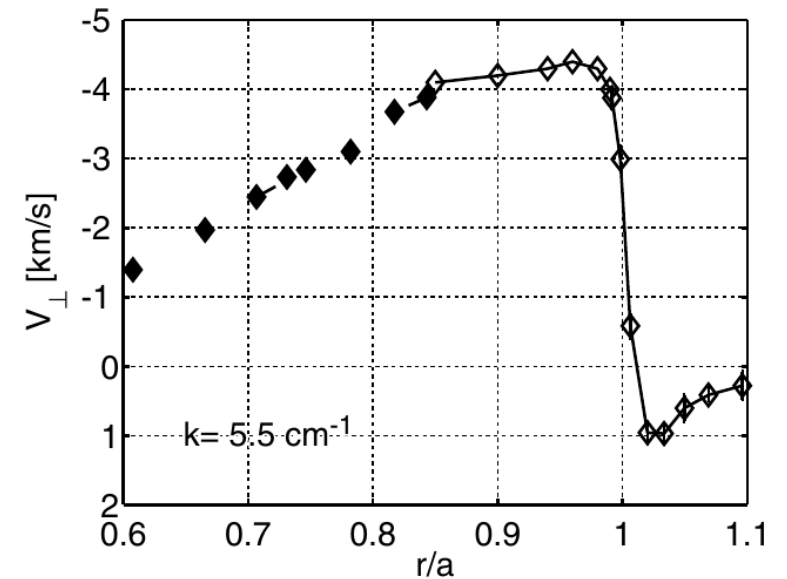
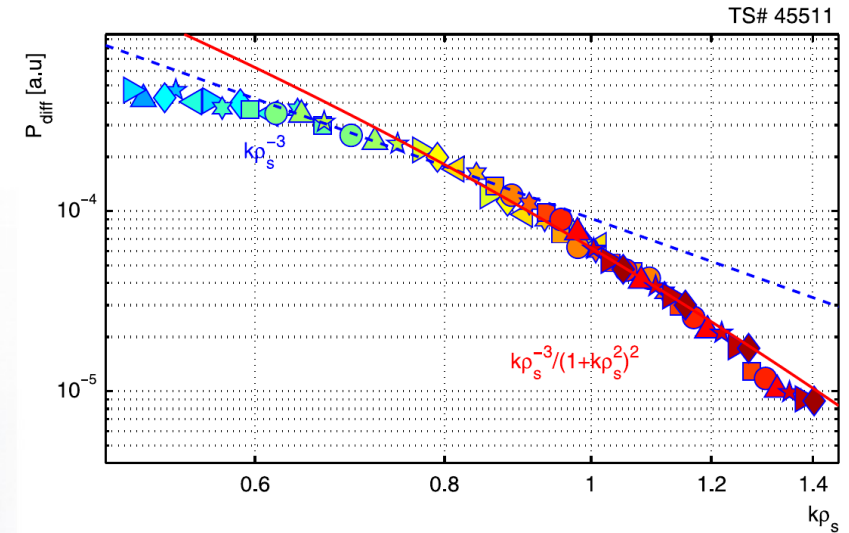
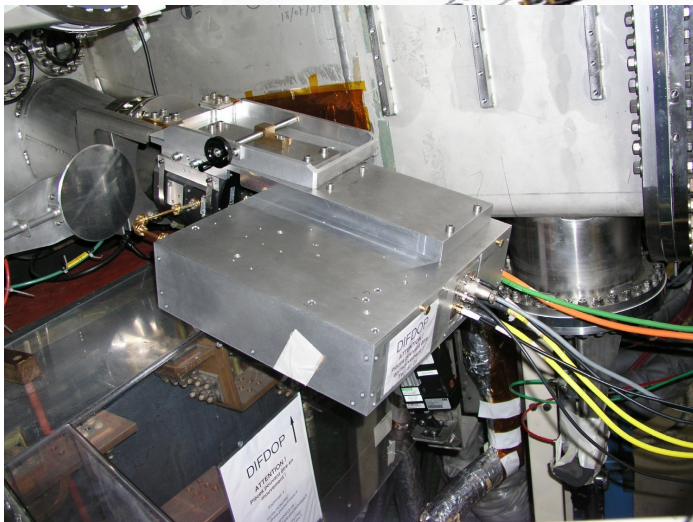


Mesures des fluctuations au cœur du plasma

La mesure des fluctuations est possible en utilisant la rétrodiffusion collective des micro-ondes par le cœur du plasma de tokamak.



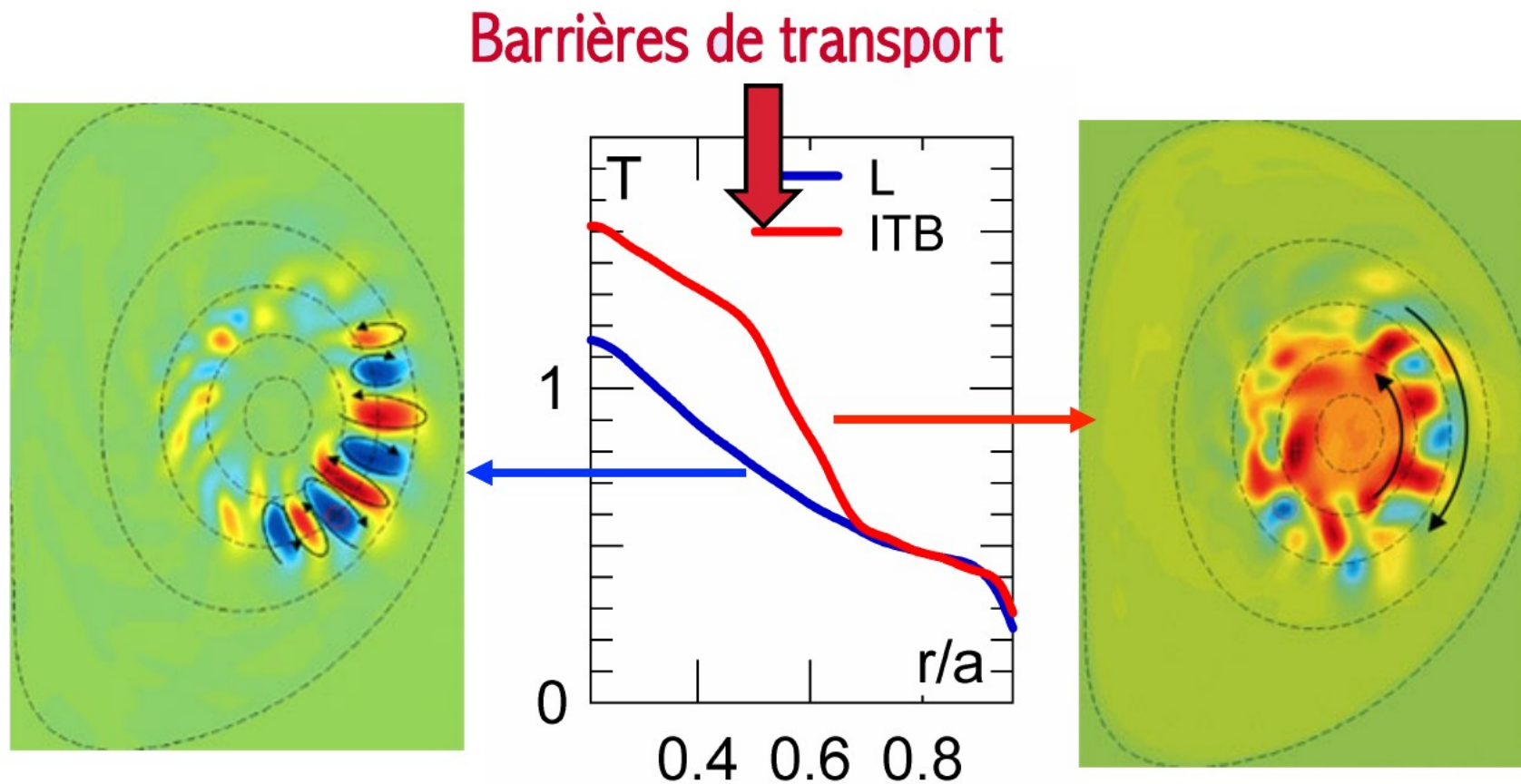
Antenne micro-onde émettrice-réceptrice



Temps de confinement et turbulence : simulations

On cherche à réduire ces fluctuations dans le plasma.

