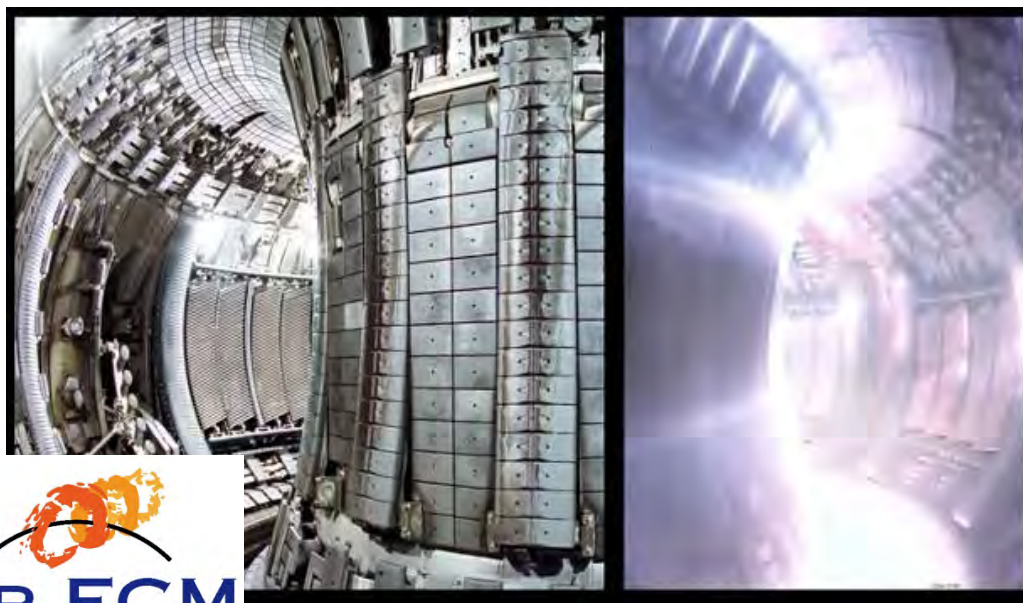
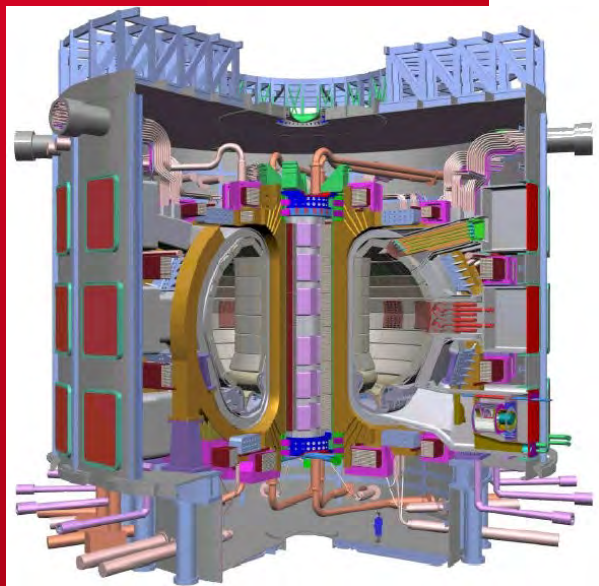


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

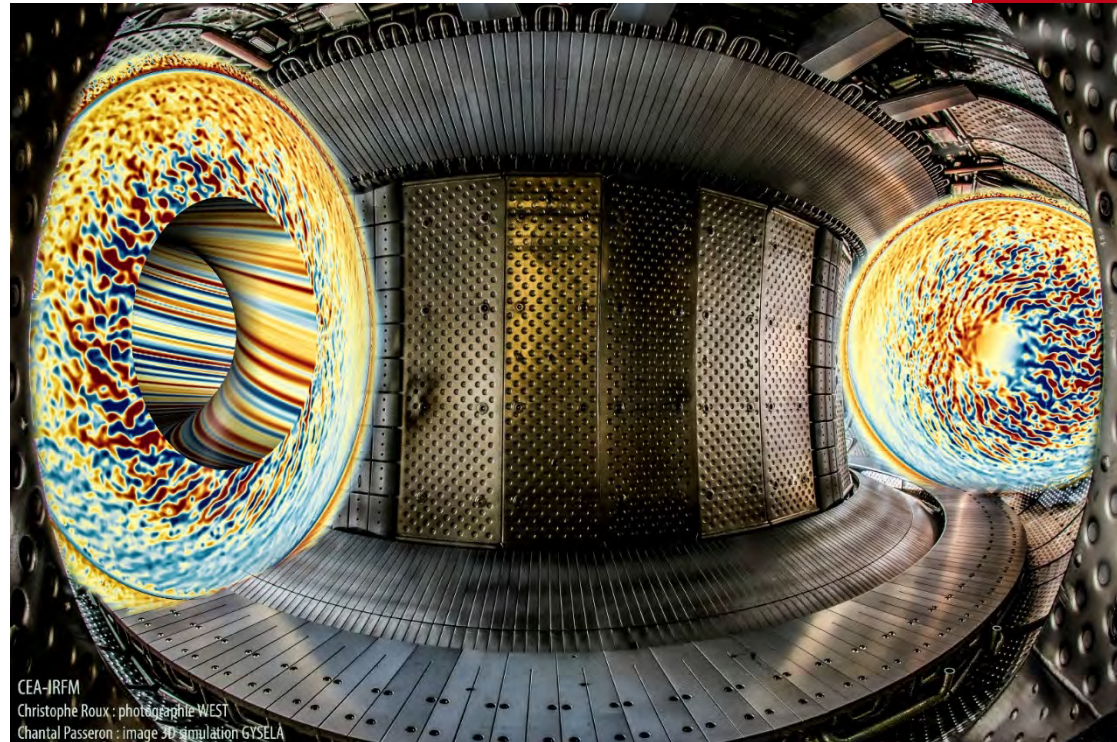


La FUSION par CONFINEMENT MAGNÉTIQUE le long CHEMIN du RÊVE à UNE RÉALISATION EXPÉRIMENTALE



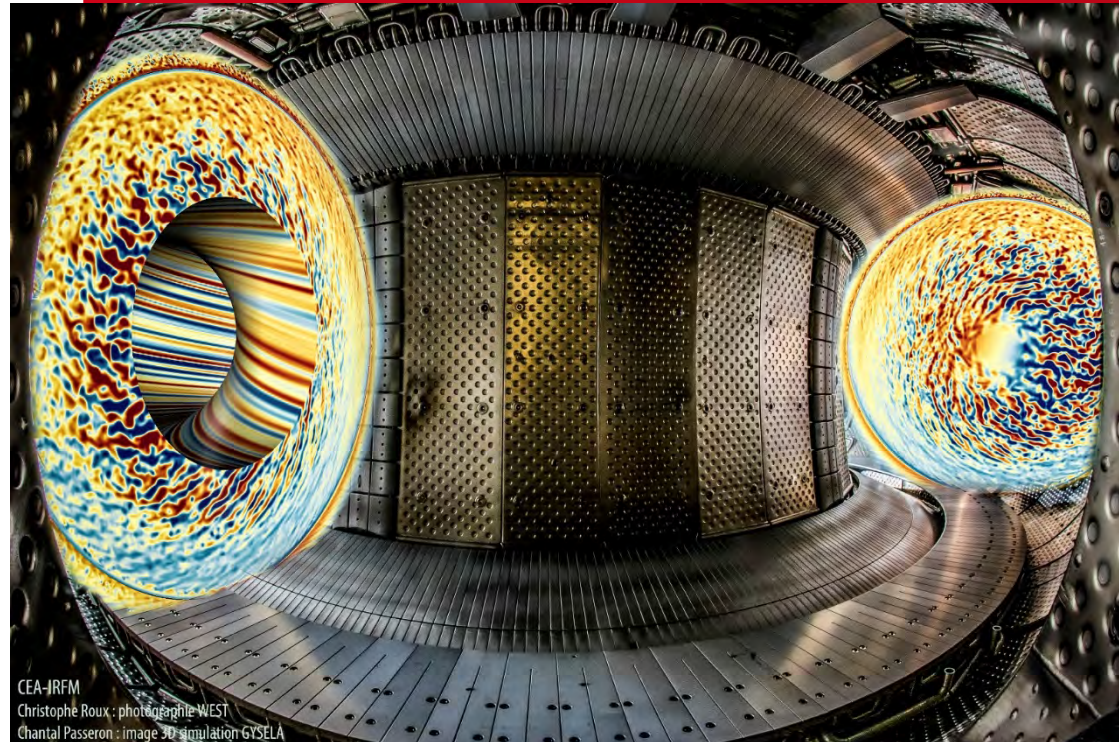
SOMMAIRE I

- Une histoire de l'énergie de fusion
- De la réaction nucléaire au confinement magnétique
- Le Tokamak
- Maths & Physique



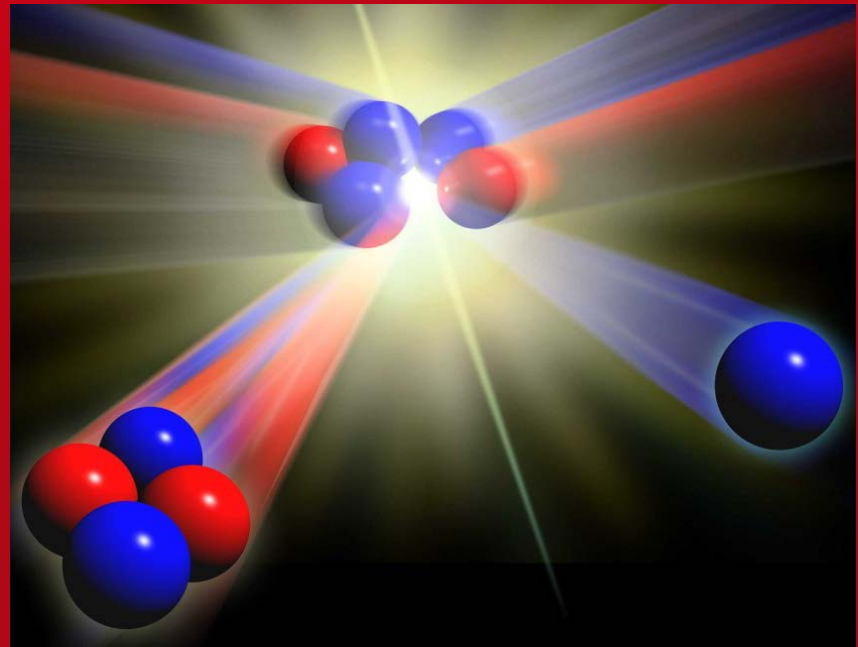
SOMMAIRE II

- Déterminer le confinement
- Turbulence plasma
- Statistiques cinétiques
How is plasma special?
- Gyrocinétique 5D
- Flux de chaleur à la paroi



UNE HISTOIRE DE L'ÉNERGIE DE FUSION

- Une histoire de l'énergie de fusion
- De la réaction nucléaire au confinement magnétique
- Le Tokamak
- Maths & Physique



1909-1911: Discovering the atom matter is not "plum pudding" (1904)



Walton Rutherford Cockcroft

He / α = 1905 common feature

1908 liquid helium at 5 K, 1911: Discovering superconductivity

1905: Einstein: $E = mc^2$ + Brownian motion

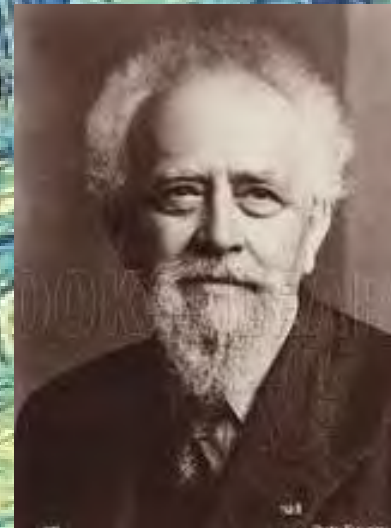
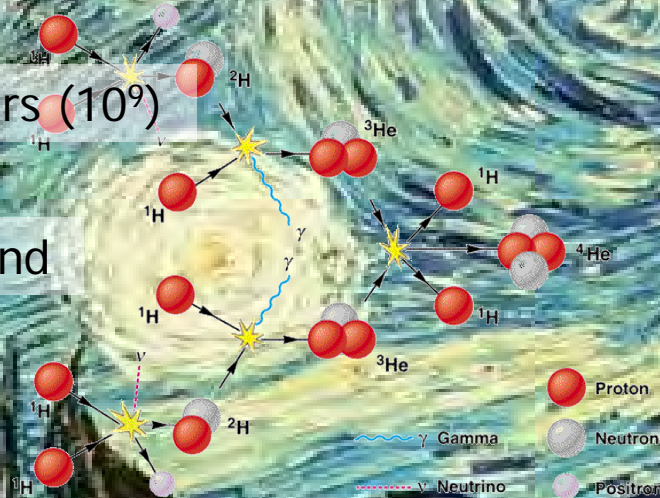
1908: Langevin, Jean Perrin \Rightarrow Brownian motion = atoms

