

# Les First Mirrors du projet ITER

M. Joanny<sup>1</sup>, J.M. Travère<sup>1</sup>, S. Salasca<sup>1</sup>, L. Marot<sup>2</sup>

*Présenté au 24th Symposium on Fusion Engineering (SOFE) in Chicago, USA, June 26-30, 2011*

irfm



cadarache

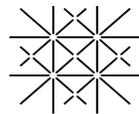
<sup>1</sup> CEA Cadarache

Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique

13108 St Paul Lez Durance, France



Association  
EURATOM-CEA



UNI  
BASEL

<sup>2</sup> Department of Physics  
University of Basel  
CH-4056 Basel, Switzerland



# Sommaire

- **La fusion par confinement magnétique et le projet ITER**
- **Les diagnostics optiques et les traitements de surface d'ITER**
- **Statut des R&D menées sur les First Mirrors d'ITER**
- **Conclusion**



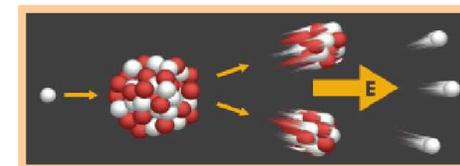
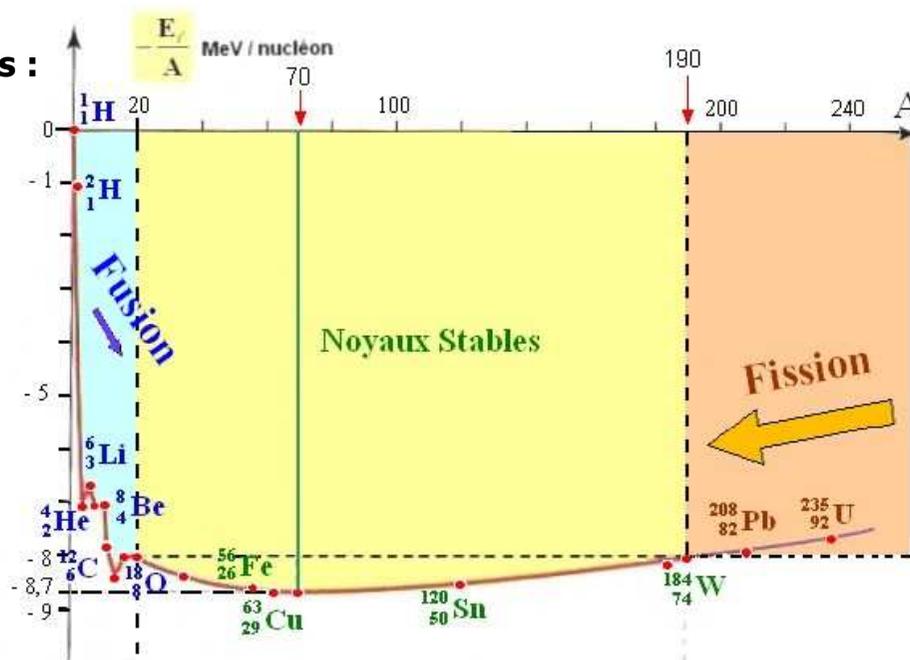
# Sommaire

- **La fusion par confinement magnétique et le projet ITER**
- Les diagnostics optiques et les traitements de surface d'ITER
- Statut des R&D menées sur les First Mirrors d'ITER
- Conclusion



# ● La fusion : une réaction nucléaire

## ➤ Les réactions nucléaires :

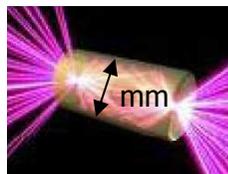


## ➤ La fusion :

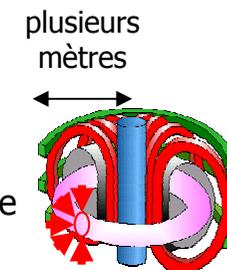
- dans les étoiles : → confinement gravitationnel



- sur Terre : → confinement inertiel (militaire)