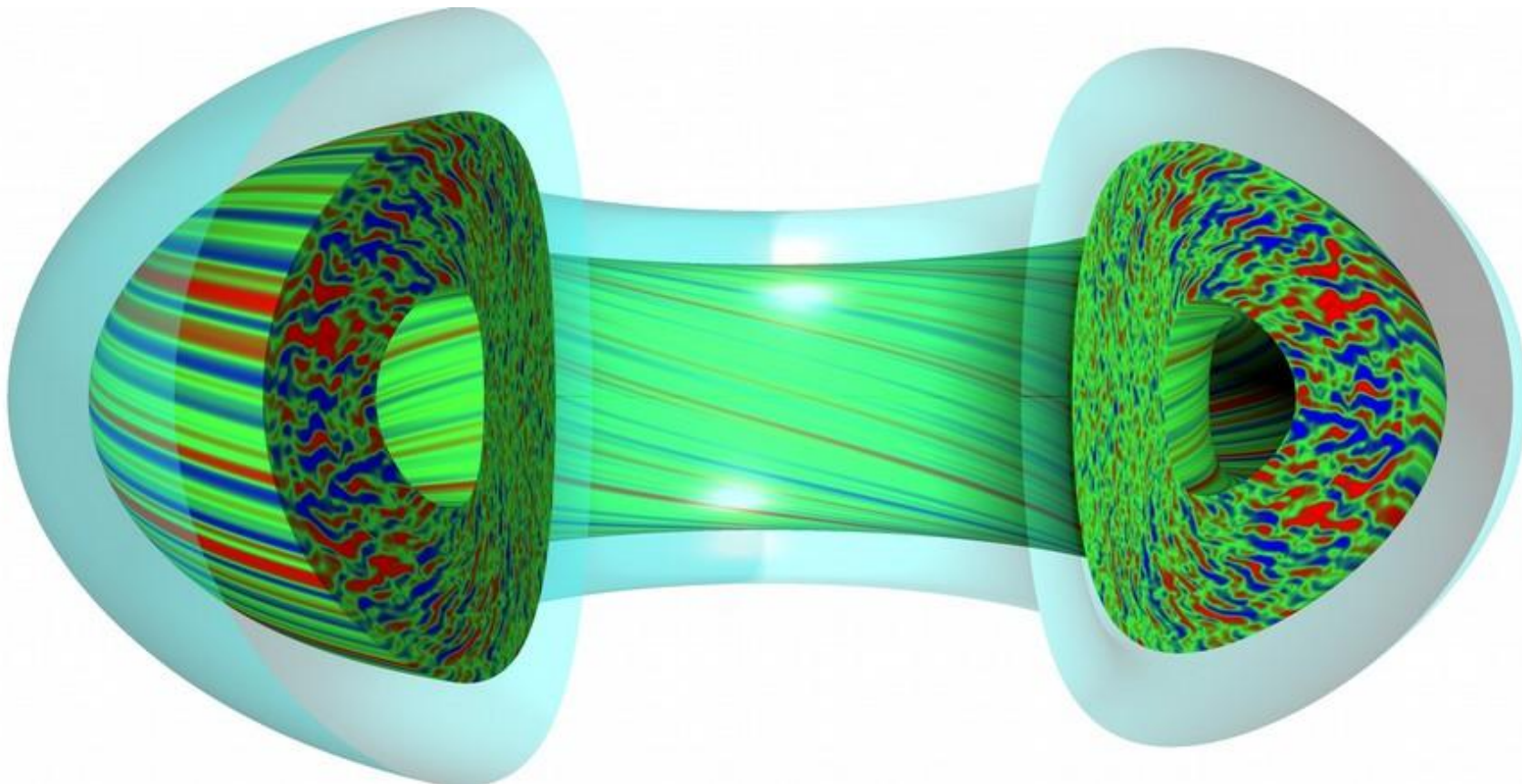
Un moyen : créer des barrières de transport en créant un cisaillement de la vitesse de rotation du plasma



Temps de confinement et turbulence : simulations

La simulation de la dynamique des électrons et des ions dans un plasma de tokamak a confirmé que des instabilités apparaissent spontanément dans le plasma.

Solution : construire une machine plus grande pour allonger ce temps artificiellement.



Temps de confinement phénoménologique

Les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer les paramètres de tokamak nécessaires pour atteindre les conditions du maintien de la fusion dans le plasma du tokamak.

Seule une approche phénoménologique est possible. L'ensemble des mesures de temps de confinement pour un plasma en mode H ont été recensés sur différentes machines. Pour chaque plasma, les principaux paramètres plasma ont aussi été enregistrés.

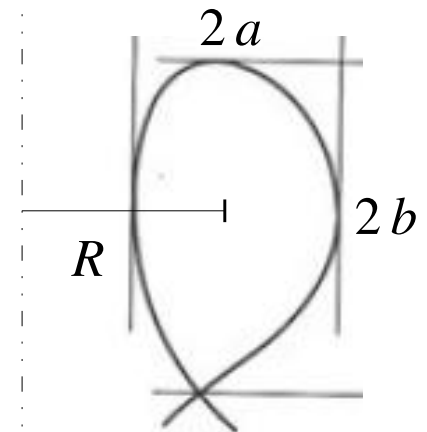
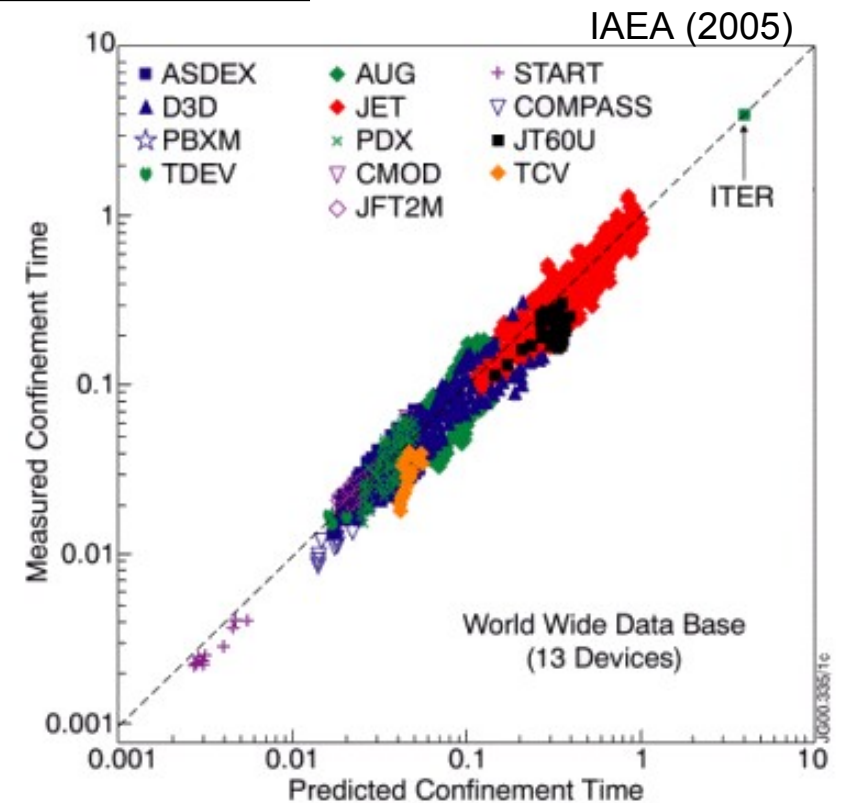
Un ajustement a permis de déterminer les variations de temps de confinement avec les paramètres plasma :

$$\tau_{E,th}^{IPB98(y,2)} = 0.0562 I_p^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} \epsilon^{0.58} \kappa_a^{0.78}$$

$$\tau_E [s] \quad I_p [MA] \quad B_T [T] \quad P: \text{puissance additionnelle} [MW] \quad n_e [10^{19} m^{-3}]$$

$$M: \text{masse isotopique effective} [1,66 \cdot 10^{-27} kg] \quad R [m] \quad \epsilon = a/R \quad \kappa_a = b/a$$

Cette loi a été extrapolée pour estimer le temps de confinement attendu pour ITER.



Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un plasma ?
- 2 Diversité des plasmas
- 3 Quelques propriétés des plasmas
- 4 La fusion nucléaire par confinement magnétique
- 5 Historique de la fusion
 - De la découverte de la fusion au premier tokamak T1
 - Du tokamak T3 à ITER

Historique : principe de la fusion

1919 J. Perrin émet l'hypothèse que la synthèse de l'hélium à partir de l'hydrogène pourrait être la source d'énergie du soleil.

Aston : défaut de masse de l'Hélium.

1920 A. S. Eddington : modèle de l'étoile

1932 Découverte du neutron et du deutérium par Rutherford. Walton et Cockroft détectent la réaction de capture d'un proton par le lithium 7, capture suivie d'une fission en deux particules alpha (He) avec dégagement d'énergie.

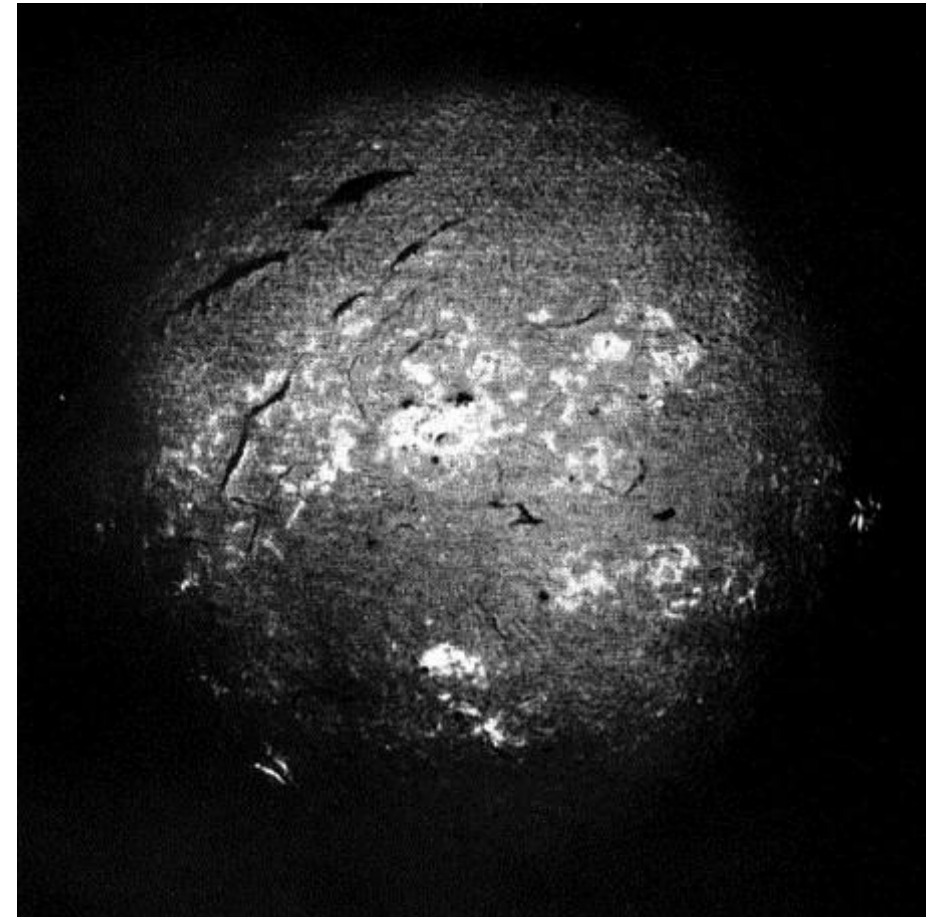
1934 Rutherford, Oliphant, Harteck réussissent la réaction : $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3.3 \text{ MeV}$