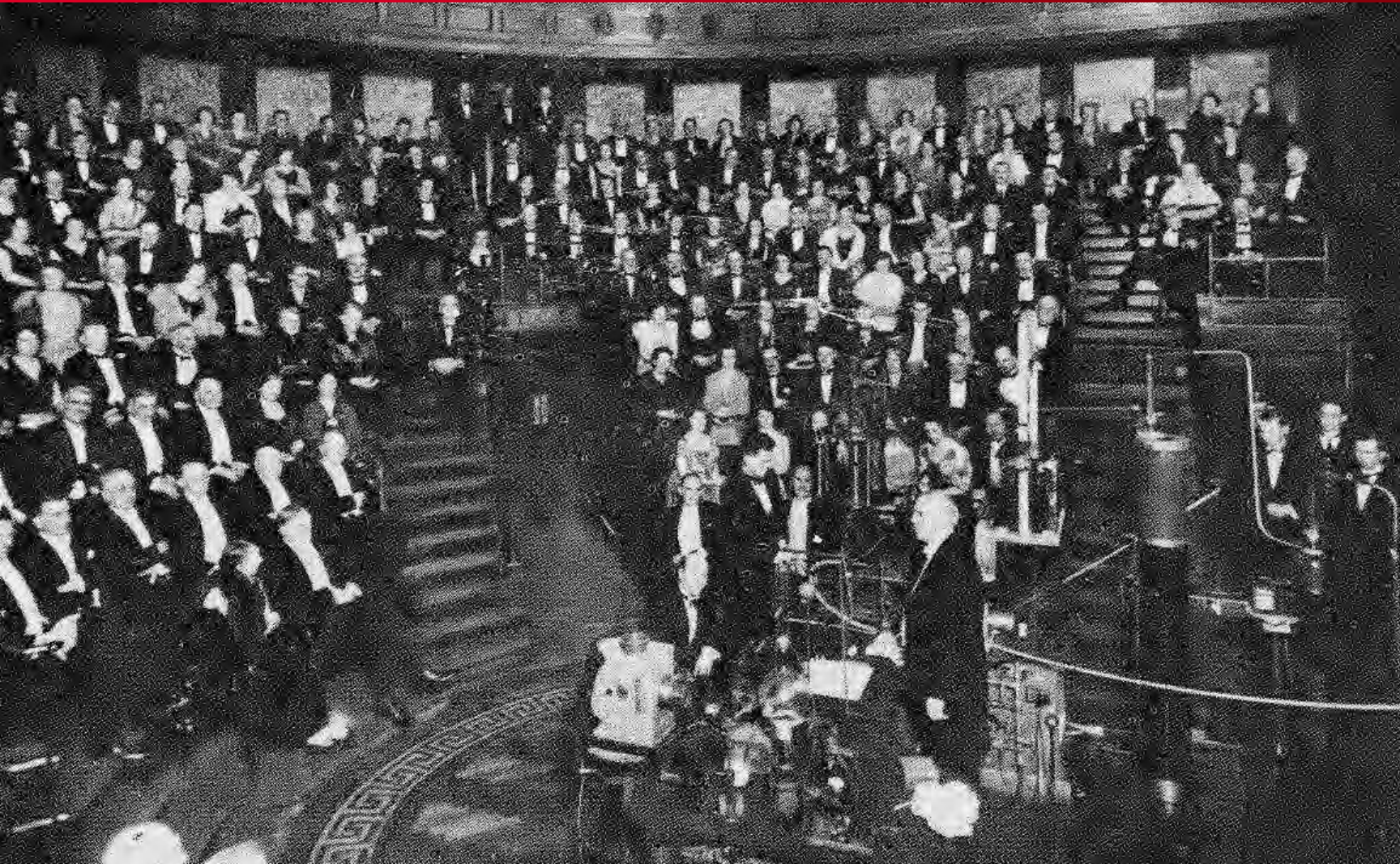
1913-1919: Nuclear fusion = energy of the stars (Jean Perrin)

1920 : Arthur Eddington, nuclear fusion = energy of the stars

1 billion years (10^9)

1 second





Oliphant & Rutherford discover deuterium fusion, 1933

a (political) story about FUSION

The cold war forefront

Early days (~1950): H bomb story
Classified Research

Ça a débuté comme ça

Céline LF "Voyage au bout de la nuit"



a (political) story about FUSION

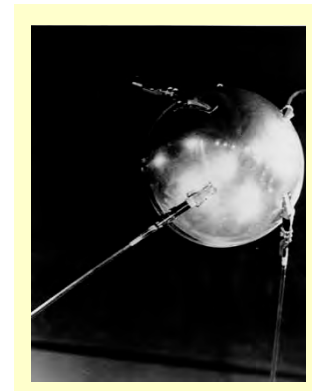
The cold war forefront

Early days (~1950): H bomb story

Classified Research

1957 Spoutnik effect,

USA \Rightarrow declassify



1958 IAEA = "International Cooperation"

Euratom = European programme (+ Swiss ? UK ?)

64 years

1960 USSR \rightarrow tokamak

1968 IAEA : tokamak T3, $T_e \sim 10\,000\,000\text{ K}$ record !

1969 Tokamak performance is confirmed (UK)

1985 ending Cold War: Reagan / Gorbachev summit

⇒ **ITER** 1.5 GW device, cost 10 Billion \$

4 partners : USA, USSR, Japan, EU



*Geneva Summit , 1985
Gorbachev, Reagan*

fusion "as an inexhaustible source of energy for the benefit of mankind"



1985 ending Cold War: Reagan / Gorbatchev summit

⇒ 1.5 GW device, cost 10 Billion \$: ITER

4 partners : USA, USSR, Japan, EU

1998 End of design (including technology research)

1998 USA pull-out

1998 New project at 50 % cost : ITER-FEAT

3 partners : Russia, Japan, EU

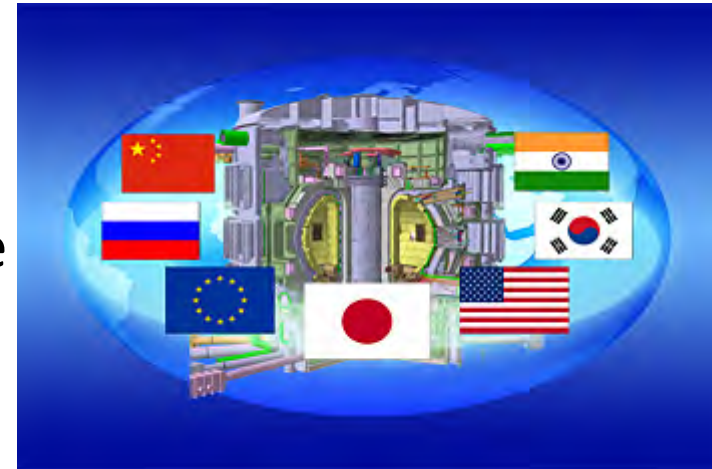
2001 End of new ITER design

2003 Towards a decision, political of course

2005 Cadarache site is chosen

2014 The long and winding road

1985 → 2025-2035: 50 years



1968... AG au CEA Fontenay aux Roses

⇒ le premier tokamak occidental : TFR (*Tokamak de Fontenay aux Roses*)

1988 Regroupement de la Fusion à Cadarache (1988 ≈ Fr = **350** personnes)

⇒ premier tokamak supra conducteur : Tore Supra

Choix de Cadarache comme site Européen pour ITER

Choix de Cadarache comme site international pour ITER

France : ITER = unité nucléaire de base ⇒ Autorité de Sûreté Nucléaire

France = infrastructures : Retour sur investissement déjà réalisé

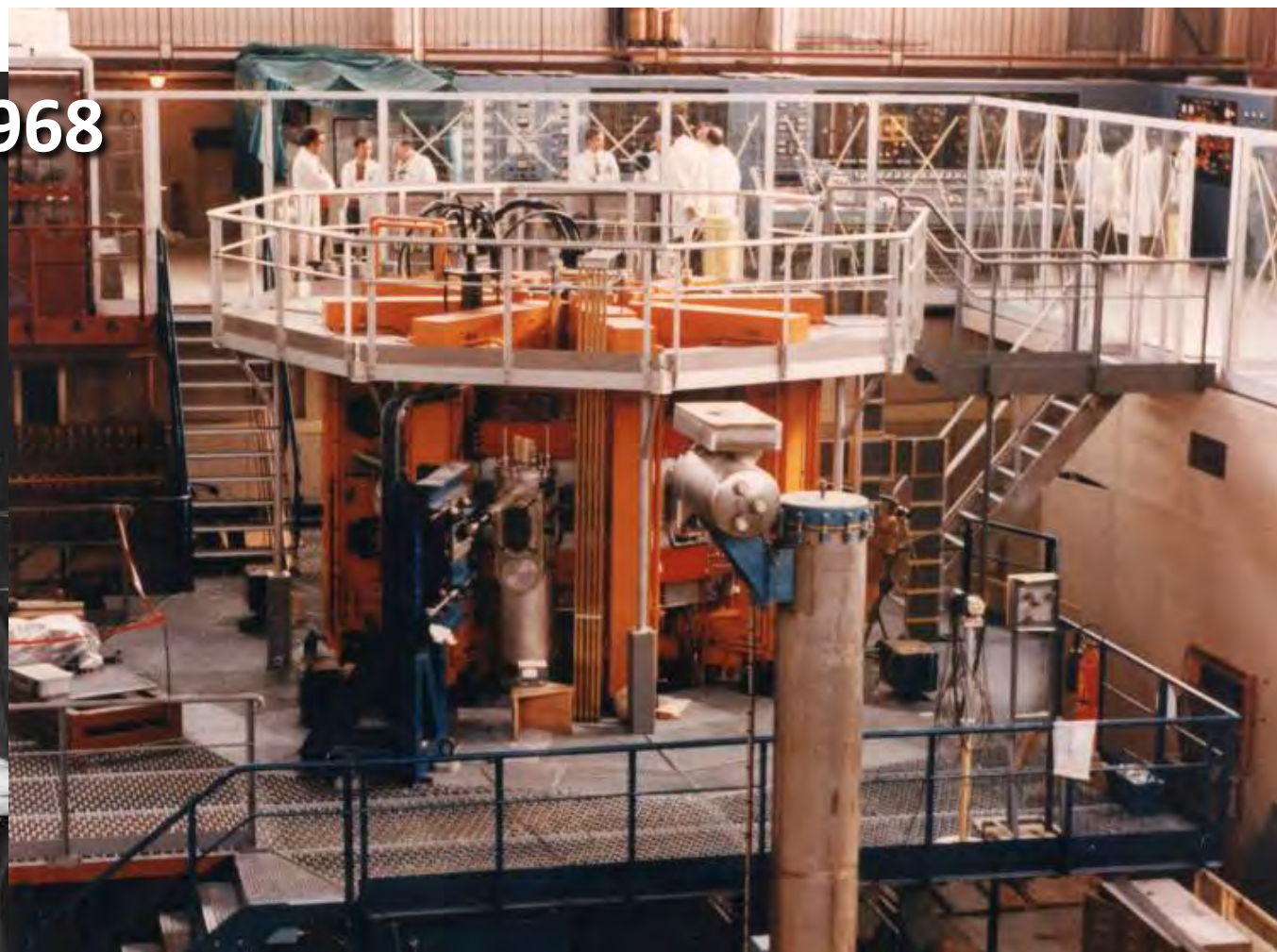
France ∈ partenaire UE

(2022 ≈ Fr = **225** personnes)

Artsimovitch: « La fusion sera disponible quand la société en aura besoin. »

Le tokamak de Fontenay aux Roses : TFR

Paris : mai 1968



2005 (1985 + 20 ans)



2013 ($\approx 1985 + 30$ ans)



ITER: building buildings...



