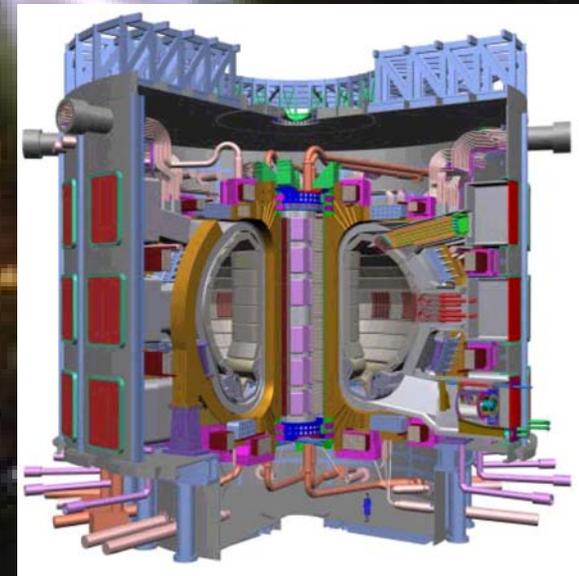


De l'énergie des étoiles à ITER

Soleil (10^{26} watts, 0.01 W/m^3)



ITER ($5 \cdot 10^8$ watts ; $5 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$)

Plan de l'exposé

- Motivations
- Fusion magnétique
 - Aspects fondamentaux
 - Base expérimentale: JET et Tore Supra
- ITER
 - Défis et enjeux scientifiques
 - Étapes à venir
- Conclusions

L'énergie

- **Le gaz et le pétrole disparaissent**

Marché énergie 3 000 Milliards € par an

- **L'Europe est très dépendante pour son énergie**

- **L'effet de serre très préoccupant**

→ **Tous au charbon ou faire mieux ?**

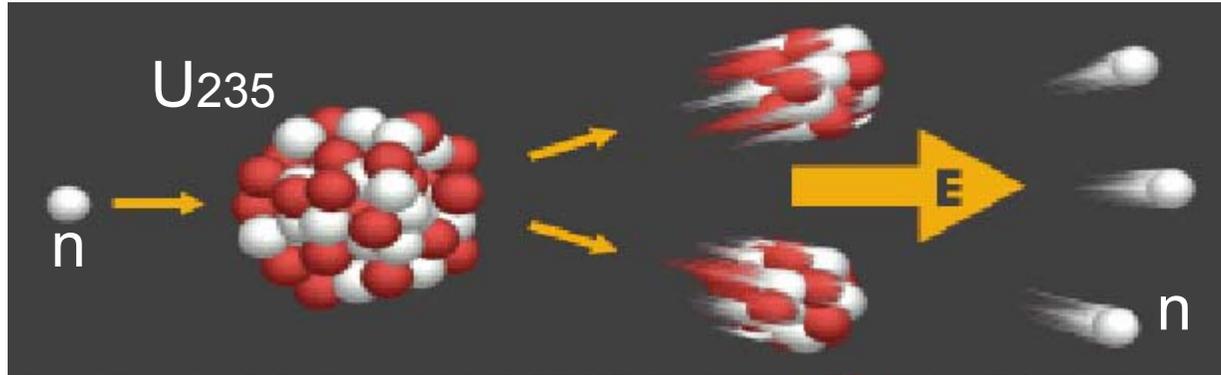
Peu d'options:

**Maîtrise de l'énergie, énergies renouvelables,
fission, fusion**

La fusion: oui mais elle a besoin de physique et de technologie

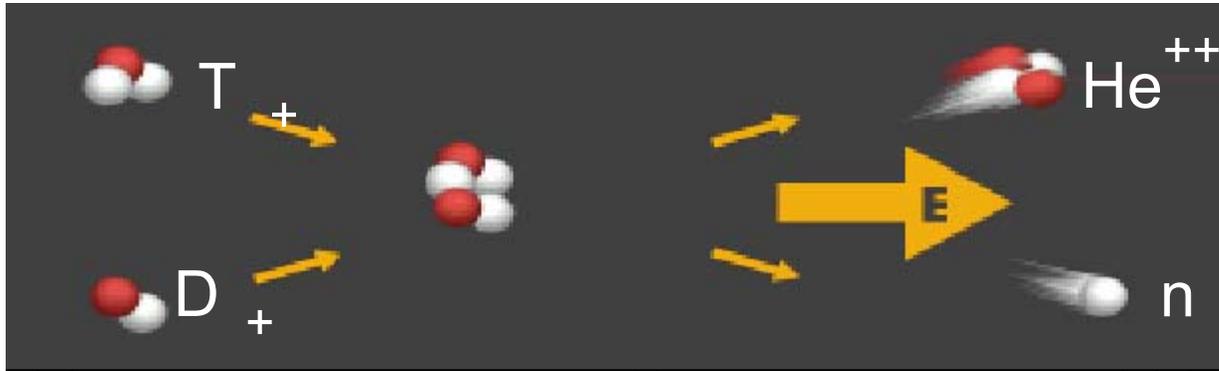
Fission / Fusion

Fission
Combustible
 : Uranium
Solide



Neutrons
 produisent
 les
 réactions
 en chaîne

Fusion
Combustible
 hydrogène:
 gaz



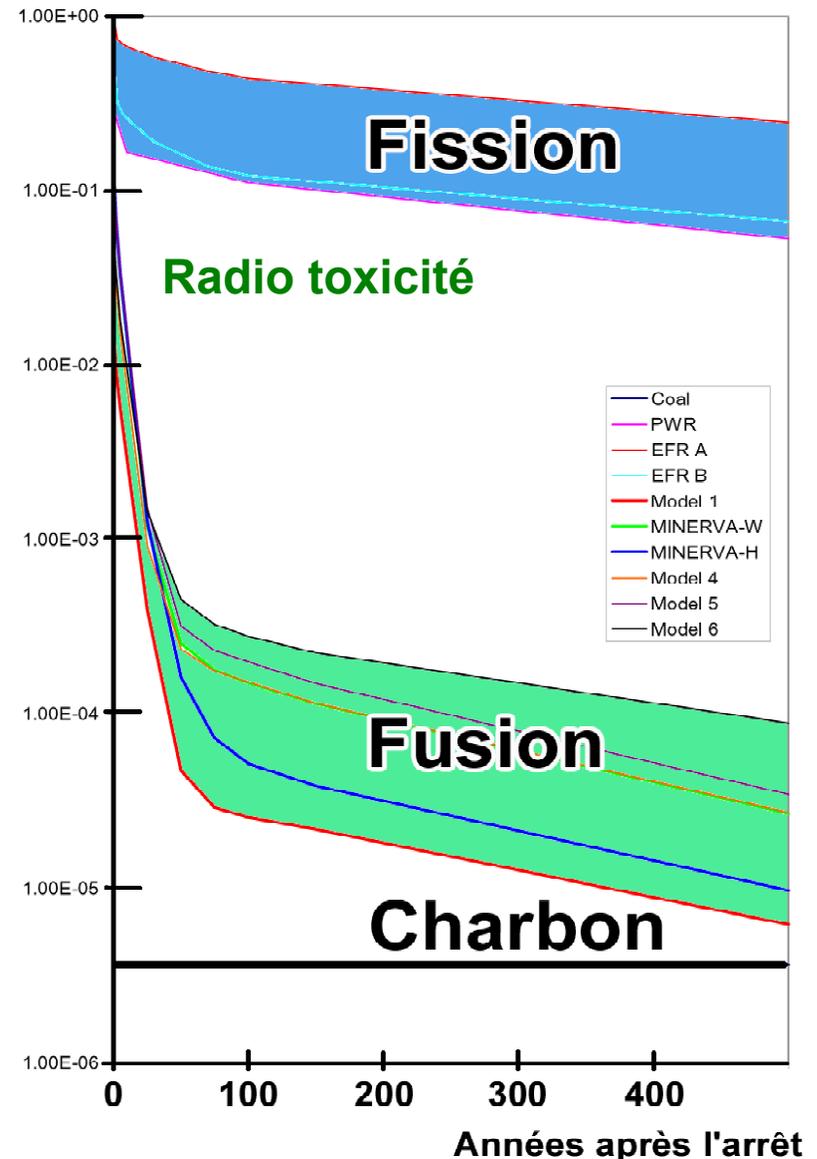
Hélium
 maintient la
 température
 du gaz

$$E = \Delta m c^2$$

Combustible de la fusion: deutérium et tritium
Deutérium: se trouve dans les océans
Tritium: fabriqué in situ a partir du Lithium

Pourquoi la Fusion ?

- **Combustible (D & Li)**
 - Abondant, bien distribué sur la planète
- **Sûreté**
 - Pas de risque d'accident majeur
- **Déchets**
 - Pas d'accumulation à très long terme (faible radio toxicité après < 100 ans)



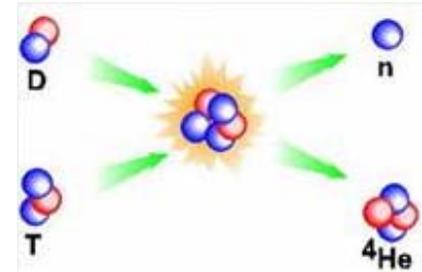
Les conditions pour produire de l'énergie

☞ Température :

L'agitation thermique doit vaincre la répulsion électrostatique

→ plasma DT à très haute température ionique T_i :

$$10^8 \text{ K ou } 10 \text{ keV}$$



☞ Densité n et temps de confinement de l'énergie τ_E :

Pour une grande fréquence de réactions de fusion sans perdre l'énergie investie :

$$n\tau_E \sim 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$$

→ Facteur de mérite pour l'expérience :

$$nT_i\tau_E \sim 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s} \sim 1 \text{ bar} \cdot \text{seconde}$$

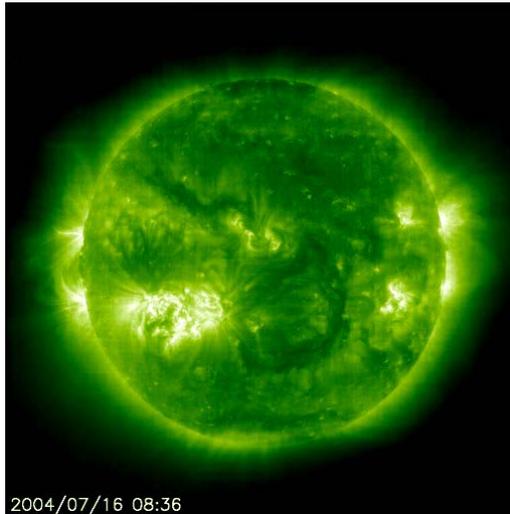
☞ Deux approches terrestres :

