



# **La question des Risques et des Conséquences des Disruptions dans les Grands Tokamaks**

**G. A Wurden**

**Los Alamos National Laboratory**

**Colloque “Perspectives en Fusion Magnétique dans les années ITER”**

**9 Septembre 2011, Princeton, PPPL**

**Traduction française J-P. Petit**

[http://advprojects.pppl.gov/ROADMAPPING/presentations/MFE\\_POSTERS/WURDEN\\_Disruption\\_RiskPOSTER.pdf](http://advprojects.pppl.gov/ROADMAPPING/presentations/MFE_POSTERS/WURDEN_Disruption_RiskPOSTER.pdf)

Original English version :

[http://advprojects.pppl.gov/ROADMAPPING/presentations/MFE\\_POSTERS/WURDEN\\_Disruption\\_RiskPOSTER.pdf](http://advprojects.pppl.gov/ROADMAPPING/presentations/MFE_POSTERS/WURDEN_Disruption_RiskPOSTER.pdf)

# La question des Risques et des Conséquences des Disruptions dans les Grands Tokamaks

---

## RESUME :

G. A. WURDEN, Los Alamos National Laboratory – ITER (et un jour DEMO) sont censés devoir travailler en étant soumis à de multiples contraintes physiques et d'engineering. En outre, ces machines devront gérer beaucoup de contraintes simultanément. Un des problèmes les plus sérieux auquel les grands tokamaks devront faire face est d'assurer le contrôle d'un plasma contenant des centaines de megajoules d'énergie, susceptibles d'être rapidement restitués lors d'une disruption, que la machine fonctionne en burning plasma, ou selon des conditions physiques moins extrêmes. Le nombre de disruptions majeures que le blindage d'un grand tokamak peut supporter est très restreint en raison des contraintes antagonistes liées d'une part à la nécessité d'évacuer rapidement un fort flux de chaleur en régime permanent, et d'autre part de résister à des événements transitoires violents. Si les machines ne parviennent pas à résister aux faisceaux d'électrons découplés correspondant à des intensités de plusieurs millions d'ampères (créés par effet d'avalanche lors d'une disruption), celles-ci ne pourront pas remplir la mission qui leur a été assignée, qu'il s'agisse de recherche fondamentale ou de production d'énergie. L'effort prioritaire le plus absolu doit se concentrer sur l'évitement, le contrôle et l'atténuation des disruptions. On doit établir ce plan d'attaque maintenant, avant que la machine ITER ne soit mise en œuvre. Ceci s'impose dans une optique d'une gestion prudente des risques, dans le cadre d'un programme sur l'Energie de Fusion Magnétique (MFE, Magnetic Fusion Energy), pris en charge aux USA par le Département de l'Energie (DOE) dans le cadre du contrat DE-AC52-06-NA25396.

# Grandes Lignes

---

- Les paramètres des tokamaks
- La question de l'énergie
- La statistique des disruptions
- Les électrons découplés : le modèle de Dreicer et l'avalanche électronique
- Dommages dus aux électrons découplés, dans des machines comme Tore Supra, JET, Alcator, C-Mod, TFTR
- Une vidéo ultra-rapide de la désintégration de tuiles par les électrons découplés
- Types de disruptions, causes
- Eviter, supprimer, atténuer leurs effets
- Comment atténuer ces effets ? Injection massive de gaz ? Perturbations magnétiques ? .... ?
- Qu'est-ce qui doit être fait dans les 10-15 années à venir, avant qu'ITER ne devienne opérationnel

# Quel est LE problème central de la génération d'énergie par fusion à confinement magnétique?

---

**De nombreux problèmes se posent : mais créer le plasma n'est pas l'un d'entre eux.**

**Nous ne savons pas contrôler parfaitement cette fusion. (par opposition à la fission: une affaire facilement réglée)**

- 1) Nous ne disposons pas de matériaux capables de résister à l'action du plasma avec lequel ils sont en contact, ni supporter le bombardement par les neutrons.
- 2) Nous ne disposons pas de suffisamment de tritium (lequel n'est pas encore produit par une couverture tritigène).
- 3) Les machines qui doivent assurer ce fonctionnement via la fusion nucléaire sont complexes et difficiles à entretenir.
- 4) Nous ne sommes pas encore capables de simuler leur fonctionnement, même en utilisant les ordinateurs les plus puissants et les plus rapides du monde.

**LE problème par excellence est que le plasma est très difficile à contrôler.  
Toute perte de contrôle peut créer des dommages importants.**

# La quantité d'énergie contenue dans le plasma reste une menace ! (Dommages)

- On a réalisé des essais avec des tokamaks qui contenaient des plasmas avec de l'ordre de 10 mégajoules d'énergie cinétique.
- Parmi tous les tirs qu'on a effectués, on n'a jamais dépassé le niveau d'un mégajoule d'énergie, bien qu'on ait déjà mis en évidence des restitutions d'énergie atteignant 1 gigajoule sur de longues périodes de temps.

| Machine    | Stored Energy | Pulse Length | Current  | Cooling  | Aux Heating | Plasma Volume           |
|------------|---------------|--------------|----------|----------|-------------|-------------------------|
| DIII-D     | 3.5 MJ        | 6 sec        | 2-3 MA   | inertial | 25 MW       | 21 m <sup>3</sup>       |
| TFTR       | 7 MJ          | 5 sec        | 3 MA     | inertial | 40 MW       | 30 m <sup>3</sup>       |
| JT-60U     | 10.9 MJ       | 20-60 sec    | 3-5 MA   | inertial | 50 MW       | 90 m <sup>3</sup>       |
| JET        | 10 MJ         | 10-30 sec    | 3-7 MA   | inertial | 20-40 MW    | 95 m <sup>3</sup>       |
| Tore Supra | 0.3-1 MJ      | 400 sec      | 1.7 MA   | water    | 3-9 MW      | 20 m <sup>3</sup>       |
| ITER       | 200-450 MJ    | 300-3000 sec | 15-17 MA | water    | 70-100 MW   | 837 m <sup>3</sup>      |
| DEMO       | 600 MJ        | steady       | 10-20 MA | helium   | 100 MW      | 500-1500 m <sup>3</sup> |

# De quelles quantités d'énergie parlons-nous ?

L'énergie des électrons découplés peut atteindre 60 mégajoules. Compter 400 mégajoules d'énergie dans le quench thermique. Plus 600 mégajoules d'énergie magnétique, associée au champ poloïdal

Avec 600 MJ on peut fondre une tonne de cuivre



7 bâtons de TNT  
représentent 15 MJ



Un Airbus 380 filant à 700 km/h : 10 GJ



Le catapultage d'un Tomcat : 100 MJ



Le cuivre fond à 1356° K

La chaleur spécifique du cuivre est de 385 Jkg-1K-1

La chaleur latente de fusion : l'énergie requise pour amener un solide à l'état liquide, à la même température (de fusion) est de 205.000 Jkg-1

UNCLASSIFIED

# Les “Quatre Cavaliers de L’Apocalypse” des disruptions majeures ?

Un grand tokamak doit toujours être en état de faire face à une telle menace

- Fortes contraintes, d’origine électromagnétique, sur les composants de l’enceinte
- Rayonnement intense émis par le plasma et reçu par les tuiles du revêtement
- Intense apport de chaleur, par convection du plasma
- Grand échauffement des tuiles du revêtement, lié à l’action des électrons découplés, au voisinage du point d’impact de ce faisceau d’électrons





# Les conséquences sur un grand tokamak des disruptions non contrôlées ? (beaucoup d'énergie au mauvais endroit)

---

Dans les expériences mettant en jeu de l'hydrogène ou du deutérium :

- Mise hors service d'éléments de la machine due à l'endommagement du blindage (points chauds dus à la déformation des tuiles du revêtement).
- Diminution de la durée de vie du blindage, allant jusqu'à la rupture totale de celui-ci (impliquant une fuite du liquide assurant le refroidissement de l'enceinte). Surpressions possibles liées au déversement du liquide de refroidissement sur les tuiles du revêtement, entraînant le déclenchement des éléments de sécurité (éclatement des disques, réservoirs de drainage de 460 m<sup>3</sup>)  
Mise hors-service de longue durée (2 mois minimum), pour remise en état.