1946 G.P. Thomson dépose un brevet (secret) sur une installation de fusion thermonucléaire avec un plasma confiné.

1951 Explosion de la première bombe H.

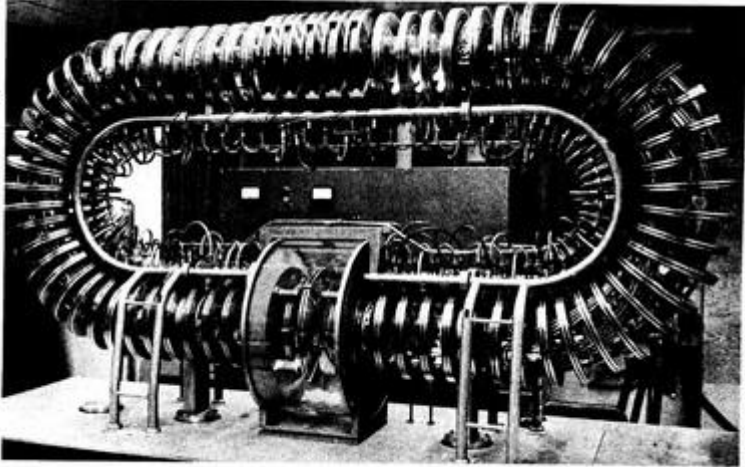
Recherches classifiées.

Début des recherches sur l'application civile de l'énergie de fusion.



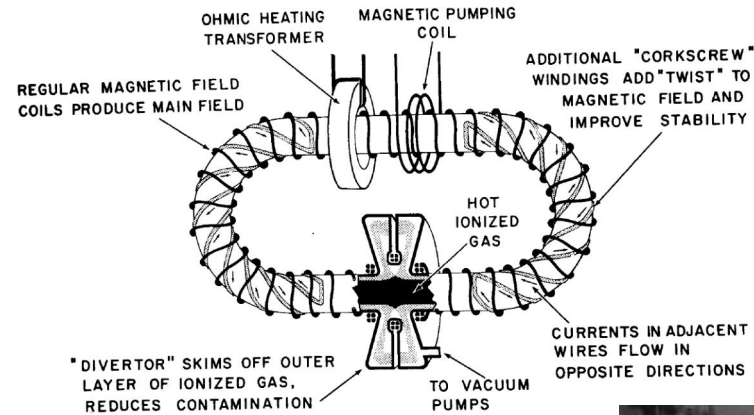
Eddington : Hydrogen Spectroheliogram. (J. Evershed)

1950, UK & USA : stellarators et pinches



DEMONSTRATION STELLARATOR SHOWN AT GENEVA CONFERENCE

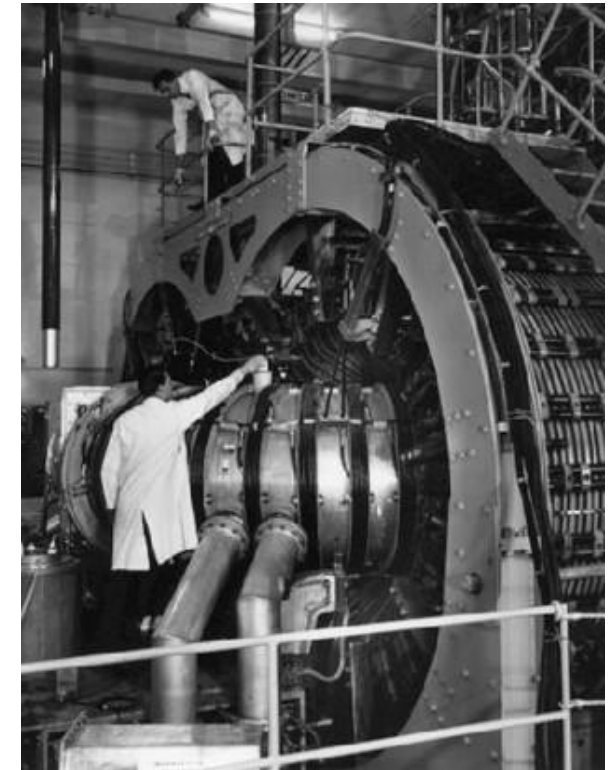
FIG. 4: SCHEMATIC "RACETRACK" STELLARATOR



1953 USA : Début des recherches sur les stellarators classiques à Princeton

1958 UK : recherche sur les « stabilized pinch » ; machine Zeta à Harwell Les anglais déclarent avoir produit des neutrons de fusion.

(On s'aperçoit plus tard qu'il s'agit de réactions localisées produites par des faisceaux de particules incident sur des surfaces deutérées).



machine Zeta à Harwell

1950, Russie : premier tokamak : T1

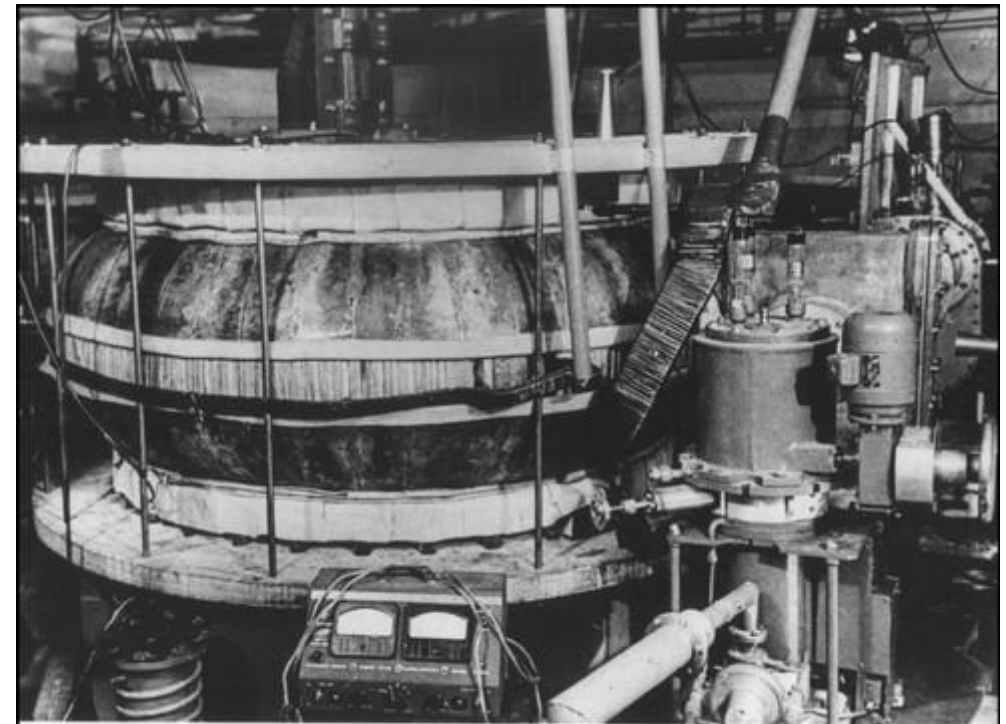
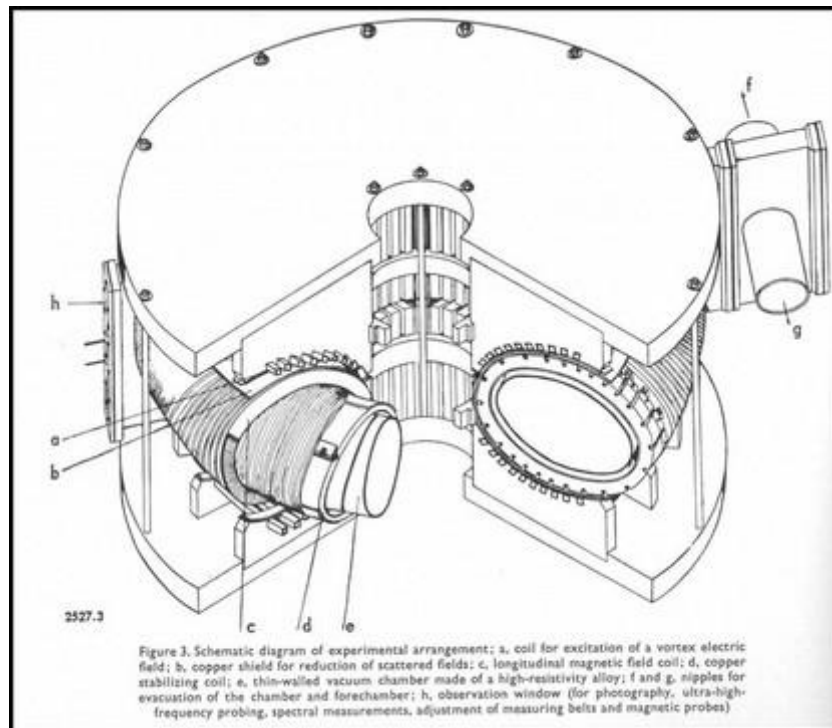
Tokamak : "тороидальная камера с магнитными катушками" (chambre toroïdale et bobines magnétiques), inventé par Igor Tamm and Andrei Sakharov.