Confinement magnétique
1 bar, 1 s

Confinement inertiel :
100 Gbars, 10 ps

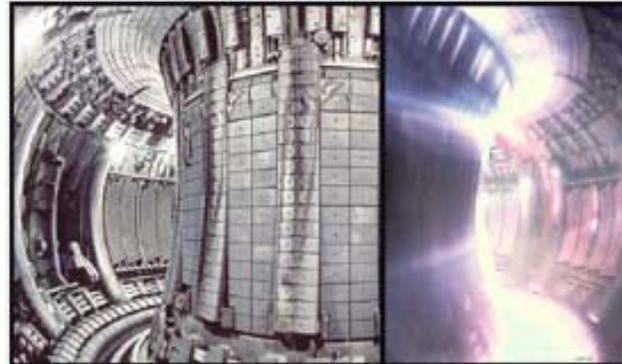
La fusion sur terre et dans les étoiles

Soleil

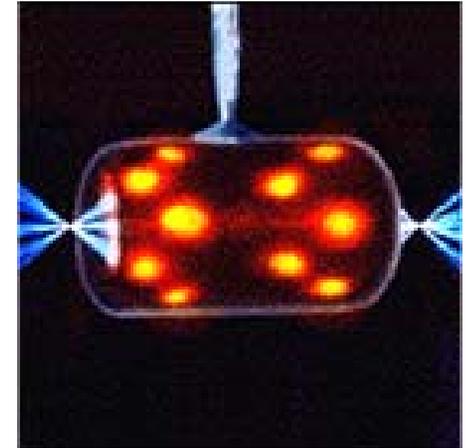


2004/07/16 08:36

Tokamak JET



Cible laser NOVA



Confinement gravitationnel :

$1.3 \cdot 10^9$ m

$3 \cdot 10^{16}$ s

10^9 atm

Confinement magnétique :

10 m

400 s

2 atm

Confinement inertiel :

10^{-2} m

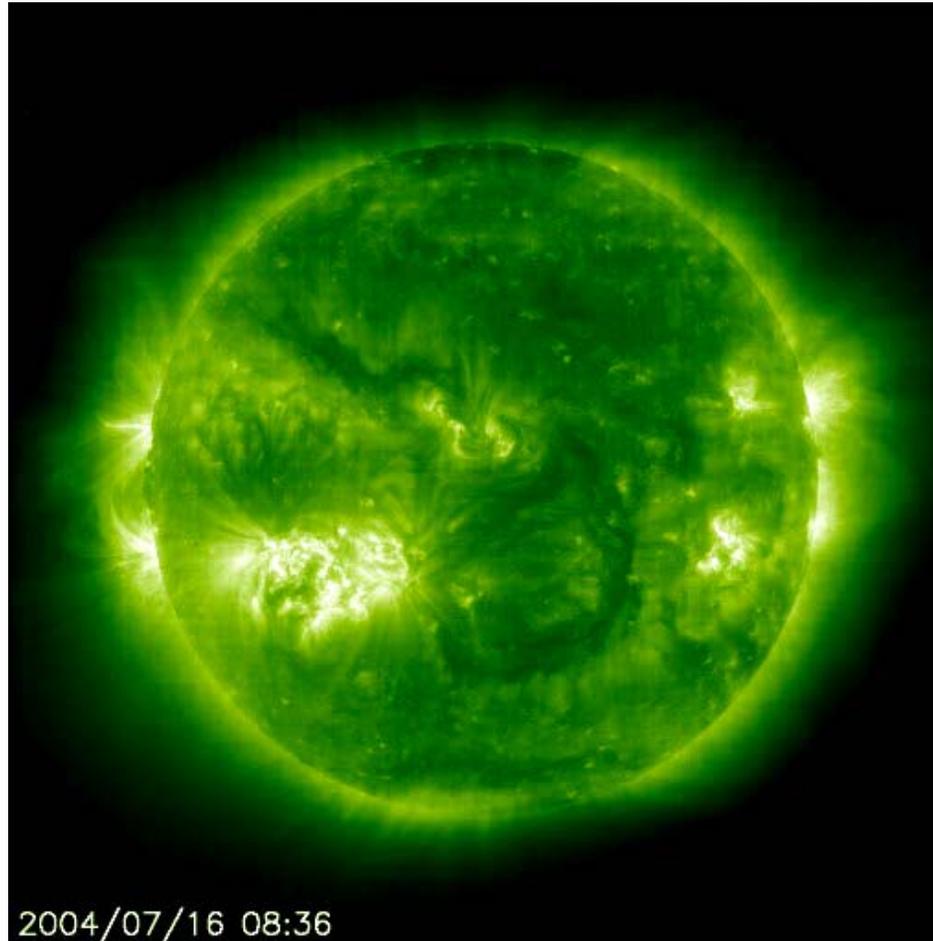
10^{-8} s

10^9 atm

Température ionique : 10^8 K \Leftrightarrow énergie thermique : 10 keV

La fusion dans les étoiles

Le soleil
vu par le
satellite
Soho



La gravité équilibre la pression du gaz; $d=1.3 \cdot 10^6$ km !

Le démon est dans le plasma !

La fusion sur terre (Tore Supra)



Distance réduite avec champs magnétiques: ~ 10 m
100 millions degrés; $P \sim 2$ atmosphères (limite due au champ magnétique)

Dates

- 1932:
 - Fusion du deutérium à Cambridge
- 1955
 - Critère de Lawson
- 1960 - 1980
 - Avènement des Tokamaks (TFR, JET, TS)
 - Regroupement à Cadarache
- 1992 -2001
 - ITER EDA (engineering design activities)
- 1997 - 2003
 - 16 MW au JET
 - 6 minutes à TS
- 2005
 - Décision ITER
- 2050 ?
 - Électricité de fusion ?

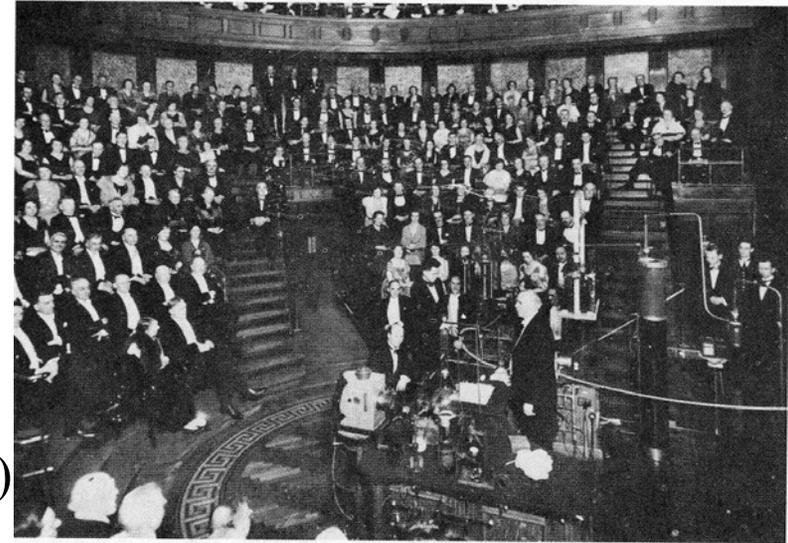
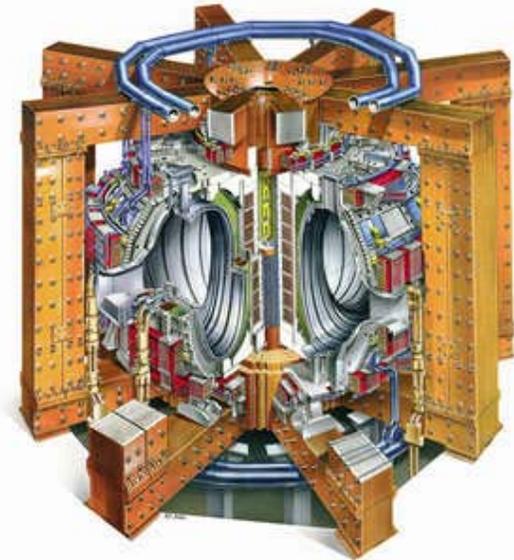


Figure 3.6.3 Rutherford demonstrating deuterium fusion at the Royal Institution, 1934. The Metropolitan-Vickers transformer is to the extreme right of the apparatus. Reproduced by kind permission of Sir Mark Oliphant from his book *Rutherford: Recollections of the Cambridge Days* (Amsterdam: Elsevier, 1972)



Le JET

Associations avec EURATOM sur la Fusion

Euratom - CEA (1958) France		Euratom - IST (1990) Portugal
Euratom - ENEA (1960) Italy		Euratom - TEKES (1995) Finland
Euratom - IPP (1961) Germany		Euratom - DCU (1996) Ireland
Euratom - FOM (1962) Netherlands		Euratom - OAW (1996) Austria
Euratom - FZJ (1962) Germany		Euratom - Hellenic Rep Greece (1999)
Euratom - Belgian State Belgium (1969)		Euratom - IPP.CR (1999) Czech Republic
Euratom - Riso (1973) Denmark		Euratom - HAS (1999) Hungary
Euratom - UKAEA (1973) United Kingdom		Euratom - MECT (1999) Romania
Euratom - VR (1976) Sweden		Euratom - Univ. Latvia Latvia (2002)
Euratom - Conf. Suisse Switzerland (1979)		Euratom - IPPLM (2005) Poland
Euratom - FZK (1982) Germany		Euratom - MHST (2005) Slovenia
Euratom - CIEMAT (1986) Spain		Joint European Torus (JET) Culham, UK (1978)

Coordination efficace par 'support préférentiel Euratom'

Fontenay aux Roses: pionnier d'une ère nouvelle

1968: Supériorité du Tokamak russe

Restructuration rapide de la fusion au CEA

→ Un 'grand' Tokamak à Fontenay aux Roses:
développement des chauffages (neutres et HF)

→ **Records mondiaux de TFR**

Construction de Tokamaks... partout!

