

Fusion nucléaire: l'énergie des étoiles



ITER un projet mondial

Pierre J. Paris

Conf' au Rotary Club Lausanne 30 septembre 2011



L'approche énergétique

A une mosaïque de problèmes

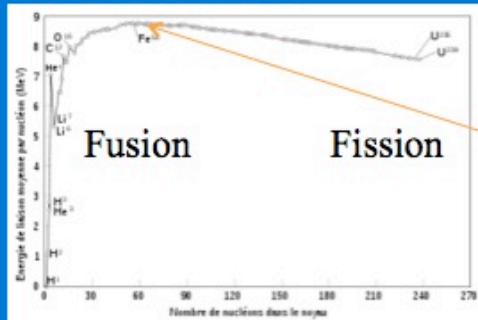
- Augmentation de la population mondiale (*7 Mia prévus en 2011*)
- Augmentation de la consommation d'énergie
- Combustibles fossiles: ressources limitées. Temps fini. Trouver un combustible de substitution (mobilité)
- Contraintes écologiques: appliquer le principe de précaution (mais à des coûts supportables), en harmonie avec un développement durable
- Solutions de substitution: nombreuses,...mais aucune d'évidente! Aujourd'hui, avec notre technologie, les sources renouvelables ne semblent pas suffisantes!
- Choix: politique, économique, éthique, sociétal

...Une mosaïque de solutions, parmi celles-ci, une option énergétique: la fusion nucléaire



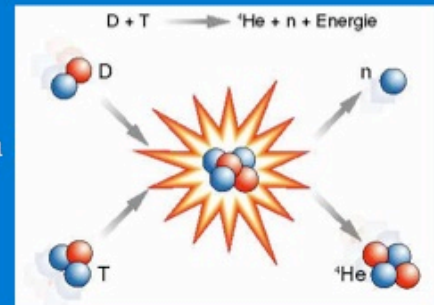
Fusion des atomes légers

Deux façons de produire de l'énergie à partir de l'atome; fission (atomes lourds) & fusion (atomes légers): $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$



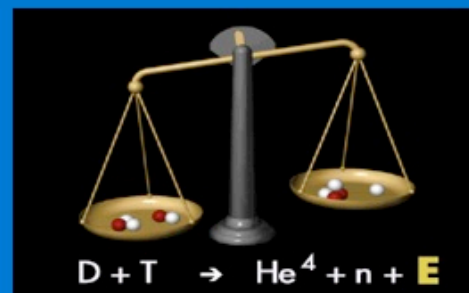
Réaction deutérium-Tritium >>>

Courbe d'Aston



Sur terre, la fusion thermonucléaire contrôlée nécessite des hautes températures du combustible, DT à plus de 100 millions de degrés

*1g de D + 1.5g de T qui fusionnent, libèrent
100 '000 kWh*



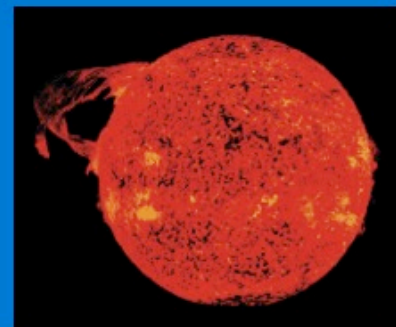
3-oct-11

3

Le Soleil: exemple d'un réacteur à fusion!

- Le Soleil brûle de l'hydrogène, il le transforme en hélium
- 77% de l'énergie provient de la fusion de l'hydrogène
- Chaque seconde, 500 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent. L'équivalent d'un Cervin en une minute!
- La masse perdue est de 4 millions de tonnes par s.
- La fusion intervient à 15 millions de degrés
- Encore 74% de sa masse est en hydrogène
- $E = mc^2 \Rightarrow$ réacteur de 3.6×10^{17} Gigawatts

1g d'hydrogène engendre 180'000kWh de rayonnement



3/10/11

Conf* du 30 septembre 2011 au Rotary Club de Lausanne

4

Du deutérium ...à partir de l'eau!

