

Fusion par confinement magnétique : défis liés aux instabilités et à la turbulence plasma

Etienne GRAVIER

Conférences Énergie / Plasmas - École des Mines - 6 février 2018

Équipe Plasmas Chauds
Institut Jean Lamour
Université de Lorraine - CNRS - UMR 7198

1 Introduction

- La fusion
- ITER

2 Physique des plasmas

- Critère de Lawson
- Confinement magnétique
- Collisions coulombiennes - Transport collisionnel
- Transport anormal

3 Aspect expérimental

- Les grands dispositifs expérimentaux
- Les machines de laboratoire

4 Simulation

- Le modèle cinétique
- Le modèle fluide

5 Conclusion

1 Introduction

- La fusion
- ITER

2 Physique des plasmas

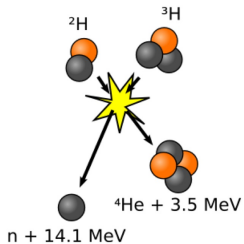
3 Aspect expérimental

4 Simulation

5 Conclusion

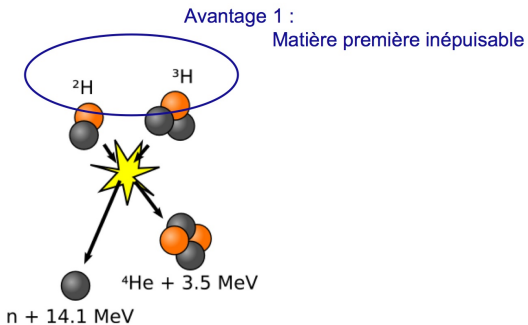
Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium



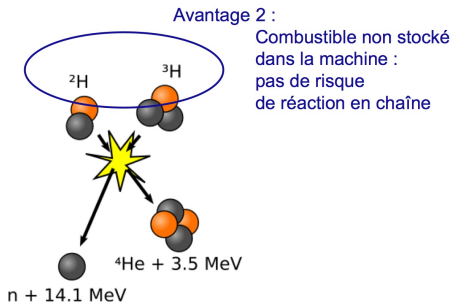
Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium



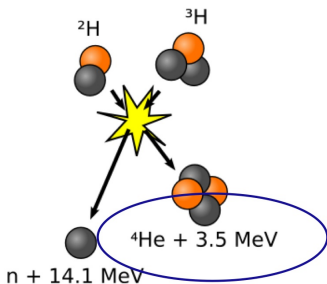
Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium



Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

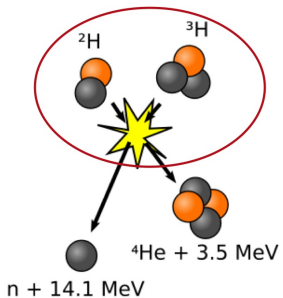


Avantage 3 :

Peu de déchets radioactifs
« Nucléaire écologique »

Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

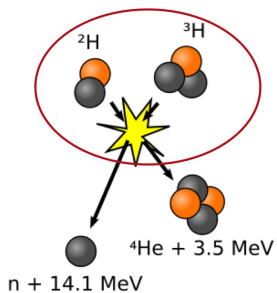
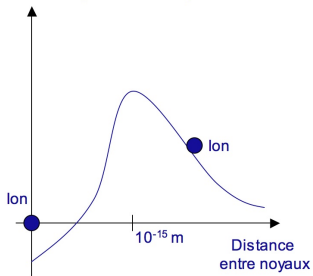


Inconvénient 1 :
Difficile

Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

Force de répulsion électrique

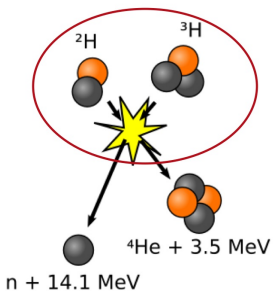
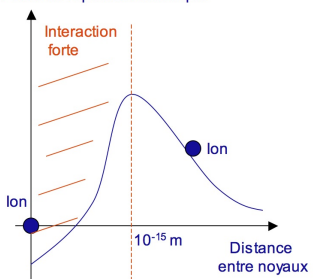


Inconvénient 1 :
Difficile

Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

Force de répulsion électrique

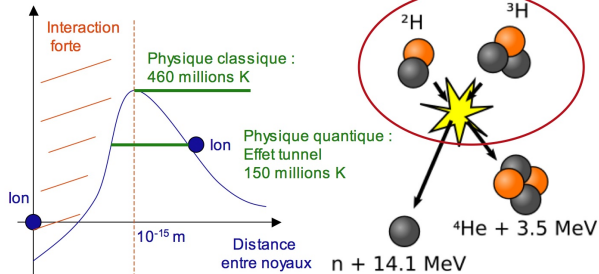


Inconvénient 1 :
Difficile

Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

Force de répulsion électrique



Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

150 millions K

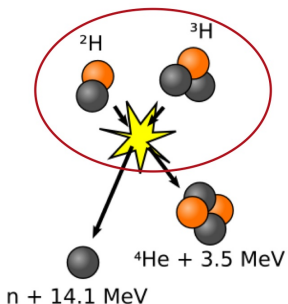
Gaz ionisé = Plasma

Conduit l'électricité

Réaction particulière aux OEM

Comportement « collectif »

Milieu facilement instable



Inconvénient 1 :
Difficile



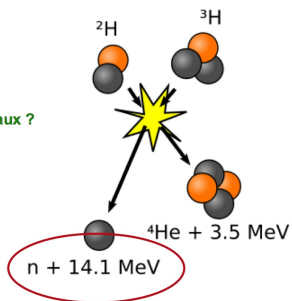
Réaction de fusion

Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

Niveau jamais atteint

Comment vont se comporter les matériaux ?