→ **Dégradation du confinement avec le chauffage.** Mais mode H en 1982 (Asdex, IPP Garching)

→ Les stellarators continuent, les autres filières sont abandonnées



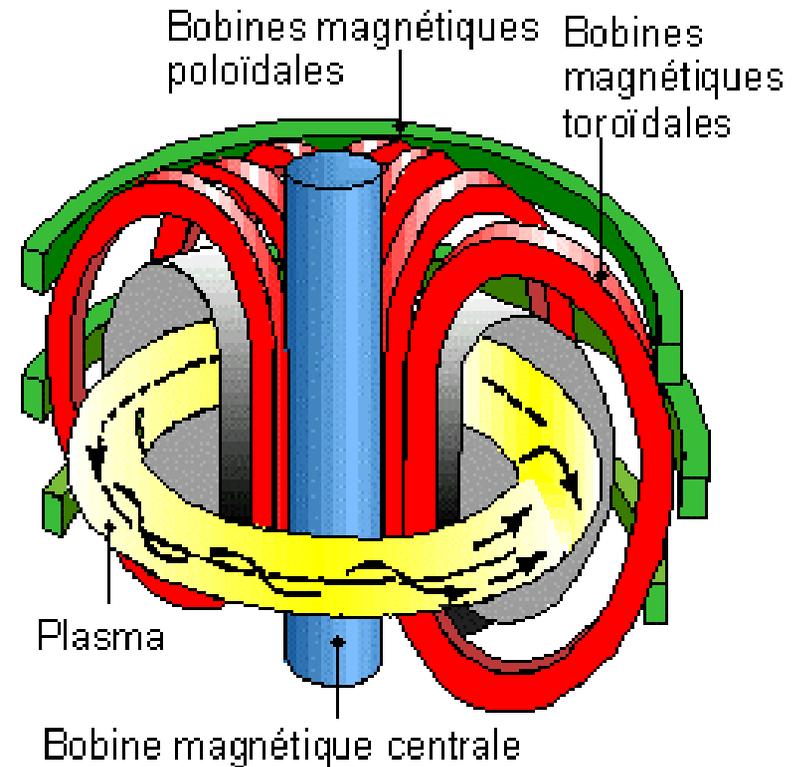
TFR 1970-1982

1975: l'Europe envisage le JET; 1980: regroupement à Cadarache

Premières lois d'échelle: importance de la taille

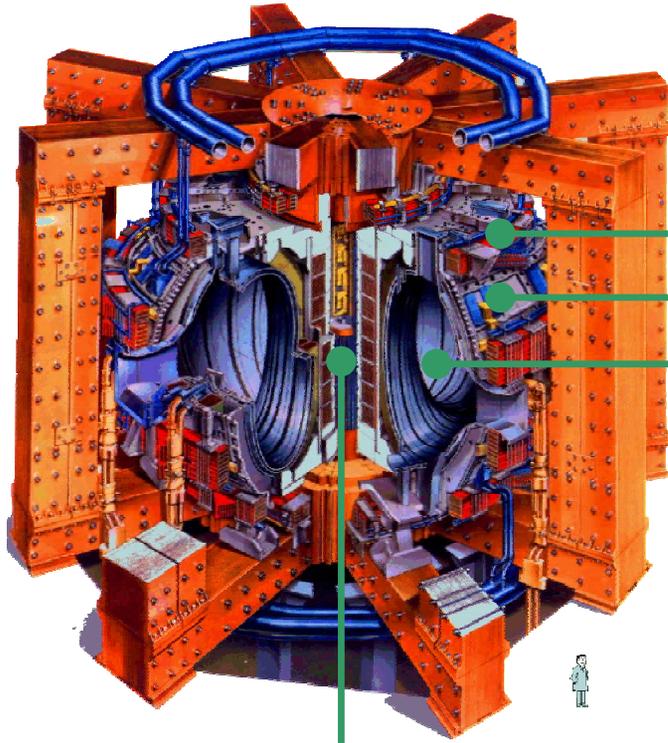
Le tokamak fonctionne grâce à un confinement par champ magnétique

- Le plasma est chauffé pour atteindre l'ignition.
- La pression du plasma est compensée par les forces électromagnétiques.



Principe du tokamak

Le JET

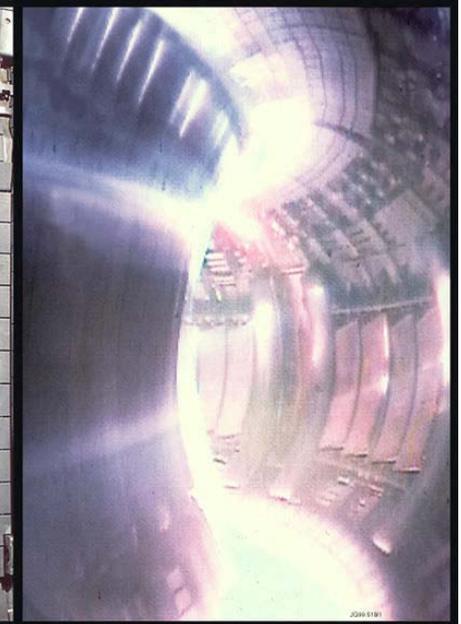
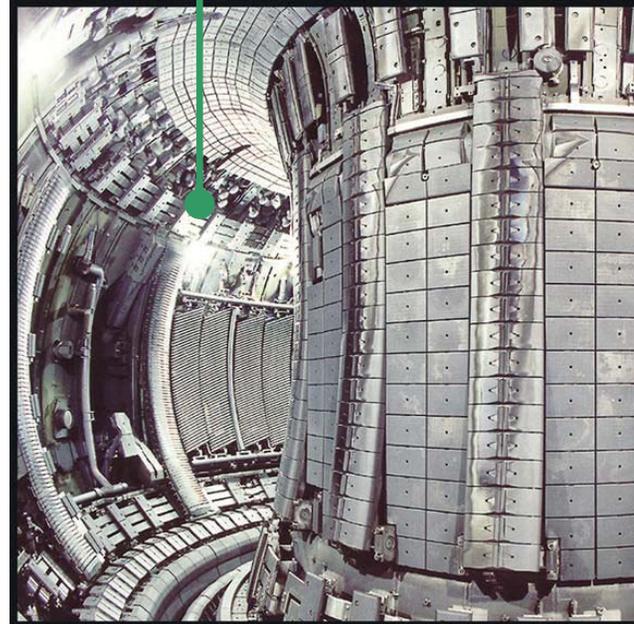
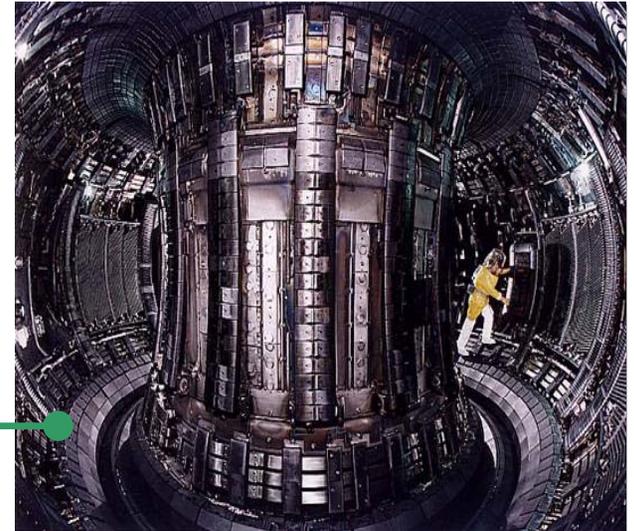


Solénoïde central

Bobine poloïdale

Bobine toroïdale

Enceinte à vide

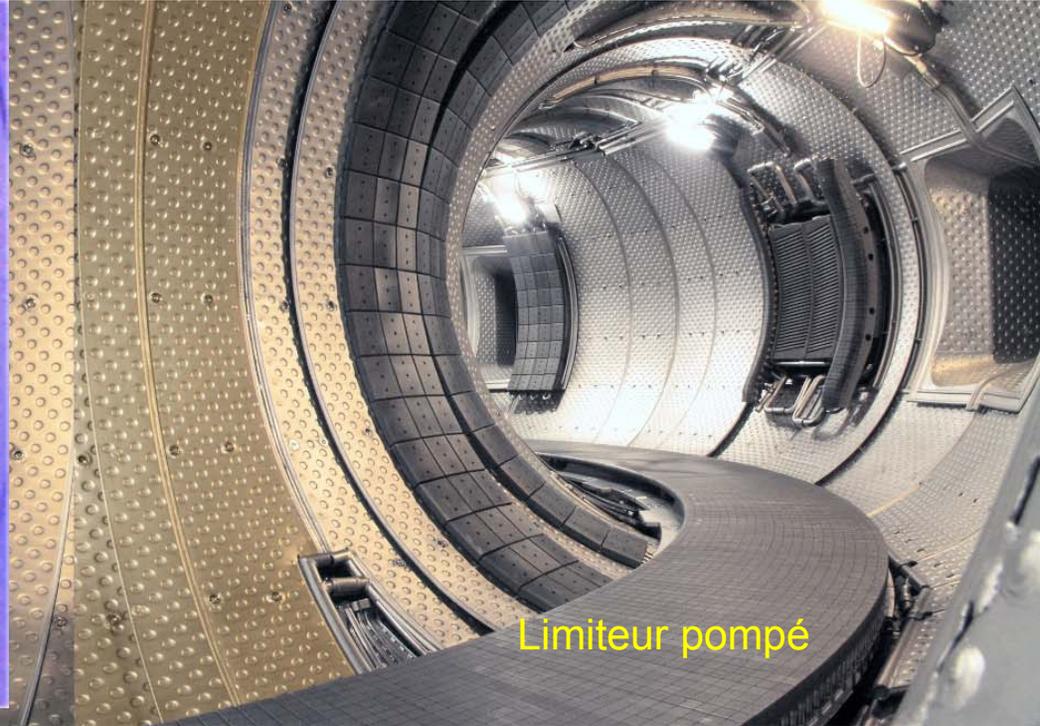
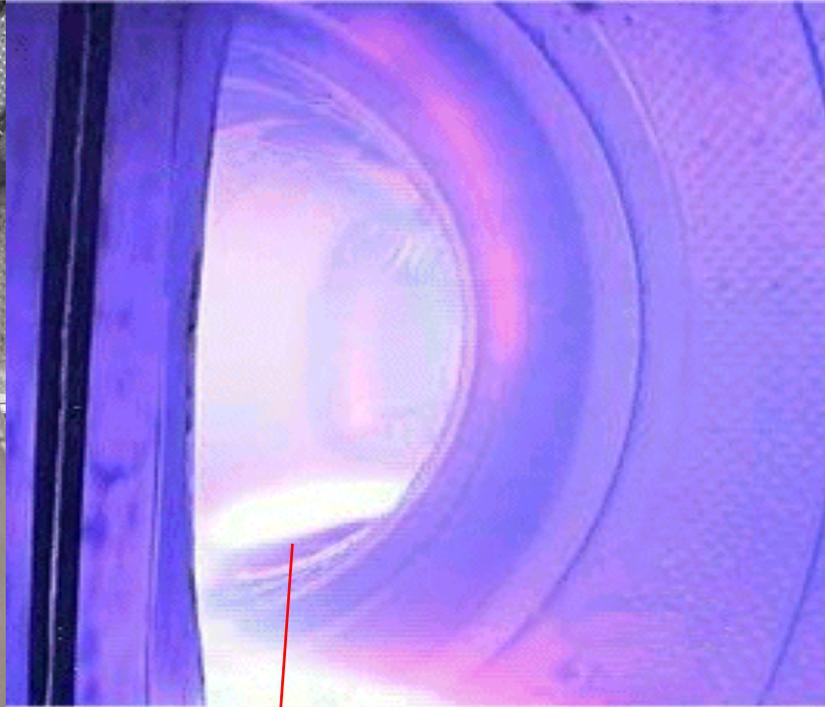