- **Deutérium:** 33 g/ m³ d'eau (sur le globe >10¹³ tonnes).
- **Tritium:** forme radioactive de courte demi-vie radioactive (12,36 ans)
 - N'existe pas dans la nature, régénéré à partir du lithium, métal léger
 - Grandes réserves de **lithium** (de quoi produire de l'électricité nécessaire au monde pendant plusieurs milliers d'années) : env. 20 Mio tonnes dans la croûte terrestre et 10¹¹ tonnes dans l'eau de mer (0.17g/m³)
- L'équation finale de la chaîne (D, Li) est donc:
D + Li → 2 He⁴ + neutrons + énergie



3-oct-11

5

Les réactions de fusion intéressantes sur Terre

Comme nous l'avons vu la réaction la « moins difficile » à réaliser: deutérium-tritium, probabilité de fusion plus favorable pour une température de 100 MioC.
 $D+T \longrightarrow {}^4\text{He} (3.5 \text{ MeV}) + n (14.1 \text{ MeV}) \quad /1)$

Deutérium-Deutérium



Réserves de deutérium pour des centaines de millions d'années, selon consommation actuelle d'énergie. Les réactions peuvent se poursuivre selon équation (1) et équation (4). Intéressante car beaucoup moins de neutrons de 14 MeV. mais existe en quantité sur la Lune...Mais fusion plus rentable à 250 MioC

Deutérium – Helium 3



Mais ³He n'est pas stable, il est rare...mais existe en quantité sur la Lune...Mais fusion plus rentable à 350 MioC

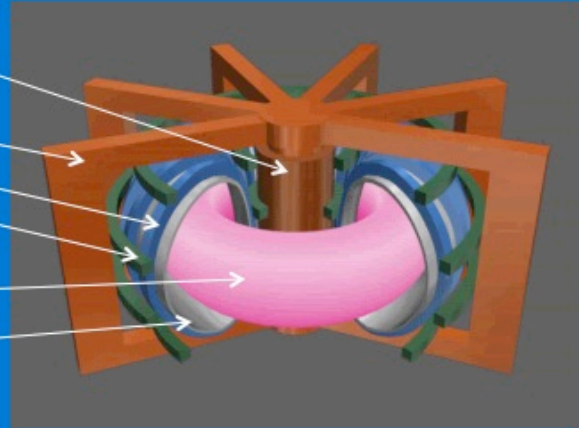
3/10/11

6

Le tokamak

Comment ça marche?

- C'est un transformateur
- Bobine d'induction du courant (ohmique)
- Circuit magnétique (fer)
- Bobines de champ torique
- Bobines de champ vertical
- Le courant chauffe le plasma et contribue à stabiliser le plasma
- Un chauffage additionnel est nécessaire
- Chambre à vide
- Invention russe: Andreï Sakharov- Igor Tamm (1951)



Acronyme (Igor N. Golovin): "tok v' magnitnom polie" "courant dans un champ magnétique"
 Autre acronyme russe possible Toroidalnaya Kamera Magnitnymi katushkami (chambre à vide toroïdale et bobine magnétique)

3-oct-11

7

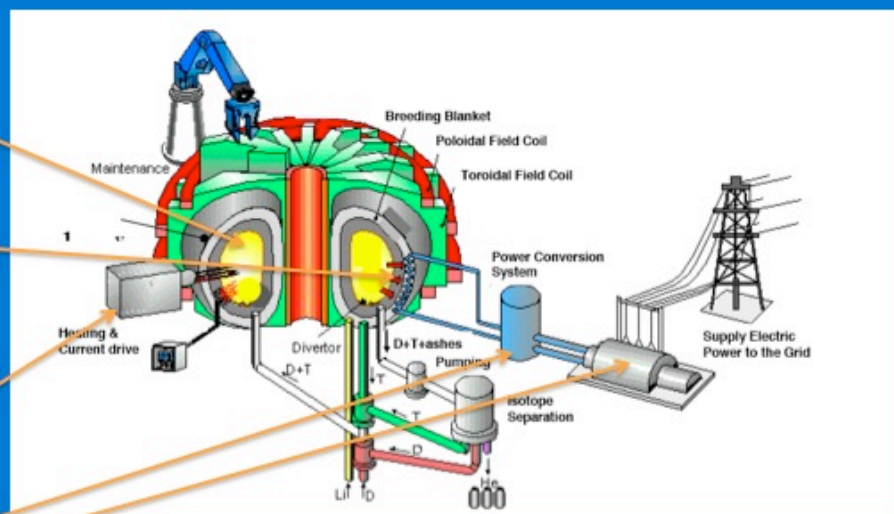
Une centrale électrique à fusion

Schéma de principe d'une centrale à fusion D-T. >>

Les particules d'hélium, confinées dans le plasma, participent au chauffage du plasma.