Dans le cas où on utilise du tritium :

- Envahissement par de l'eau tritiée, due au mélange de l'eau avec le tritium issu des tirs précédents. A ajouter aux effets ci-dessus.
- Enfin, des impératifs de sécurité pourraient interdire l'introduction de tritium dans l'expérience, à cause de la probabilité de fuites d'eau.

## Quel est le moindre de ces maux ?

---

Supposons que vous puissiez atténuer la décroissance de l'énergie du plasma pendant le quench thermique, lors d'une disruption majeure, en vous débrouillant pour que cette énergie soit dissipée radiativement de façon isotrope, de manière à éviter des fusions locales des matériaux... vous n'avez aucune assurance d'échapper aux :

- **Forces électromagnétiques, qui tendront à arracher les composants de la structure, ceci étant dû à un effondrement trop rapide du courant de plasma?**

**OU**

- **Décharge d'électrons découplés, avec une intensité proche de celle du courant de plasma, qui agiront comme une torche thermique perforante, quel que soit l'endroit touché?**

**Table 5.** Disruption and disruption consequences for JET, ITER and ITER-EDA.

| Parameter   | JET   | ITER  | ITER-EDA | Basis or comment                                 |
|---|-------|-------|----------|--|
| $R$ (m)   | 2.9   | 6.2   | 8.14     | Major radius                                     |
| $a$ (m)   | 0.95  | 2.0   | 2.8      | Minor radius                                     |
| $\kappa_{95}$   | 1.6   | 1.7   | 1.6      | Vertical elongation                              |
| $V$ (m <sup>3</sup> )                                 | 86    | 831   | 2000     | Plasma volume                                    |
| $S$ (m <sup>2</sup> )                                 | 145   | 683   | 1200     | Plasma surface area                              |
| $B_T$ (T)   | 3.45  | 5.35  | 5.68     | Toroidal field                                   |
| $I_p$ (MA)  | 4.0   | 15    | 21       | Plasma current                                   |
| $q_{95}$  | 3.0   | 3.0   | 3.0      | Edge safety factor                               |
| $W_{mag}$ (MJ)  | ~11   | 395   | 1100     | Poloidal field energy inside separatrix          |
| $W_{th}$ (MJ)   | ~12   | 353   | 1070     | $\beta_N = 2$ , with 'ITER-like' $p(r)$ profiles |
| <i>Magnetic and current quench related attributes</i> |       |       |          |  |
| $\langle B_p \rangle$ (T)                             | 0.60  | 1.07  | 1.13     | Average poloidal field                           |
| $\langle B_p \rangle^2 / 2\mu_0$ (MPa)                | 0.143 | 0.454 | 0.507    | Torus vacuum vessel magnetic pressure            |
| $t_{CQ}$ (ms)   | 9.4   | 35.6  | 65.7     | Minimum current quench duration                  |
| $B_T * dB_p/dt$ (T <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )     | 220   | 161   | 98       | Relative force due to induced eddy currents      |

### Coefficient d'amplification de l'effet des électrons découplés par effet d'avalanche

|  |                      |                      |                       |  |
|--|----------------------|----------------------|-----------------------|--|
| <i>Thermal quench and divertor energy loading attributes</i> |                      |                      |                       |  |
| $A_{div}$ (m <sup>2</sup> )                                  | ~1.6                 | ~3.5                 | ~4.6                  | Effective divertor target area, for H-mode                             |
| $U_{TQ} = W_{th}/A_{div}$ (MJ m <sup>-2</sup> )              | 1.07                 | 14.1                 | 33                    | For 7-x SOL expansion during disruption TQ                             |
| $t_{TQ}$ (ms)  | 0.32                 | 0.70                 | 1.0                   | $A_{div}$ per figure 54 of [1]   |
| $U_{TQ}/t_{TQ}^{(0.5)}$ (MJ m <sup>-2</sup> )                | 60                   | 530                  | 1040                  | C or W vapour/melt onset at 40-60 MJ m <sup>-2</sup> s <sup>-0.5</sup> |
| <i>Runaway electron conversion and mitigation attributes</i> |                      |                      |                       |  |
| $E_{int}$ (V m <sup>-1</sup> )                               | 38.3                 | 38                   | 28.8                  | In-plasma $E'$ -field  |
| $n_{c,RE}$ (m <sup>-3</sup> )                                | $4.2 \times 10^{22}$ | $4.2 \times 10^{22}$ | $3.2 \times 10^{22}$  | $n_c$ to suppress avalanche growth                                     |
| $G_{avalanche}$  | $2.2 \times 10^6$    | $1.9 \times 10^{16}$ | $6 \times 10^{22}$    | Coulomb avalanche gain = $\exp[2.5 \times I \text{ (MA)}]$             |
| $I_{RA, seed}$ (A)   | 90                   | $4 \times 10^{-10}$  | $1.8 \times 10^{-16}$ | Seed current for $I_{RA} = 0.5I_p$                                     |