Lois d'échelle, D / T, Béryllium
Télé-manipulation
Organisation internationale

Sans plasma

Avec plasma 14

L'intérieur de Tore Supra Cadarache



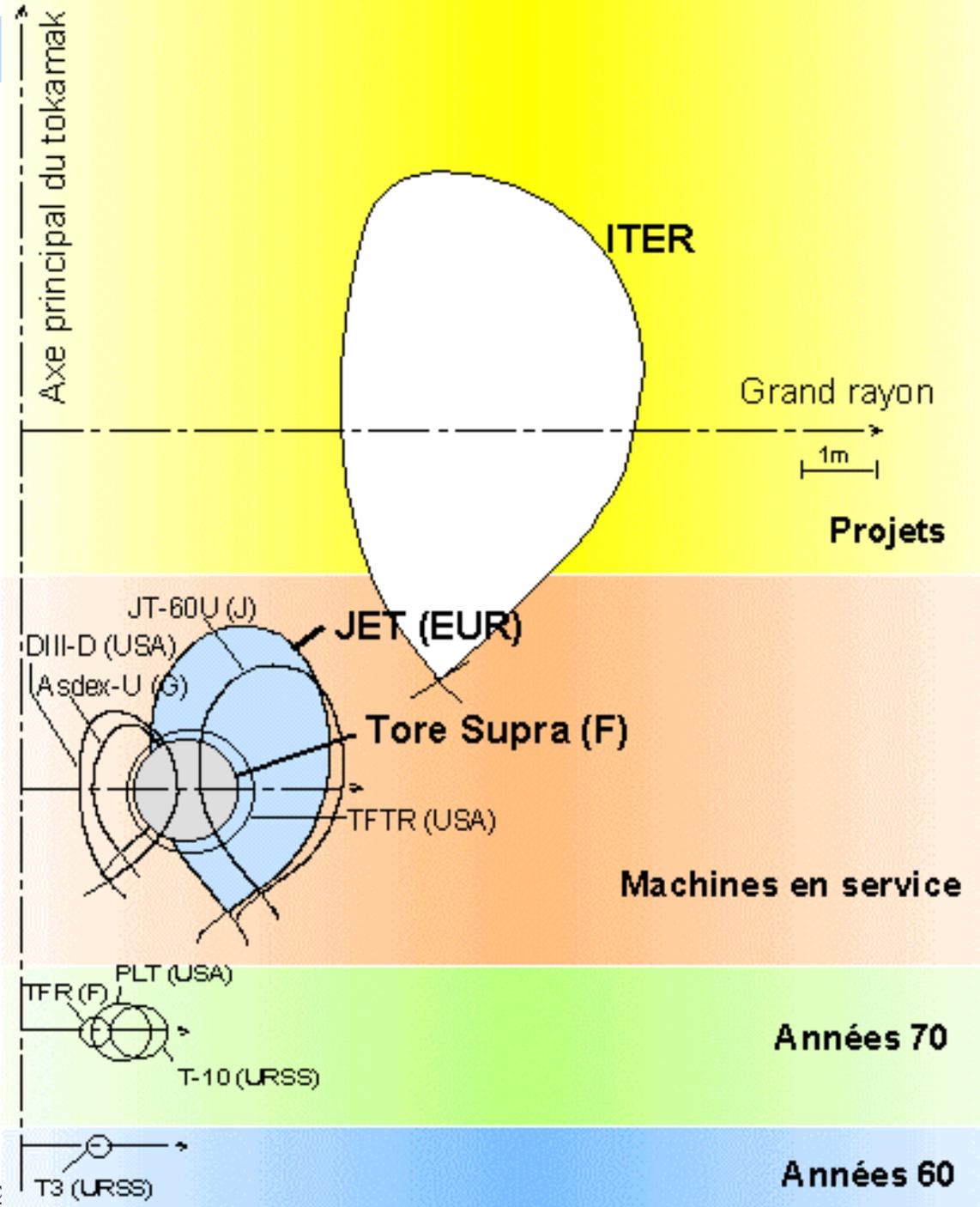
Physique et technologie du fonctionnement continu

***Tout doit être refroidi!
(comme dans ITER)***

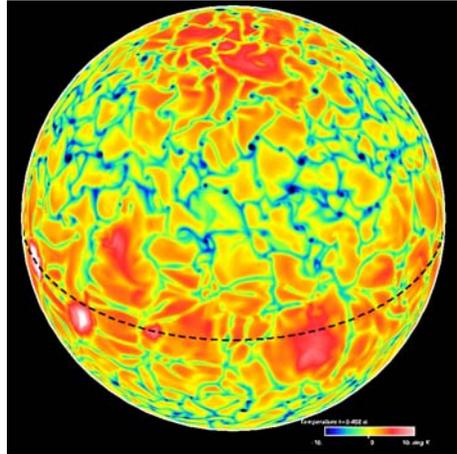
Record (2003): 6 min 18 s, 1.07 GJ

Histoire des Tokamaks

- Éléments déterminants:
 - Taille
 - Flexibilité
 - Mode opératoire
 - L, H, avancé
 - Chauffages
 - Contrôles en temps réel

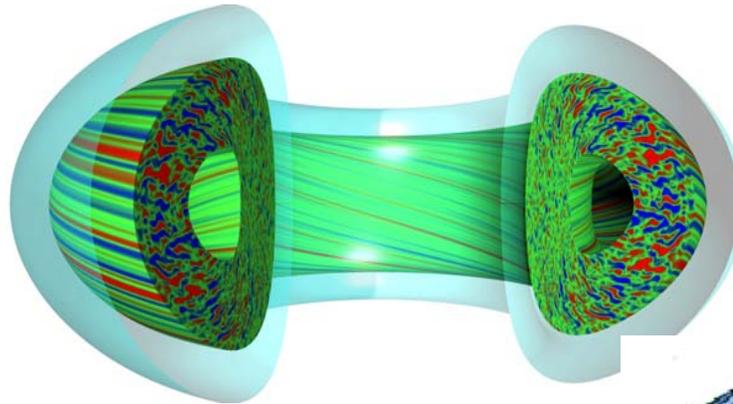


Physiques: thèmes principaux

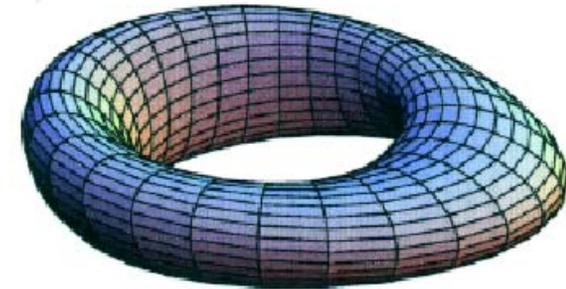


Soleil

- Thermoconvection
- Dynamo
- Éruptions solaires
- Mesures



Tokamak



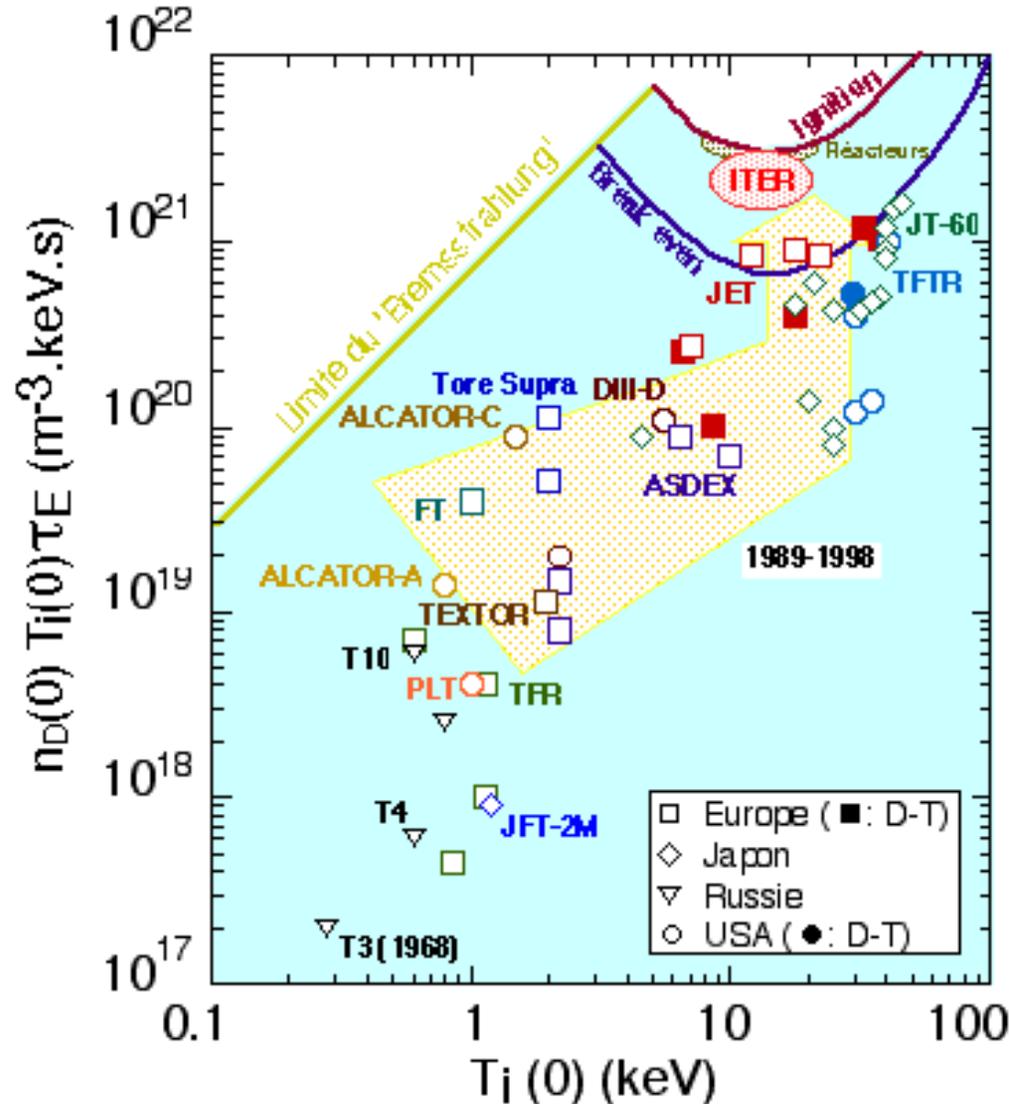
- Stabilité
- Transport turbulent
- Auto organisation
- Reconnexion magnétique
- Chauffages (ondes et particules)
- Interactions plasma-surface
- Mesures non intrusive
 - Physique atomique, spectroscopie passive/active, sondage ondes/particule