Les neutrons issus des réactions de fusion traversent la paroi, ralentissent dans le manteau contenant du lithium, régénérant ainsi le tritium et libérant l'énergie utile du réacteur. Chauffage additionnel au courant

L'énergie est récupérée par un échangeur de chaleur, et finalement grâce à la vapeur, une turbine génère de l'électricité.



Note: utilisation dans le manteau de composés Li et non de Li seul.
 Régénération du tritium par fission des isotopes du lithium:
 ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He}(2.1\text{MeV}) + \text{T}(2.7\text{MeV})$ exothermique (${}^6\text{Li}$, 7.5% du Li naturel)
 ${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + n - 2.87\text{MeV}$ endothermique (${}^7\text{Li}$, 92.5 % du Li naturel)

3-oct-11

8

Avantages - *problèmes*

- Non-radioactifs, les combustibles de base, D et Li, existent sur tout le globe; ils sont abondants (Li) et pratiquement inépuisables (D)
- La partie radioactive, T, est produite dans le réacteur même. Transformée en hélium et neutrons. Quelques grammes de combustible existent en même temps, dans le réacteur
- L'hélium, cendre non-radioactive, est un élément sûr
- Quantité de combustible et de cendres est petite (qq 100kg par réacteur/an)
- Sécurité intrinsèque au réacteur, si perturbations importantes, arrêt des réactions. Pas de réactions en chaîne!
- *Radioactivité (induite par neutrons) des parois et de la structure du réacteur, peut (doit) être réduite. Grand volume de déchets structurels, mais radioactivité 100 à 100000 moins élevée que pour la fission*
- *Technologie complexe, développements considérables*

La fusion est compatible avec le développement durable

3-oct-11

9

Centre de Recherches en Physique des Plasmas (EPFL) *Association EURATOM - Confédération Suisse*

Site de Lausanne >>

- Physique de la fusion
 - TCV (Tokamak)
 - Gyrotron
 - Théorie
- Procédés plasmas industriels



- << Site de l'Institut Paul Scherrer (PSI) à Villigen - Würenlingen
- Technologie de la fusion
 - Matériaux
 - Supraconductivité

3-oct-11

10

Le programme suisse



TCV

- Confinement des plasmas à forte élongation (rapport h du plasma sur largeur). Record max d'élongation 2.8
- Chauffage par ondes ECRH et génération de courant par onde
- Stabilité & Contrôle du Plasma.
- Centre européen de test des générateurs UHF « gyrotron » pour chauffage du plasma

3-oct-11



SULTAN: installation unique

- **Supraconductivité**
Essais critiques des éléments de bobines magnétiques pour ITER et dans les conditions d'ITER. Centre de test international.
- **Recherches en matériaux**
Test sur SIN Q: source de neutrons du PSI
Développer les matériaux spécifiques

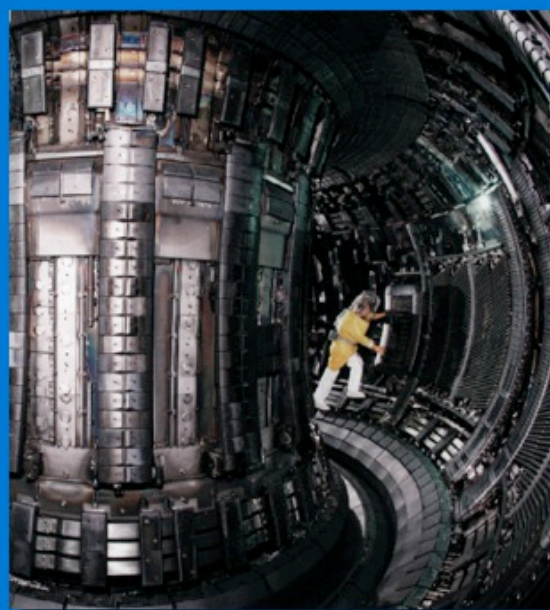
11

JET: le tokamak européen

- JET, le tokamak le plus grand au monde
- Performances les plus élevées au monde
 $n\tau I = 6.10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$
- Q = Rapport Energie investie dans le plasma / énergie de fusion = 0.68, proche du breakeven (égalité des termes)
- Température centrale du plasma: 350 Mio K
- Impulsions de 30 secondes de plasma