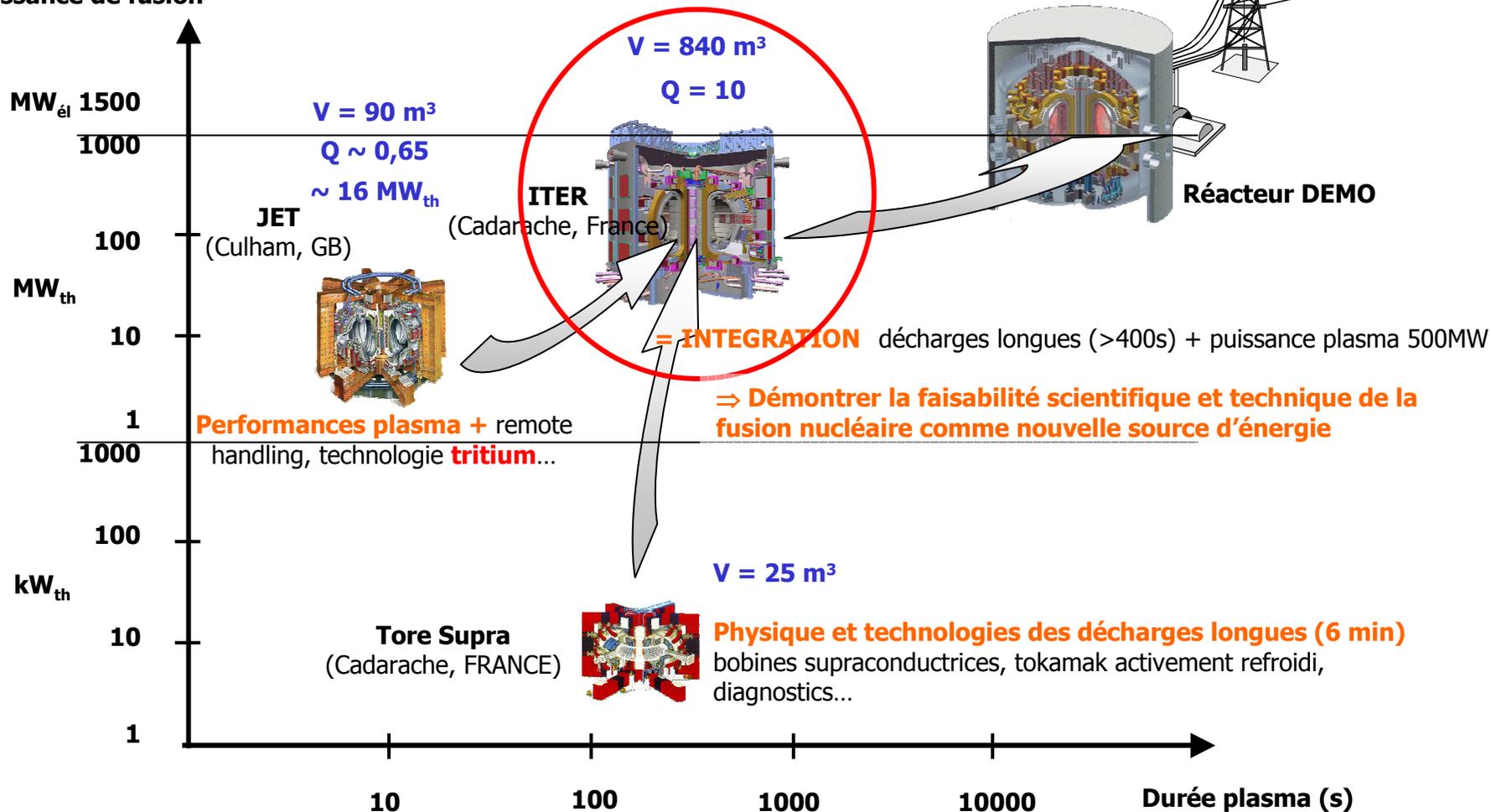
→ confinement magnétique (production d'énergie)