Progrès de N.T.tau

- Progrès de l'ordre de 10000 à la fois sur n.T.tau et sur la durée des décharges
- **Gagner encore un facteur 3 à 5**

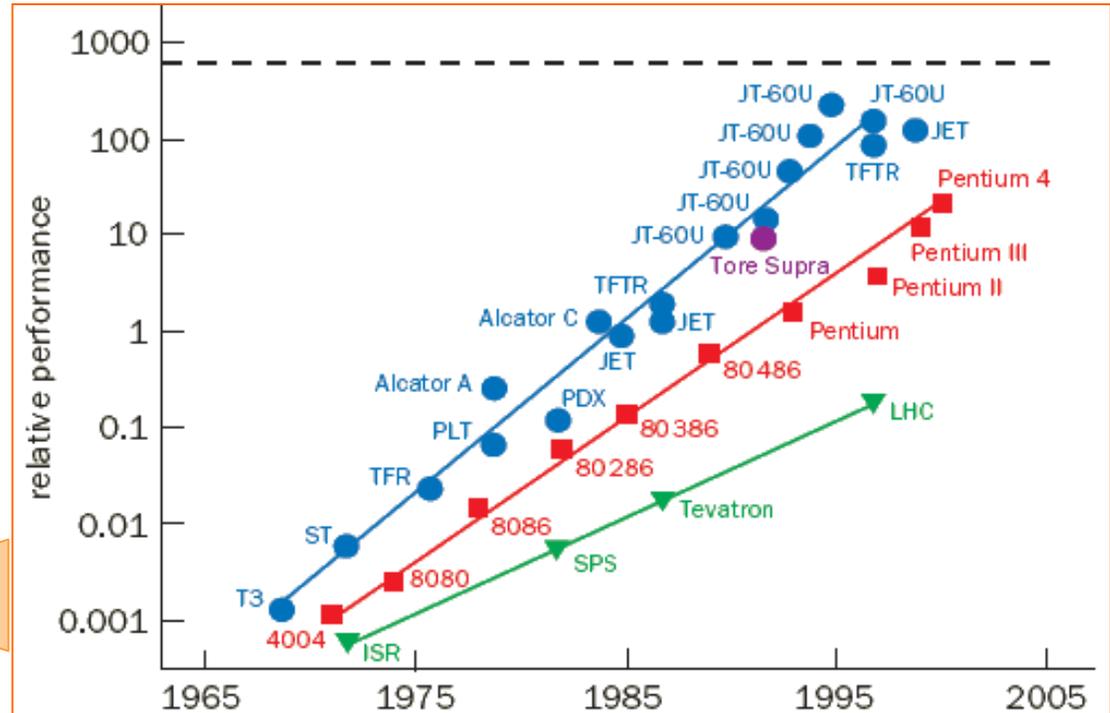
➔ **ITER et Démo**

Auto entretien de la température



Les progrès de la recherche en fusion

Des progrès constants
exceptionnellement élevés



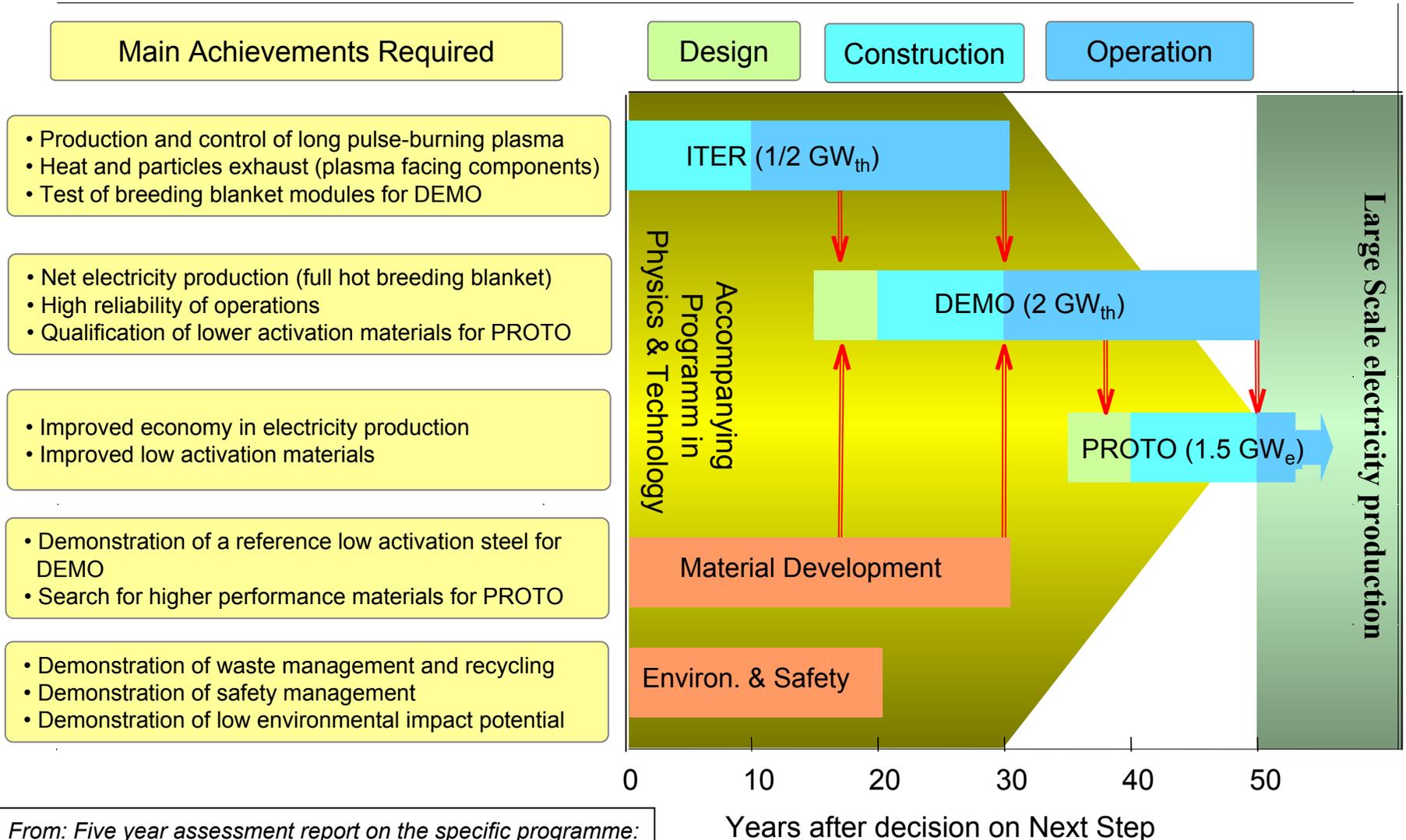
Fusion experiments have kept pace with other hi-tech developments over the last 30 years. Since the early Russian T3 tokamak, the performance of fusion plasmas has doubled every 1.8 years (blue line). This compares with the doubling of the energy of particle accelerators every 3 years (green line), and the doubling of the number of transistors on a chip every 2 years (red line). The performance of fusion plasmas is defined in terms of the triple product, $nT\tau_E$ (see text). The dashed line at the top shows the performance expected with ITER. (Courtesy of J B Lister.)

