

<http://emmanuelplaut.perso.univ-lorraine.fr/nucleaire/fusion.pdf>

CE55 : Physique de la production d'énergie nucléaire

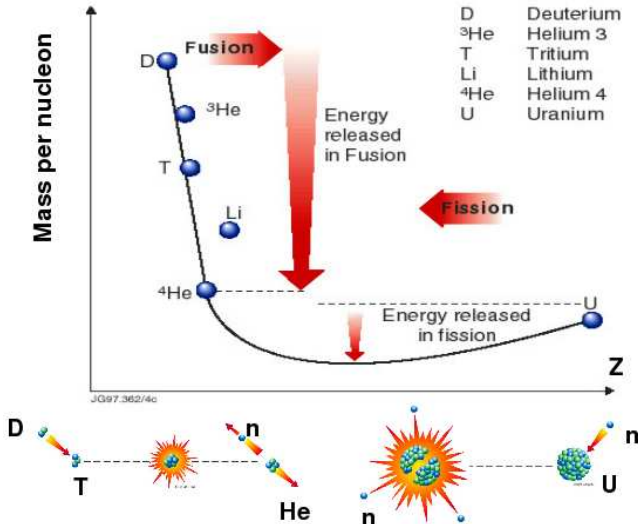
Emmanuel Plaut
Mines Nancy, octobre 2014

Complément 2 :

Fusion thermonucléaire : principes, et quelques projets

Et la fusion ?...

Vue comme alternative à la **fission**, sur la courbe des masses par nucléons :



Étude énergétique de différentes réactions de fusion

- ▶ ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu_e$, $E = 1,44 \text{ MeV}$ (réact. solaire)
- ▶ ${}^2_1\text{D} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$, $E = 5,49 \text{ MeV}$ (réact. solaire)
- ▶ ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_1\text{T} + {}^1_1\text{H}$, $E = 4,03 \text{ MeV}$
- ▶ ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$, $E = 17,6 \text{ MeV}$
- ▶ ${}^2_1\text{D} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H}$, $E = 18,4 \text{ MeV}$

${}^A_Z\text{X}$	${}^1_0\text{n}$	${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{D}$	${}^3_1\text{T}$	${}^3_2\text{He}$	${}^4_2\text{He}$
$M({}^A_Z\text{X}) [\text{MeV}]$	939,57	938,78	1876,12	2809,43	2809,41	3728,4

Les réactions les plus énergétiques sont D-T et D-He.

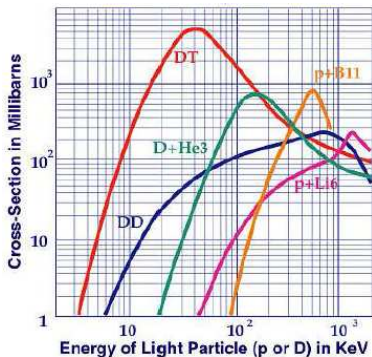
Étude de différentes réactions de fusion

- ▶ ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$, $E = 17,6 \text{ MeV}$
- ▶ ${}^2_1\text{D} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H}$, $E = 18,4 \text{ MeV}$

Difficultés de ces réactions / réactions de fission par neutrons :

faire réagir 2 atomes avec leurs nuages d' e^- ou 2 ions chargés **qui se repoussent**

⇒ **sections efficaces faibles** :

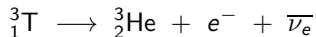


- ▷ Réaction D-T la – difficile
- ▷ σ max pour $E_{\text{inc}} \simeq 40 \text{ keV}$
- ▷ $T \simeq 310 \text{ MK}$
- ▷ Matière = **plasma !**

[Polywell nuclear fusion Web]

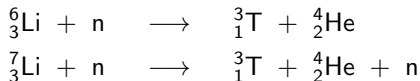
Les réactifs deutérium et tritium

- ▶ L'eau de mer contient du **deutérium** en proportion 1/6500.
- ▶ Le **tritium** est **radioactif**,



avec une demi-vie de 12 ans.