ITER: la complexité à l'œuvre *isfm*



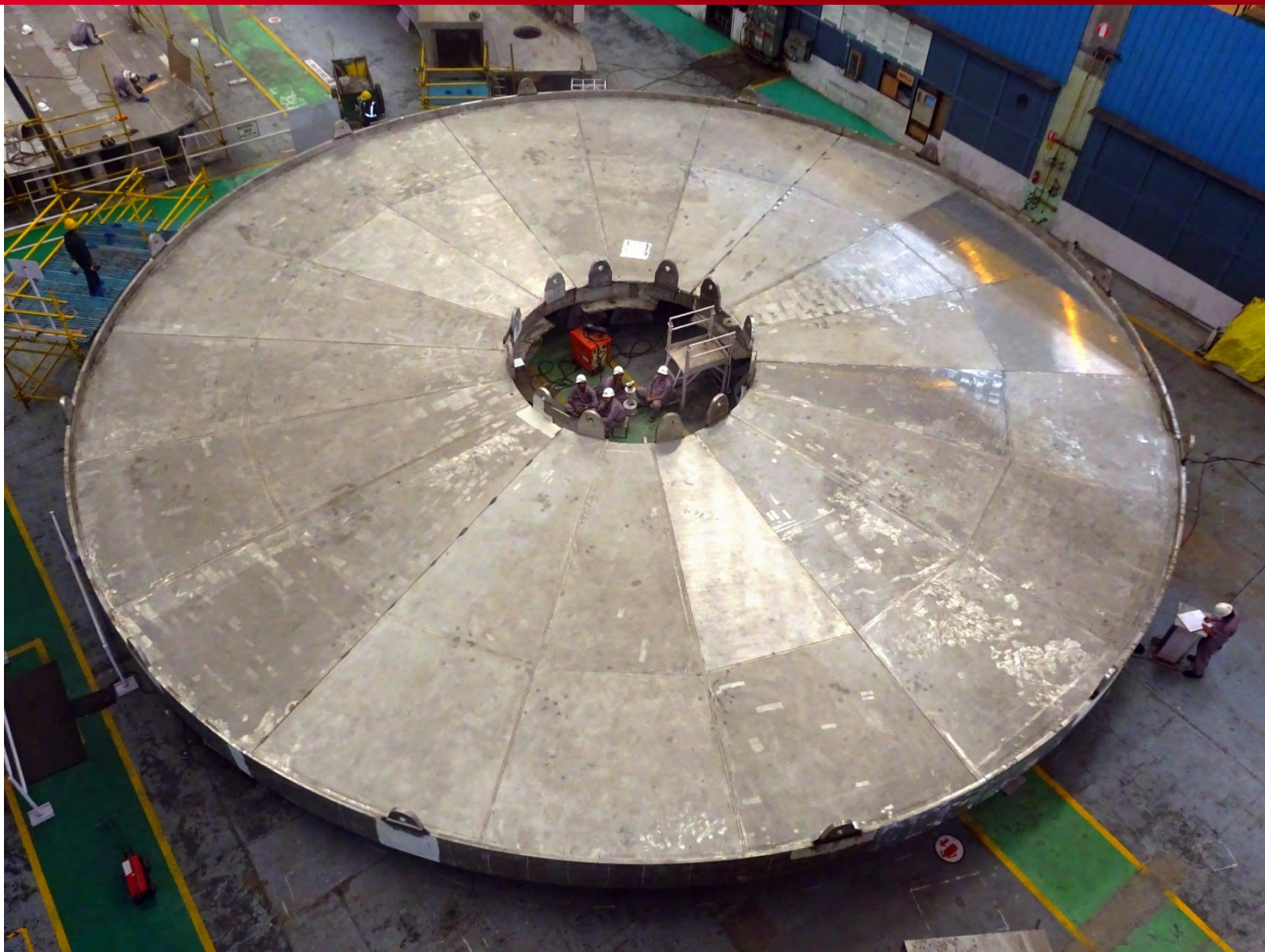
ITER: une expérience nucléaire

china
eu
india
japan
korea
russia
usa

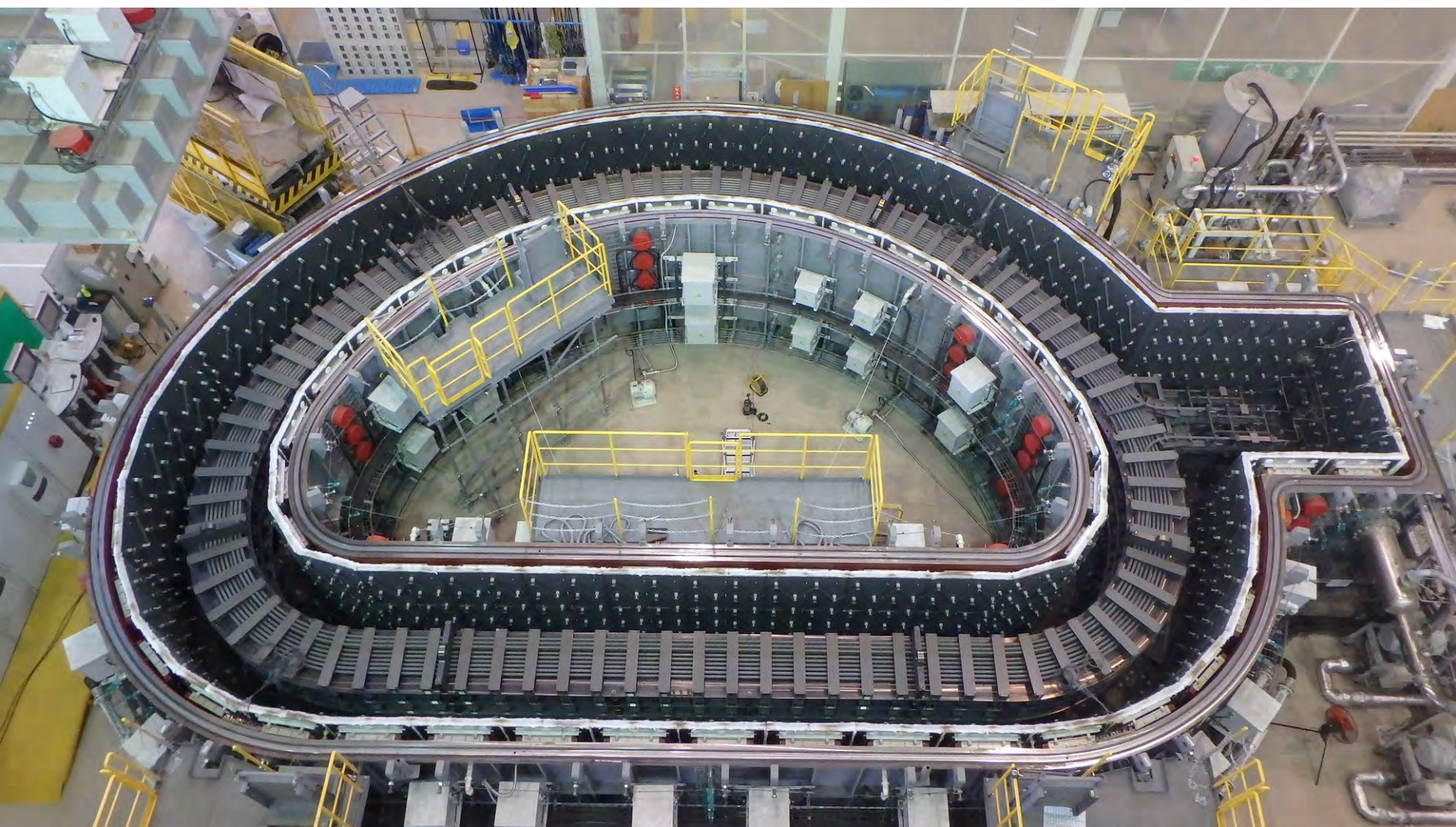
iter



ITER : Base du cryostat

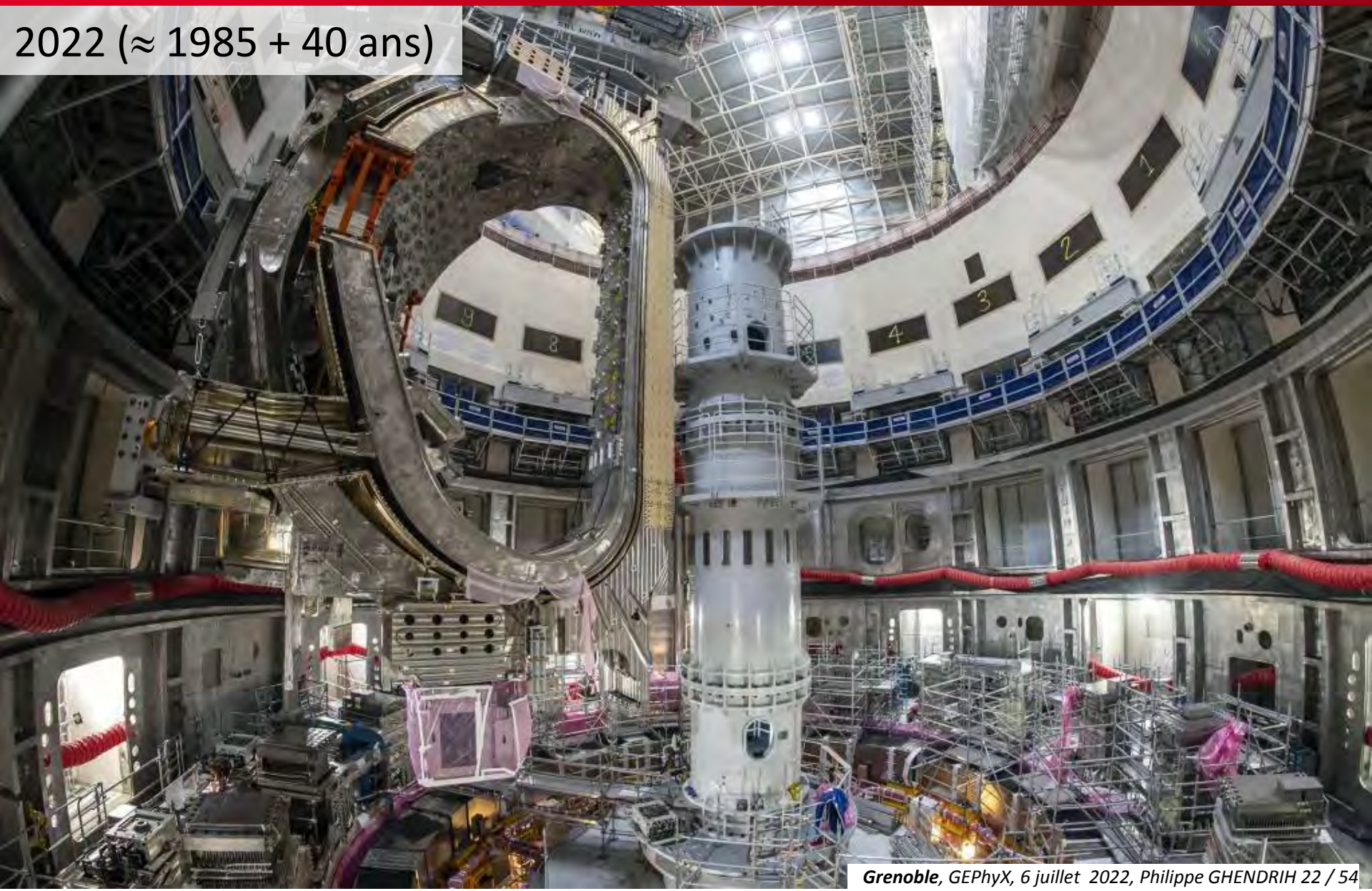


ITER: bobine made in Japan



cea **ITER** : le tokamak se réalise... *irfm*

2022 ($\approx 1985 + 40$ ans)



essor à l'Est - lentueur à l'ouest



EAST

The new generation of
superconducting
tokamaks



KSTAR



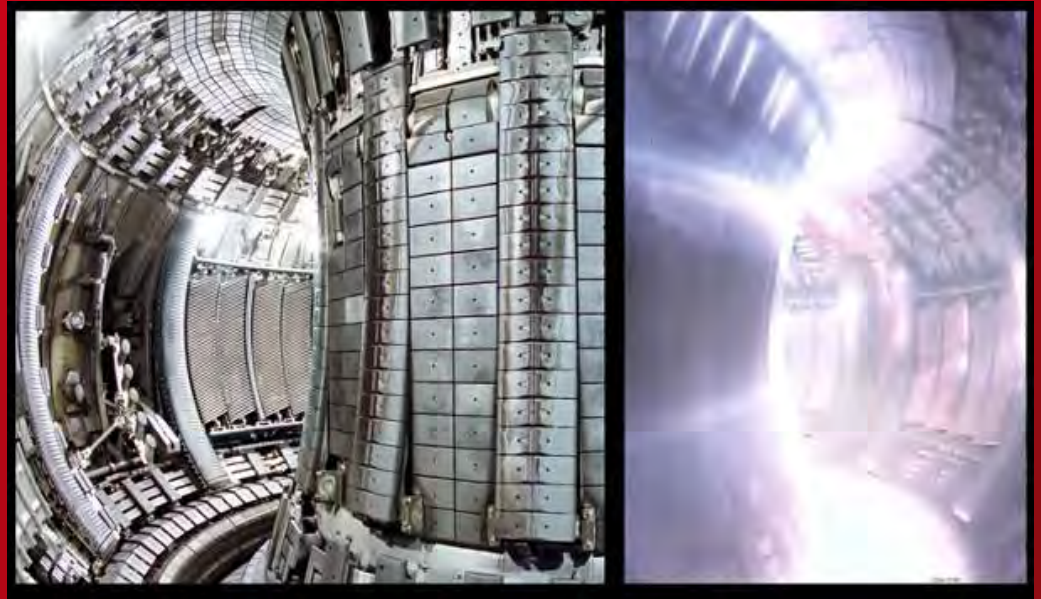
SST1

JT60-SA



DE LA RÉACTION NUCLÉAIRE AU CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