1957 : Premier tokamak T1 au Kurchatov Institute (Moscou)

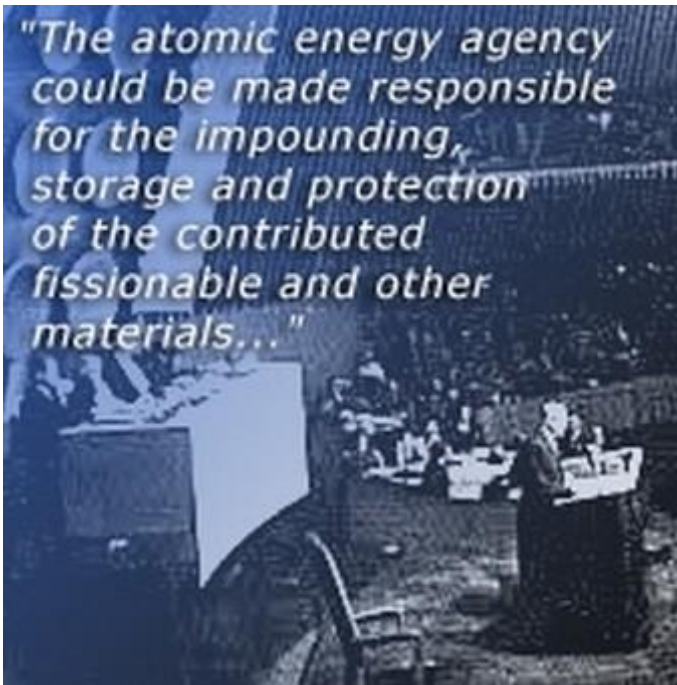
Chambre torique métallique.

$R_0 = 0,63 \text{ m}$ $a = 0,13 \text{ m}$ $B_T = 1 \text{ T}$ $I_p = 40 \text{ kA}$ (q proche de 1)

Équilibre macroscopique atteint



1957 : la recherche en fusion contrôlée est déclassifiée



The first IAEA General Conference held at the Konzerthaus in Vienna from 1 to 23 October 1957, with the participation of diplomats and scientists from 57 nations. (Photo: IAEA)

1953 : discours « Atom for Peace » du président des USA, D. Eisenhower devant l'assemblée plénière des Nations Unies.

1957 : première conférence générale de l'IAEA à Vienne (agence internationale de l'énergie atomique)

1957 : traité Euratom.

1958 : Conférence Internationale de l'ONU pour les usages pacifiques de l'énergie atomique (Genève) : le tokamak T1 y est présenté, mais sans convaincre...

Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy

Held in Geneva
1 September - 13 September 1958

Volume 31
Theoretical and Experimental Aspects
of Controlled Nuclear Fusion



UNITED NATIONS
Geneva
1958

Performance du tokamak T3

1960 : tokamak T3

$R_0 = 1 \text{ m}$ $a = 0,12 \text{ m}$ $B_T = 4 \text{ T}$ $I_p = 60 \text{ kA}$

Le plasma du tokamak T3 à Moscou atteint la température de **7 millions de degrés K** (600 eV).

La température est estimée de manière indirecte, via la résistivité du plasma.

L'occident est incrédule : la température dépasse de beaucoup celle des autres machines.

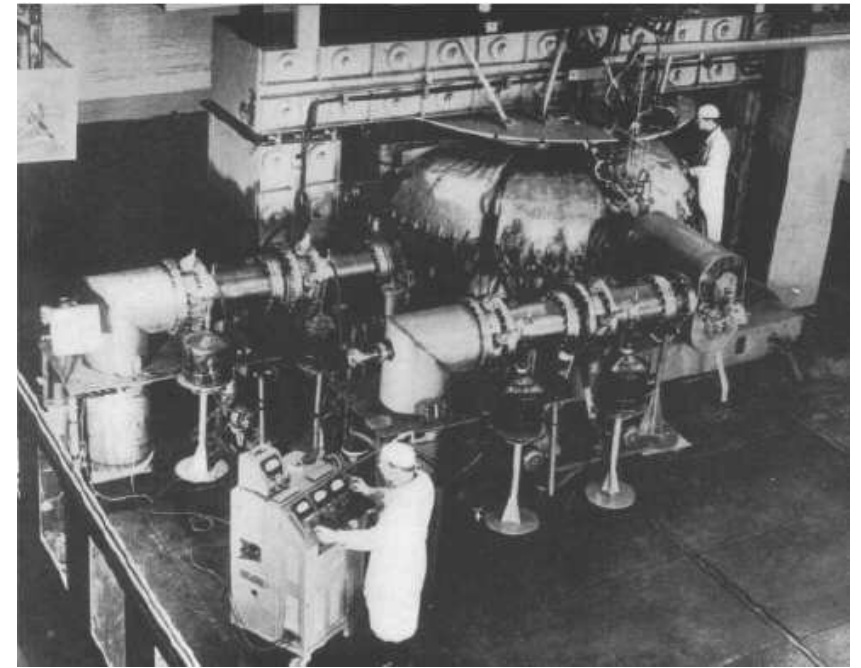
1968 : les russes invitent une équipe anglaise (Peacock, Robinson, Forrest, Wilcock) à venir sur place faire des mesures de température électronique par diffusion Thomson incohérente par laser (le laser a été inventé 10 ans plus tôt aux USA).

La valeur de la température est confirmée.

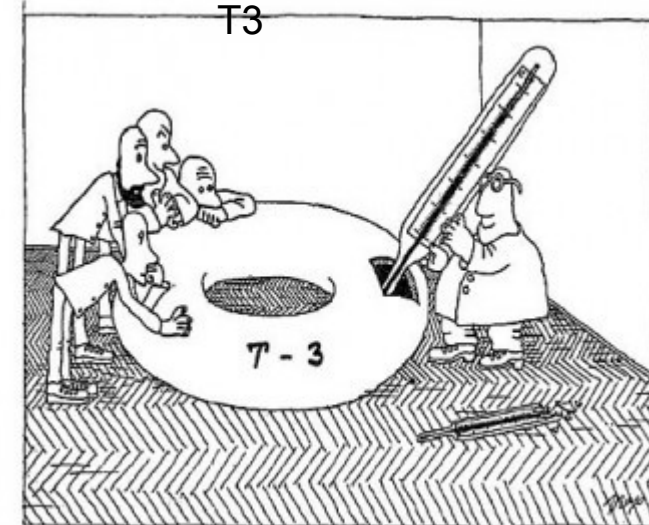
La communauté internationale est convaincue : elle se lance dans la filière tokamak.

1969 : première mesure significative de flux de neutrons produits par fusion.

Le confinement est moins bon qu'attendu par la formule de Bohm.



Tokamak
T3



Dessin extrait de l'éposé "Evolution of the Tokamak" donné par B.B. Kadomtsev à Culham (UK, 1988)

1970 : montée en puissance

1973 : tokamak **TFR** (Fontenay aux Roses).

Le plasma y atteindra 2keV (20 millions de degrés Kelvin).

Le confinement est bien moins bon que celui prévu par les théories néoclassiques.

Le temps de confinement est corrélé au niveau des fluctuations de densité à petites échelles dans le plasma.

1978 : tokamak **PLT** à Princeton

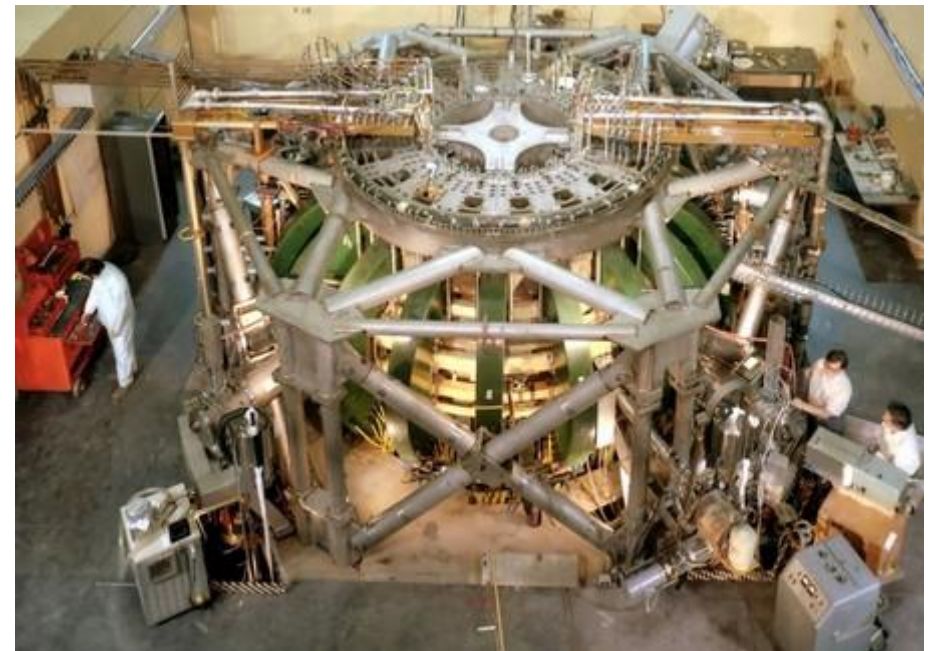
$R_0 = 1,32 \text{ m}$ $a = 0,4 \text{ m}$ $B_T = 4 \text{ T}$ $I_p = 700 \text{ kA}$

Chauffage à la résonance cyclotronique ionique (5 MW)

Injection de faisceau de neutres (3 MW)

Génération de courant à la résonance hybride haute (1 MW)

Le plasma du tokamak PLT (Princeton) atteint la température de 60 millions de degrés.