- ▶ On pense produire le **tritium** à partir de **lithium**, suivant les réactions



qui auraient lieu par exemple dans une « **couverture tritigène** » autour du réacteur.

Difficulté majeure : confiner le plasma

- ▶ à une température T suffisante
- ▶ avec une densité volumique $n = N_{\text{ions}}/V$ suffisante
- ▶ pendant un temps τ suffisant

de sorte que

$$E_{\text{produite par fission}} > E_{\text{injectée pour chauffer le plasma}}$$

ce qu'exprime le **critère de Lawson** (1956) :

$$T \simeq 20 \text{ keV} \quad \text{et} \quad n \tau > 6 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s} .$$

Voie prometteuse : fusion par confinement magnétique

$$n \simeq 10^{20} \text{ m}^{-3} \quad \Longrightarrow \quad \tau \simeq 6 \text{ s} .$$

Principe simplifié du confinement magnétique

Mouvement cyclotronique autour des **lignes de champ magnétique**,

cf. l'équation de la dynamique d'une particule chargée :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{\text{Lorentz}} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

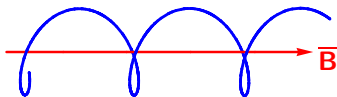
↪ en champ magnétique uniforme, mouvement hélicoïdal suivant les lignes de \vec{B} ,
de **fréquence cyclotron**

$$\Omega = \frac{|q|B}{m}$$

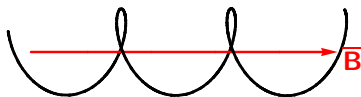
et de rayon

$$r_{\text{Larmor}} = \frac{||\vec{v}_{\perp}||}{\Omega} = \frac{m ||\vec{v}_{\perp}||}{|q|B}.$$

cas d'un ion ($q > 0$)



cas d'un électron ($q < 0$)



Principe simplifié du confinement magnétique

Le rayon de giration autour des lignes de champ

$$r_{\text{Larmor}} = \frac{v_{\perp}}{\Omega} = \frac{m v_{\perp}}{|q|B}$$

est petit si B est grand \implies les particules suivent les lignes de \vec{B} .

Exemple : plasma de fusion à 20 keV, $B \simeq 1 T$:

Estimation de v_{\perp} :

$$v_{\perp} \simeq v_{\text{thermique}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \implies r_{\text{Larmor}} \simeq \frac{\sqrt{2mkT}}{|q|B}.$$

▷ Électrons : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$:

$$\Omega_e = \frac{|q_e|B}{m_e} = 175 \text{ GHz}, \quad v_{\perp e} \simeq 83900 \text{ km/s}, \quad r_{\text{Larmore}} \simeq 0,5 \text{ mm}.$$

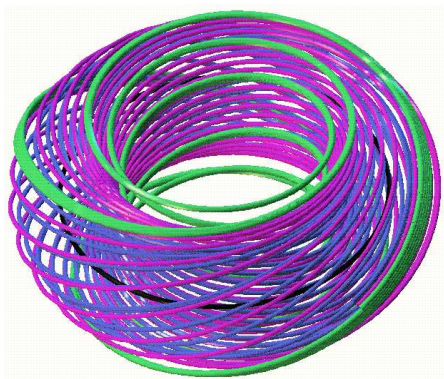
▷ Ions tritium : $m_i = 3 \text{ uma} = 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$:

$$\Omega_i = \frac{|q_i|B}{m_i} = 32 \text{ MHz}, \quad v_{\perp i} \simeq 1130 \text{ km/s}, \quad r_{\text{Larmor i}} \simeq 35 \text{ mm}.$$