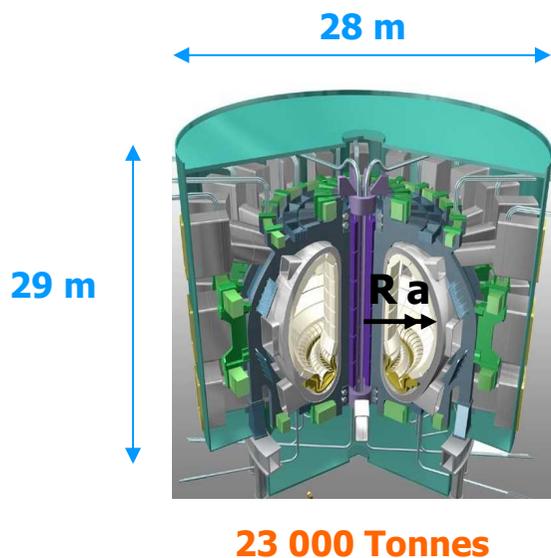
# • Machines de fusion

⇒ Démontrer la faisabilité industrielle de la production d'électricité par la fusion nucléaire

Puissance de fusion



## ● Principales caractéristiques d'ITER



**Arc de Triomphe**  
(H=49m, L=45m)

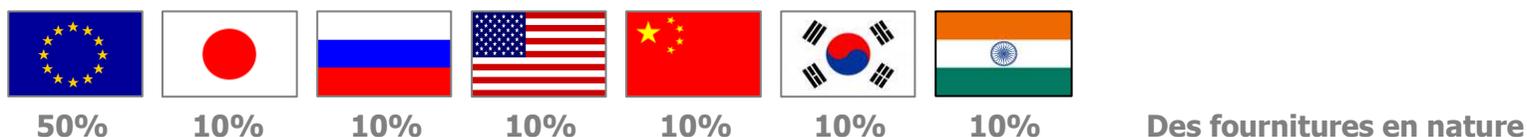
| Paramètres                     | ITER                           |
|--------------------------------|--------------------------------|
| R : grand rayon (m)            | <b>6.2</b>                     |
| a : petit rayon (m)            | <b>2.0</b>                     |
| Puissance de fusion $P_F$ (MW) | <b>500</b>                     |
| Durée des décharges            | <b><math>\geq 400</math> s</b> |
| Facteur d'amplification (Q)    | <b>10</b>                      |
| Coût (investissement)          | <b><math>\sim 16</math> G€</b> |



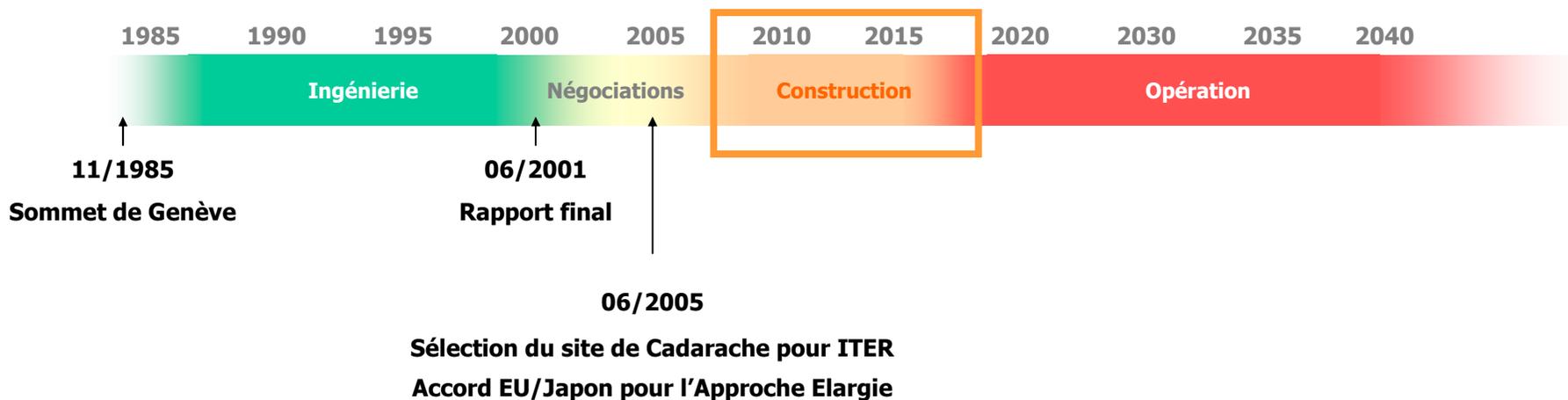
**Le Charles de Gaulle**  
(**38 000 Tonnes à vide**,  
L=261 m)