# Concentrons-nous sur la plus grande menace: Les électrons découplés des grands tokamaks

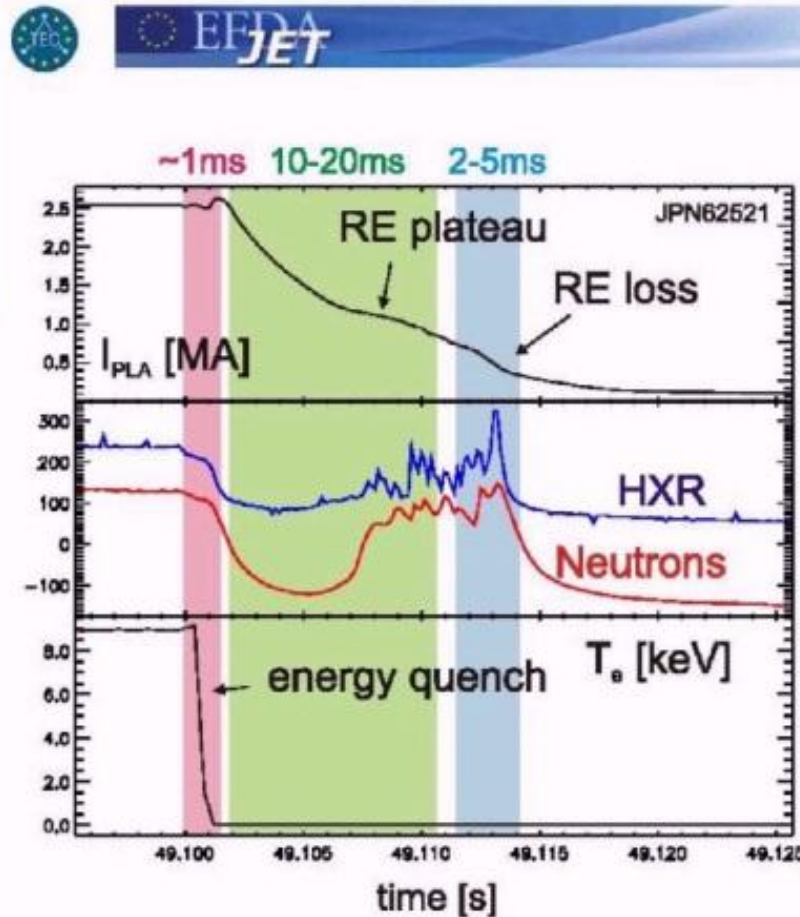
---

- « Le facteur d'amplification exponentielle associé au mécanisme d'avalanche électronique est proportionnel à l'intensité du courant du plasma et pourrait atteindre 40 dans ITER, sous 15 millions d'ampères. Ceci est suffisant pour que le plasma puisse transférer une part importante (jusqu'à 80 %) de son courant aux électrons découplés. Ceci contrastant avec ce qu'on observe dans les expériences actuelles dans les petits tokamaks, où cet effet reste modéré. »
- « Un fonctionnement exempt de toute disruption est un préalable obligatoire pour une machine comme DEMO et pour les futurs tokamaks de puissance. Pour ITER cela reste un problème important, et il est indispensable de faire la démonstration de l'efficacité des méthodes d'atténuation à la fois pour cette machine et pour DEMO. »

Référence : Progress in ITER Physics Basis, Nucl Fusion 2007, Chapter 9  
Mukhovatov et al. "*ITER contributions for DEMO*".

- Des Faisceaux d'électrons découplés, dotés d'énergies allant de 10 à 20 MeV, avec une intensité de plusieurs millions d'ampères ne seraient simplement pas tolérables, et perforeront probablement catastrophiquement le fin revêtement de la paroi dès la première occurrence du phénomène.

# Données de disruption du JET



runaway generation in  
 a JET disruption

power load during disruptions

- 1) loss of thermal energy  
 to divertor/main chamber  
 (impurity influx)
- 2) loss of magnetic energy  
 by radiation  
 (RE generation)
- 3) runaway loss to PFCs

# Comparaison des disruptions, actuelles et pour ITER

## “Des décharges d’électrons découplés sont attendues dans toutes les disruptions d’ITER”\*

M. Lehnen, et al, FZJ, Conférence 2008 PSI & discours du vendredi

\*(non maîtrisées)



|                                 | Present day devices                                  | ITER                                 |
|---------------------------------|--|--------------------------------------|
| <i>source</i>                   | Dreicer mechanism<br>( $F_{\text{friction}} < eE$ )* | Compton scattering,<br>tritium decay |
| <i>avalanche multiplication</i> | $5 \times 10^5$ (JET 4MA)                            | $10^{21}$ - $10^{22}$                |
| <i>runaway current</i>          | 1-2 MA   | 9 MA                                 |
| <i>runaway energy</i>           | > 25 MeV   | 10-20 MeV                            |
| <i>power to PFCs</i>            | < 1 GW   | 5-10 GW                              |

power load during thermal quench: ~ 1-15 GW/m<sup>2</sup>

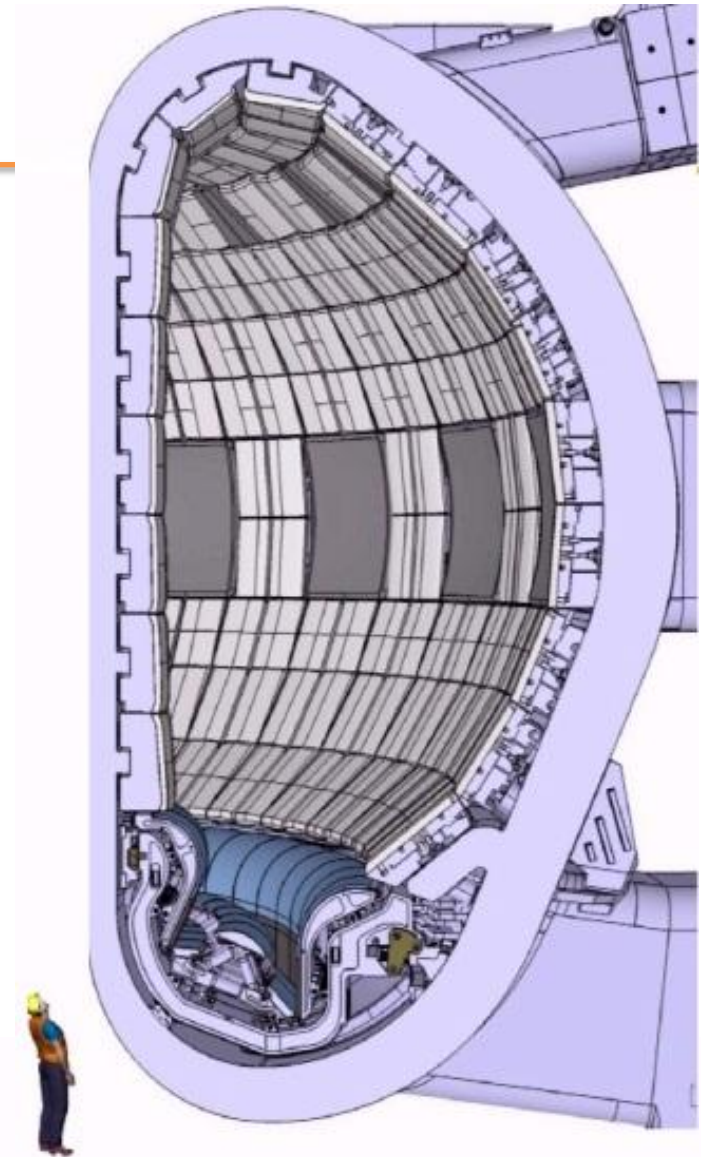
wetted area for runaways ?  
penetration into PFC (depends on angle of incidence) ?

# Analysons de plus près comment arrêter l'énergie des électrons découplés

- Les électrons rapides vont pénétrer le blindage à différente profondeur, selon leur énergie initiale
- Actuellement la majorité des parois d'ITER est prévue avec 8mm de Beryllium et sur 5 mm de CuCrZr, pour protéger les canaux de refroidissement à eau.
- Ralentissement des électrons à 10 MeV
  - Matériau      Densité      CSDA      Profondeur de pénétration
  - Be              1.85 g/cm<sup>3</sup>    6.3 g/cm<sup>2</sup>              3.4cm
  - C                1.7 g/cm<sup>3</sup>    5.66 g/cm<sup>2</sup>             3.3cm
  - Cu              8.96 g/cm<sup>3</sup>    6.16 g/cm<sup>2</sup>             0.7cm
  - W               19.3 g/cm<sup>3</sup>    6.2 g/cm<sup>2</sup>              0.3cm
- Quand des flux de millions d'ampères d'électrons découplés sont produits dans une seule disruption dans ITER, vous obtenez en fait une énorme torche thermique qui va finalement rencontrer la paroi.