Un des défis majeurs d'ITER



Inconvénient 2 :
Neutrons très énergétiques

Réaction de fusion

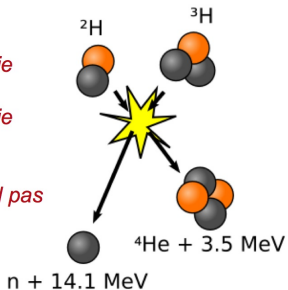
Fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium

Inconvénient 3 : « politique »

*1960 : Fusion = source d'énergie
pour les années 2000*

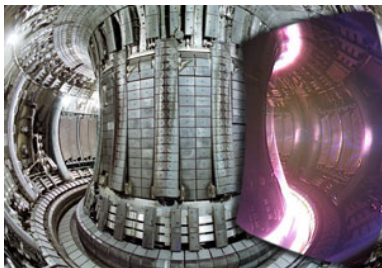
*2000 : Fusion = source d'énergie
pour les années 2050*

*Solution nucléaire, et ne répond pas
aux besoins à court terme*



JET : Joint European Torus

Culham (près d'Oxford) - Machine actuelle la plus performante

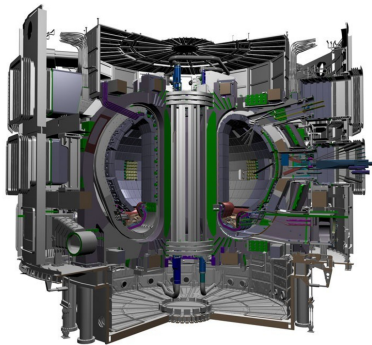


Record actuel :

$P_{fusion} = 16 \text{ MW}$, $P_{heating} = 25 \text{ MW}$, pendant 1 s

ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor

Prototype de réacteur nucléaire à fusion - Actuellement en construction à Cadarache - **Pas de production d'électricité**





ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor

Prototype de réacteur nucléaire à fusion - Actuellement en construction à Cadarache - **Pas de production d'électricité**

- ▶ petit rayon du plasma : 2 m (JET x 2)
- ▶ grand rayon du plasma : 6,20 m (JET x 2)
- ▶ hauteur du plasma : 6,80 m (JET x 4)
- ▶ volume plasma : 840 m³ (JET x 8,5)
- ▶ courant plasma : 15 MA (JET x 3)
- ▶ champ magnétique toroïdal : 5,3 T (JET x 1,5)

ITER : Objectif

$P_{fusion} = 500 \text{ MW}$, $P_{heating} = 50 \text{ MW}$, pendant 400 s

- ▶ 1985 : Sommet de Genève, Mikhaïl Gorbatchev (URSS) et Ronald Reagan (Etats-Unis)





- ▶ 1985 : Sommet de Genève, Mikhaïl Gorbatchev (URSS) et Ronald Reagan (Etats-Unis)
- ▶ 1986 : + Europe, Canada, Japon
- ▶ 1998 : Phase d'étude terminée - Retrait des Etats-Unis (réussite incertaine + coût)
- ▶ 2001 : Nouveau projet (moins ambitieux)
- ▶ 2002 : + Chine , Corée du Sud
- ▶ 2003 : Retour des Etats-Unis
- ▶ 2005 : Le site de Cadarache est choisi (choix parmi Canada, Espagne, France, Japon) + Inde



- ▶ 2007 : Début construction (2010)
- ▶ 2015 : Premier plasma (2025)
- ▶ 2039 : Démantèlement d'ITER
- ▶ 2040 : DEMO (production d'électricité)
- ▶ 2050 : Exploitation industrielle
- ▶ coût : 10 milliards € (20 milliards €)



ITER



Construction ITER / Janvier 2012 / *Iter.org*



Construction ITER / Plots parasismiques / Février 2012 / *Iter.org*



Construction ITER / Avril 2013 / *Iter.org*



Construction ITER / Avril 2014 / *Iter.org*



Construction ITER / Avril 2015 / *Iter.org*



Construction ITER / Avril 2016 / *Iter.org*



Construction ITER / Avril 2016 / *Iter.org*



Chantier ITER / Avril 2017 / *Iter.org*



ITER



Chantier ITER / Avril 2017 / Iter.org



DEMO et exploitation industrielle :

- ▶ La fusion produit un neutron qui transporte 80% de l'énergie produite hors du plasma (particule non chargée, insensible au champ magnétique)
- ▶ Neutrons absorbés par les parois du réacteur \Rightarrow Chaleur transférée aux parois
- ▶ Parois refroidies \Rightarrow chaleur utilisée pour produire de la vapeur \Rightarrow turbines et alternateurs \Rightarrow électricité
- ▶ Les neutrons serviront aussi à transformer le lithium en tritium

1 Introduction

2 Physique des plasmas

- Critère de Lawson
- Confinement magnétique
- Collisions coulombiennes - Transport collisionnel
- Transport anormal