## ● Organisation du projet ITER

### ➤ Les parties impliquées et leur contribution :



### ➤ Planning :



# Sommaire

- La fusion par confinement magnétique et le projet ITER
- **Les diagnostics optiques et les traitements de surface d'ITER**
- Statut des R&D menées sur les First Mirrors d'ITER
- Conclusion

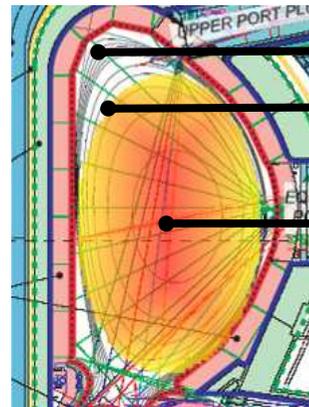


## • Qu'est ce qu'un diagnostic optique d'ITER ?

➤ **Un système de mesures** du plasma, de son interaction avec les CFP, et de l'état de la machine

➤ **Dans un environnement très hostile :**

- température du plasma très élevée :



~ 100 000 °C

~ 10 millions °C

~ 100 millions °C (réaction de fusion)

→ refroidissement des diagnostics

→ température des premiers composants des diagnostics : ~ 100°C-250°C

- vide ( $10^{-7}$  Pa) et reste de gaz ionisé

- forces électromagnétiques importantes ( $B=5$  Teslas)

- vibrations et déplacements mécaniques (jusqu'à plusieurs mm)

- **réaction de fusion → rayonnements neutron et gamma**

**→ accessibilité réduite**

## • Des optiques dans un environnement nucléaire



- Accès interdit
- Miroirs métalliques
- Maintenance possible / 4 ans

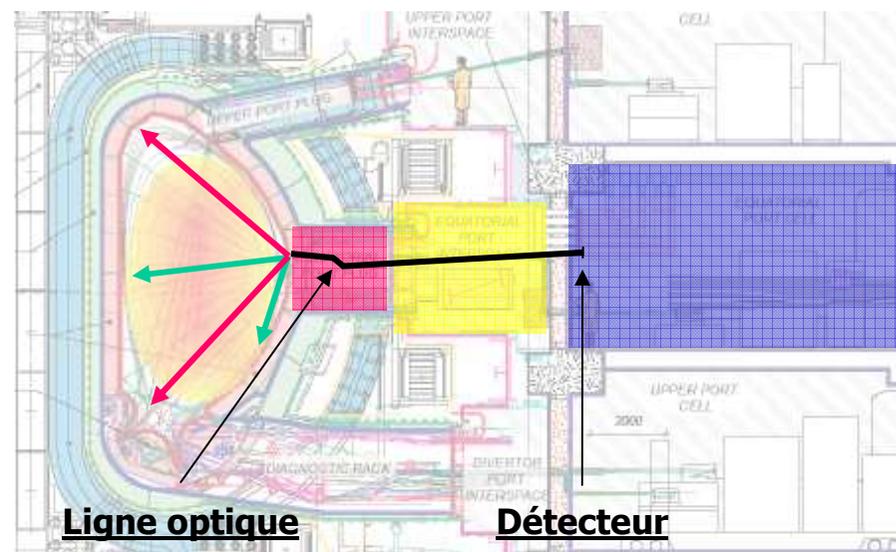
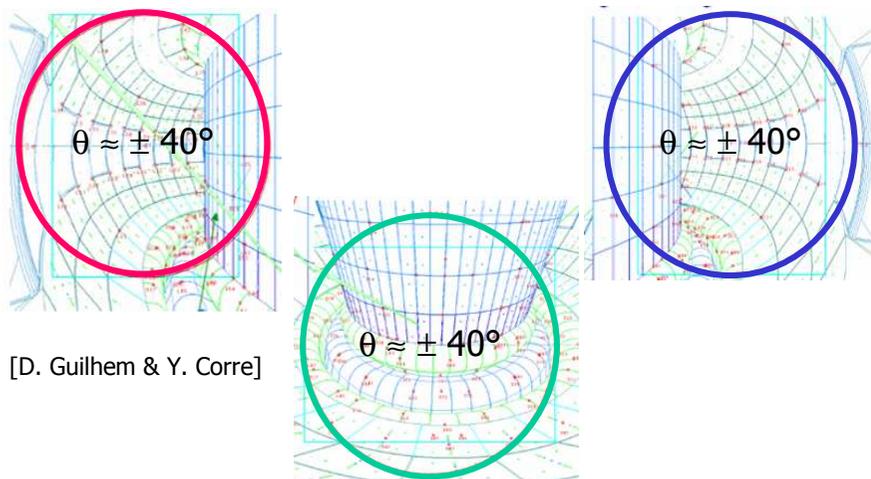
- Accès 1 jour après l'arrêt machine
- Détecteurs