# ITER sera-t-il le dernier Tokamak à être construit ?

- Oui ... si la vraie mission d'ITER n'est pas atteinte!
- L'objectif poursuivi avec ITER est d'étudier un mélange Deutérium-Tritium en régime de fusion auto entretenue, avec un coefficient  $Q \sim 10$ .
- En réalité la mission d'ITER est toute autre. Si celle-ci n'est pas remplie, la machine ne pourra jamais obtenir une fusion auto-entretenue.
- **La vraie mission d'ITER est d'étudier (avec succès) le contrôle du plasma, et les interactions plasma-paroi, avec des courants toroïdaux de l'ordre de 10 – 15 MA et un stockage d'énergie atteignant de 100 à 400 MJ, dans des expériences de longue durée.**
- Cette mission devra être réalisée dans de l'hydrogène, puis du deutérium, sinon l'emploi du tritium ne pourra jamais être envisagé (ou requis), dans la machine ITER.



Coupe de ITER avec son blindage



# Principales différences entre les tokamaks d'aujourd'hui et ITER:

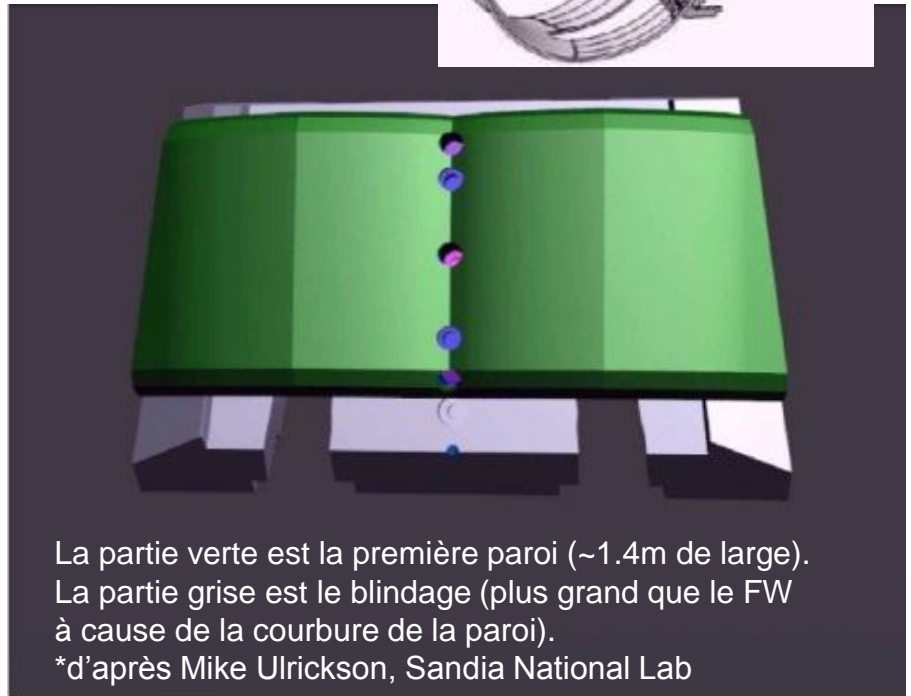
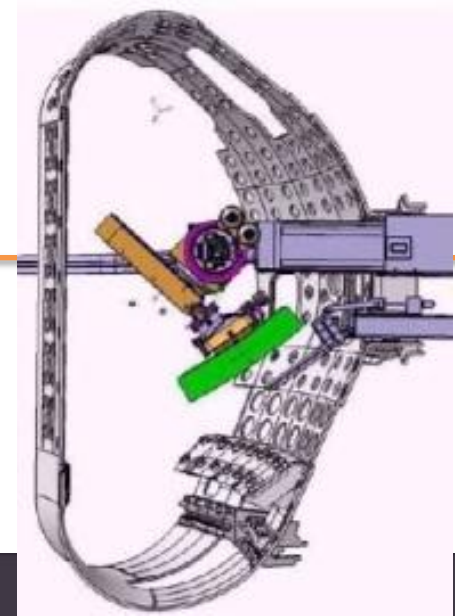
**Le besoin de résister à des grandes pertes d'énergie accumulée tout en fonctionnant avec des impulsions de longue durée**

---

- Les tuiles ont une mission contradictoire: Permettre d'évacuer de grandes quantités d'énergie sur de longues périodes tout en résistant à des événements soudains et anormaux.
- Pour le premier besoin, il faut des grandes surfaces rapidement refroidies... dans ITER l'eau est seulement 1cm sous la surface. Pour le second besoin il faudrait un blindage ablatif épais.
- Le document de conception 2004-2007 d'Iter (DDD16) spécifie pour la première couche de blindage (section 2.4), que sur 10mm de blindage de Be, 2mm fondra sous l'action de flux d'électrons découplés de 50MJ/m<sup>2</sup>, avec une distribution exponentielle d'énergie de 12.5MeV, et une température maxi (526°C) à la jonction collée entre le Cu/Cr/Zr et le radiateur.
- DDD16 suppose que le blindage résistera à 5 à 15 de ces événements "rares", hypothèse basée sur la "distribution statistique de l'emplacement des impacts à la surface de la chambre".
- Le problème est qu'il est possible qu'il y ait dans les disruptions plus d'énergie dans une plus courte période que dans l'hypothèse retenue, à cause des forces contre-électromotrices dues au déclin des courants d'avalanche.

# Dernier design de tuile et de blindage\*

- La première paroi d'ITER (FW) est faite de 440 modules en deux parties.
- L'avant est constitué de formes complexes, pour réduire l'exposition des angles.
- La pièce frontale pèse entre 800 et 1000 lb, et chacune dispose de 2 connections d'eau.
- Le bras robot changera les pièces.
- En enlevant un écrou, et coupant un couvercle on peut accéder aux tuyaux d'eau, qui devront être coupés.
- Il y a 18 sortes principales de blindage, 42 variantes principales et 100 autres variations secondaires.
- Le temps de remplacement minimum estimé d'un seul segment (en supposant qu'il soit disponible) est de 2 mois en supposant que la plaque arrière n'est pas endommagée (ITER SRD-16-BS).
- Ceci ne prend pas en compte le temps nécessaire pour trouver la fuite d'eau.



La partie verte est la première paroi (~1.4m de large).  
La partie grise est le blindage (plus grand que le FW  
à cause de la courbure de la paroi).

\*d'après Mike Ulrickson, Sandia National Lab

# Que se passe-t-il quand on met trop d'énergie dans un matériau trop rapidement?

## Ou dans deux matériaux différents collés entre eux?

- Au-delà du point de fusion / ébullition, et plus vite qu'il ne peut refroidir par rayonnement / convection?
- Réponse : " Il explose ".
- Sur TFTR une disruption majeure sonait comme une petite explosion de bombe ...pour une bonne raison.
- Les tuiles de TFTR ont-elles jamais "explosé"? .....en fait oui.



1 Kg d'explosif HE,  
Vidéo General Fusion

Rappelez-vous de l'énergie équivalent-TNT\*

|                  |              |
|------------------|--------------|
| 1MJ (TFTR)       | 0.217 Kg TNT |
| 2MJ (Tore Jelly) | 0.434 Kg TNT |
| 1 GJ (ITER)      | 217 Kg TNT   |

\* Dans une bombe, l'énergie est libérée en 100  $\mu$ s; heureusement dans ITER l'énergie thermique est libérée 10 à 30 fois moins vite.