- Une histoire de l'énergie de fusion
- **De la réaction nucléaire au confinement magnétique**
- Le Tokamak
- Maths & Physique



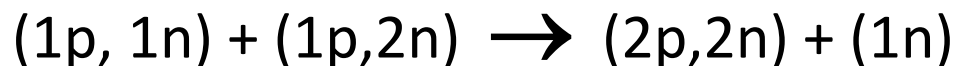


D : deuterium = isotope stable de l'hydrogène (1p, 1n)

T : tritium isotope instable l'hydrogène (1p, 2n)

He : hélium 3,5 MeV (stable ϕ & χ) (2p, 2n)

n : neutron 14 MeV



D : deuterium = naturel

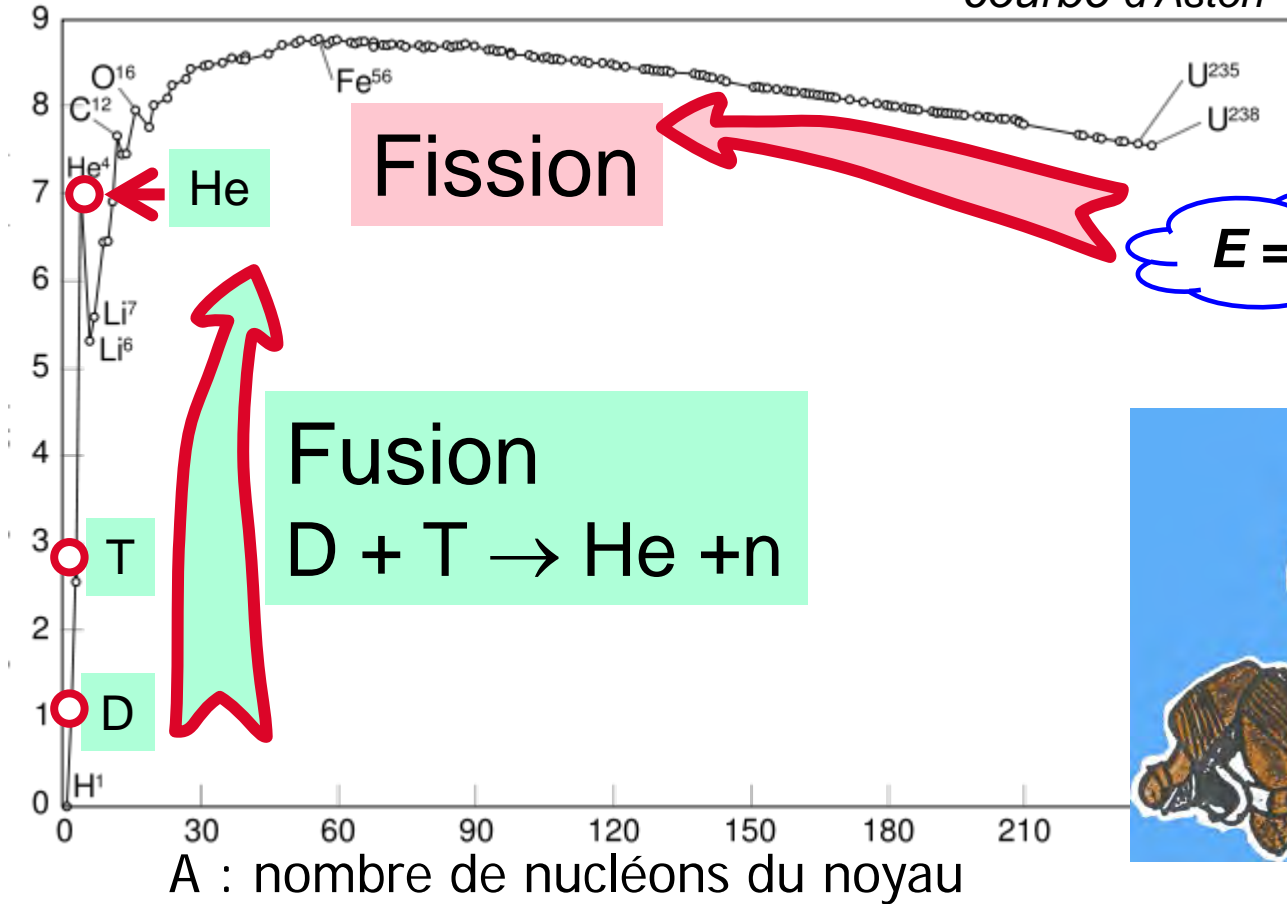
T : tritium

doit être produit
pas crucial pour ITER

vieillissement tokamak
utilisé pour produire **T**
pas crucial pour ITER

énergie de liaison par nucléons (MeV)

courbe d'Aston



Energie : $E_{fus} = 4 \times 7 - 3 \times 3 - 2 \times 1 \approx 17 \text{ MeV}$

Impulsion : $m_n \times V_n = m_{He} \times V_{He}$

$E_{He} = E_{fus} / (1 + m_{He} / m_n)$

Machine à gaz : D, T injecté



D, T, He pompés (moins de 1% D,T "brulé")

n impact la paroi (capté avant les supraconducteurs)

Energie seuil de la réaction de fusion

Effet tunnel : distance d'interaction 10^{-13} m

$$\leftrightarrow E_{th} \geq 10 \text{ keV} \leftrightarrow T \approx 100\,000\,000 \text{ K}$$

$$E_{th} \gg 13,6 \text{ eV (ionisation hydrogène)}$$



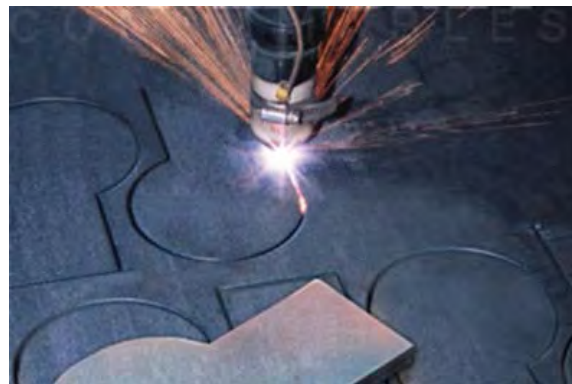
Milieu ionisé = PLASMA

Langmuir 1928

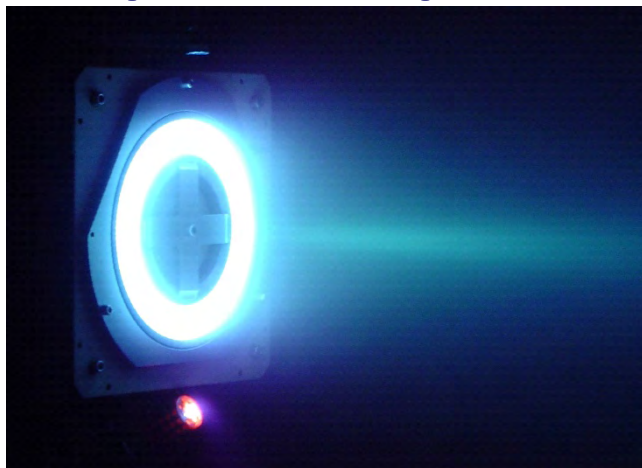
□ Naissance en 1928



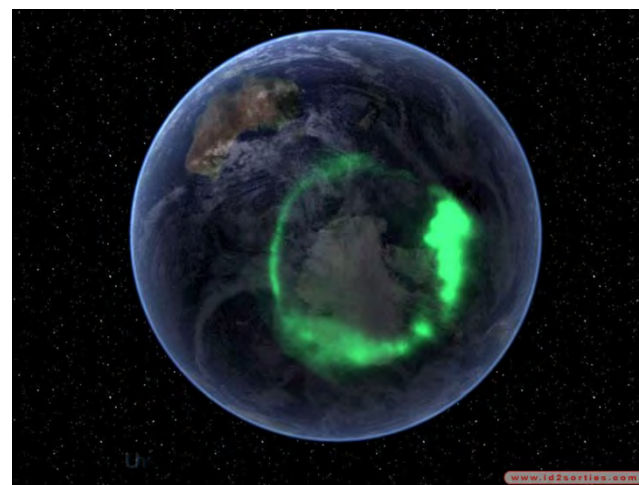
□ Les plasmas froids



□ Propulsion spatiale



□ Télécommunication



Accélérateur

exemple : charge D^+ (1 e),

accélération : différence de potentiel électrique ΔV

Energie : $E = e \Delta V$ (unité eV= électron-Volt)

Seuil nucléaire : 1 Fermi = 10^{-15} m

10 eV $\Leftrightarrow 10^{-10}$ m, atome d'hydrogène

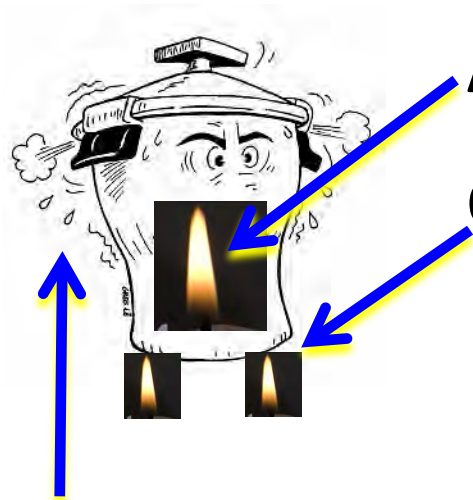
1 MeV $\Leftrightarrow 10^{-15}$ m, Rutherford, mais rendement négatif