- Accès 12 jours après l'arrêt machine
- Matériaux dioptriques spécifiques "radiation shielding"

## • L'exemple du diagnostic équatorial Vis/IR (1/3)

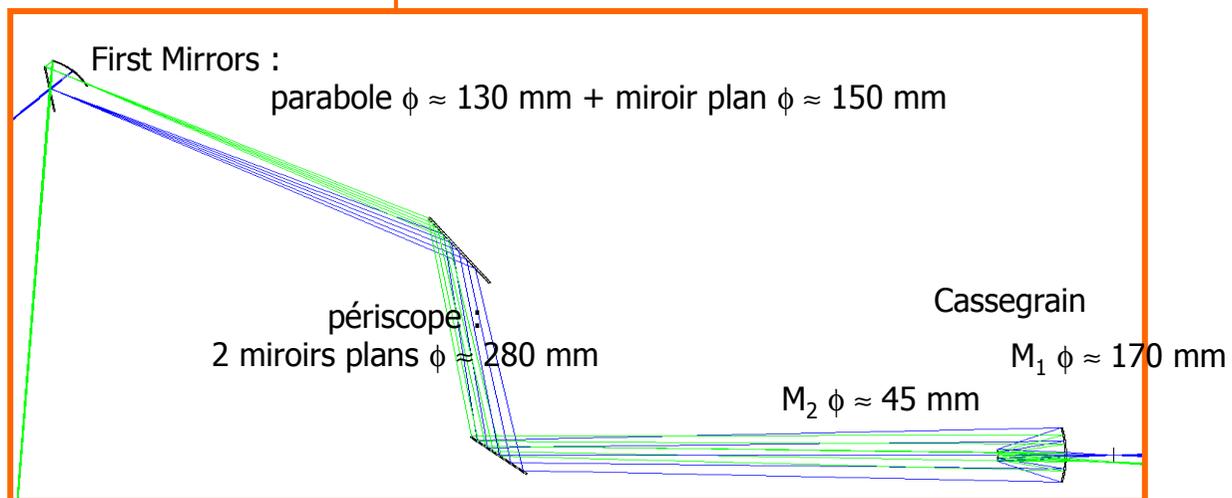
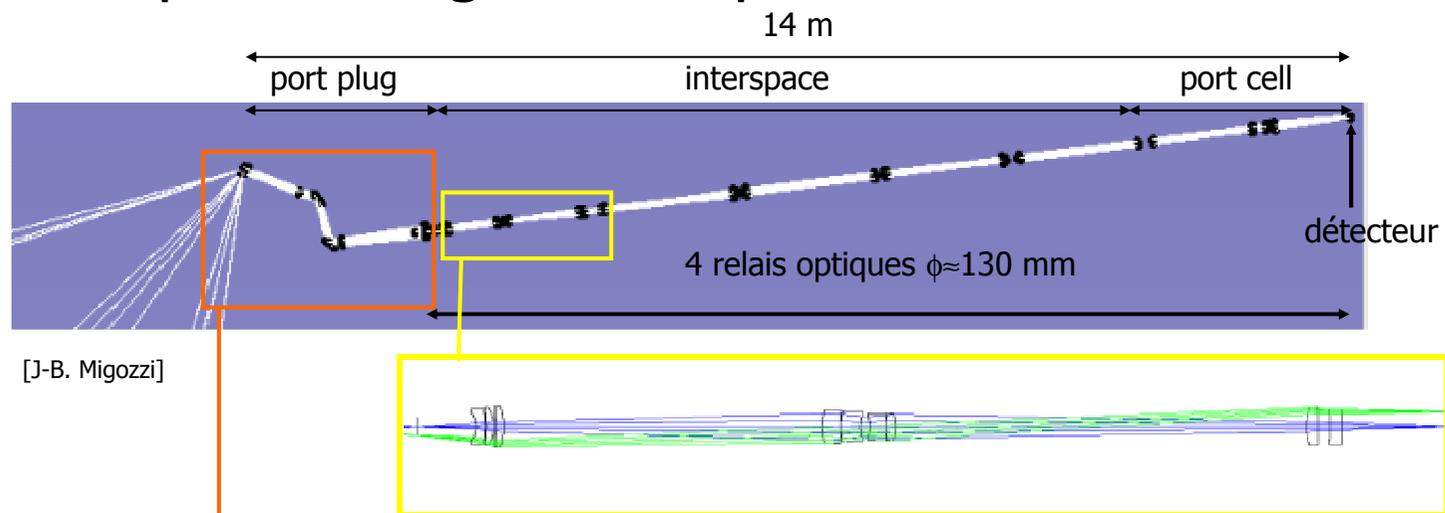
### Parties de la chambre à vide observées