1980 : tokamaks de taille intermédiaire

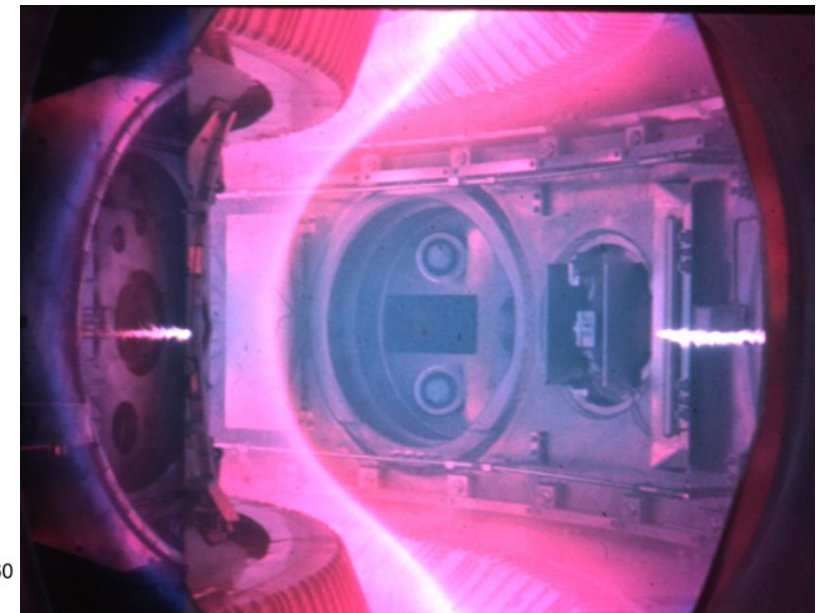
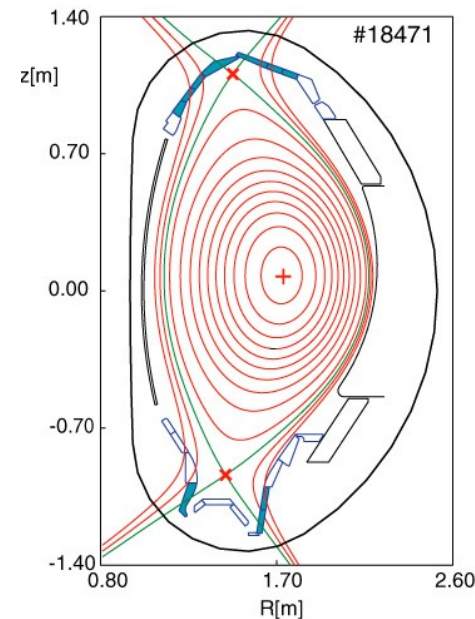
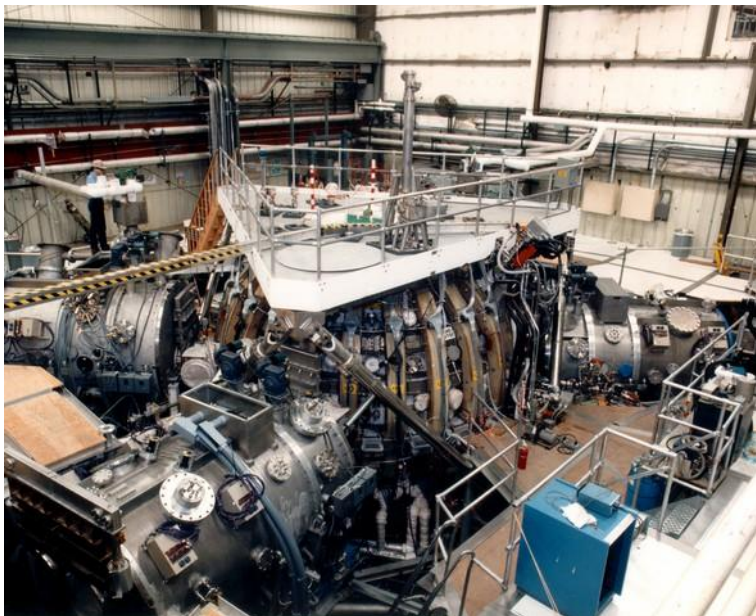
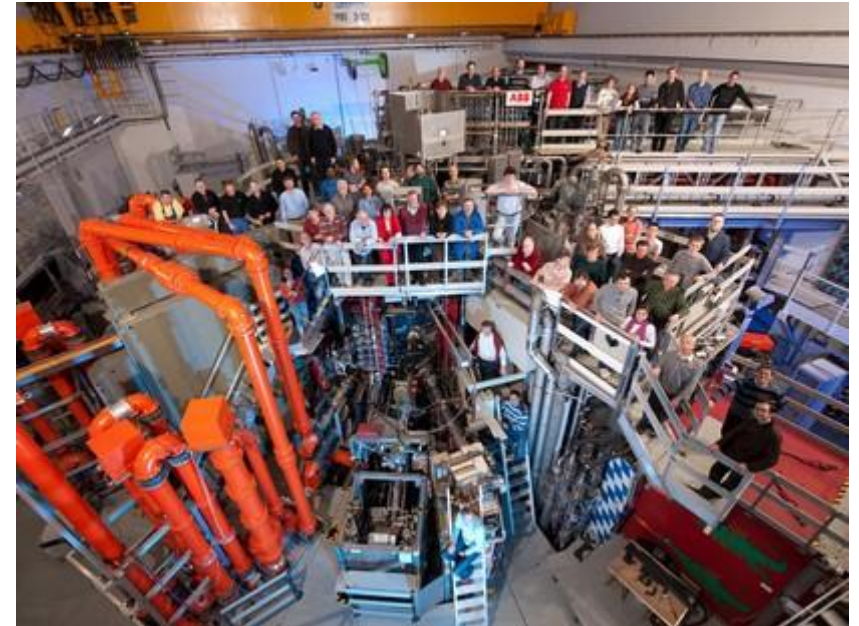
1982 : ASDEX (Garching, Munich, D)

Tokamak à divertor en point X

Premier tokamak à atteindre le mode H (confinement amélioré)

1986 : DIII-D (San Diego, USA)

Tokamak à section en forme de D

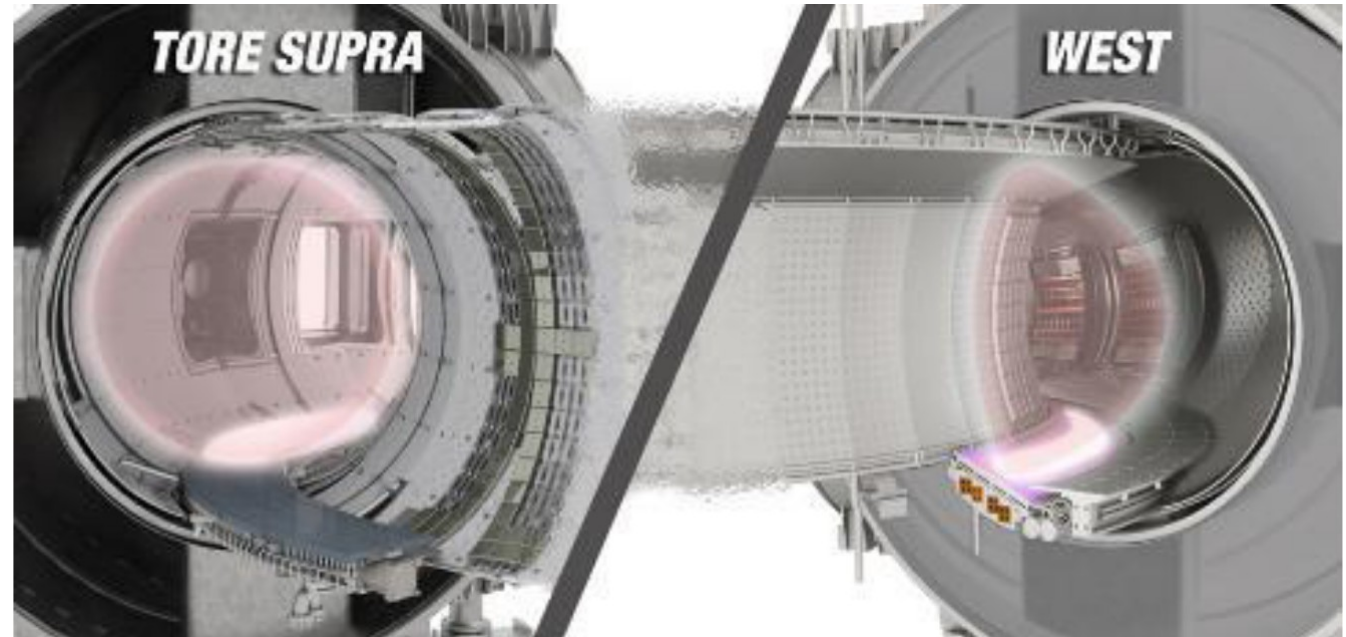
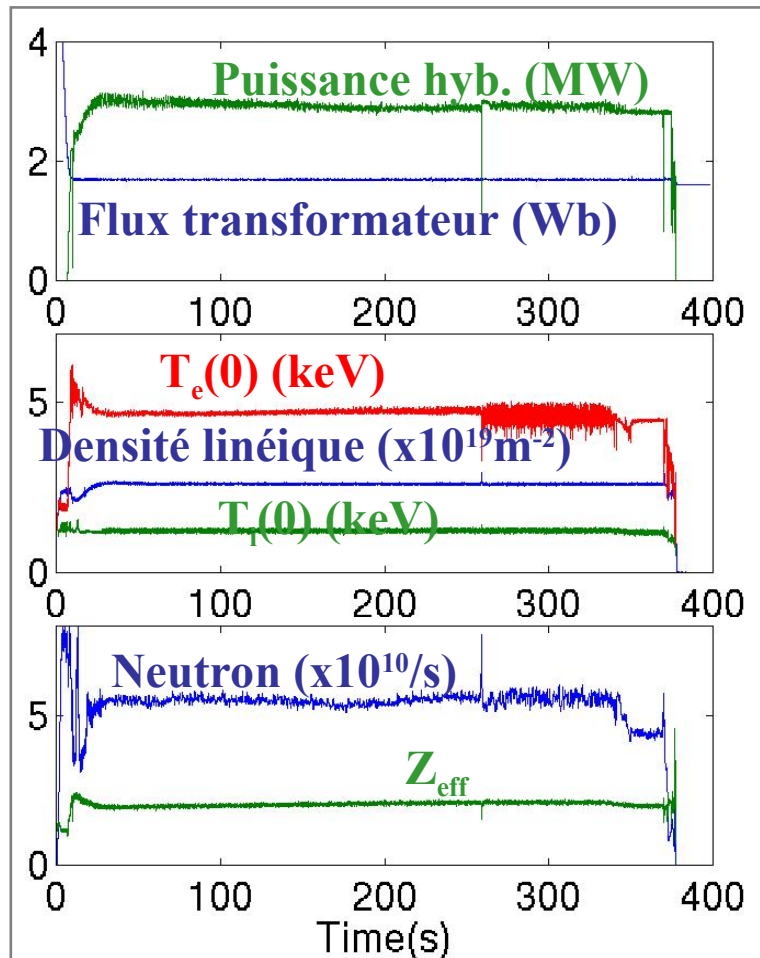
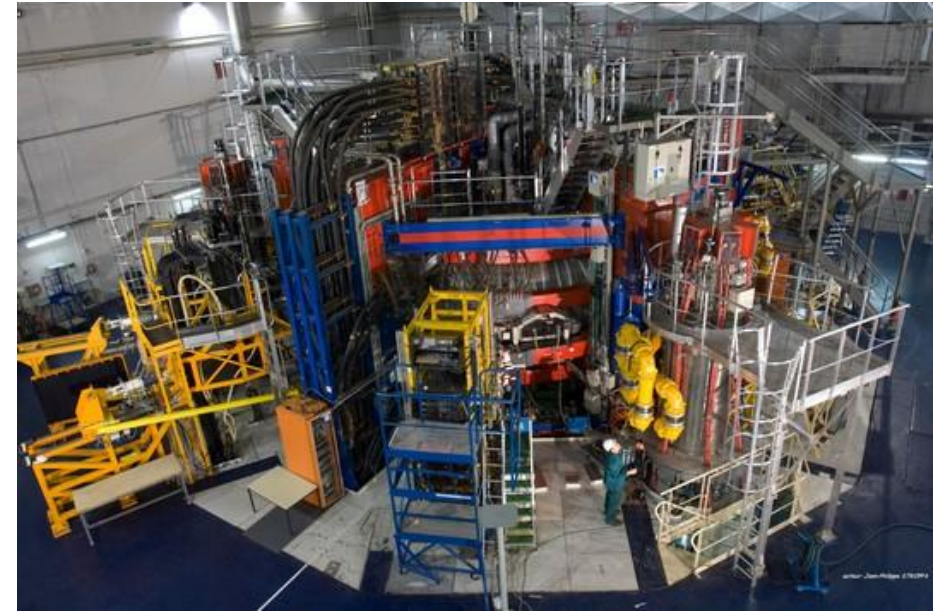