Une bombe de 500lb  
contient environ  
150 Kg de TNT

# “Analyse statistique des disruptions du JET”

P.C. de Vries, M.F. Johnson, I. Segui et collaborateurs de JET EFDA,  
Nuc. Fusion 49 (2009) 055011

“La question est de déterminer quels facteurs déterminent le taux de disruptions et la disruptivité des plasmas de tokamaks. Ici le taux de disruption est défini comme un pourcentage de chocs qui donnent lieu à disruption alors que la disruptivité est la probabilité d’un choc dans un tokamak dans un état spécifique.”

Dans une récente publication sur JET, “Analyse des causes de disruption sur JET” P.C. de Vries, M.F. Johnson et al, Nuclear Fusion 51 53018 (2011), “Le développement de scénarios opérationnels plus robustes a réduit le taux de disruptions du JET dans la dernière décennie d’environ 15% à moins de 4%.

Une fraction de toutes les disruptions a été causée par des événements rapides, imprévisibles, sans événement précurseur. La survenue de ces disruptions pourrait établir une limite inférieure de 0.4% au taux de disruptions du JET.

Si on considère de plus l’erreur humaine et toutes causes imprévisibles de défaillance de systèmes de chauffage ou de contrôle cette limite inférieure pourrait monter respectivement à 1.0% ou 1.6% \*

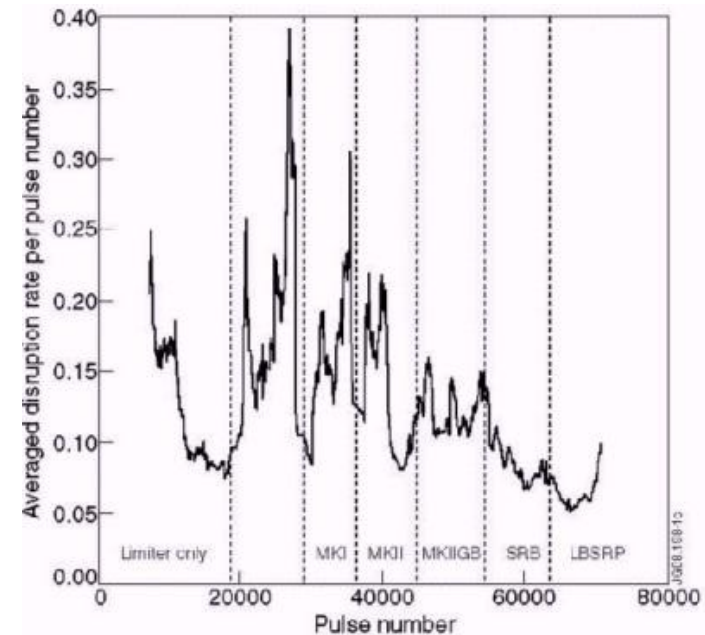


Figure 1 : La moyenne mobile du taux de disruptions sur 2000 impulsions en fonction du numéro du tir. Les lignes verticales pointillées montrent le début des phases de fonctionnement X-point et les diverses phases du divertor du JET, selon la table 1 (a).

# Statistiques des disruptions

- **Même après des années de fonctionnement :**
  - ~10% des chocs sur TFTR ont conduit à une disruption
- **La plupart ont eu lieu suite à un chauffage auxiliaire**
- **Plus grande disruption dans TFTR :**
  - Energie stockée dans le plasma 7 MJ

## Statistics for Discharges During TFTR DT Run

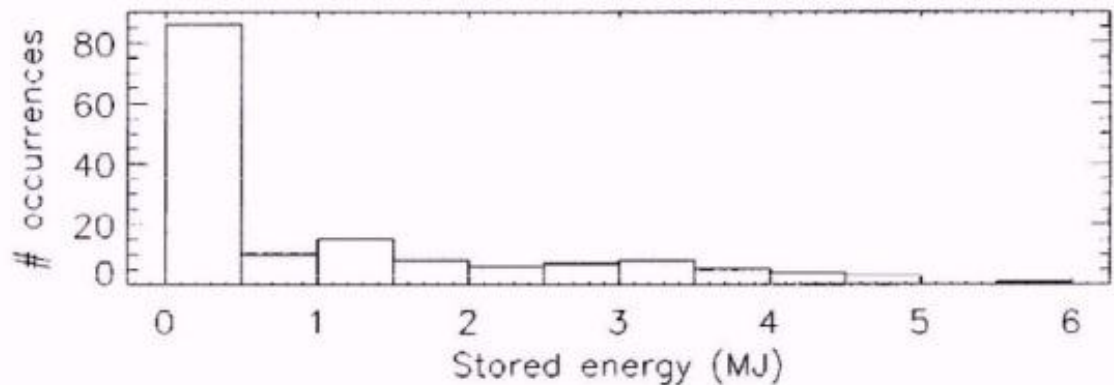
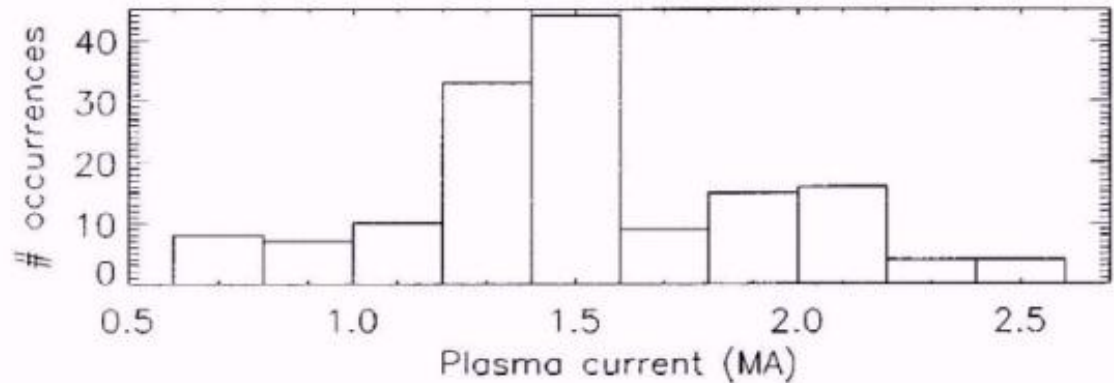
From shot 70236 – 79966:

|   |      |
|---|------|
| Total Shot Numbers                          | 9731 |
| Shots in OPERLOG                            | 8466 |
| “Undocumented Test Shots”                   | 1265 |
| Documented Test Shots                       | 201  |
| Total Test Shots                            | 1469 |
| Aborts                                      | 436  |
| Plasma Attempts                             | 7826 |
| Explicit “Fizzles”                          | 294  |
| Shots with no data                          | 14   |
| Shots with $I_p < 100$ kA                   | 163  |
| Shots with $100 \text{ kA} < I_p < 180$ kA  | 367  |
| Total “Fizzles”                             | 838  |
| Good Plasma Attempts                        | 6988 |
| Shots with NBI                              | 2788 |
| Shots with ICRF                             | 1571 |
| Shots with both                             | 638  |
| Shots with Auxiliary Heating                | 3721 |
| Shots in TASKLOG                            | 6155 |
| Good Shots with DISRUPTION*                 | 1520 |
| “DISRUPT”ions in TASKLOG on plasma attempts | 272  |
| OPERLOG DISRUPTIONs on good plasma attempts | 218  |
| “DISRUPT”ions in TASKLOG                    | 86   |
| DISRUPTION before aux power                 | 28   |
| DISRUPTION after aux but within 0.8 second  | 29   |
| Tail-end disruptions after aux power        | 725  |
| AuxHeated shots with DISRUPTION             | 782  |

\*Many of these may be misidentified from plasma current bump due to pellet injection.