10 keV $\Leftrightarrow 10^{-13}$ m par effet tunnel, faible probabilité

Plasma à 10 keV d'énergie thermique

Nombre d'évènements compense la faible probabilité





Auto-chauffage = Hélium (particule α) = P_{α}

Chauffage externe = amorcer + contrôle = P_{add}

→ équilibre thermique : $P_{\alpha} + P_{add} = P_{pertes}$

τ_E : temps de confinement de l'énergie

W : énergie interne $\propto n \times T \times Volume$

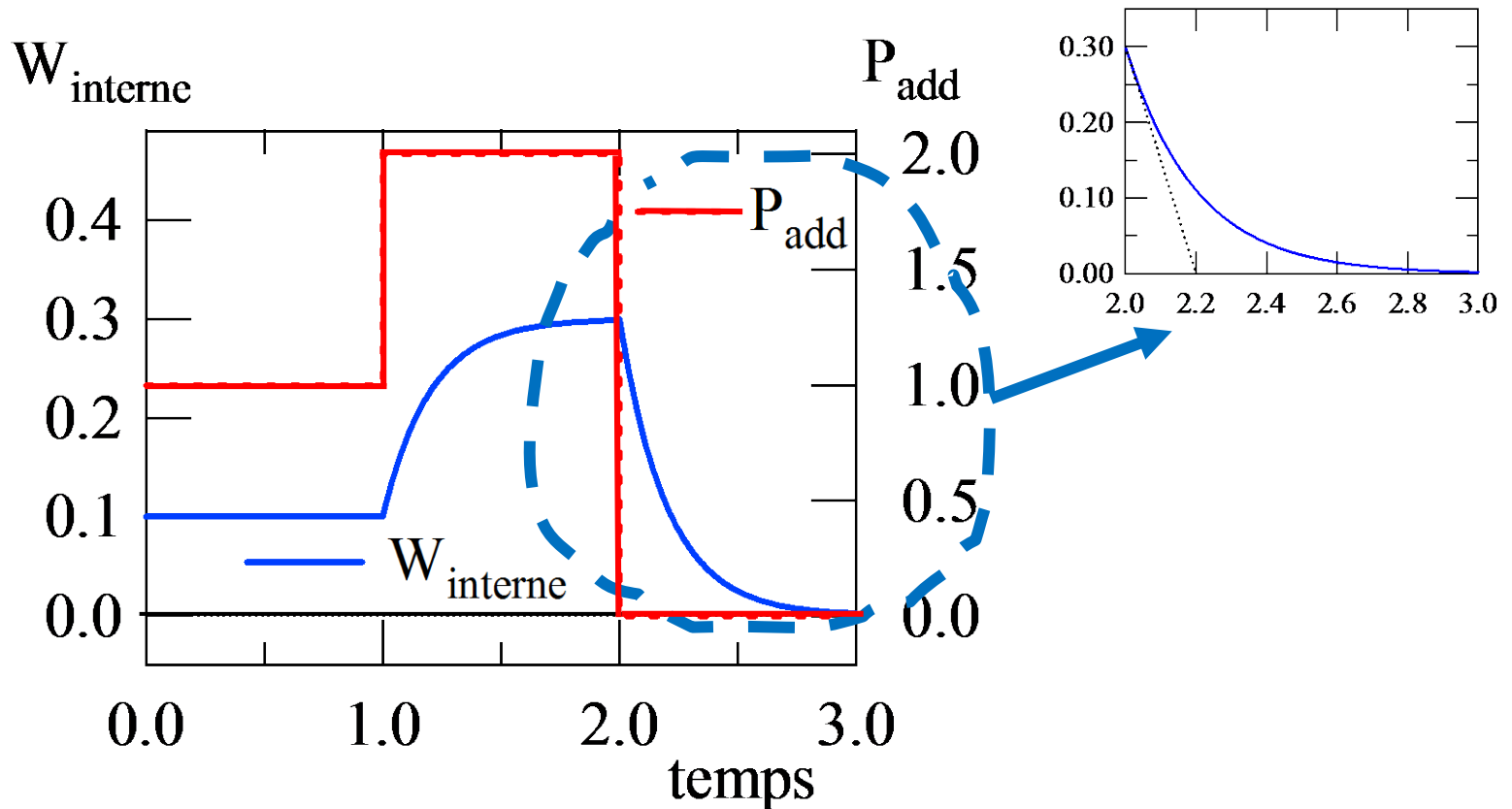
$$P_{pertes} = W / \tau_E$$

$$P_{\alpha} + P_{add} = W / \tau_E$$

τ_E = qualité de l'isolation
= confinement

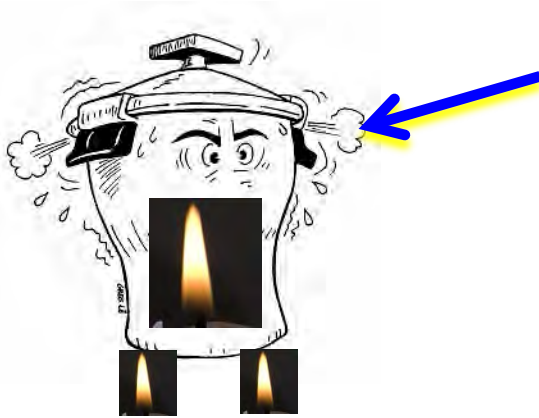


Régime stationnaire \neq Fusion inertielle



$\tau_E \approx 0.2 \ll$ temps plasma

Le temps de confinement \Leftrightarrow résistivité thermique



Pertes = puissance déposée sur les parois

Neutrons = puissance dans la paroi

$P_{\alpha} + P_{add} \rightarrow$ Flux d'énergie sur la paroi

Q = facteur d'amplification

Réacteur $Q \geq 40$

$$Q = \frac{P_{fus}}{P_{add}} = \frac{5 P_{\alpha}}{P_{add}}$$

$$P_{\alpha} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{fus} E_{\alpha} \text{ Volume}$$

3.5 MeV cendre hélium (particule α)



Triple produit : $n T_i \tau_E > \text{seuil}$

Lawson 1957

n_e densité (des électrons)

T_i énergie thermique des ions (D & T)

τ_E temps de confinement de l'énergie

$T_i \approx 10$ keV optimum fusion D, T

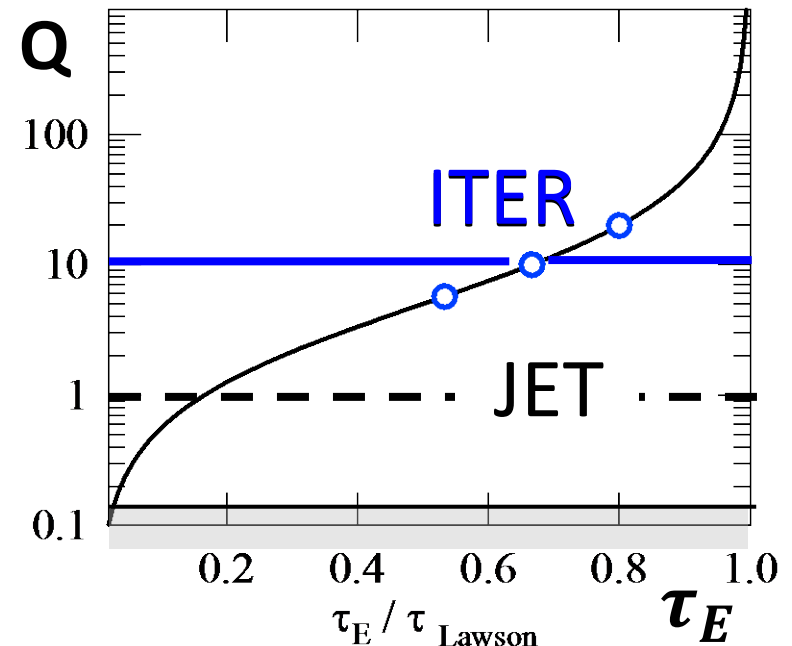
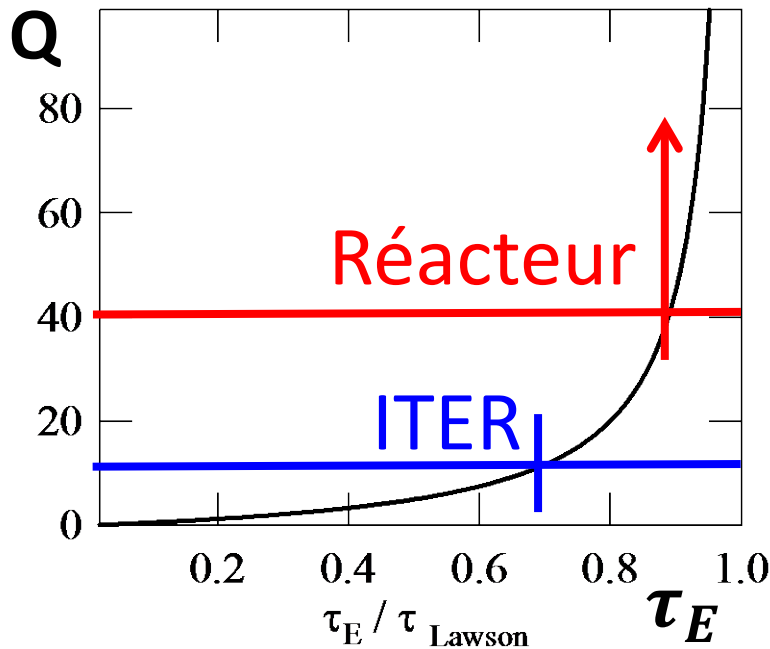
$$\tau_E = \frac{6.2 \cdot 10^{20} \text{ s m}^{-3}}{n_e} \frac{Q}{(Q + 5)}$$

$Q \rightarrow +\infty$ ignition

n_e faible & τ_E long : confinement magnétique

n_e très grand : fusion inertielle

$Q_{\text{ITER}} \approx 10 \Rightarrow P_{\alpha} = 2 P_{\text{add}} \Rightarrow \text{contrôle} < \text{auto-chauffage}$



$Q_{\text{ITER}} \approx 10$ mais incertitude $\tau_E \approx \pm 20 \%$

$$\Rightarrow 5.7 \leq Q_{\text{ITER}} \leq 20$$

Densité de puissance

DIESEL: 12.0 MW / m³

FISSION: 3.6 MW / m³

HYDRO: 1.4 MW / m³

FUSION: 0.7 MW / m³

VENT: 10⁻⁵ MW / m³

SOLAIRE: 10⁻¹² MW / m³

SOLEIL: 10⁻⁸ MW / m³

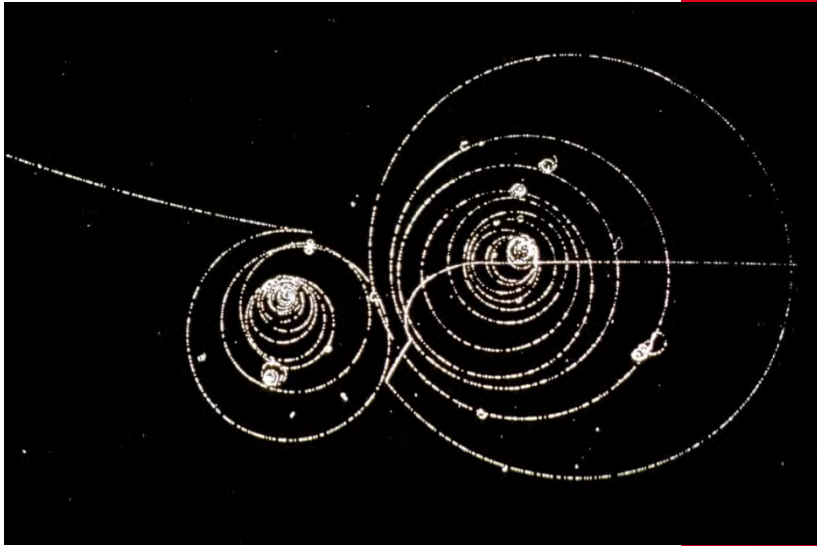
Ressources
Sûreté
Déchets
Prolifération

ITER 2030-2080 après ITER ?

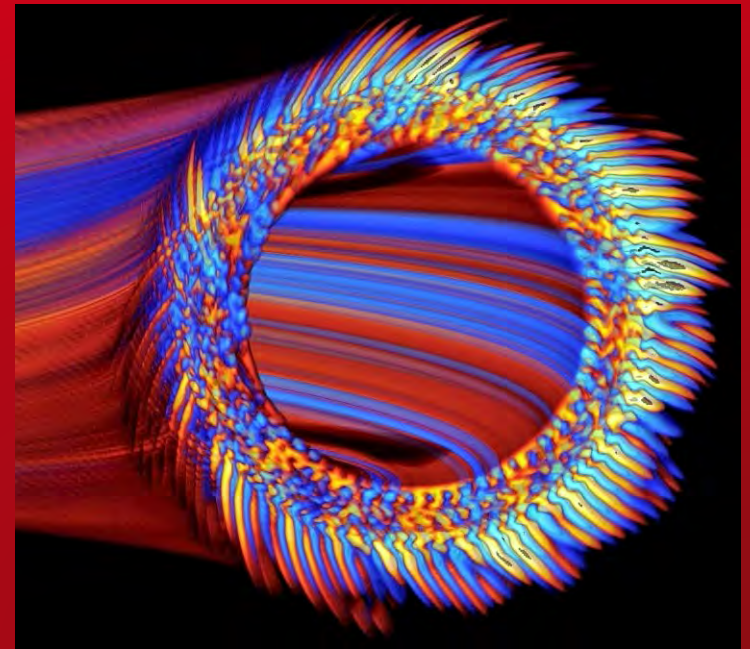


RENAISSANCE
FUSION

ISOLATION MAGNÉTIQUE



- Une histoire de l'énergie de fusion
- **De la réaction nucléaire au confinement magnétique**
- Le Tokamak
- Maths & Physique



Plasma

&

Champs magnetiques intenses

équation de Newton / force de Lorentz : $m_a \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q_a \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

sans dimension : $\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{v} \times \mathbf{b}$ \mathbf{b} vecteur unitaire selon \mathbf{B}

paramètre de contrôle : $\Omega_a t_0 = 1$ $\Omega_a = \frac{q_a B_0}{m_a}$ pulsation de Larmor

Symétries & travail

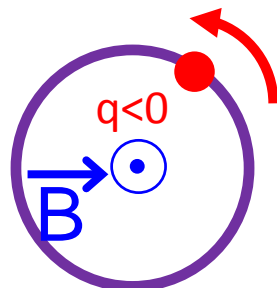
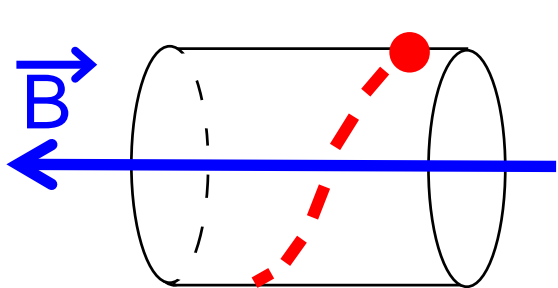
Travail : $\delta W = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x}$ Puissance : $\frac{\delta W}{dt} = m_a \frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot \frac{d\mathbf{x}}{dt} = m_a \frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot \mathbf{v}$