1980 : tokamaks de taille intermédiaire

1988 : Tore Supra - WEST (CEA Cadarache)

$R_0 = 2,2 \text{ m}$ $a = 0,7 \text{ m}$ $B_T = 4,5 \text{ T SC}$ $I_p = 2 \text{ MA}$

Tokamak à bobine supraconductrice et refroidissement actif, permettant des plasmas longs (6 min)



1990 : meilleures performances

1982 : tokamak TFTR (Princeton, USA)

$R_0 = 2.4 \text{ m}$ $a = 0,8 \text{ m}$ $B_T = 6 \text{ T}$ $I_p = 3 \text{ MA}$

1983 : tokamak européen JET (Culham, Oxford, UK)

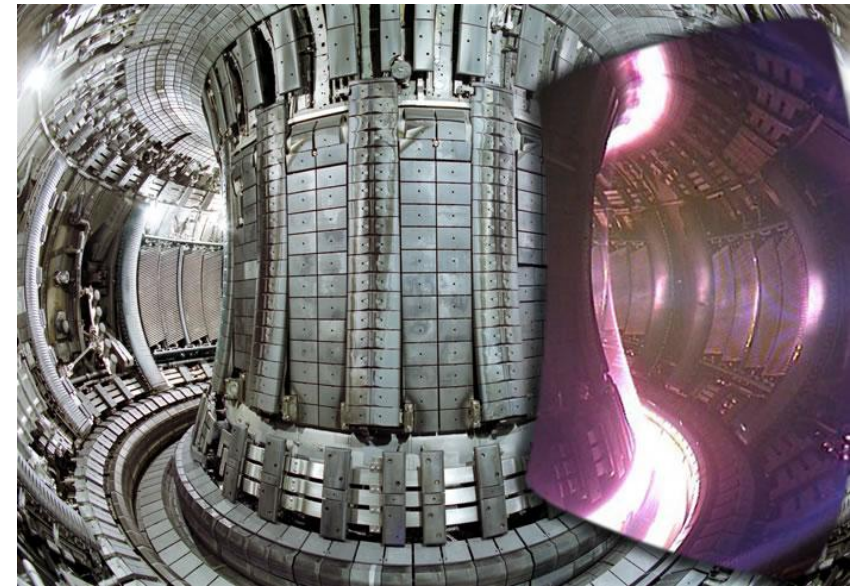
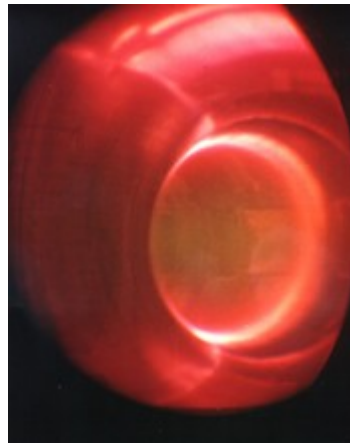
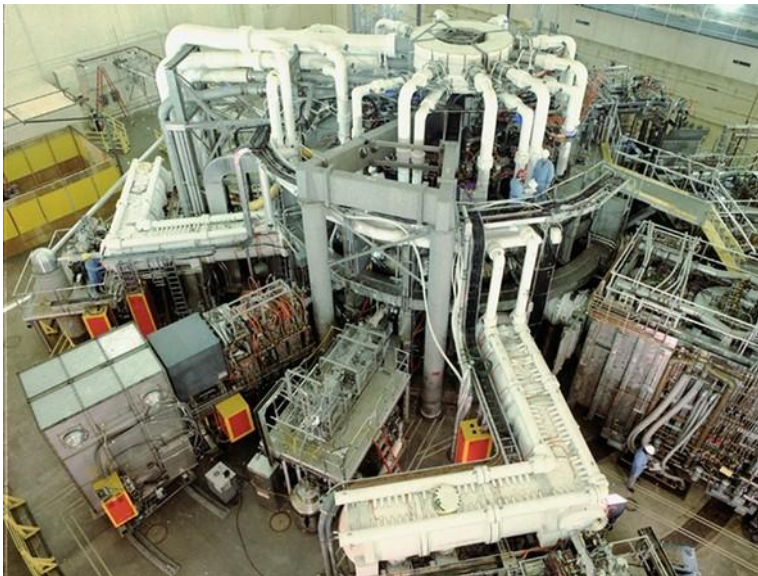
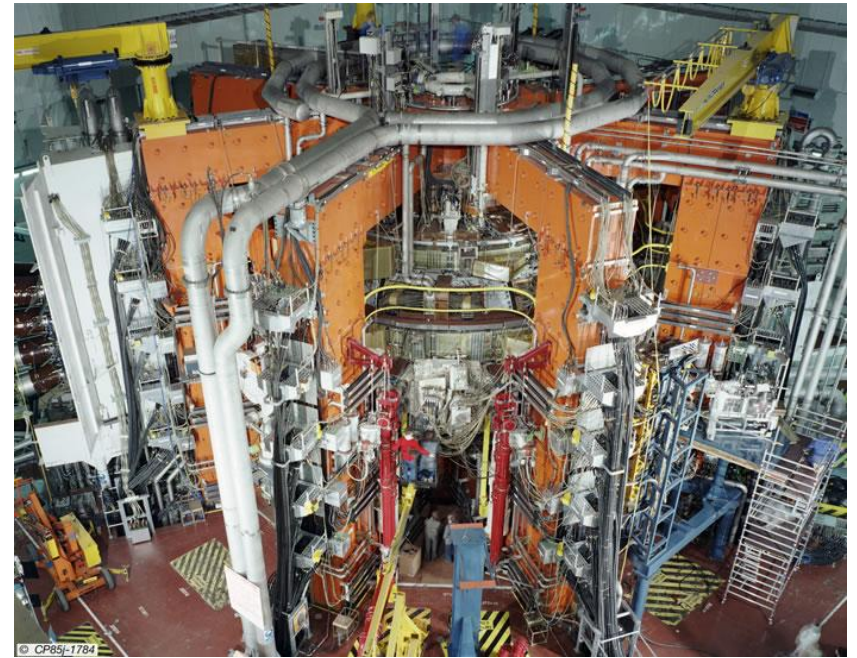
$R_0 = 3 \text{ m}$ $a = 1 \text{ m}$ $B_T = 4 \text{ T}$ $I_p = 6 \text{ MA}$

1991 : premières expériences avec un mélange de tritium et deutérium dans JET: 2 MW produits par les réactions de fusion.

1994 : TFTR atteint 9 MW de puissance produite, également en mélange DT.