3 Aspect expérimental

4 Simulation

5 Conclusion



Plasma

Gaz constitué de particules chargées = gaz ionisé

Ici : complètement ionisé

Ions et électrons : n_e, T_e, n_i, T_i

Neutralité globale : autant d'ions que d'électrons

Densité plasma : $n = n_e = n_i$

Pour un plasma de tokamak : $T_e \simeq T_i$

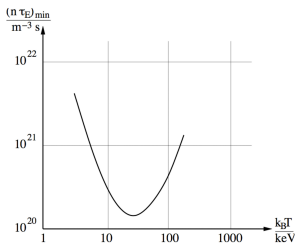


Le critère de Lawson : condition d'ignition

$$nk_B T_{TE} > 3 \times 10^{21} \text{ keV s m}^{-3}$$

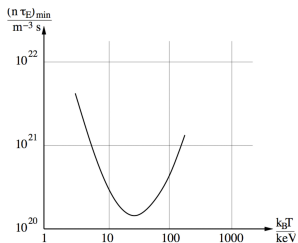
Le critère de Lawson : condition d'ignition

$$nk_B T \tau_E > 3 \times 10^{21} \text{ keV s m}^{-3}$$



Le critère de Lawson : condition d'ignition

$$nk_B T \tau_E > 3 \times 10^{21} \text{ keV s m}^{-3}$$



Fusion magnétique :

$$\begin{aligned} &\Rightarrow T \simeq 15 \text{ keV} \\ n &\simeq 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ (disruption)} \\ &\Rightarrow \tau_E = 2 \text{ s} \end{aligned}$$



Temps de confinement τ_E :

Temps caractéristique de décroissance de l'énergie du plasma si toutes les sources étaient coupées.

Confinement magnétique :

Une particule chargée *s'enroule* autour de la ligne de champ magnétique.

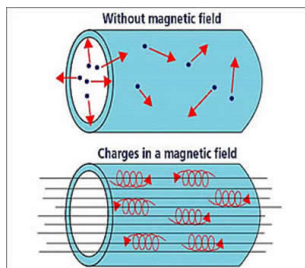
Mouvement cyclotron :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Confinement magnétique :

Mouvement cyclotron, de caractéristiques :

- ▶ la pulsation (ou fréquence) cyclotron $\omega_c = \frac{qB}{m}$
- ▶ le rayon de Larmor $r_L \simeq \frac{v_{T_i}}{\omega_c}$



www.jet.efda.org



Première idée : machine cylindrique avec champ magnétique axial



Première idée : machine cylindrique avec champ magnétique axial

Fusion par confinement magnétique :

$$\tau_E = 2 \text{ s}, T_i = 15 \text{ keV}$$

$$\Rightarrow v_{T_i} = 8.5 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

\Rightarrow Distance parcourue par un ion en 2 s : **1700 km**



Première idée : machine cylindrique avec champ magnétique axial

Fusion par confinement magnétique :

$$\tau_E = 2 \text{ s}, T_i = 15 \text{ keV}$$

$$\Rightarrow v_{T_i} = 8.5 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

\Rightarrow Distance parcourue par un ion en 2 s : **1700 km**

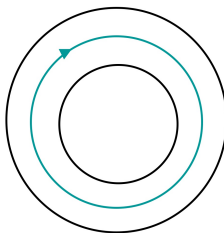
\Rightarrow **Conditions aux extrémités \Rightarrow Machine trop grande !**



Deuxième idée : machine toroïdale, les lignes de champ ne "heurtent" pas les parois



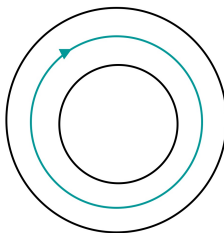
Deuxième idée : machine toroïdale, les lignes de champ ne "heurtent" pas les parois



vue de dessus



Deuxième idée : machine toroïdale, les lignes de champ ne "heurten" pas les parois



vue de dessus

Mais il reste un problème : la courbure des lignes de champ



Force supplémentaire sur le mouvement de la particule chargée :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} + \vec{F}$$



Force supplémentaire sur le mouvement de la particule chargée :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} + \vec{F}$$

Il apparaît une **dérive perpendiculaire** aux lignes de champ magnétique :

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{F} \times \vec{B}}{qB^2}$$

Force supplémentaire sur le mouvement de la particule chargée :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} + \vec{F}$$

Il apparaît une **dérive perpendiculaire** aux lignes de champ magnétique :

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{F} \times \vec{B}}{qB^2}$$

Par exemple, si $\vec{F} = q\vec{E}$:

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

Force supplémentaire sur le mouvement de la particule chargée :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} + \vec{F}$$

Il apparaît une **dérive perpendiculaire** aux lignes de champ magnétique :

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{F} \times \vec{B}}{qB^2}$$

Par exemple, si $\vec{F} = q\vec{E}$:

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

Ou encore, si $\vec{F} = m\vec{g}$:

$$\vec{v}_d = \frac{m\vec{g} \times \vec{B}}{qB^2}$$



Courbure, force centrifuge : $g = v_{\parallel}^2/R_c$

$$\vec{F}_{R_c} = mv_{\parallel}^2 \frac{\vec{R}_c}{R_c^2}$$

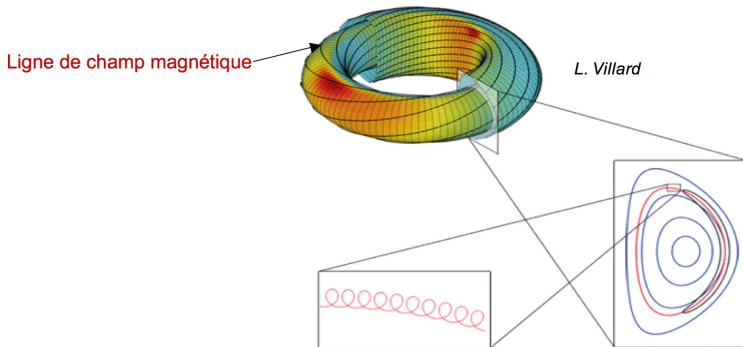
$$\vec{v}_{d_{R_c}} = \frac{mv_{\parallel}^2}{qR_c^2 B^2} \vec{R}_c \times \vec{B}$$

Cette dérive *déconfin*e les particules



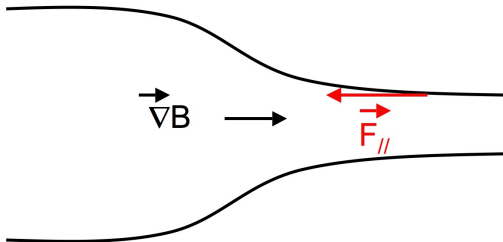
Champ magnétique toroïdal + champ magnétique poloïdal

Champ magnétique toroïdal + champ magnétique poloïdal

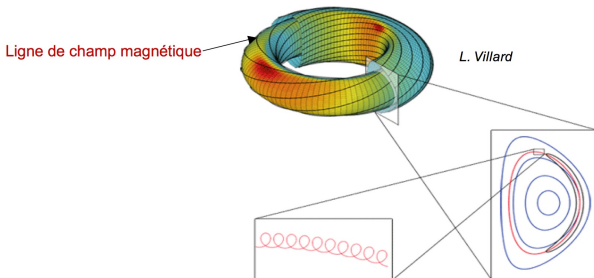


Aussi, force suivant la direction du champ magnétique :

$$F_{\parallel} = -\mu \nabla_{\parallel} B$$



Notion de miroir magnétique : **particules piégées**



Dans un tokamak : côté **faible champ** et côté **fort champ**

Notion de miroir magnétique : **particules piégées**

Remarque : comparaison périodes [Tokamak](#) / [Ceintures de Van Allen](#)

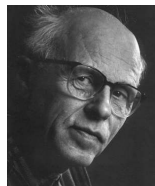
	Tokamak	Van Allen
Mouvement cyclotron	10^{-8} s	1 ms
Mouvement de rebond	10^{-5} s	1 s
Mouvement de précession	10^{-2} s	1000 s

TOKAMAK :

Igor Tamm et Andreï Sakharov

Vient de **toroïdalnaïa kamera magnitnymi katushkami** :
*chambre toroïdale avec bobines magnétiques*Années 1960 : performances obtenues dans les tokamaks supérieures à celles
obtenues dans les autres machines

Igor Tamm - (1895/1971)



Andreï Sakharov - (1921/1989)

Malgré ces efforts : **TRANSPORT**

Transport de matière et de chaleur perpendiculaire aux lignes de champ



Malgré ces efforts : **TRANSPORT**

Transport de matière et de chaleur perpendiculaire aux lignes de champ

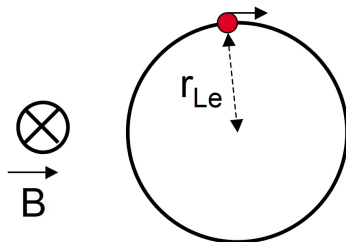
⇒ D'où vient ce transport ?



Principe du transport collisionnel

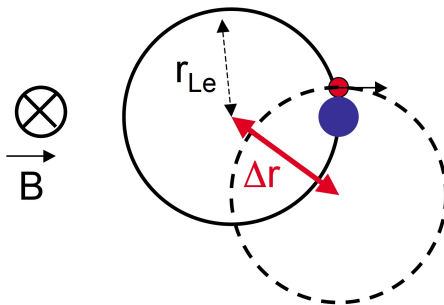
Principe du transport collisionnel

Collision électron-ion



Principe du transport collisionnel

Collision électron-ion





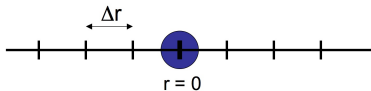
Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$



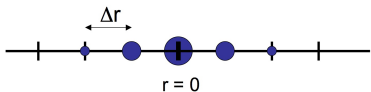
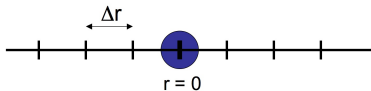
Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$



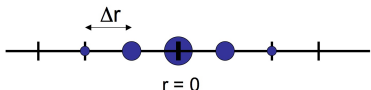
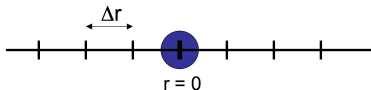
Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$



Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$



Equation de diffusion :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \nabla^2 n$$



Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$



Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$

Ici, $(\Delta r)^2 = 2r_{LE}^2$ et $\Delta t = \frac{1}{\nu_{ei}}$



Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$

Ici, $(\Delta r)^2 = 2r_{LE}^2$ et $\Delta t = \frac{1}{\nu_{ei}}$

d'où

$$D = \frac{k_B T_e \nu_{ei}}{m \omega_C^2} = \frac{m k_B T_e \nu_{ei}}{e^2 B^2}$$



Marche aléatoire

$$D = \frac{(\Delta r)^2}{2\Delta t}$$

Ici, $(\Delta r)^2 = 2r_{LE}^2$ et $\Delta t = \frac{1}{\nu_{ei}}$

d'où

$$D = \frac{k_B T_e \nu_{ei}}{m \omega_C^2} = \frac{m k_B T_e \nu_{ei}}{e^2 B^2}$$

Le champ magnétique confine et les collisions déconfinent le plasma.

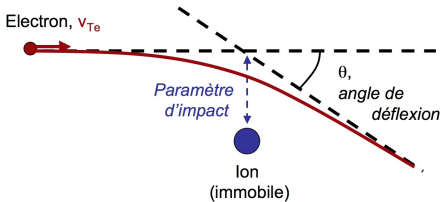


Calcul de la fréquence de collision ν_{ei}

Ernest Rutherford (1871-1937)

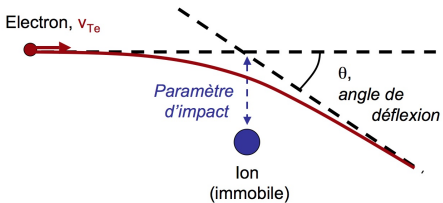
Calcul de la fréquence de collision ν_{ei}

Ernest Rutherford (1871-1937)



Calcul de la fréquence de collision ν_{ei}

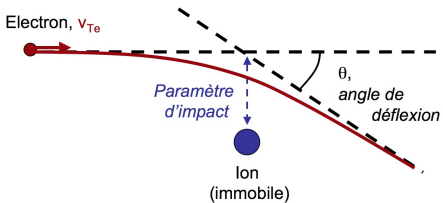
Ernest Rutherford (1871-1937)



$$\nu_{ei} = \frac{4n_i e^4}{\pi \epsilon_0^2 m_e^2 v_{Te}^3}$$

Calcul de la fréquence de collision ν_{ei}

Ernest Rutherford (1871-1937)

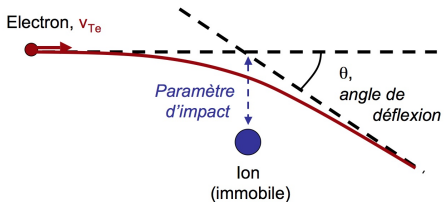


$$\nu_{ei} = \frac{4n_i e^4}{\pi \epsilon_0^2 m_e^2 v_{Te}^3}$$

Paramètres fusion ITER : $\nu_{ei} \simeq 5000 \text{ s}^{-1}$

Calcul de la fréquence de collision ν_{ei}

Ernest Rutherford (1871-1937)



$$\nu_{ei} = \frac{4n_i e^4}{\pi \epsilon_0^2 m_e^2 v_{Te}^3}$$

Paramètres fusion ITER : $\nu_{ei} \simeq 5000 \text{ s}^{-1}$
 \sim Une collision tous les 10 km

Transport collisionnel *classique* / Particules passantes

$$D \simeq 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



Transport collisionnel *classique* / Particules passantes

$$D \simeq 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Transport observé expérimentalement

$$D \simeq 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



Transport collisionnel *classique* / Particules passantes

$$D \simeq 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Transport observé expérimentalement

$$D \simeq 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Transport collisionnel *néo-classique* / Particules piégées

$$D \simeq 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



Transport collisionnel *classique* / Particules passantes

$$D \simeq 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Transport observé expérimentalement

$$D \simeq 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Transport collisionnel *néo-classique* / Particules piégées

$$D \simeq 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Chercher une autre cause pour expliquer le transport !

Remarque : Collisions pas forcément utiles pour expliquer le transport observé expérimentalement / Le modèle théorique pourra s'en passer en première approximation.

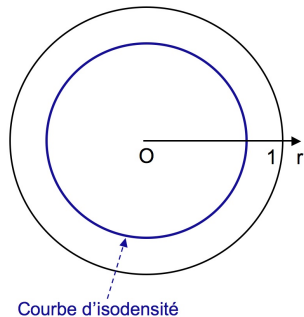
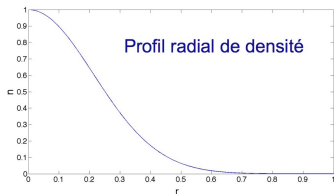


Deuxième idée pour expliquer le transport observé

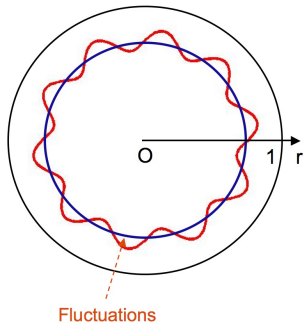
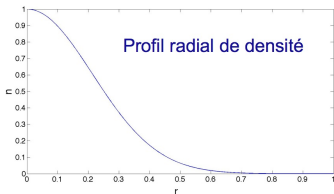
Transport lié aux instabilités et à la turbulence = **transport anormal**