$\dot{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{b} = 0$ v_{\parallel} invariant mouvement // = libre

$\frac{1}{2} \mathbf{v}^2 = \text{constant}$ $v_{\perp}^2 = \text{constant}$

intégrale première : $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x} \times \mathbf{b} + \text{constant} \Rightarrow \mathbf{v} = \mathbf{b} \times \rho_L$

rayon de Larmor : $\rho_L = \mathbf{b} \times \frac{\mathbf{v}}{\Omega_a}$ avec dimension



Rayon de Larmor

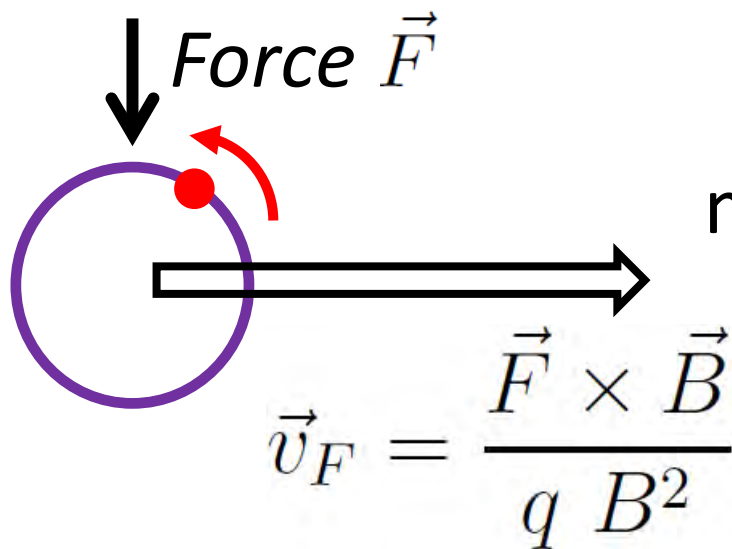
$$\rho_{\perp} = v_{\perp} / \Omega$$

$$\approx 10^{-3} \text{m}$$

Champ magnétique intense : 5T

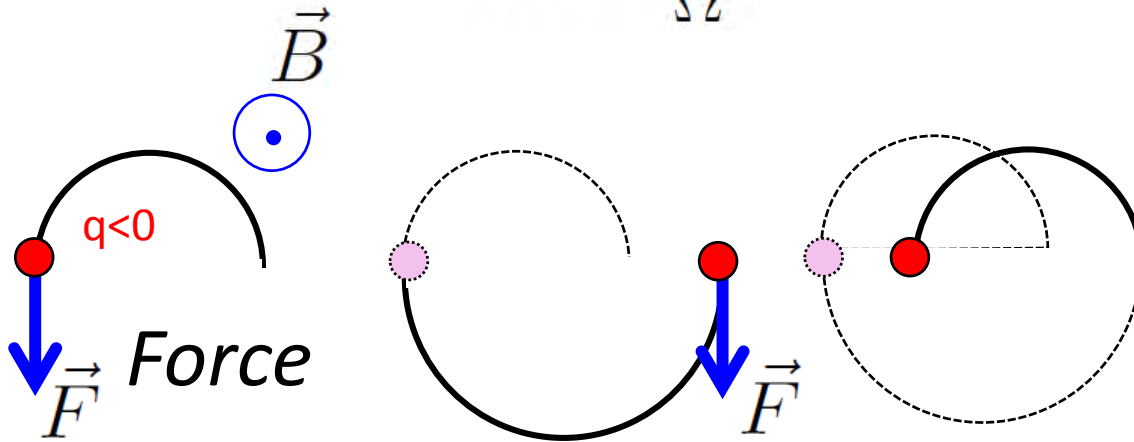
+ mouvement de dérive

mouvement // = libre
& compressible



mouvement \perp = contraint
& incompressible

$$\rho_L = \frac{v_{\perp}}{\Omega} \quad \text{si } v_{\perp} \nearrow \text{ ou } \Omega \searrow \quad \rho_L \nearrow$$



$$m\dot{\vec{v}} = \vec{F} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_L + \vec{v}_F \quad \dot{\vec{v}}_F = \vec{0}$$

$$\vec{0} = \vec{F} + q\vec{v}_F \times \vec{B}$$

$$m\dot{\vec{v}}_L = q\vec{v}_L \times \vec{B}$$

$$\vec{v}_F = \frac{\vec{F} \times \vec{B}}{q B^2}$$

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad \vec{v}_E = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

LE TOKAMAK

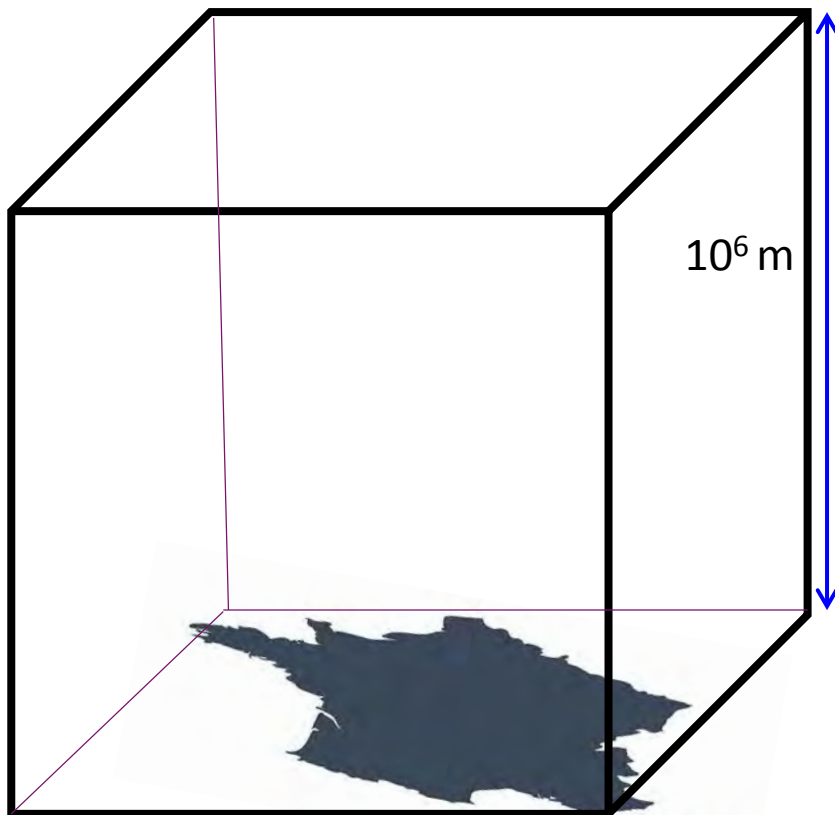
- Une histoire de l'énergie de fusion
- De la réaction nucléaire au confinement magnétique
- **Le Tokamak**
- Maths & Physique



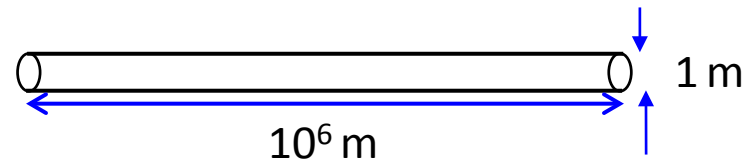
Impératif : confinez !

$$E = 10 \text{ keV} \Rightarrow v_H = 10^6 \text{ m/s}$$

$$\text{Confiner : } 1\text{s} \Rightarrow \text{boite : } 10^6 \times 10^6 \times 10^6 = 10^{18} \text{ m}^3$$



$$B = 5 \text{ T} : \rho_L = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



$$\text{tube : } 10^6 \times 1 \times 1 = 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{Tore : rayon } R = 5 \text{ m}$$

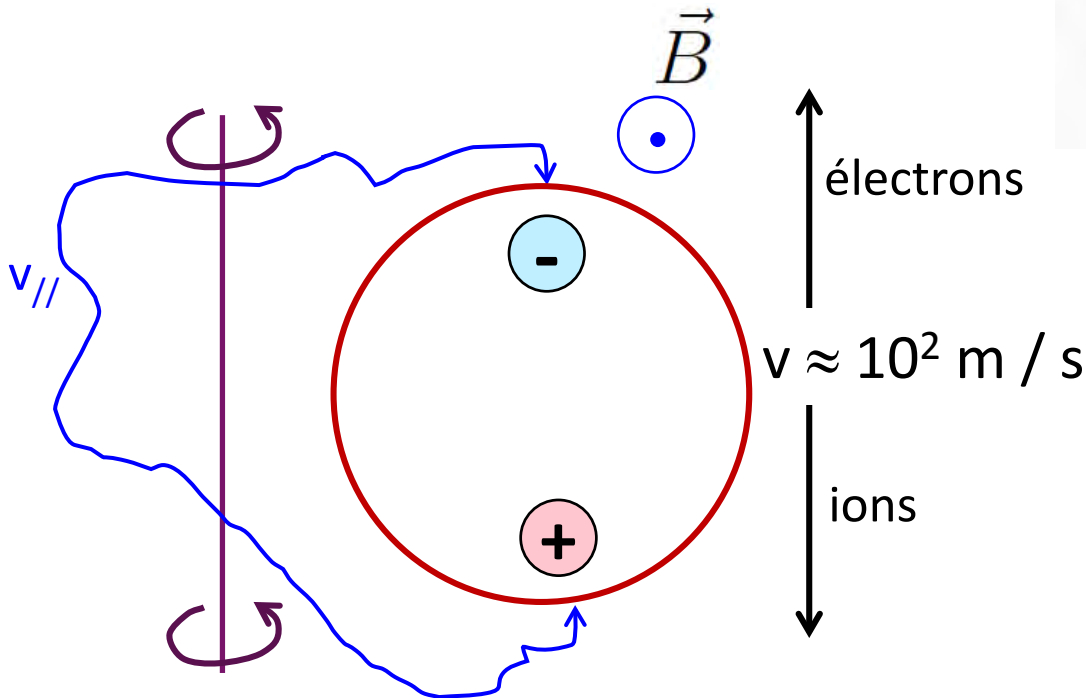
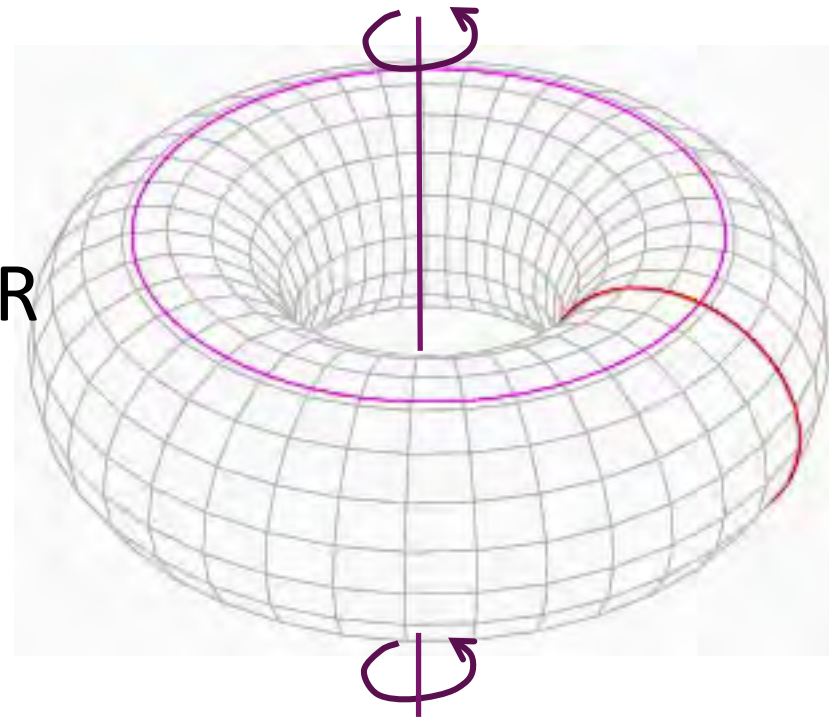
$$\Rightarrow 10 \times 10 \times 10 = 10^3 \text{ m}^3$$