1995 : TFTR atteint la température ionique de $500 \text{ M } ^\circ\text{C}$

1997 : JET atteint 17 MW pour 25 MW de chauffage (DT)



Projet ITER

1986 : lancement de l'équipe internationale de conception d'ITER

1998 : fin de la phase de dessin d'ITER ($Q=\infty$), remise des dessins; retrait des USA; nouveau projet ITER-FEAT ($Q=10$)

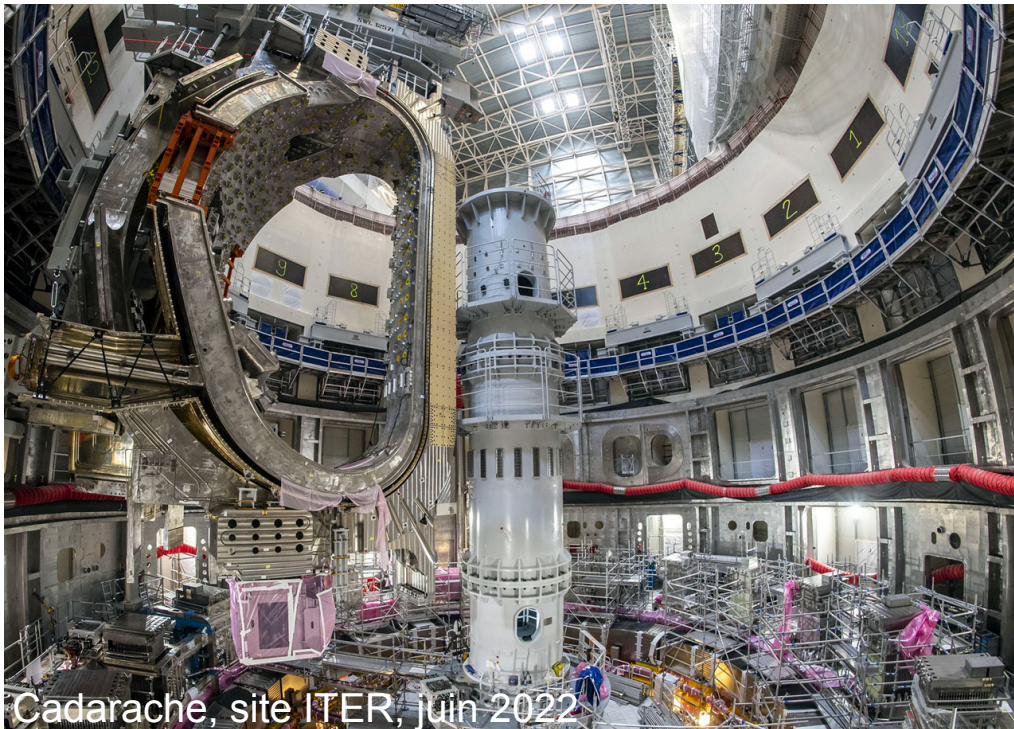
2007 : accord pour la construction d'ITER à Cadarache. UE + Russie + USA + Chine + Japon + Corée + Inde(plus tard)

$R_0 = 6,2 \text{ m}$ $a = 2 \text{ m}$ $B_T = 5,3 \text{ T SC}$ $I_p = 15 \text{ MA}$

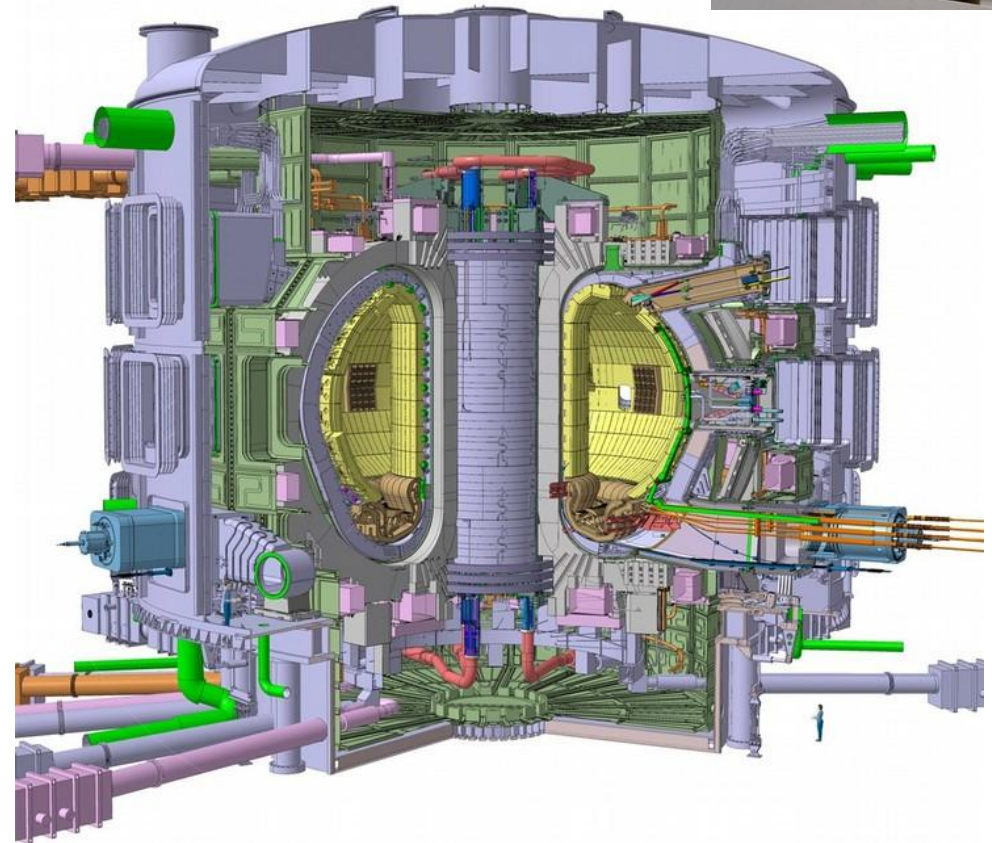
Objectif : 500 MW de fusion pour 70 MW de chauffage pendant 1000 s

2027 ? : premier plasma

2035 ? : premier plasma DT



Cadarache, site ITER, juin 2022



Stellarators

1988 : stellarator W7-AS (Garching, D)

$R_0 = 2 \text{ m}$ $a = 0,2 \text{ m}$ $B = 3,5 \text{ T}$ SC $P_{\text{add}} = 5 \text{ MW}$

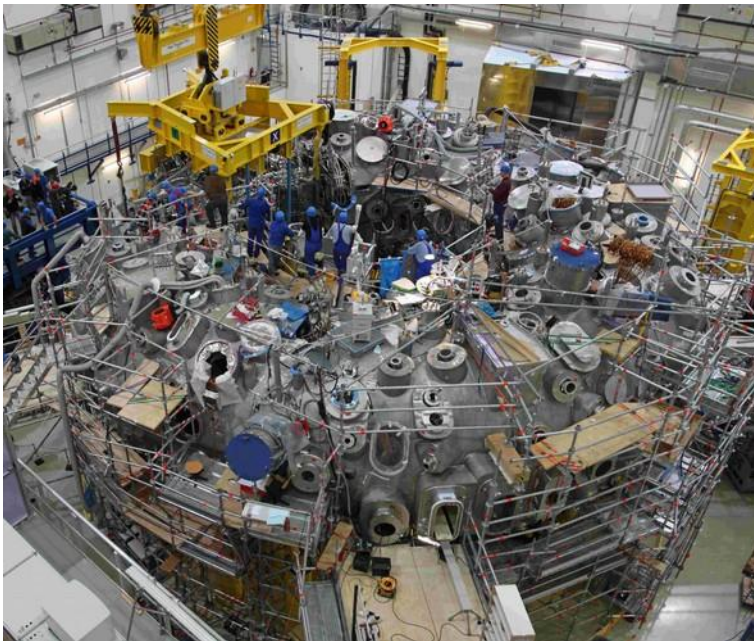
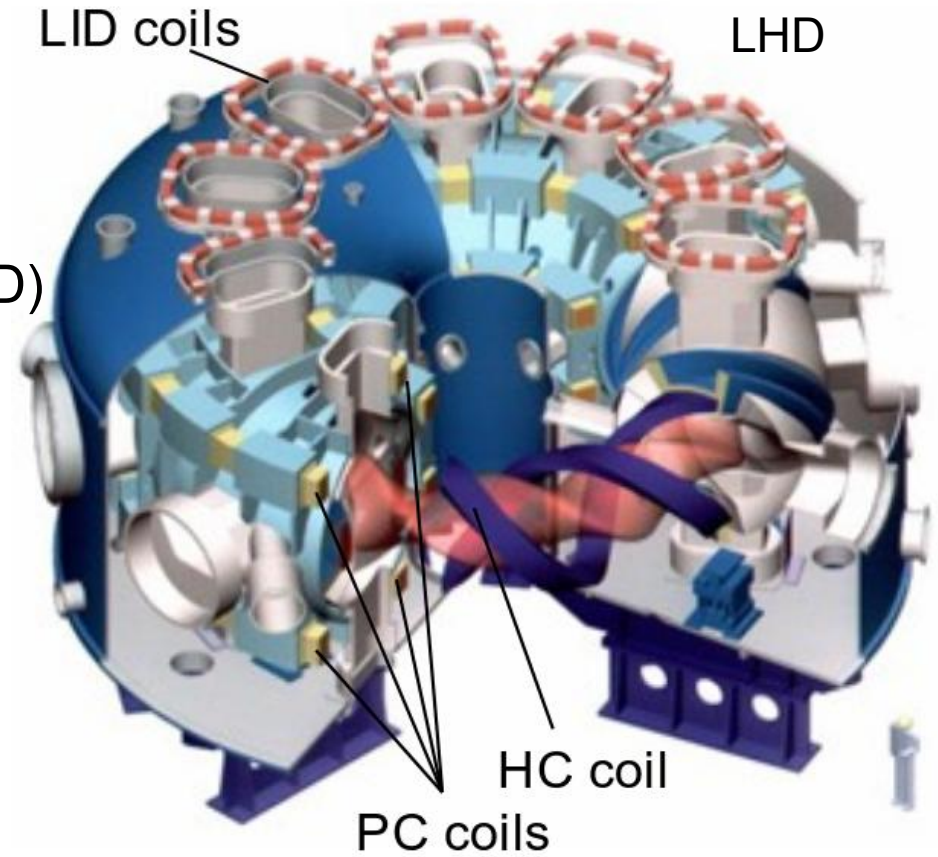
1994 : décision de construire W7-X à Greifswald (D)

1998 : stellarator LHD (Japon)