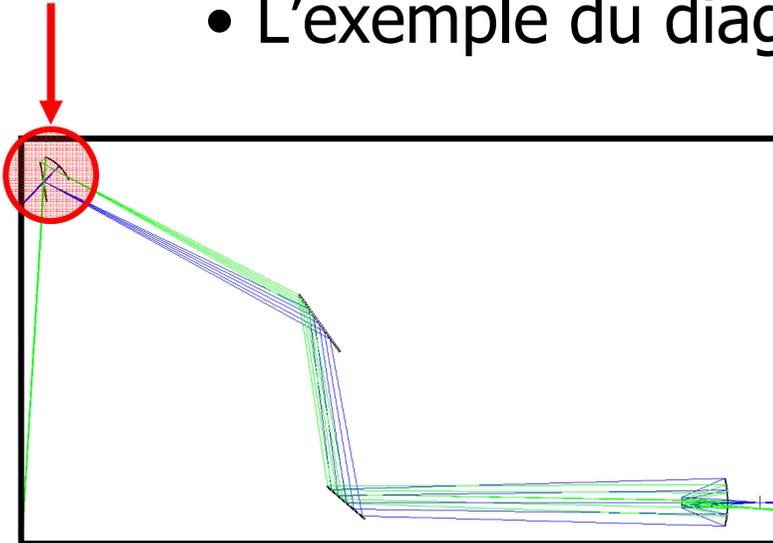
### Objectifs :

- domaine spectral : **visible** (400 nm - 700 nm) + **IR** (3  $\mu$ m – 5  $\mu$ m)
- résolution spatiale : 3 à 5 mm
- résolution temporelle : 10 ms (20  $\mu$ s pour les phénomènes rapides)
- classe de température : 200°C – 3600°C