# Une année de disruptions dans TFTR (1996)

- 153 disruptions
- Total de 166 MJ d'énergie cinétique perdue
- Les disruptions de faible énergie étaient soit au démarrage soit à la fin
- Moins d'énergie qu'un seul choc sur ITER

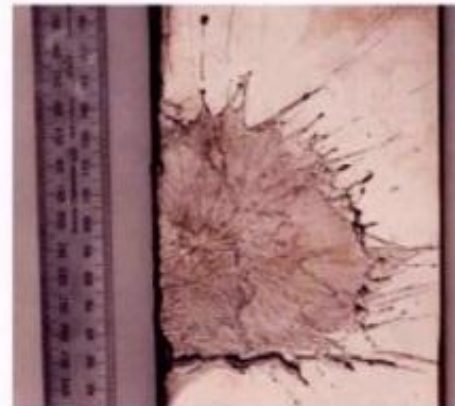


# Dommages dans les machines actuelles



runaway impact on the outboard limiter of Tore Supra

melting of inner-side bumper at JET



G. Martin, IAEA2004

Michael Lehnen | Institute of Energy Research - Plasma Physics | Association EURATOM - FZJ

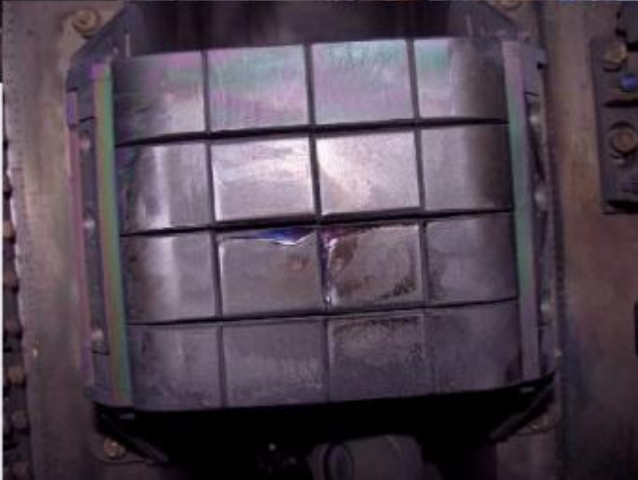
# Inspection interne de l'Alcator Mod-C en juin 2008

## Fusions locales très certainement dues à des disruptions



Fusions sur les bords supérieurs

Harnais de diagnostic brûlé / fondu par des électrons découplés

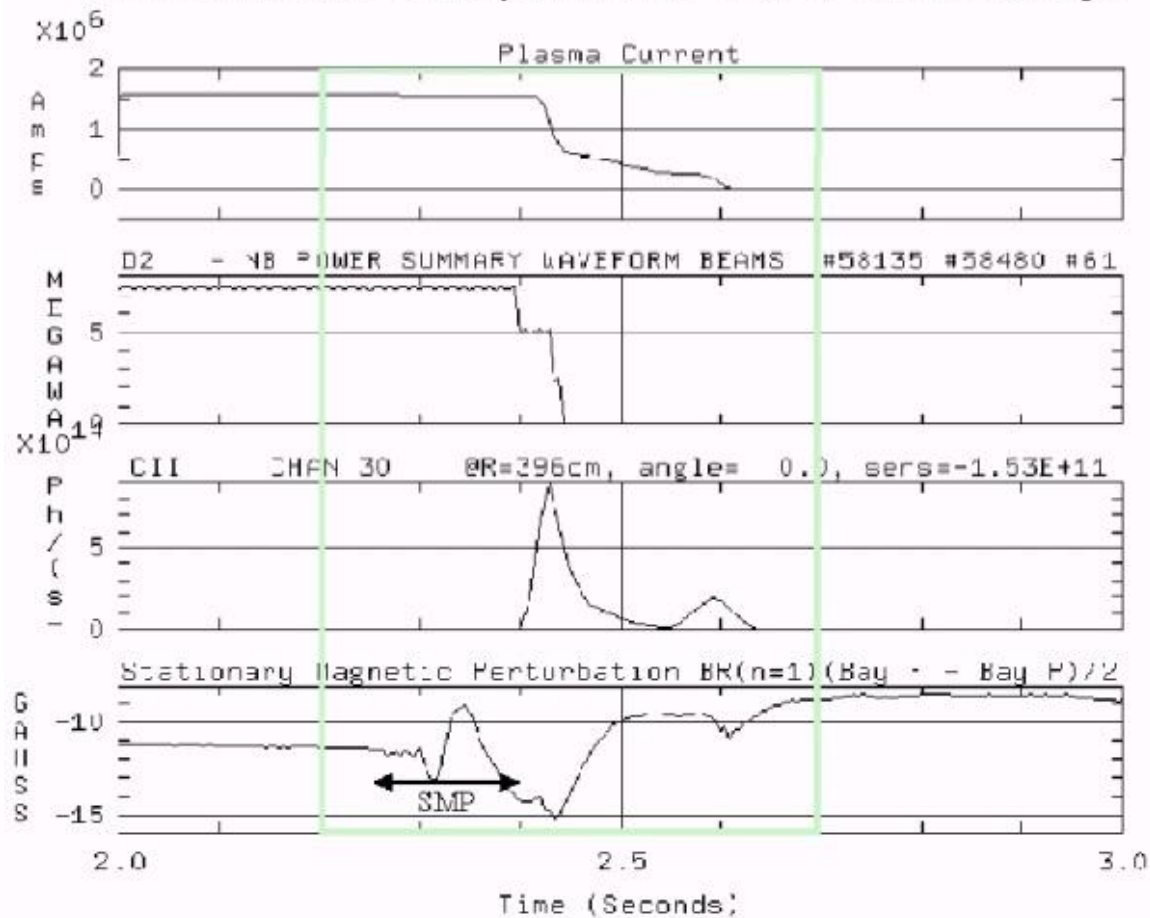


UNCLASSIFIED



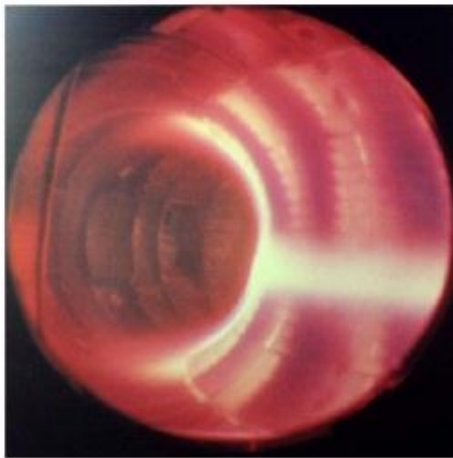
# TFTR formes d'ondes de l'essai 103681

Locked Mode Disruption with 300 kA of runaways



# Des disruptions de 1.6MA ont donné des faisceaux d'électrons découplés de 300kA-700kA sur TFTR

- TFTR avait des tuiles de blindage refroidies naturellement par inertie. Quand elles ont été atteintes par des faisceaux d'énergie découplés issus de disruptions multi-méga-ampères, elles se sont simplement désintégrées.
- Les conséquences sur les opérations ont été faibles... une journée de nettoyage et de reconditionnement avant de recommencer les essais.
- Contrairement à ITER, TFTR n'avait pas de circulation d'eau de refroidissement à l'intérieur de ses tuiles.