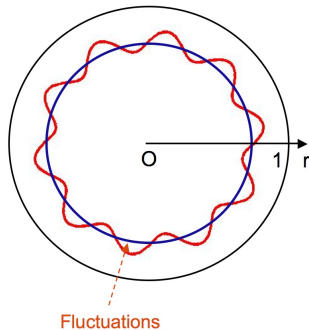
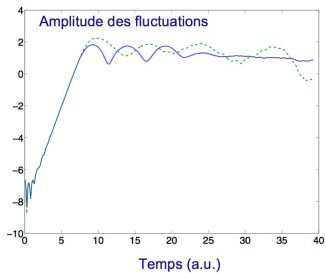
⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

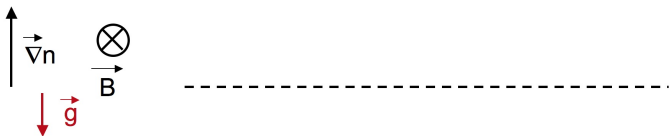




⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

Exemple : **instabilité de type Rayleigh-Taylor**

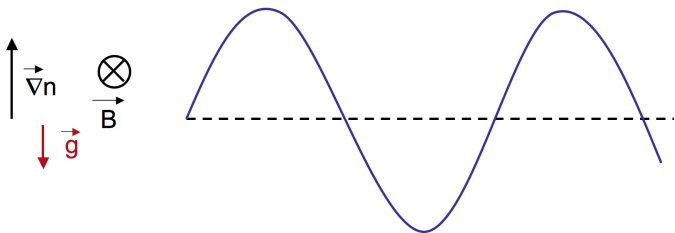
Courbe d'isodensité :



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

Exemple : **instabilité de type Rayleigh-Taylor**

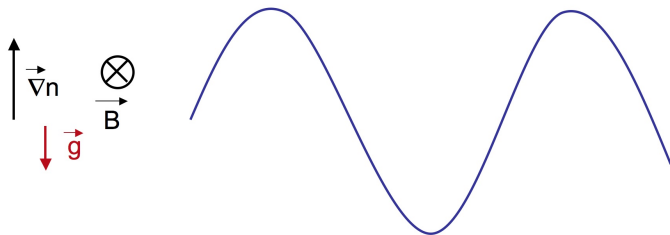
Perturbation de la courbe d'isodensité :



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

Exemple : instabilité de type Rayleigh-Taylor

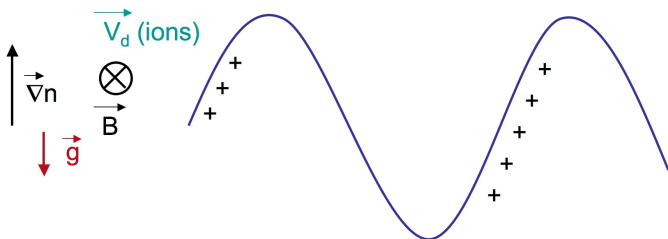
Perturbation de la courbe d'isodensité :



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

Exemple : **instabilité de type Rayleigh-Taylor**

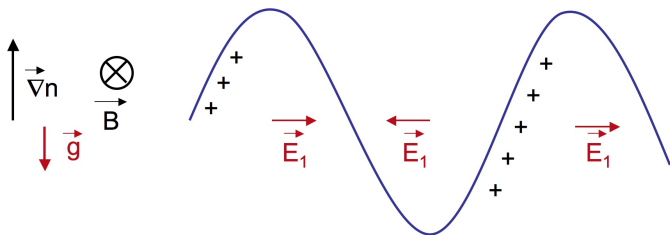
Dérive $\vec{v}_d = \frac{m\vec{g} \times \vec{B}}{qB^2}$:



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

Exemple : **instabilité de type Rayleigh-Taylor**

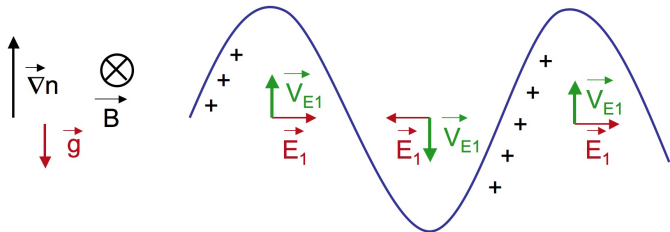
Génération d'un champ électrique :



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

Exemple : **instabilité de type Rayleigh-Taylor**

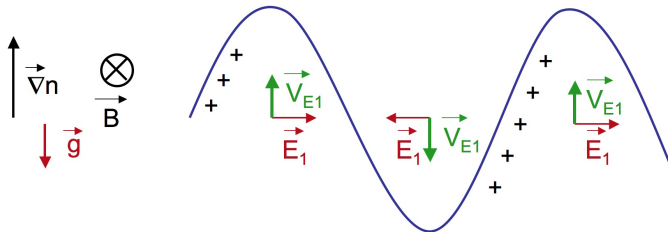
Nouvelle dérive $\vec{v}_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$:



⇒ Qu'est-ce qu'une instabilité ?