## • L'exemple du diagnostic équatorial Vis/IR (2/3)

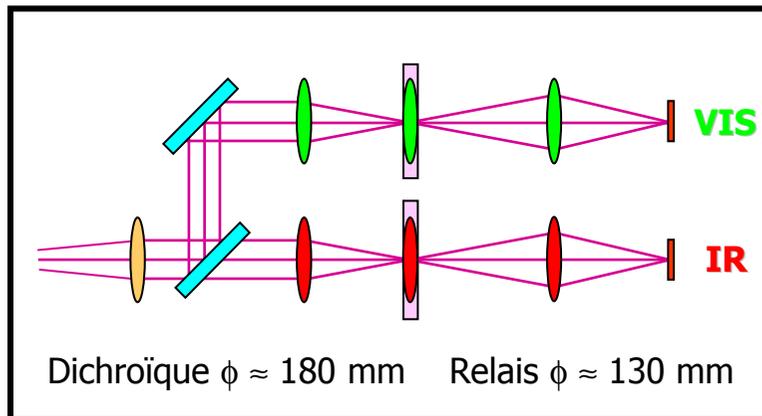


## • L'exemple du diagnostic équatorial Vis/IR (3/3)



### ➤ Traitements réfléchissants

- $R_{\max}$  pour **VIS** + **IR**
- $100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$
- $P < 10^{-7}$  Pa
- Flux neutron/ $\gamma$  :  $10^3$  à  $10^7$  W.m<sup>-3</sup>



### ➤ Traitements anti-reflets

- AR pour **VIS** et/ou **IR**
- $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$
- $P \approx 10^5$  Pa
- Flux neutron/ $\gamma$  <  $10^3$  W.m<sup>-3</sup>

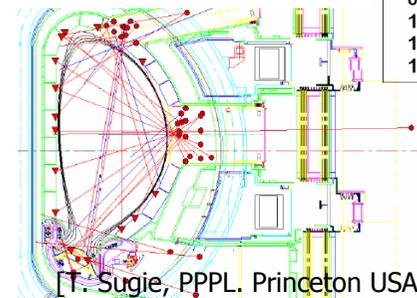
### ➤ Dichroïques

- separation **VIS** / **IR**
- $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$
- $P \approx 10^5$  Pa
- Flux neutron/ $\gamma$  <  $10^3$  W.m<sup>-3</sup>

## • Problématique des First Mirrors d'ITER

Les FM sont les premiers composants de nombreux diagnostics optiques d'ITER :

- ⇒ Sévères spécifications :
- $R_{\max}$  sur un large domaine spectral
  - propriétés thermo-mécaniques pour ne pas dégrader la qualité image
  - tenue mécanique du traitement de surface :

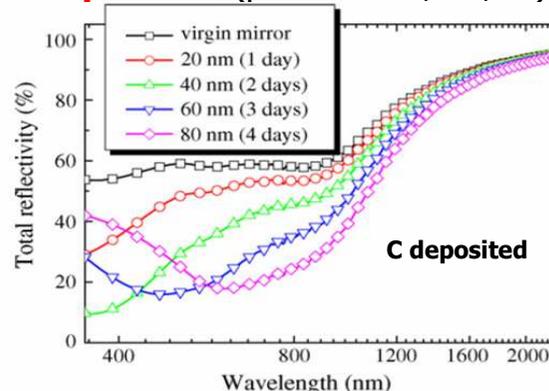


### Corrosion

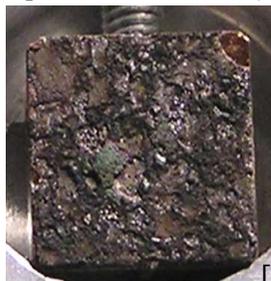


[E.R. Hodgson, I.W on BPD 2007]

### Déposition (particules C, Be, W)



[G. De Temmerman, FED 83(2008)30-38]



[M. Rubel, JET, PSI 2006]

### Erosion



[L. Marot, ITPA meeting 14, 2008]

# Sommaire

- La fusion par confinement magnétique et le projet ITER
- Les diagnostics optiques et les traitements de surface d'ITER
- **Statut des R&D menées sur les First Mirrors d'ITER**
- Conclusion



## • R&D organisées sur le plan international

➤ Investigations organisées par le Specialist Working Group on First Mirrors de l'ITPA\* autour de 5 axes :