Stratégie à moyen terme

- ITER
 - **Démonstration et physique du plasma en combustion**
 - **Validation de technologies clefs**
- Programme d'accompagnement
 - Préparer l'exploitation d'ITER et le design de DEMO
 - **Coordination internationale** renforcée
 - Intégration des avancées (JET et JT-60)
 - Fonctionnement en **continu** (Tore Supra, KSTAR, EAST, ST1)
- Matériaux sous forte irradiation
 - Valider un projet d'irradiateur (**IFMIF**)
 - Rassembler la **communauté matériaux**

Feuille de route pour la fusion

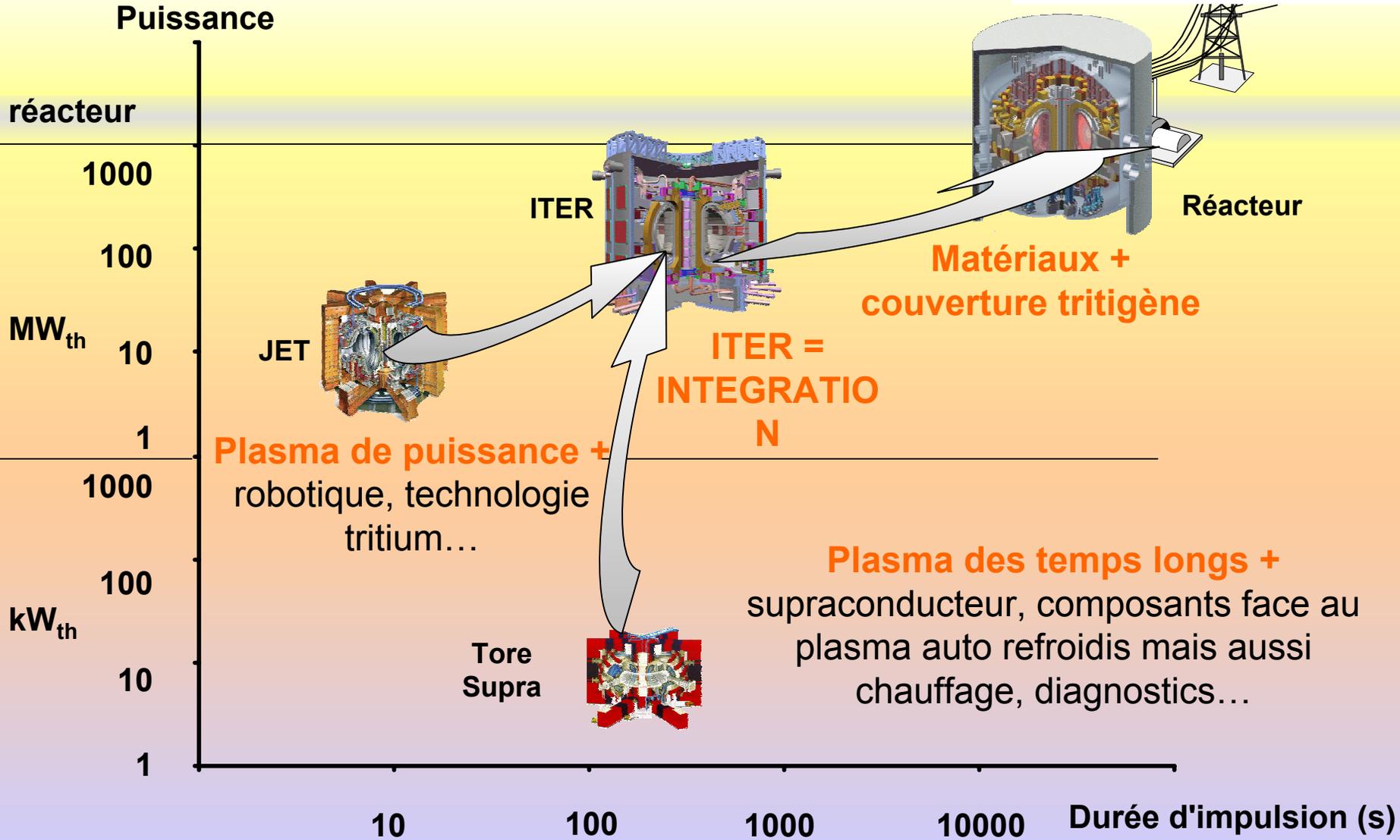
Tentative Roadmap of Achievements starting from the decision to construct the Next Step



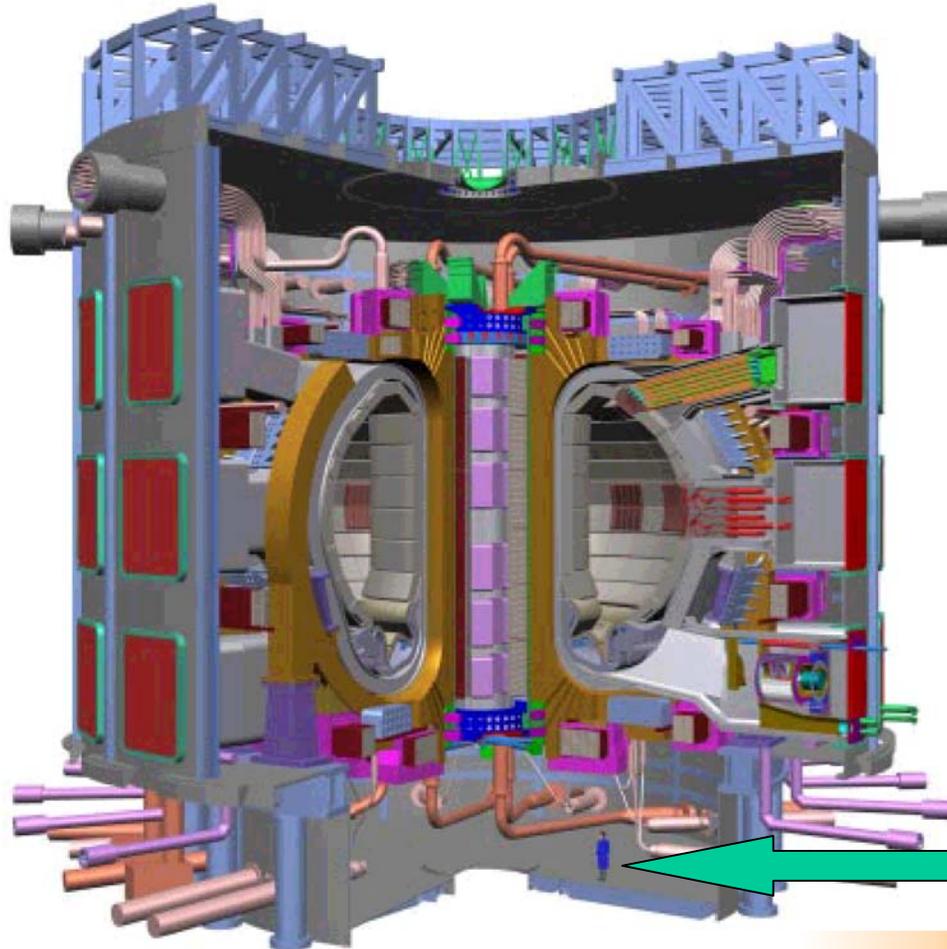
From: Five year assessment report on the specific programme: Nuclear energy covering the period 1995-1999; June 2000

Au-delà d'ITER

Fiabilité, crédibilité économique...



ITER



Taille: 8 x JET (volume),

Courant: 15 MA,

Puissance: 0.5 GW

Démonstration scientifique : **Gain 10**

- **Taille minimum pour la combustion D/T**

- couverture tritigène

-flexibilité expérimentale → paramètres DEMO

Homo sapiens



Les grandes étapes vers ITER

1984

Premiers résultats du JET

1985-86

Sommets

Gorbatchev-Mitterrand-Reagan-Tanaka → **Collaboration internationale**

1988-90

Conception: Euratom, Japon, URSS, USA.

1992-2001

Ingénierie: Objectif : 1,5 GW - 1000 s, puis **0,5 GW - 400 s, 4,5 milliards d'euros.**



Depuis 2001

Négociations à 4 puis à 6 : Chine, Corée du Sud, États-unis d'Amérique, Fédération de Russie, Japon, Union européenne.

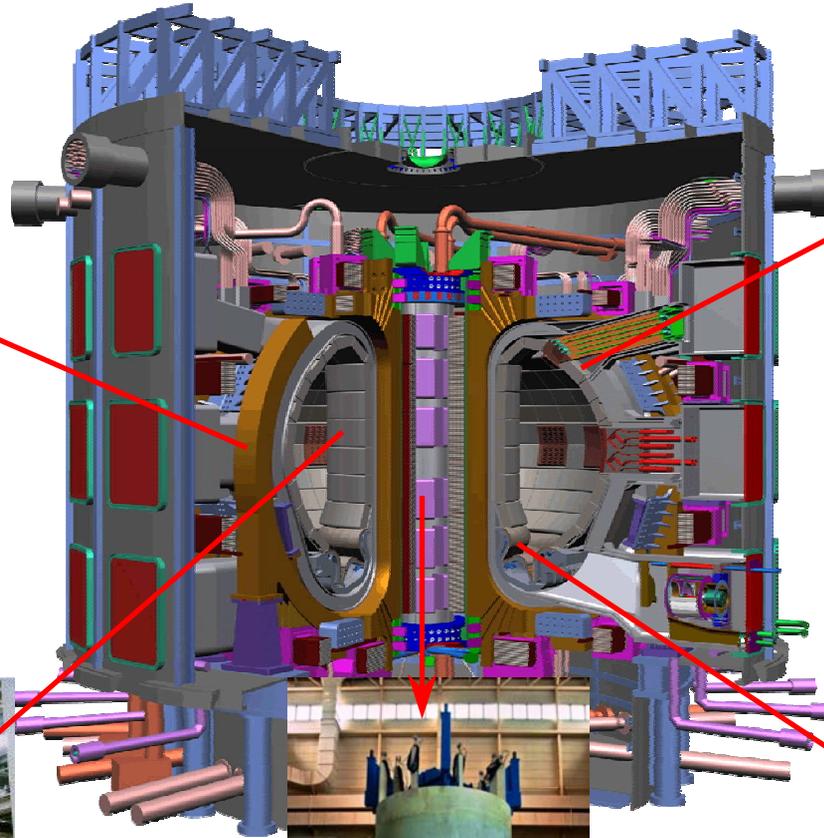
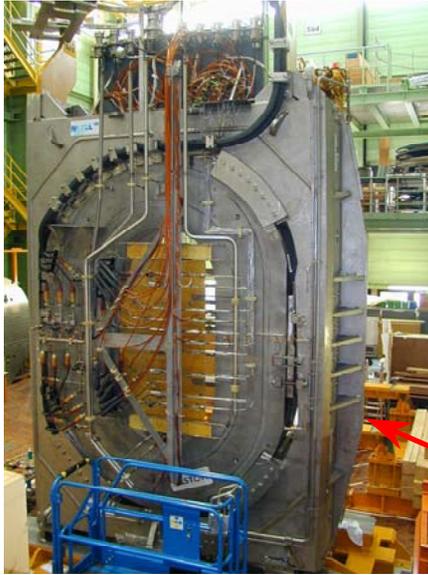
Évaluations, Statuts et organisation

Choix entre 4 sites d'implantation : Cadarache, France; Rokkasho, Aomori, Japon; Vandellós Espagne, Clarington Canada