Milestones in Fusion Power with Deuterium-Tritium Plasmas

1991	1.7 MW
1994	10 MW
1997	16 MW
2015 - 2020	500-700 MW (ITER)



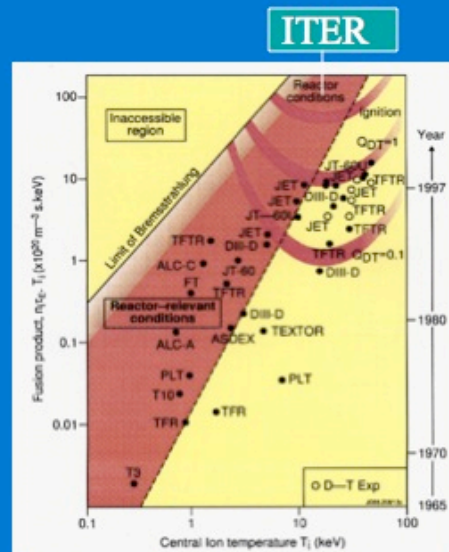
3-oct-11

12

Où en sommes-nous et allons-nous?

- La communauté internationale scientifique est prête, au niveau scientifique & technique, à construire une grande expérience qui intègre la physique et la technologie.
- C'est le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)... et en latin: la voie... le chemin!

Les progrès au cours des 40 dernières années > (Amélioration des performances des tokamaks 1998). En abscisse la Température, en ordonnée, le facteur de performance basé sur le critère de Lawson, du triple produit $n\tau T$ (Densité x Temps de confinement de l'énergie x Température des ions au centre du plasma,



Domaine de l'ignition (auto-entretien des réactions sans apport de chauffage additionnel) : $n\tau T = 6 \cdot 10^{22} \text{ (m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K)} \dots$ 1seulement 10 fois plus que la valeur atteinte dans JET .

3-oct-11

13

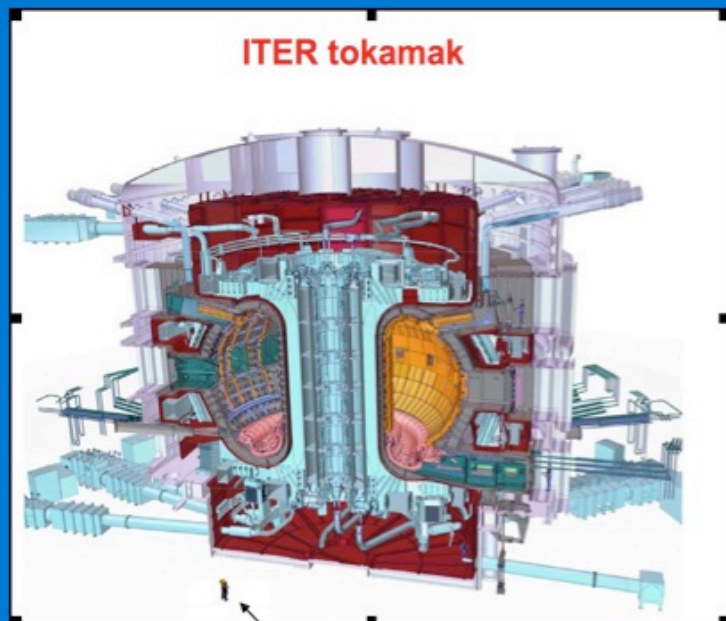
La Fusion...Un objectif mondial commun

Vers une grande installation commune

JET : Europe

ITER: Monde

Genève 1985: Gorbachev et Reagan décide de l'effort de recherche en fusion
Vienne, IAEA, 28 Juin 2005: décision construction d'Iter à Cadarache.
Paris, 21 novembre 2006: Signature de l'Accord de construction d'Iter
Chine, Europe, Inde, Japon, Corée du Sud, Fédération Russe et les Etats-Unis d'Amérique