- Video, choc103681
- Disruption à 2.42 secondes dues au mode couplé. Décharge de 1.6 MA, avec 7.5 MW NBI. 300 kA de faisceaux d'électrons découplés.
- 2000 image/s à 30µsec exposition
- Protections d'antennes RF chauffage ionique extérieures dans le plan équatorial détruites.

# Contrôle des disruptions

---

- **Les disruptions sont généralement classées par type:**
  - Limite de densité
  - Faible-q
  - Mode résonnant
  - Invasion d'impuretés
  - Défauts techniques
  - Limite de beta (spécialement haut  $\beta$ -poloïdal)
  - Mystère (~20% des disruptions du JET en 1991 ou 1.4% en 2011)
- **Certaines disruptions (haut  $\beta$ p et mystère) n'ont pas de précurseur indentifiable**
- **Trois “solutions”:** évitement passif et protection (à la conception), détection des précurseurs et action préventive, et finalement ...atténuation des dégâts.

# “Disruptions dans les Tokamaks”, F. C. Schueller, Plasma Phys. Control. Fusion 37 A135 (1995). Présentation du workshop sur les disruptions et VDE d’ITER, Garching, 13-17 mars 1995.

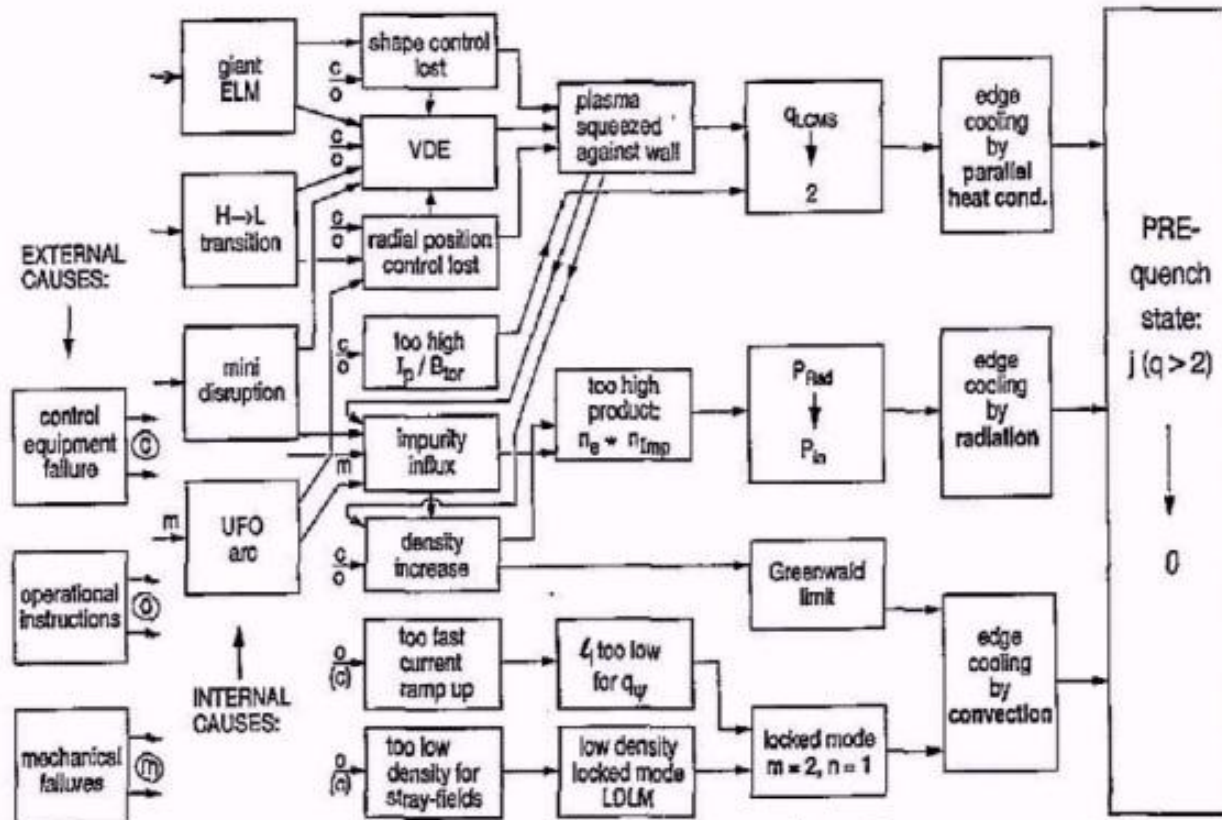


Figure 12: Tableau des causes possibles d’évènements conduisant à un état pré-quench avec front déficient et de leurs scénarios précurseurs.

# Il est essentiel de résoudre le problème des disruptions des Tokamaks

---

- Nous devons insister sur un examen prioritaire du problème des disruptions:
- Dans les 15 dernières années de recherche, de combien avons-nous réduit la probabilité de disruptions dans les Tokamaks? D'un facteur 3?
- Dans les 15 prochaines années nous allons devoir essentiellement éliminer les disruptions à travers le développement de techniques d'évitement? Quelle est la probabilité de succès à 99.9%? Est-ce suffisant?
- On a tendance à regarder séparément les différentes parties de ce problème ... par exemple éviter les disruptions VDE par la détection (relativement facile, comme elles sont lentes) suivie par une injection massive de gaz pour réduire les courants de halo et le rayonnement par quench thermique. Ok, mais ceci peut alors générer des disruptions (?), et impose une forte charge sur les panneaux cryo-réfrigérés. La même procédure marche-t-elle pour les disruptions à haut beta-poloïdal ... probablement non ... pas de précurseurs ou trop rapides. Et pour les chutes de particules (disruptions inattendues de baisse de densité sous la limite)? Comment fonctionnera exactement la phase d'apprentissage du réseau neuronal de contrôle d'ITER? Ce n'est pas évident.
- **Nous devons démontrer un contrôle effectif des plasmas à haute énergie des tokamaks avant ITER**
- **Un programme intégré de contrôle des disruptions, multi-machine, centré sur la compréhension et l'ingénierie, sur à la fois la prévention (évitement actif et contrôles) et l'atténuation des conséquences des disruptions, doit être engagé.**
- **Nous pouvons utiliser les machines existantes, pour la création de bases de données et de techniques de contrôle, et des nouvelles machines pour des démonstrations d'impulsions longues.**

# Comment prévenir / atténuer les disruptions?

- Il n'y a actuellement que deux méthodes:
  - 1) Prévenir leur formation par l'augmentation du quench thermique post-disruption d'un facteur 100
  - 2) Augmenter massivement leurs pertes ... par des perturbations magnétiques
- Pour l'instant la densité limite n'a pas été atteinte dans les tokamaks actuels. L'injection massive de gaz, de pellets tueurs, de débris, de poussières, etc. Leurs effets sur les systèmes de pompage et de conditionnement d'environnement d'ITER reste à étudier. Par ailleurs si le courant de quench induit est trop élevé, les forces électromagnétiques seront trop élevées.
- Les perturbations magnétiques ( $\sim 10^{-3} \delta B/B$  de champ stochastique des bords) ne seront peut-être pas suffisants pour atteindre le cœur, où elles sont le plus nécessaires. Et encore plus si le canal de courant s'éloigne des bobines ELM internes.