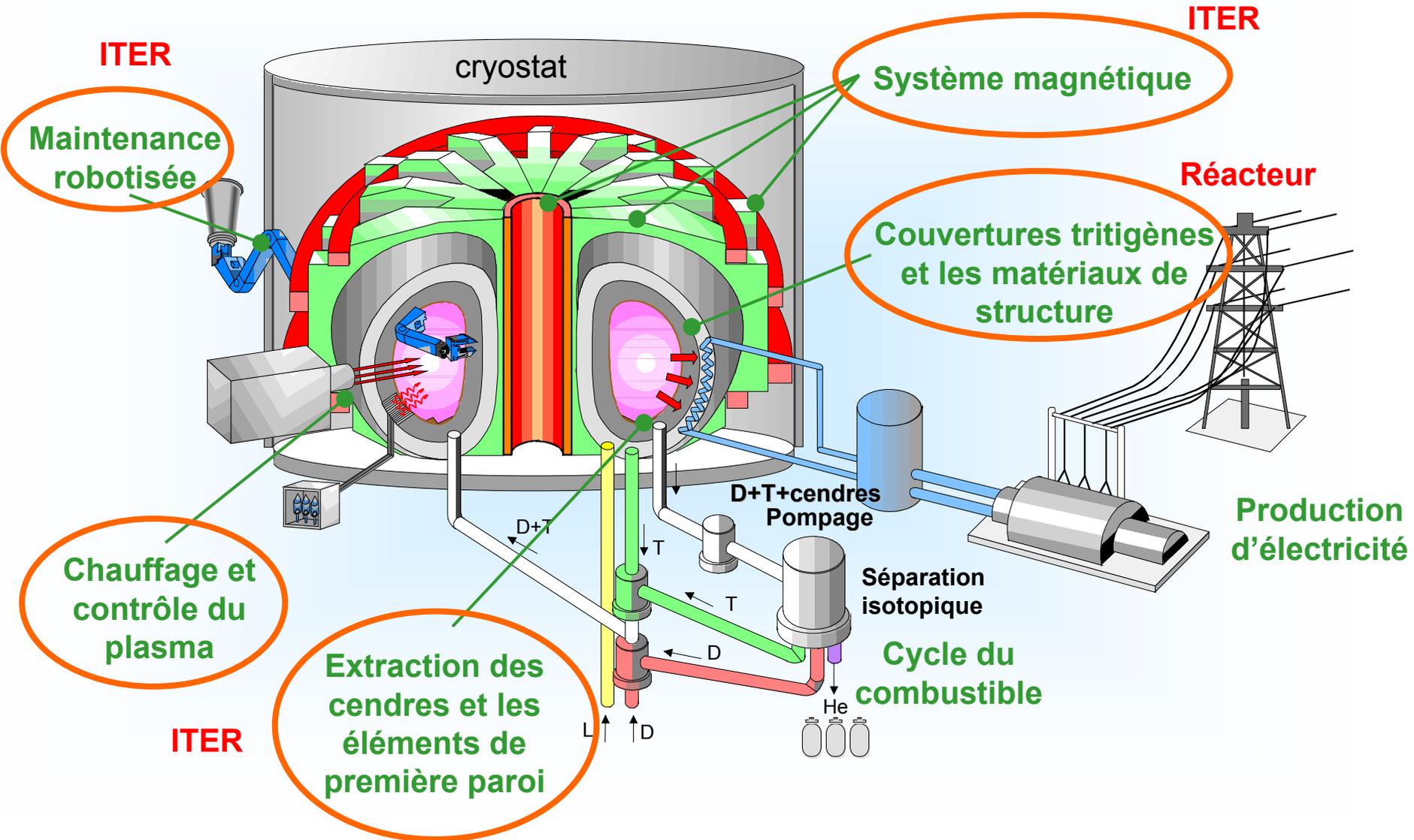
28 juin 2005: **Choix de Cadarache ! Coût pour la France: 15%**

2005 – 2006: **Mise en place des structures, début de construction**

Prototypes construits et testés avec succès



Défis technologiques de la fusion



IFMIF

International Fusion Materials Irradiation Facility

Source de neutrons de 14 Mev

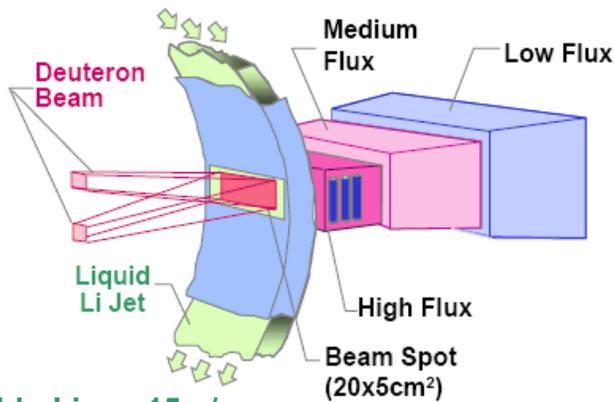
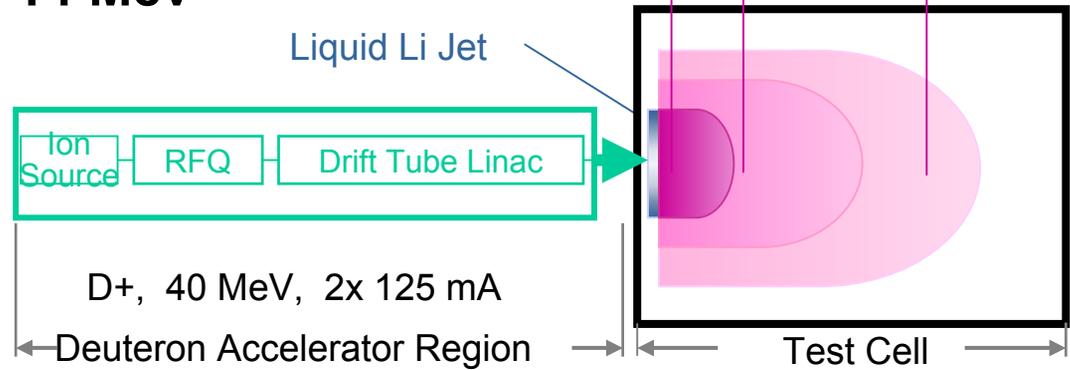
High flux (>20 dpa/an , 0.5 L)

Medium flux (20-1 dpa, 6 L)

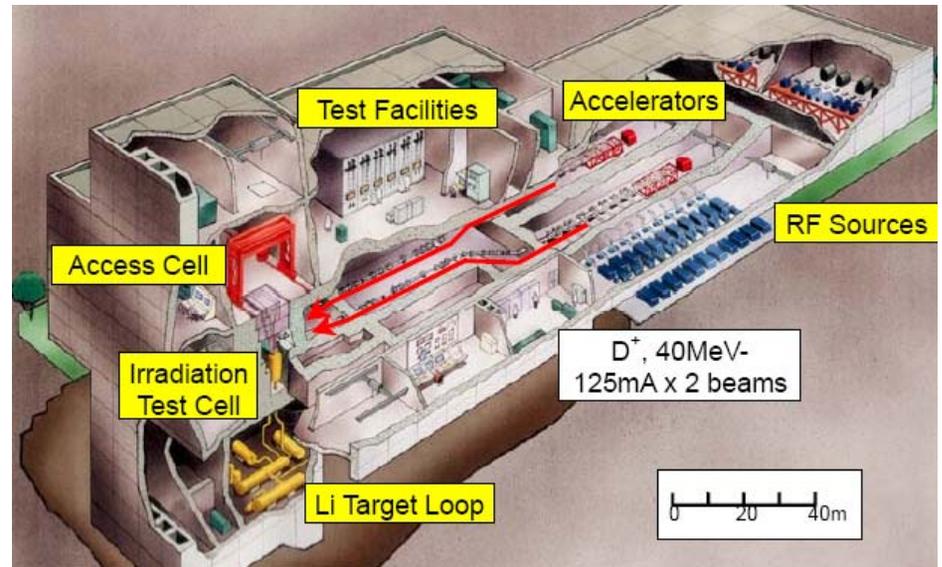
Low flux (<1 dpa, >8 L)

Réactions typiques : ${}^7\text{Li}(d,2n){}^7\text{Be}$,
 ${}^6\text{Li}(d,n){}^7\text{Be}$

Coût ~ 15% d'ITER



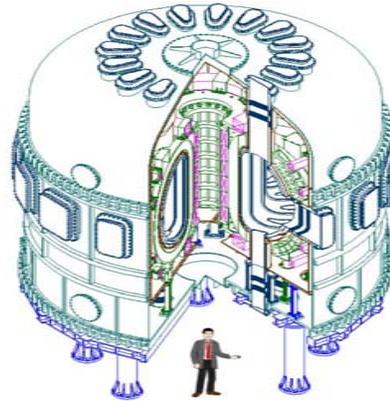
Cible-Li : $v=15\text{m/s}$,
 $T_{in}=250^\circ\text{C}$, $T_{out}=300^\circ\text{C}$



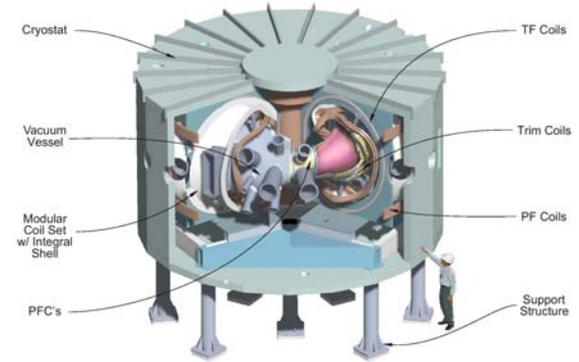
Autres installations en construction



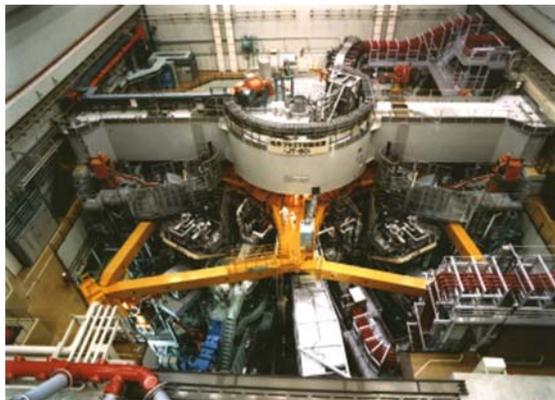
KSTAR Corée



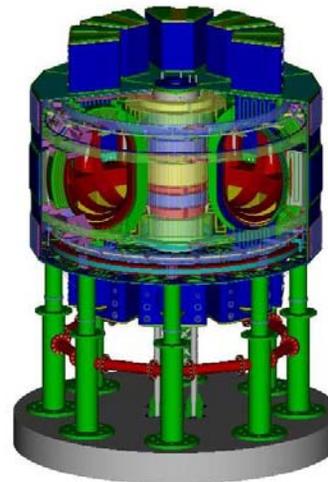
EAST Chine



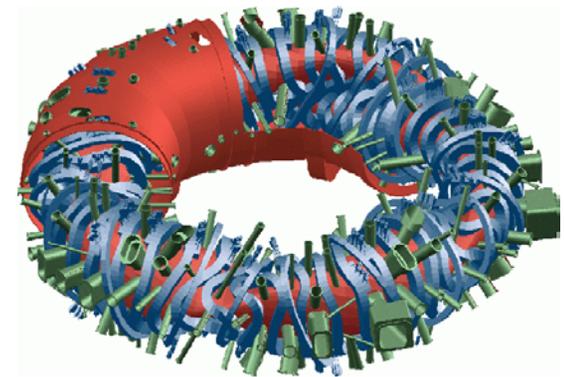
NSTX USA



Upgrade de JT-60 Japan
Accord UE/Japn



SST1 Inde



Wendelstein Allemagne

Le site de Cadarache

ITER: 2000 pers (construction)
1000 pers (exploitation)