Homme

3-oct-11

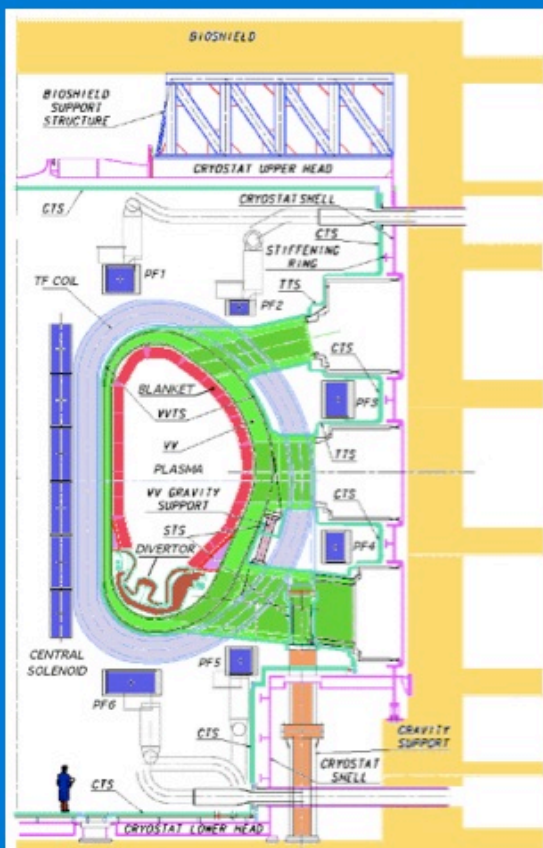
14

Les caractéristiques d'ITER

- Le tokamak ITER sera la seule installation expérimentale entre les expériences actuelles et le réacteur de démonstration de production électrique (DEMO)
- ITER atteindra l'ignition et générera une fraction significative de puissance de fusion (500 MW avec seulement 50 MW de puissance incidente, $Q=10$) pendant une longue impulsion (500 s - quasi continu)
- Démonstration de l'intégration des technologies utiles à une centrale
- Démonstration de la sécurité d'un tel réacteur
- Premier tokamak avec un chauffage dû aux particules α (He)
- Volume du plasma $\sim 840\text{m}^3$
- Champ magnétique généré par des supraconducteurs $B_t = 5.3\text{T}$
- Durée de la construction - env. 10 ans
- Début de la construction 2009
- Premier plasma 2019
- ITER est une entreprise internationale impliquant l'Union Européenne (avec CH), Chine, Japon, Corée du Sud, Féd. de Russie, l'Inde et les EU (USA). Soit 7 partenaires. Brésil et Australie contribueront .Un Grand Défi Mondial!

3-oct-11

15



ITER section Verticale

Parameters

Large radius R	6.2m
Small radius a	2.0 m
Plasma current I_p	15 MA
Elongation	1.7
Plasma volume	837 m ³
Additional heat. power	73 MW
Fusion power	500-700 MW for 400s
B_T	5.3 T
Neutron Flux	0.57MW/m ²
Electrical power on the site	500MW-400 MVar

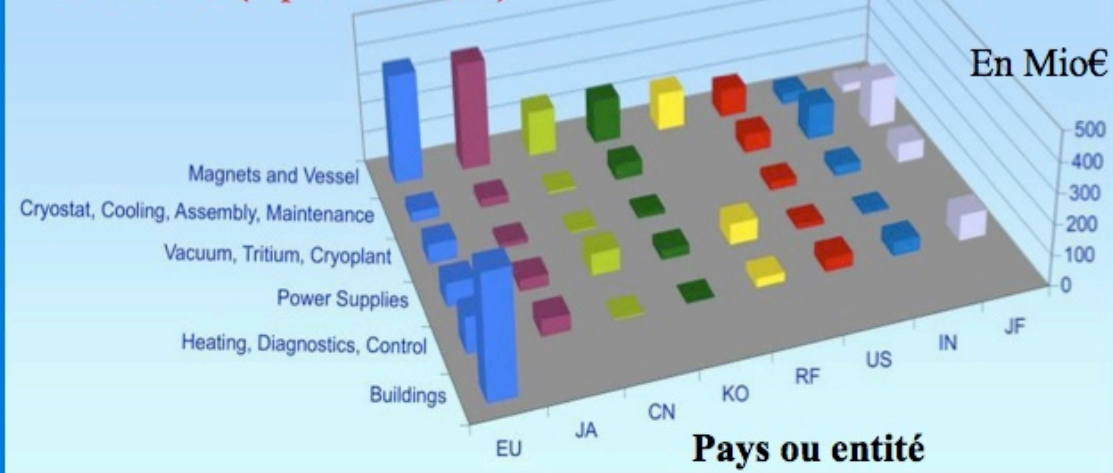
3-oct-11

16

Répartition des lots de construction d'Iter (procurements)

Chaque partenaire dans le cadre qui lui revient a établi une agence domestique: interface avec les industries du pays, pour placer les contrats de construction des composants.