Exemple : instabilité de type Rayleigh-Taylor

Nouvelle dérive $\vec{v}_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$:



L'amplitude de la perturbation augmente ⇒ Instabilité

⇒ Gradients = moteur des instabilités

	Plasma de bord	Plasma de coeur
$n \text{ (m}^{-3}\text{)}$	10^{18}	10^{20}
$T \text{ (eV)}$	10^2	$2 \cdot 10^4$



Transport observé expérimentalement

$$D \simeq 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



Transport observé expérimentalement

$$D \simeq 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Transport lié aux instabilités et à la turbulence

$$D \simeq 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



Pourquoi une machine de plus en plus grande ?



Pourquoi une machine de plus en plus grande ?

⇒ à cause de la turbulence

Surfaces magnétiques = « couches successives de vêtements »

Instabilités et turbulence = « déchirures dans les vêtements »

Pourquoi une machine de plus en plus grande ?

⇒ à cause de la turbulence

Surfaces magnétiques = « couches successives de vêtements »

Instabilités et turbulence = « déchirures dans les vêtements »

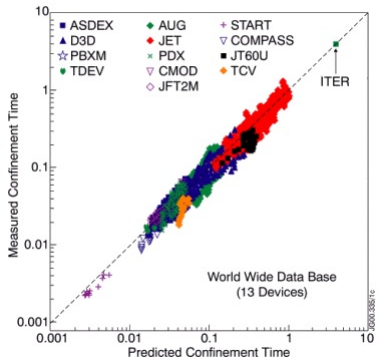
Deux façons d'améliorer « l' isolation » :

- 1) « Augmenter l'épaisseur des vêtements » = augmenter la taille de la machine
- 2) « Limiter les déchirures » = contrôler ou limiter les instabilités

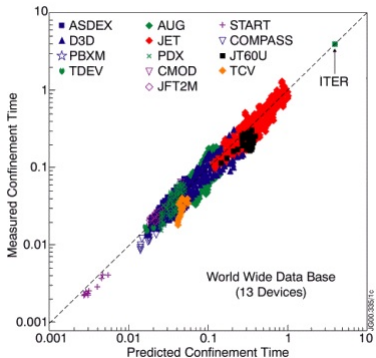


Performances ITER estimées par extrapolation d'une loi empirique

Performances ITER estimées par extrapolation d'une loi empirique



Performances ITER estimées par extrapolation d'une loi empirique

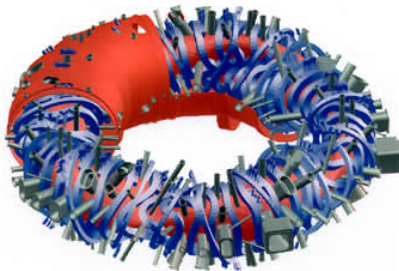


⇒ Turbulence au cœur du plasma mal comprise

⇒ Obtenir des outils prédictifs fiables

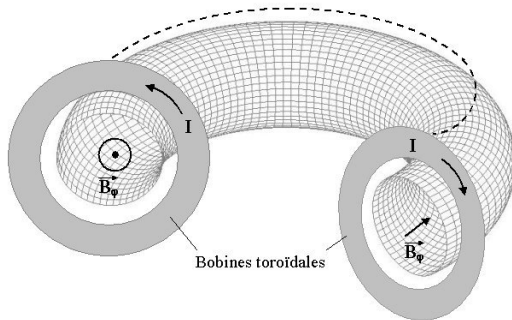
- 1 Introduction
- 2 Physique des plasmas
- 3 Aspect expérimental**
 - Les grands dispositifs expérimentaux
 - Les machines de laboratoire
- 4 Simulation
- 5 Conclusion

Stellarator :



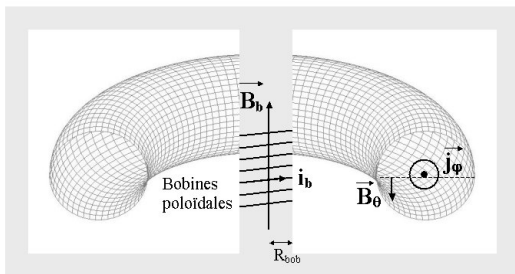
W7X IPP Greifswald, Max Planck Institut - Les champs magnétiques **poloïdal** et **toroïdal** sont tous les deux créés par les mêmes **bobines**.

Tokamak :



Création du champ magnétique toroïdal. Les bobines sont traversées par un courant I constant créant B_ϕ .

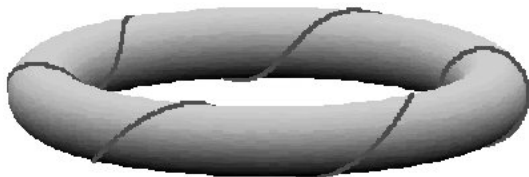
Tokamak :



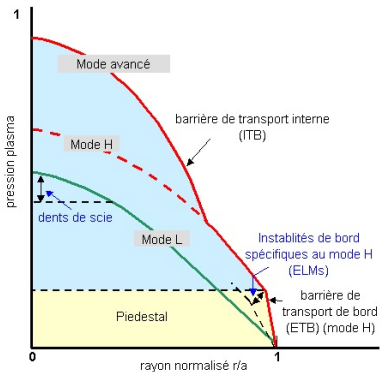
Création du champ magnétique poloïdal. Les bobines poloïdales sont traversées par un courant i_b qui varie avec le temps. Selon le même principe de fonctionnement qu'un transformateur, une densité de courant j_ϕ va apparaître dans le plasma. Ce courant génèrera le champ magnétique poloïdal.