Champ magnétique principal

bobines supraconductrices

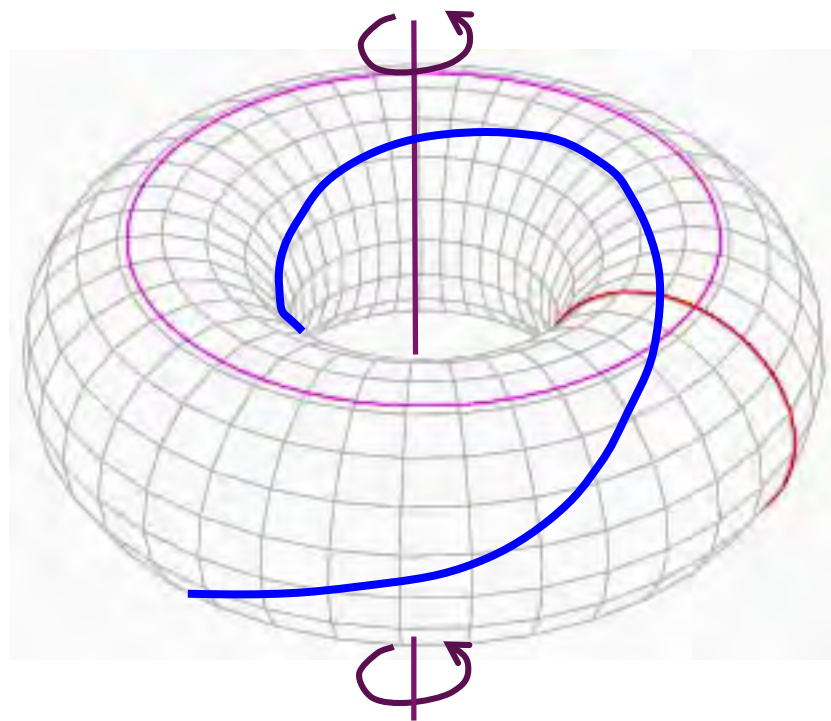
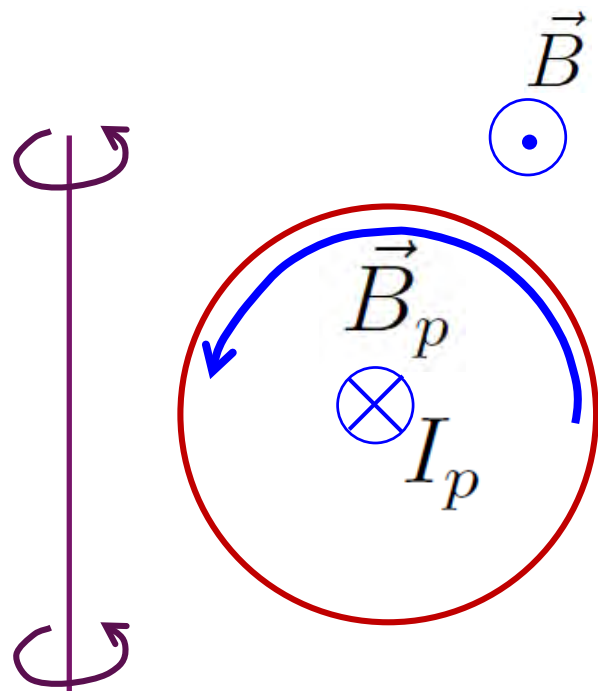
Ampère $2\pi R$ $B = \mu_0 I_B \Rightarrow B \propto 1/R$

B inhomogène \Rightarrow dérive



\Rightarrow nouveau
champ
magnétique

Nouveau champ magnétique
= courant plasma : I_p

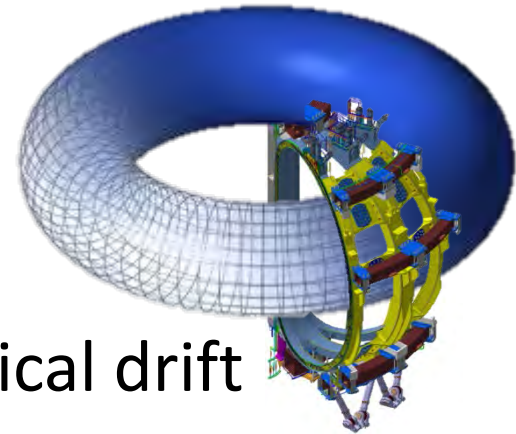


TOKAMAK : \exists surfaces magnétiques axisymétriques

Free // motion: solution = torus

centrifugal force = g-force

drive of interchange instability \Rightarrow vertical drift



High Performance Magnetic Geometry: **Tokamak** \Rightarrow **ITER**

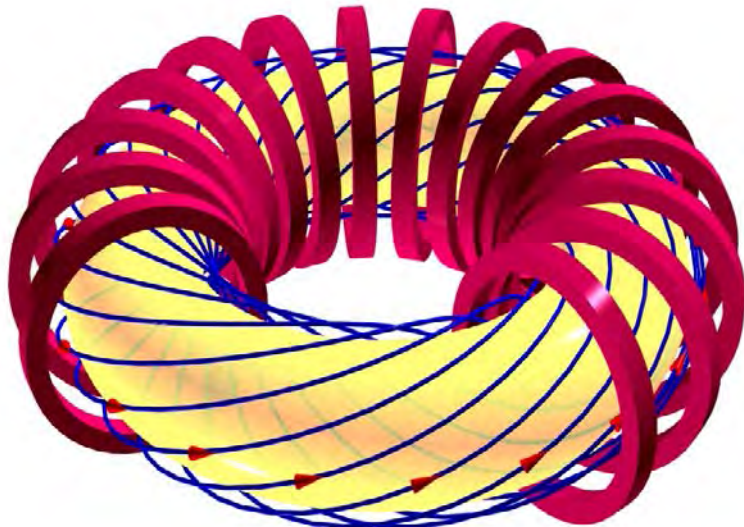
(alternative g-force)

$$B \approx 5 \text{ T}$$

a = minor radius ($R = A a$)

$a \approx 2 \text{ m}$ $A \approx 3$ aspect ratio

$$\rho_* = \rho_{\perp} / a = 10^{-3} \ll 1$$



Résumé

Recherche sur l'énergie

Fusion nucléaire

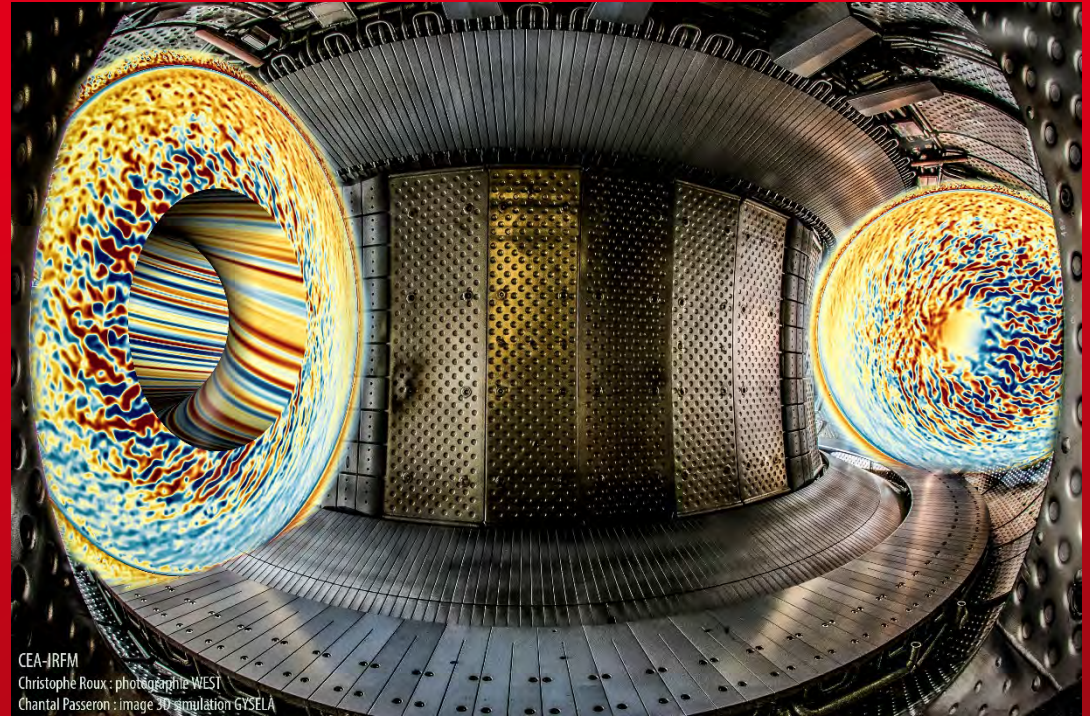
*Plasma à très haute
énergie thermique*

*Confinement par le
champ magnétique
plasma + B = isolant*

Mouvement de dérive

Configuration tokamak

*ITER une réalisation
expérimentale
internationale*



CEA-IRFM
Christophe Roux : photographie WEST
Chantal Passeron : image 3D simulation GYSELA

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Cadarache | 13108 Saint Paul Lez Durance Cedex
T. +33 (0)4 42 25 46 59 | F. +33 (0)4 42 25 64 21

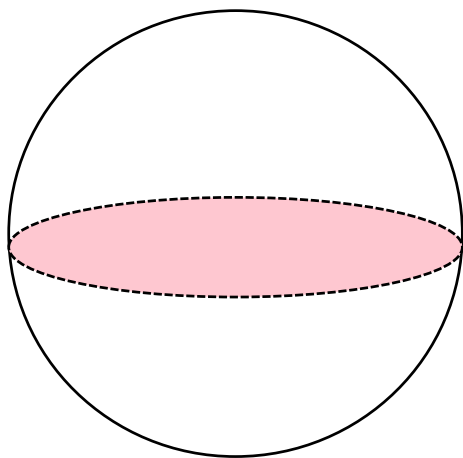
DSM
IRFM
SIPP

MATHS & PHYSIQUE

- Une histoire de l'énergie de fusion
- De la réaction nucléaire au confinement magnétique
- Le Tokamak
- **Maths & Physique**

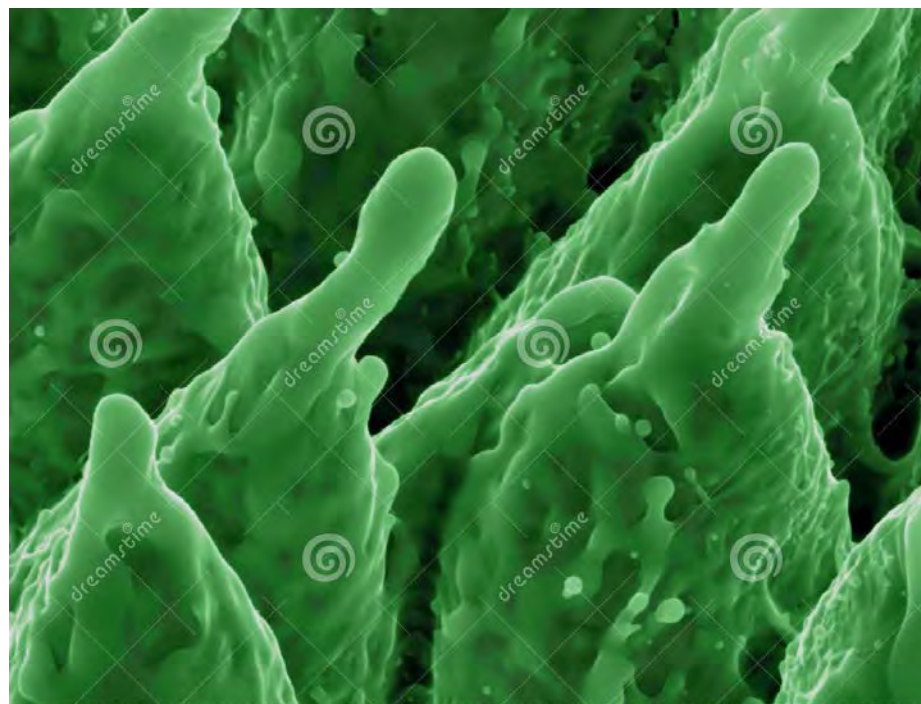
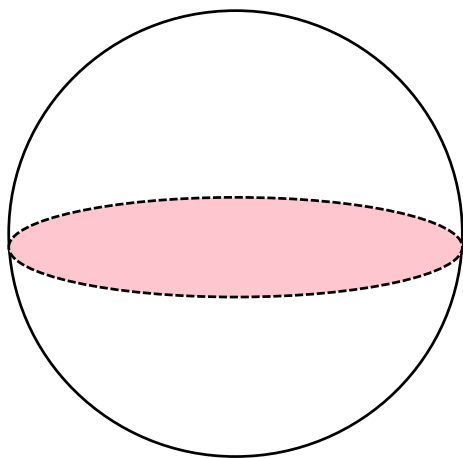


Bille de nickel diamètre $d = 1$ mm
Surface ± 1 m² ?