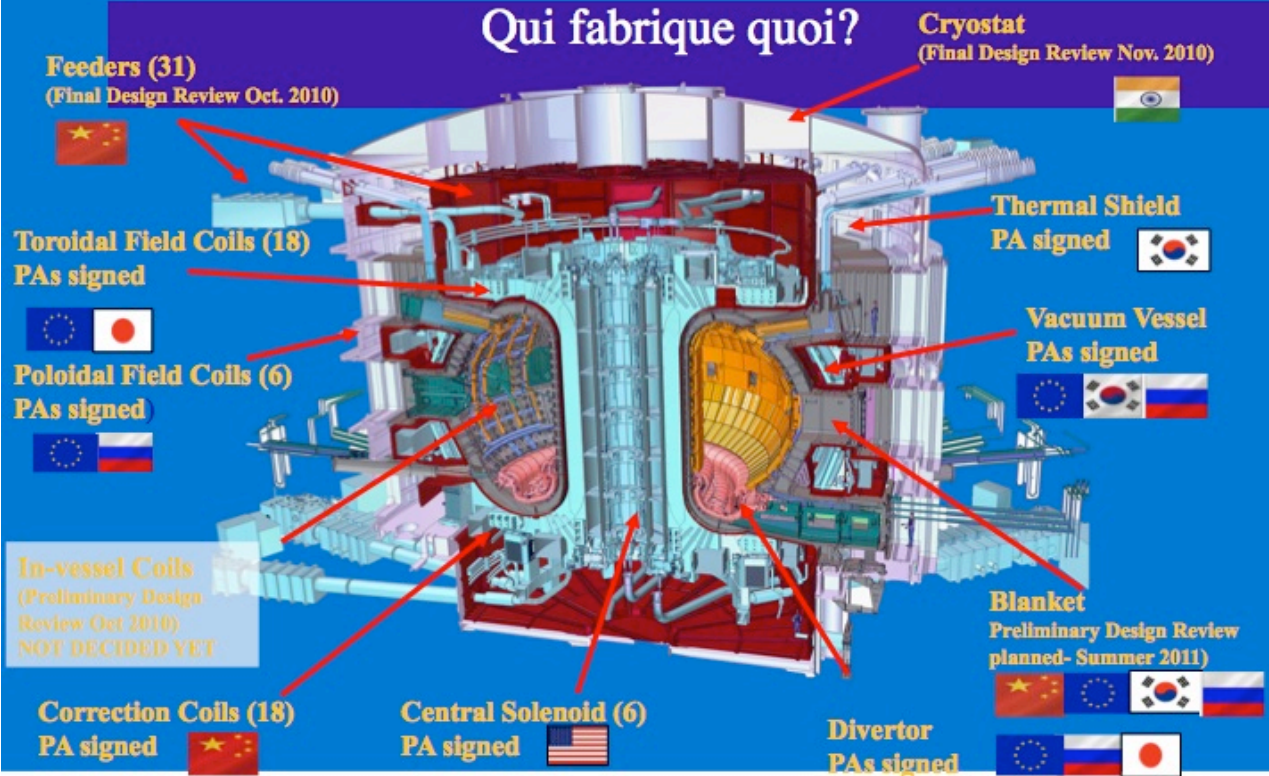
Les Agences domestiques ont déjà contracté pour env. 3 Mia€ de commandes (septembre 2011)



3/10/11

17

Qui fabrique quoi?