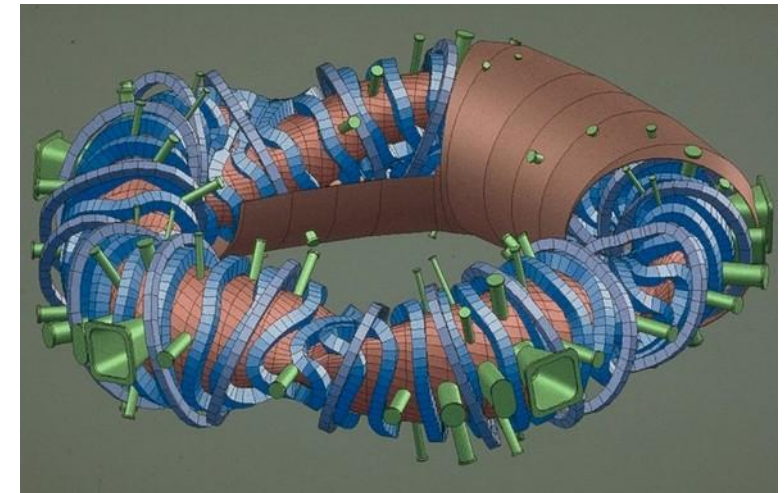
$R_0 = 3.6 \text{ m}$ $a = 0,6 \text{ m}$ $B = 3 \text{ T}$ SC $P_{\text{add}} = 30 \text{ MW}$

2015 : W7-X, premier plasma

$R_0 = 5,5 \text{ m}$ $a = 0,5 \text{ m}$ $B_T = 3 \text{ T}$ SC $P_{\text{add}} = 15 \text{ MW}$



W7-X

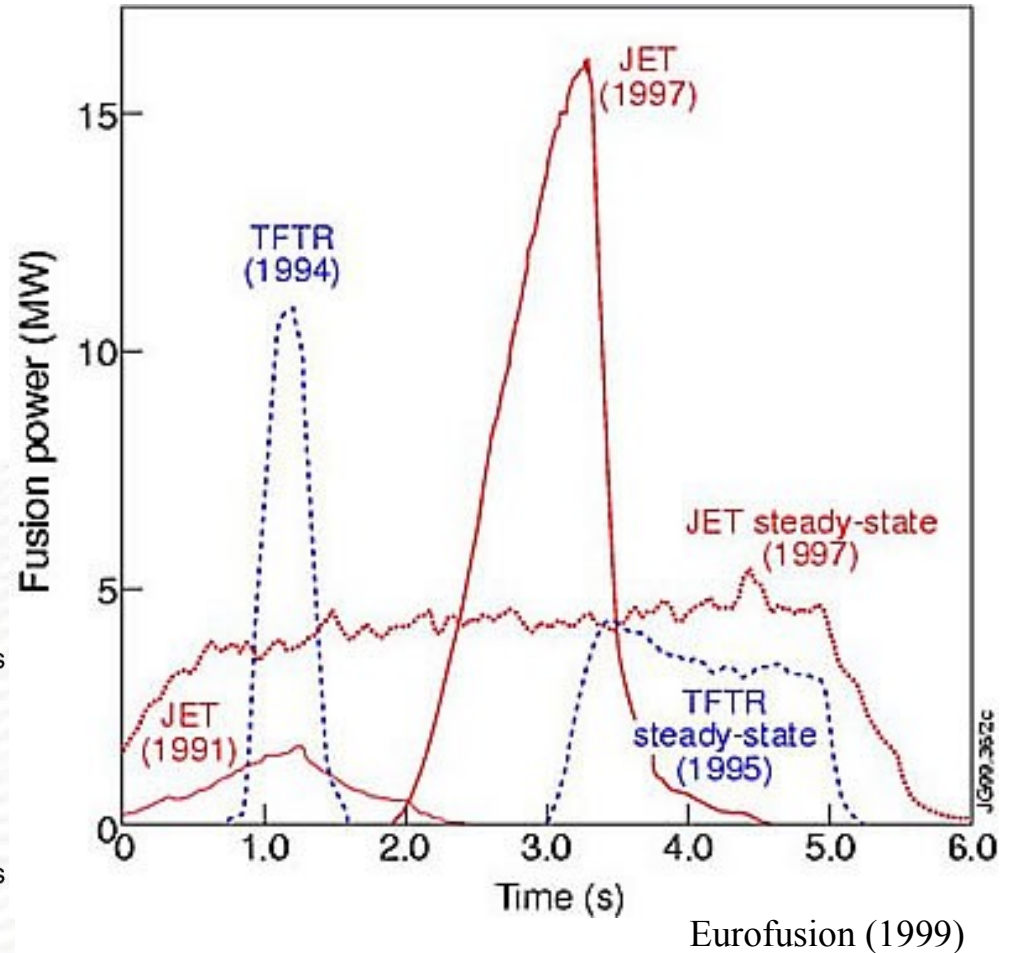
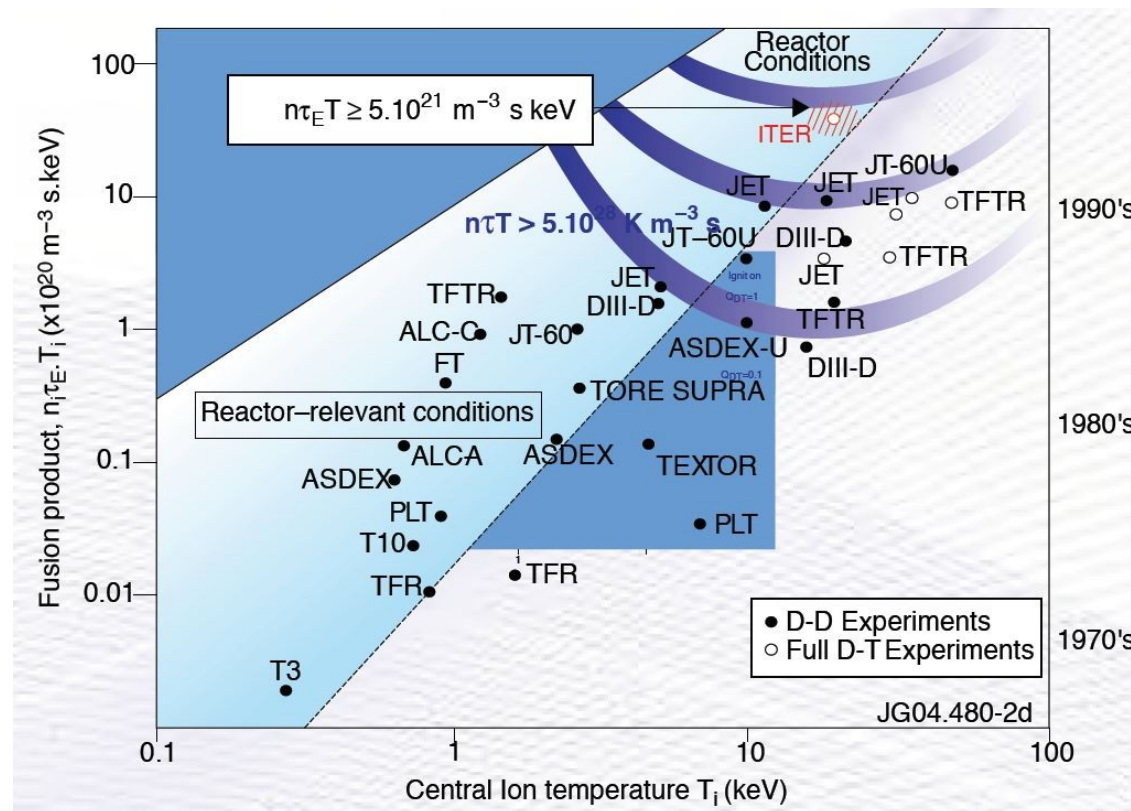


Évolution des performances de fusion

Le plasma le plus performant a été obtenu sur JET. Il a quasiment autant produit de puissance par fusion que celle nécessaire pour le chauffer :

$$P_{fus} = 16 \text{ MW} \quad P_{add} = 25 \text{ MW}$$

Le plasma a duré de l'ordre de 1 s.



Focus on : JET (EFDA, 2007)

Bibliographie

J.-M. Rax, Physique des Plasmas, Dunod (2005)

Chap. 3 : Phénomènes collectifs

Chap. 4 : Collisions et réactions

R. Mackintosh et al., Nucleus, un voyage au cœur de la matière, EDP Sciences (2006)

Chap. 9 : la fournaise cosmique

T. Lehner, L'état de plasma, Vuibert (2005)

G. Belmont, L. Rezeau, C. Riconda et A. Zaslavsky, Introduction à la physique des plasmas, ISTE Éditions (2018)

J. Wesson, Tokamaks, 3rd edition, Clarendon Press Oxford (2004)

Chap. 2 : Plasma physics

Chap. 3 : Equilibrium

J.-M. Rax, Physique des Tokamaks, Éditions de l'École polytechnique (2011)

Chap. 6 : Confinement Orbital

Chap. 7 : Magnétohydrodynamique

Constantes physiques

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$: constante de Boltzmann

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$: constante de Planck

$C = 2,99 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$: vitesse de la lumière dans le vide

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$: permittivité du vide

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$: perméabilité du vide

$q_e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$: charge élémentaire

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$: masse de l'électron

$r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_e^2}{m_e c^2} = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{ m}$: rayon classique de l'électron

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$: nombre d'Avogadro

$m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$: unité de masse atomique

- Grandeurs standard

$T_0 = 273,15 \text{ K}$: température standard de l'air (0°C)

$P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$: pression standard de l'air

$n_0 = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$: densité moléculaire d'un gaz parfait à T_0 et P_0

- Unités

$1 \text{ Torr} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{760} \text{ Pa} = 133,3 \text{ Pa}$: pression correspondant à 1 mm de mercure

$1 \text{ eV} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23}} \text{ K} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ K}$