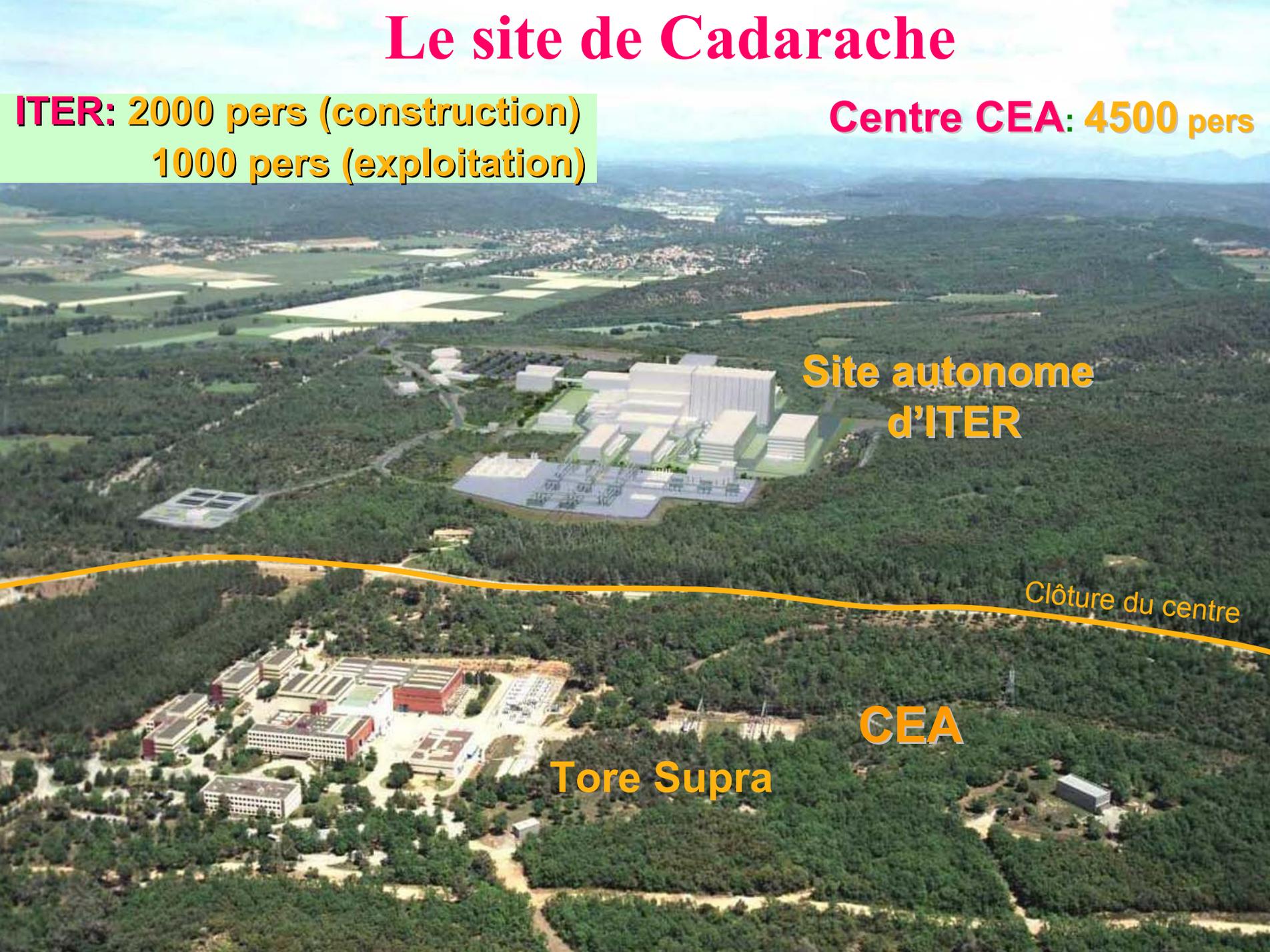
Centre CEA: 4500 pers

**Site autonome
d'ITER**

Clôture du centre

CEA

Tore Supra



Prochaines étapes (1)

- **Structures sur 3 niveaux:**
 - **Organisation internationale** (ILE); siège Cadarache
 - DG nommé: Kaname Ikeda
 - Premiers arrivants en 2006
 - **Agences domestiques:**
 - **Une agence par partenaire** : fournitures en nature
 - **pour l'Europe** : l'ELE → siège Barcelone
 - **Structures françaises:**
 - **Coordination par F. d'Aubert**
 - **Scientifique et industriel: Pôle sciences de la fusion renforcé**
 - **Formation supérieure: spécialité de master co-habilité sur 4 sites**
 - **Agence ITER France : accueil, débat public, aménagement du site, licensing, démantèlement**
 - **Région (CdP: Y. Imbert): transport charges lourdes, école internationale**
- **Construction:** aménagements en 2006, bâtiments 07/08

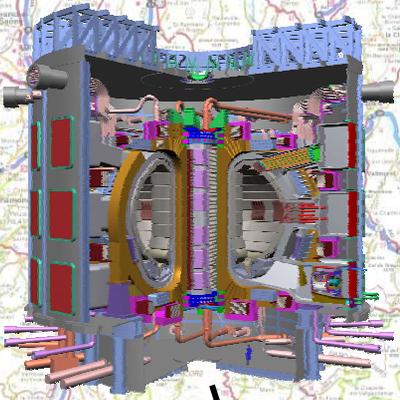


Euratom cea

Transport des charges exceptionnelles



Airbus Assembly site



Bordeaux

96 km

240 km

Toulouse

96 km

Cadarache

Fos

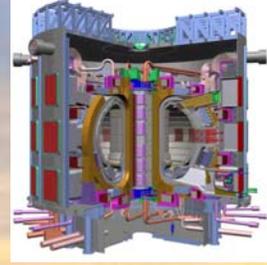
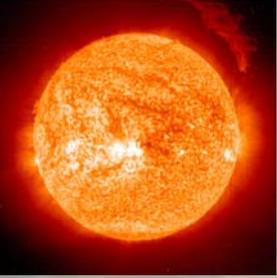
13 km

32 charges à acheminer en 2 ans, 5 secteurs à aménager dont une estacade au défilé de Mirabeau



Etude du transport





La fusion se lève sur la Sainte Victoire

L'énergie : le défi majeur du siècle

ITER: une collaboration scientifique sans précédent

Un pôle mondial en France à préparer activement

Opportunités pour la science et la technologie européenne

Les retombées économiques et l'emploi

- **Phase de construction (2005 -2015) : 4,7 G€**

- Équipements d'infrastructure et adaptation du site
- Composants de haute technologie
- Études d'ingénierie

Contribution régionale : 452 M€

500 personnes directement employées par ITER,
3000 emplois indirects en France dont 1400 en PACA

***Dépenses pendant les 10 ans de construction:
180 M€ par an en France, dont 100 M€ en PACA***

Les retombées économiques et l'emploi

Phase d'exploitation (2015-2035) : 4,8 G€

- Environ 1000 personnes employées directement par ITER, dont :
 - 600 personnes pour l'exploitation et 400 scientifiques (dont 2/3 d'étrangers)
- 3250 emplois indirects en France dont 2400 en Région PACA

Dépenses par an: 165 M€ en France, dont 135 M€ en PACA, pendant les 20 ans d'exploitation

Impacts

- Aménagement du site et accueil:
 - École internationale ouverte aux locaux (1400 élèves mini)
 - Route convoi exceptionnel (dans les Bouches du Rhône)
 - Ligne 400KV prolongée (4km dans terrain CEA)
 - Prélèvement d'eau (0.7% canal de Provence)
- Logement
 - 1000p sur ITER → + 20% de 'Cadarachiens' dans les localités avoisinantes, inférieur à l'augmentation de la population ces dernières années (2% par an); arrêtés de pré-ZAD

Sûreté d'ITER

- Installation Nucléaire de Base (INB) soumise aux Autorités de Sûreté Nucléaire françaises **et** validation des pays membres
 - Contrôle: l'installation, les matières radioactives, les déchets radioactifs (2300t, type B), rejets d'effluents ($T < 0,25\text{g/an} \sim 20\%$ des autorisations actuelles)
 - Limites réglementaires strictes
 - Risques nucléaires: tritium et activation progressive des structures
 - Conception (DOS): confinement triple, ventilation / récupération, semi enterrement
- ➔ pas d'évacuation de la population en cas d'accident 'enveloppe' (180 μSv à la clôture)**

Le Retour d'expérience

- Tritium 'civil', déchets
 - Réacteurs Candu (depuis 23 ans) : ~ 20 kg à Darlington (Toronto)
 - JET (UE), TFTR (USA), Karlsruhe (All)
- aucun accident**
- Tokamaks et Stellarators
 - En Europe: JET + 7 autres dont TORE SUPRA
 - Dans le monde : JT 60U (Japon), DIID, Alcator...
 - En construction: KSTAR (Corée), EAST (Chine), ST1 (Inde), W7X (UE)
 - Construction du RES et 18 INB à Cadarache

→ Visitez Tore Supra et JET!