Confinement magnétique mis en œuvre dans des grandes machines, les tokamaks

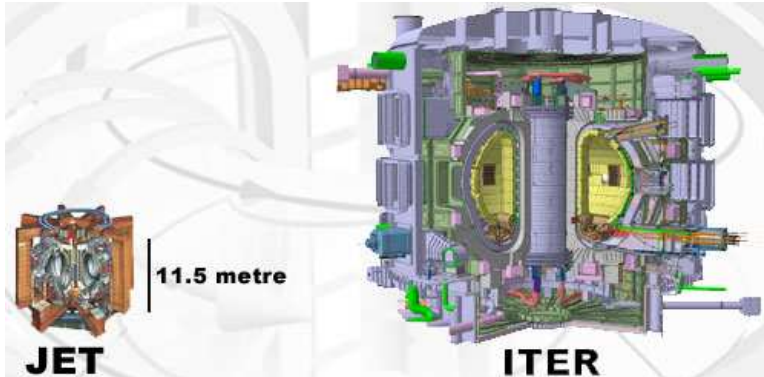
Concept inventé par les russes dans les années 1950 : « *toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami* ».

Les lignes du champ magnétiques s'enroulent en hélices toroidales...



[Oak Ridge National Laboratory. USA]

Confinement magnétique mis en œuvre dans des grandes machines, les tokamaks



À Culham, *UK*.

Record de fusion D-T obtenu en 1997 :

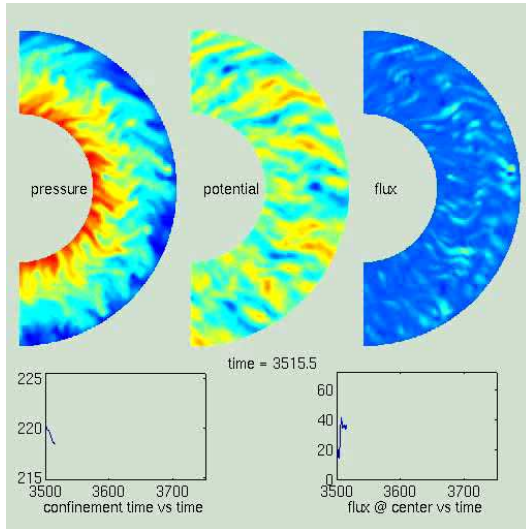
$$P_{\text{fusion}} = 16 \text{ MW} = 0,7 P_{\text{injectée}}$$
$$\tau \simeq 1 \text{ s}$$

En construction à Cadarache, *France*.

Objectif à atteindre vers 2020 :

$$P_{\text{fusion}} \simeq 500 \text{ MW} \gtrsim 10 P_{\text{injectée}}$$
$$\tau \gtrsim 450 \text{ s}$$

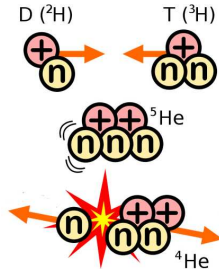
1^{er} problème majeur : la turbulence et les instabilités du plasma



[Beyer 2004 Simulation d'un modèle magnétohydrodynamique *PIIM*]

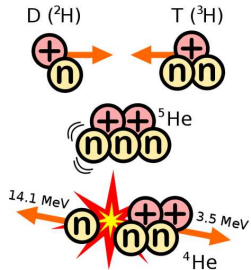
2^{ème} problème majeur ?

Comment se répartit l'énergie après la réaction D-T ?



2^{ème} problème majeur ?

Comment se répartit l'énergie après la réaction D-T ?



On obtient des **neutrons de haute énergie**

$$E_{cn} = 14,1 \text{ MeV !}$$

↪ recherches à faire en **physique des matériaux** pour que les **parois résistent** à ces bombardements neutroniques, tout en permettant le **transfert d'énergie** à un **fluide caloporteur**...

↪ projet **IFMIF : International fusion material irradiation facility**...



Bibliographie : traités

Arzhanov, V. 2009 *Reactor Physics*.
KTH Lectures.

Bodansky, D. 2004 *Nuclear Energy. Principles, practices and prospects*.
Springer.

Charles, P. 2007 *Énergie nucléaire. Fission et fusion*.
Ellipses.