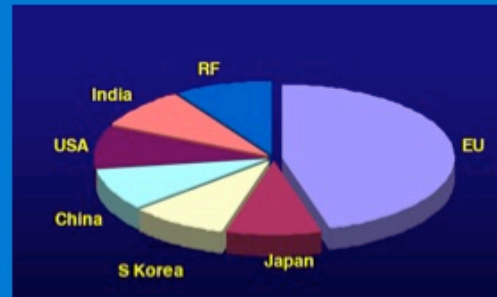


3/10/11

18

Le coût d'ITER

ITER coût de la construction :
7050 M€ (prévu) dont 211 M€ de réserve
Env. 1/3 cash 2/3 en matériel
ITER opération sur 20 ans: 5640 M€
Phase de désactivation: 281 M€
Phase de décommissioning: 530 M€
Total: 13712 M€... sur 30 ans env. >>>
UE: 45%; le reste réparti entre les 6
partenaires (9% chacun)



Repartition des coûts, selon les composants >>>

Coût de l'Approche Globale "Broader Approach" : (prévu)
16 % du coût de construction d'ITER
partagé: UE (8%) et Japon (8%) soit env.
1200 M€



3-oct-11

19

Iter: le chantier aujourd'hui (septembre 2011)



42 hectares des 180 ha disponibles constituent la plateforme entièrement préparée en 2009 pour recevoir les divers bâtiments du projet Iter.

Photo: Altivue/ Iter organisation

3/10/11

20

Le Chantier d'ITER

Construction Status at Cadarache

Tokamak Complex Excavation



PF Coil Winding Building



ITER Headquarters Building



Situation en
Juin 2011

Photos: Altivuc/ Iter
organisation

3/10/11

21

Le site et le building d'ITER

La halle expérimentale

$h_a = +60\text{ m}$

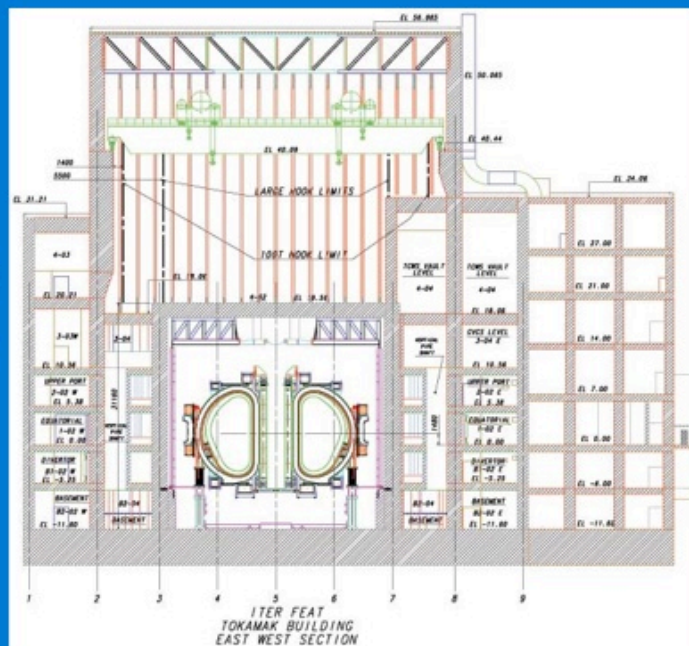
$h_b = -13\text{ m}$ $h_{\text{tot}} = 73\text{ m}$

$L = 34 \text{ \& } 50\text{ m}$

Cryostat diam. = 28.50m

Plus haut que l'Arc de Triomphe à Paris

Vue de l'ensemble proche du tokamak

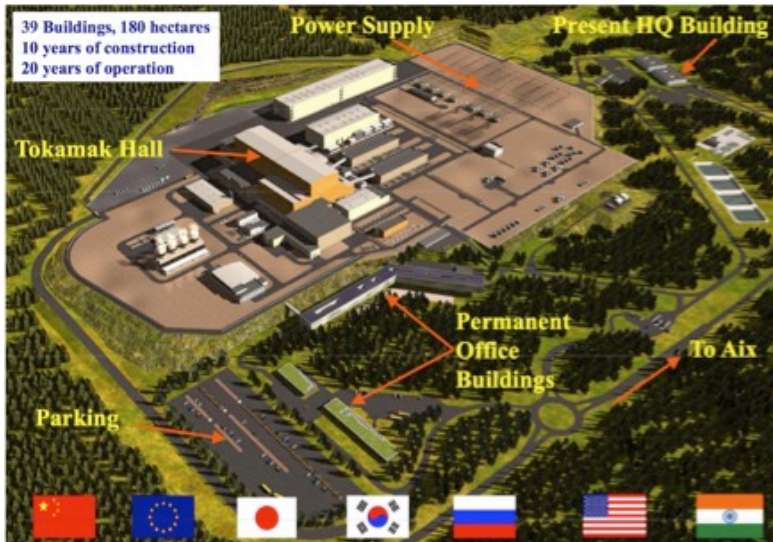


3/10/11

22

Le site d'Iter (Cadarache-F)