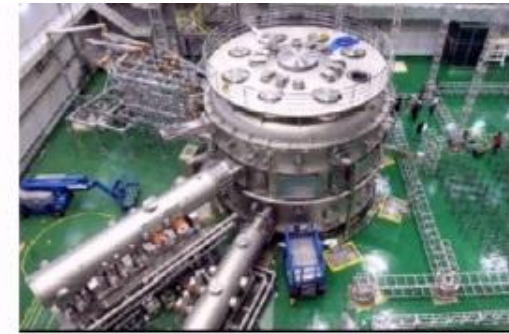
Sergei Putvinski (à gauche) et le physicien de la fusion François Saint-Laurent (IRFM) ne manipulent pas une mitrailleuse Gatling. Ils sont devant un prototype de système d'atténuation des disruptions. Ce système de canon à cartouche effectuera ses premiers tests dans Tore Supra\*.  
\*ITER Newslines #176, Mai 2011

# L'atténuation a aussi des effets sérieux sur le régime de fonctionnement

- **Garder le ratio  $E_{||}/E_{crit}$  de champ électrique accélérateur  $<1$ , en augmentant massivement (x100) la densité d'électrons (liés ou libres) pour prévenir la formation des disruptions**
  - Impact sur les systèmes de pompage
  - Impact sur le conditionnement NBI (les vannes ne peuvent être fermées assez rapidement)
  - Impact sur les systèmes de recyclage (séparation des gaz)
  - Impact sur les systèmes de paroi (s'il y en a)
  - Impact sur  $di/dt$  ... plus les quench de courants sont rapides, plus fortes les forces EM
- **Dissiper l'énergie thermique du quench plus uniformément, par rayonnement en introduisant des bouffées de gaz à plusieurs (nombreux?) endroits.**
  - Cela cause-t-il encore plus de disruptions?
  - Un flash géant de 1-10eV peut encore causer l'ablation du blindage. De combien?
- **Essayer de faire "atterrir" la disruption à des endroits précis peut être plus efficace ... par exemple sur le blindage du pilier central.**
  - Est-ce possible, à chaque fois? Est-ce plausible? Le temps de réponse des bobines supraconductrices et l'épaisseur de la paroi posent problème. Seuls les bobines internes pourraient être mises à contribution.
- **Injecter massivement des gaz pour améliorer la diffusion des électrons découplés sur une plus grande région de la paroi (expériences de Tore Supra).**

# Augmentons massivement le temps d'étude des disruptions dans les machines actuelles

- Etudier la turbulence et le transport, c'est bien ...mais 20% d'amélioration dans ce domaine ne remettront pas en cause l'existence d'ITER.
- Mais trouver un moyen de démontrer le contrôle des disruptions et des électrons découplés nous permettra d'empêcher ITER de s'autodétruire.





# Quel est le meilleur endroit pour étudier les disruptions des tokamaks ... pas ITER!

---

- Sur JET, avec sa nouvelle paroi “ITER-like”, où les opérations seront menées à court-terme avec de grandes précautions, pour éviter des dommages inutiles. L'étude systématique des disruptions y est improbable.
- DIII-D est bien blindé, et peut supporter des disruptions. Il est bien instrumenté et peut permettre des diagnostics et tester des systèmes de contrôle potentiels.
- ASDEX-U doit être attentif à ses tuiles passives, et ne résiste pas très bien aux fortes disruptions.
- EAST a besoin de plus d'instruments de diagnostic et de capacités de contrôle.
- Alcator C-Mod a un blindage métallique molybdène, qui peut supporter 1MA et des disruptions habituelles de 100KJ, mais n'aime pas beaucoup les électrons découplés. Le coefficient d'avalanche est faible et il a rarement des plateaux de disruptions.

# La stratégie U.S. sur les disruptions devrait comporter des éléments d'atténuation et d'évitement

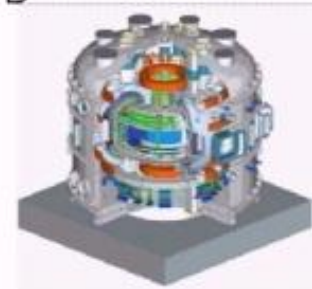
- **L'atténuation doit être testée dans des installations qui peuvent :**
  - Fonctionner avec des plasmas oblongs "ITER-like"
  - Produire suffisamment de disruptions
  - Tolérer les effets de nombreux événements disruptions / électrons découplés
- **L'évitement doit être testé dans des installations qui ont :**
  - Un jeu complet d'actuateurs et de systèmes de contrôle pour modifier l'état du plasma
  - Des durées d'impulsions suffisantes pour pouvoir tester l'évitement dans des régimes stationnaires / établis
- **Notre fort potentiel aux USA peut démultiplier les collaborations internationales**



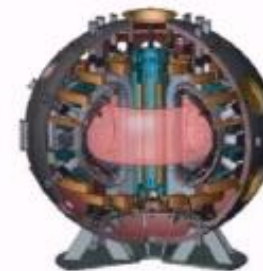
DIII-D



EAST



KSTAR



JT-60SA

# Diagnostiquer les disruptions?

---

- **Quelle résolution temporelle est nécessaire pour les diagnostics (en disruption). Quels diagnostics sont utiles pendant l'ensemble de la disruption (et restent fiables).**
- **Quelles sont les conditions de plasma post quench thermique?**
- **Courants de halo. Rechercher les asymétries poloïdales et toroïdales.**
- **Peut-on déterminer l'inductance du plasma et le profil de courant tout au long de la progression de la disruption?**
- **Mesurer l'énergie et la distribution spatiale des électrons découplés en fonction du temps. Quel est l'énergie totale des flux issus des disruptions?**
- **Déterminer la position et la durée des transferts d'énergie sur les éléments de paroi. Radiation ou convection? Pics?**
- **Mesurer les forces sur les composants de l'enceinte.**
- **Caractériser les précurseurs (durée, signature) de chaque disruption.**

# Résumé: La clé est dans le contrôle fiable des plasmas à haute énergie des tokamaks

---

- Dans les 5 à 10 prochaines années, nous devons utiliser les machines existantes, ou qui vont bientôt exister.
- Pour les impulsions longues, cela veut dire des coopérations internationales intenses (grandes équipes américaines) avec les tokamaks d'Asie:

## KSTAR, EAST et JT-60 Super Advanced

- Des études à faible risque des disruptions sur les machines à courtes durées d'impulsion comme DIII-D (bon jeu de diagnostics, systèmes de contrôle en temps réel, injections massives de particules, etc.)
- *Non seulement les disruptions peuvent causer des dommages sérieux aux tokamaks, mais notre manque de contrôle des disruptions porte atteinte à la crédibilité de nos futurs réacteurs à fusion de type « tokamaks » ... et celle de l'énergie par fusion magnétique en général.*
- Personne d'autre que nous ne sommes responsables de ce problème ... nous devons en assumer la pleine responsabilité.
- Sinon et par ailleurs ... nous devrions (devons) construire des stellarators.