Sphère : πd^2

Bille de nickel diamètre 1 mm
Surface $\pm 1 \text{ m}^2$



Download from
Dreamstime.com

The watermark.com logo is for previewing purpose only.

87536282

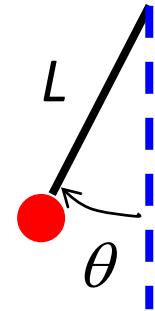
Georgy Shafeev | Dreamstime.com

Sphère : πd^2
Matériaux : $\approx 60 \text{ m}^2$

Symmetry

Emmy NOETHER

- no dependence on 1 variable
- conjugate variable is conserved
- identify these couples



Symmetry = conservation laws

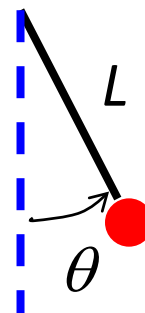
- in the plane
- cylindrical symmetry: L fixed, θ varies
- invariance origin of time

= energy conservation: $H = \text{kinetic} + \text{potential}$

$$H = \frac{1}{2}m(L\dot{\theta}^2) + mgL(1 - \cos(\theta))$$

Equation de conservation (variables conjuguées)

- $g = 0$ pas de dépendance en $\theta \Rightarrow \dot{\theta}$ constant (conservé)
- variables conjuguées : $(\theta, \dot{\theta})$
- espace des phases = $(\theta, \dot{\theta})$



courbe iso-énergie : $H = \frac{1}{2}m(L\dot{\theta}^2) + mgL(1 - \cos(\theta))$

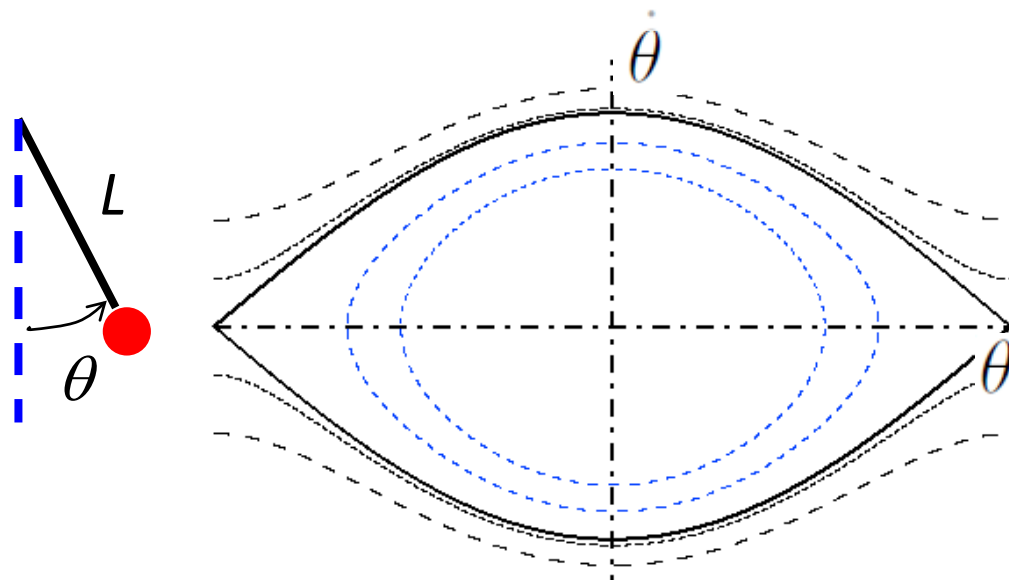
paramètre de contrôle : $\omega = \sqrt{\frac{mgL}{mL^2}} = \sqrt{\frac{g}{L}}$
normalisation du temps

version maths :

$$h = \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 + (1 - \cos(\theta))$$

rapport énergie cinétique / potentielle, valeur de $h \Rightarrow \dot{\theta}$ pour $\theta = 0$

Les forces qui ne travaillent pas \Leftrightarrow symétries



Point O : $h = 0$

Point X : $h = 1$

$h < 1$ trajectoires piégées

$h \geq 1$ trajectoire passante

$$\dot{\theta} = \sqrt{2(h - (1 - \cos(\theta)))}$$

$$h \geq 1 - \cos(\theta) \quad h \geq 0$$

$$t = \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta'}{(2(h - 1 + \cos(\theta')))^{1/2}}$$

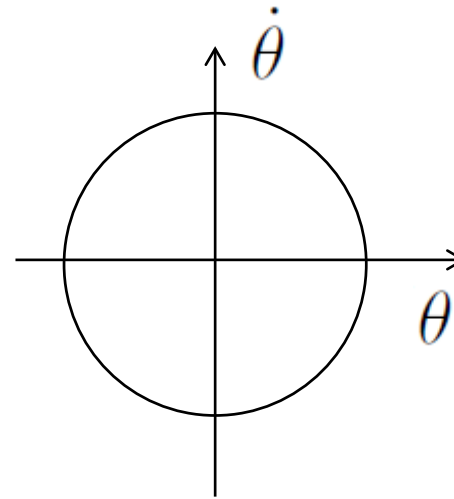
Evolution selon Newton

ordre dérivées : +1

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \sin(\theta)$$

Limite θ petit : $1 - \cos(\theta) \approx \frac{1}{2} \theta^2$

$$h = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \theta^2$$



Systèmes analogues en physique des plasmas

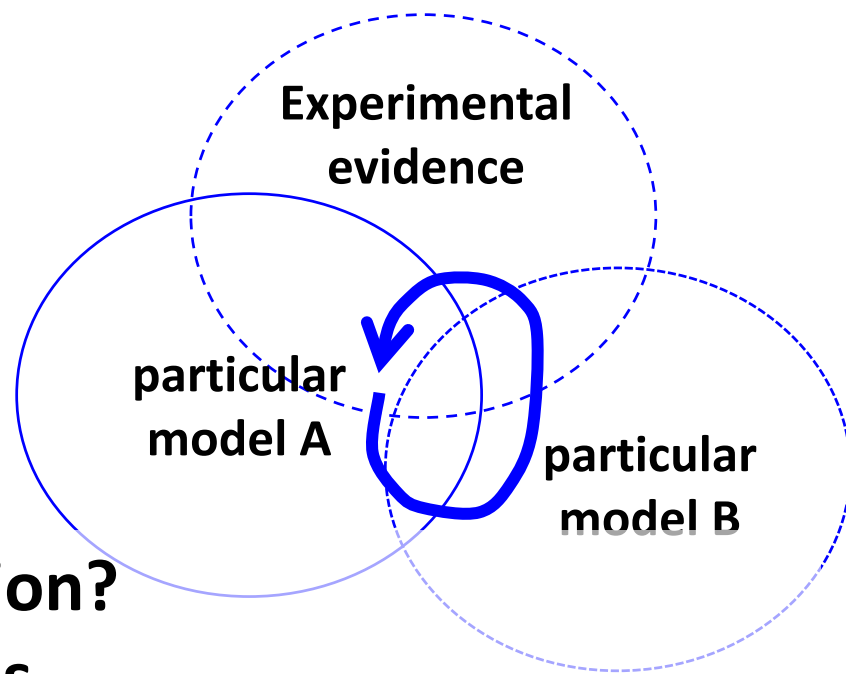
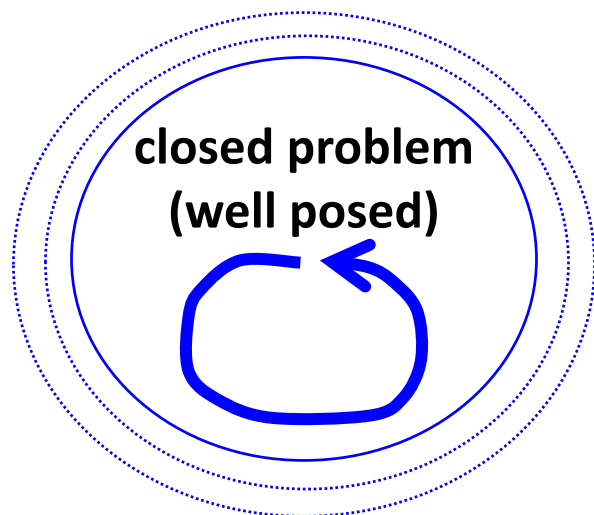
particule dans un une onde électrostatique :

$$H = \frac{1}{2} m_a v^2 + q_a U_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})$$

particule dans un champ magnétique toroïdal intense

$$H = \frac{1}{2} m_a v_{\parallel}^2 + \mu_a B \quad B = \frac{R_0 B_0}{R_0 - r \cos(\theta)} \approx \frac{R_0 B_0}{R_0} \left(1 - \frac{r}{R_0} \cos(\theta)\right)$$

Mathematics: stepping by extension



Physics: stepping by agglomeration?

Unification: towards maths

Simplification: effectiveness = towards engineering

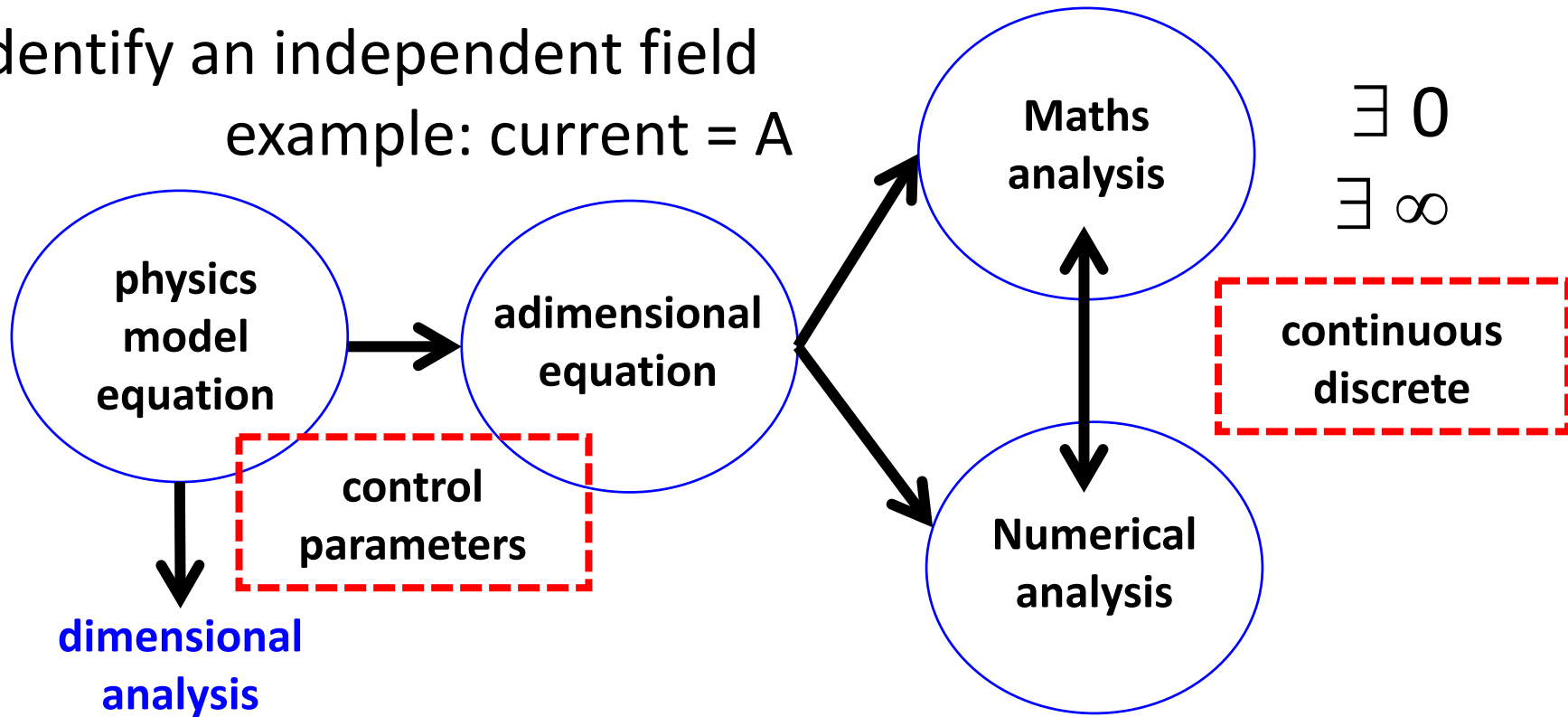
Making tools (Newton, Fourier, etc.)

Threshold effects: changing model

Symmetry breaking

Different facets of units

- Identify an independent field
example: current = A



- Identify a scale: mili kilo, etc.
identifies small ($\ll 1$) and big ($\gg 1$)
consequently: limits and derivatives