ITER Site after Construction



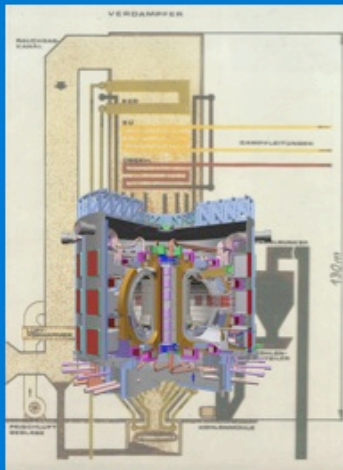
"ITER will be the stepping stone into a new era, in which a safe and inexhaustible source of energy becomes available for mankind."
Osamu Motojima, DG Iiter organisation Août 2011

La communauté scientifique a confiance dans la réussite d'Iter quant à atteindre les conditions d'ignition et la démonstration d'un facteur d'amplification de l'énergie.

3-oct-11

23

ITER: est-ce vraiment gigantesque ? Vraiment cher?



Comparé à une chaudière de centrale thermique (800 à 1000 MWe) en Allemagne.



Comparé à un porte-avions "Nimitz"

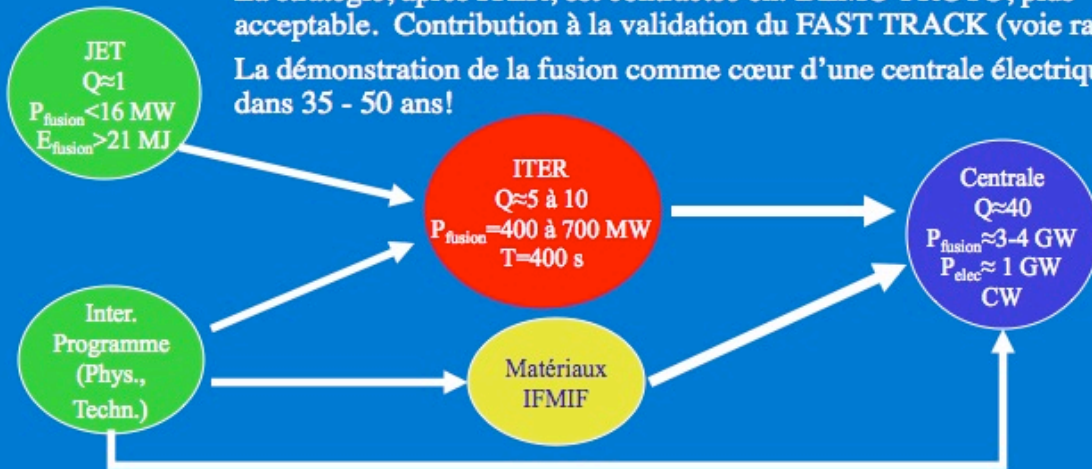
Energie: deux réacteurs nucléaires,
Long. totale: 332.85 m. **Larg. du pont:** 76.8 m.
Avions: 85
Equipage: bateau: 3200, aviation: 2480
Coût: env. 4.5 Mia \$
(USA: 20 navires de ce type)

3-oct-11

24

Conclusion: ITER & IFMIF, des étapes nécessaires

La stratégie, après ITER, est contractée en: DEMO-PROTO, plus acceptable. Contribution à la validation du FAST TRACK (voie rapide)
La démonstration de la fusion comme cœur d'une centrale électrique dans 35 - 50 ans!



L'avenir de cette voie passe par la recherche. Il faut penser aux futures générations et leur laisser le choix décisionnel de l'énergie et de la forme qu'ils adopteront . Pour cela, après avoir contribué à l'appauvrissement de nos ressources fossiles, c'est un devoir d'offrir à celles-ci des solutions alternatives. La fusion en est une! C'est une voie prometteuse en accord avec le développement durable!

3-oct-11

25

Voir les sites internet :

<https://crppwww.epfl.ch/>

<http://www.iter.org/>

<http://www.itercad.org/>

<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/>

<http://fusionforenergy.europa.eu/>

http://ec.europa.eu/research/leaflets/fusion/page_88_fr.html

Auteur : Pierre J. Paris

e-mail : pjjparis@sfr.fr