Tokamak :



Champ magnétique total



www.fusion-magnetique.cea.fr

Mode H (découvert par hasard sur ASDEX, 1982)

⇒ Temps de confinement x 2

⇒ Cisaillement de vitesse, atténue la turbulence



Intérêt des machines de laboratoire :

- ▶ Plasmas plus accessibles
- ▶ Conditions d'utilisation plus souples
- ▶ Instabilités observées peuvent avoir des points communs avec celles des tokamaks



- 1 Introduction
- 2 Physique des plasmas
- 3 Aspect expérimental
- 4 Simulation**
 - Le modèle cinétique
 - Le modèle fluide
- 5 Conclusion



- ▶ L'idéal serait de suivre individuellement chaque particule
- ▶ Mais $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$
- ▶ **Modélisation n corps impossible**
- ▶ **Physique statistique**



Pour chaque espèce de particules α :

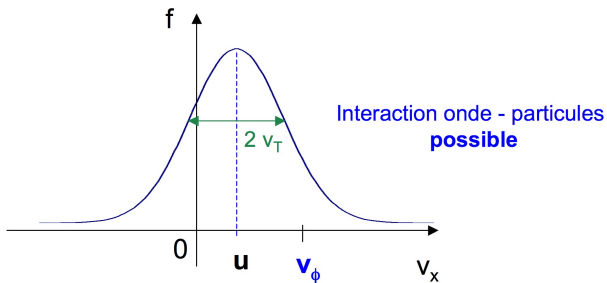
$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}_r f_\alpha + \frac{q_\alpha}{m_\alpha} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{\nabla}_v f_\alpha = 0$$

+ Equations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B}, \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{j} + \epsilon_0 \partial_t \vec{E}), \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

avec

$$\rho = \sum_\alpha q_\alpha \int f_\alpha d^3v \quad \text{et} \quad \vec{j} = \sum_\alpha q_\alpha \int \vec{v} f_\alpha d^3v.$$



f dépend de 7 variables indépendantes \vec{r} , \vec{v} et t

⇒ **La modélisation reste très difficile**

Plasma de cœur d'un tokamak :

Equation cinétique (ions)

$$v_\phi \sim v_\parallel$$

Vlasov

$$\frac{df}{dt} = 0 = \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}}$$

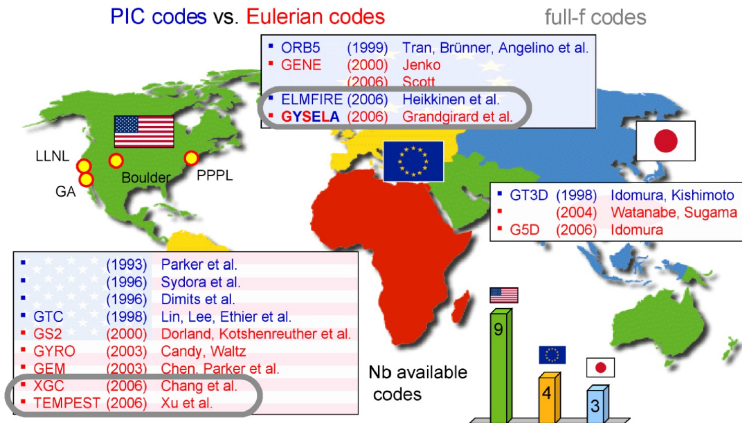
Instabilités
+ interactions onde-particules

Fokker-Planck

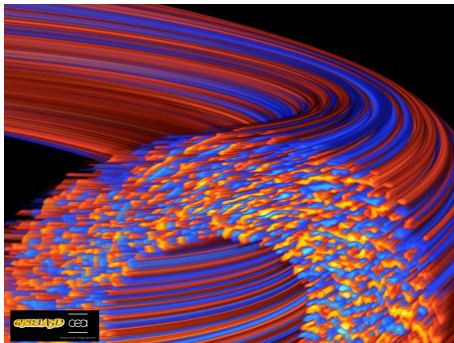
$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll}$$

Collisions
+ Instabilités
+ Interactions ondes-particules

Les codes gyrocinétiques :



Code GYSELA (CEA Cadarache)



Code hautement parallélisé ($\sim 100\ 000$ coeurs)



Modélisation fluide :

Vlasov \times 1 et intégration sur \vec{v}

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n\vec{u}) = 0$$

Equation de continuité

Vlasov \times \vec{v} et intégration sur \vec{v}

$$mn \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right] = nq(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - \vec{\nabla} p$$

Equation fluide du mouvement

Vlasov \times v^2 et intégration sur \vec{v}

Equation de transport de l'énergie

etc., équation de fermeture nécessaire.



- 1 Introduction
- 2 Physique des plasmas
- 3 Aspect expérimental
- 4 Simulation
- 5 Conclusion**



Physique de la turbulence encore mal comprise

Exemple : **Barrière de transport interne (ITB)**

Transport néoclassique ?

Plasma idéal : **deutérium et tritium**

Mais autres espèces :

- ▶ production d'**hélium**
- ▶ érosion des composants face au plasma (**carbone, tungstène, béryllium**)

Impuretés :

- ▶ désirables dans le plasma de bord
- ▶ indésirables dans le plasma de coeur