Task A  
Material choice



→ En conditions d'érosion : **blank Mo + coating Mo**

→ En conditions de déposition : **blank métal + coating Rh**

Task B  
Mirror modeling



Task C  
Mirror Surface  
Recovery



Task D  
Irradiation of  
mirrors



Task E  
Manufacturing of  
mirrors



→ **Projet First Mirror mock-ups à l'IRFM/CEA Cadarache**

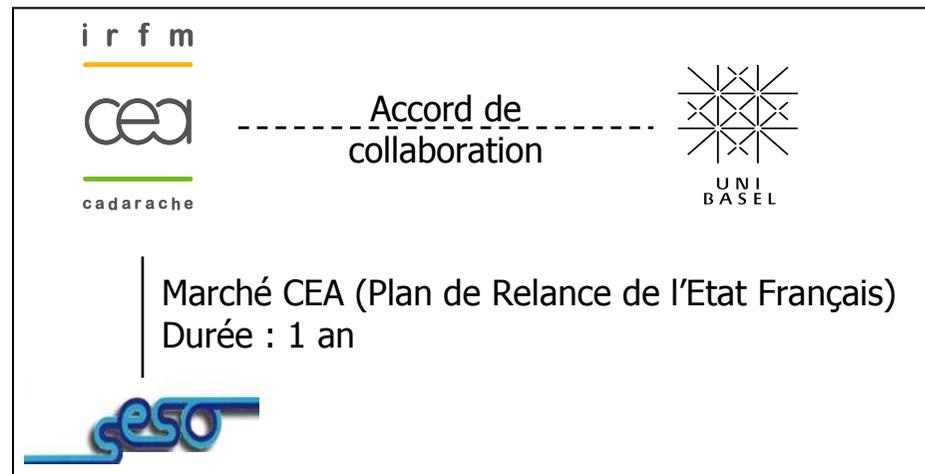
\*International Tokamak Physics Activity Topical Group on Diagnostics

# • Le projet First Mirror mock-up

## ➤ Partie 1 - 2010 : Travaux d'ingénierie et de fabrication

- Objectifs :
  - Valider les principales étapes de fabrication : circuit de refroidissement, **traitements**, poli
  - REX et chiffrage de prototypes échelle 1

### - Organisation :



- Miroirs développés : **Rh sur Inox, Mo sur TZM nickelé, Mo sur Inox**

## ➤ Partie 2 – 2011/2012 : Tests dans les installations européennes (Pays-Bas, Suisse, Belgique, Allemagne)

# • Le projet First Mirror mock-up

## Besoin ITER

Miroirs métalliques  $\phi$  100 à 500 mm

Circuit de refroidissement

Dépôt épais 4-5 $\mu$ m

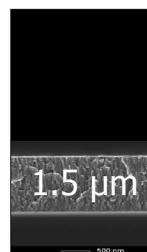
R% @ 350nm-11 $\mu$ m

## Etat de l'art en 2009

$\phi$  20 à 50 mm



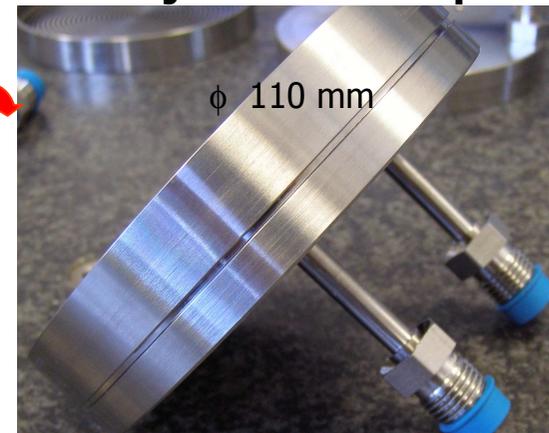
Non



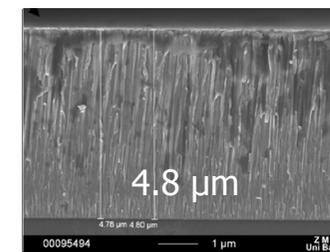
OK

## Projet FM mock-ups

$\phi$  110 mm



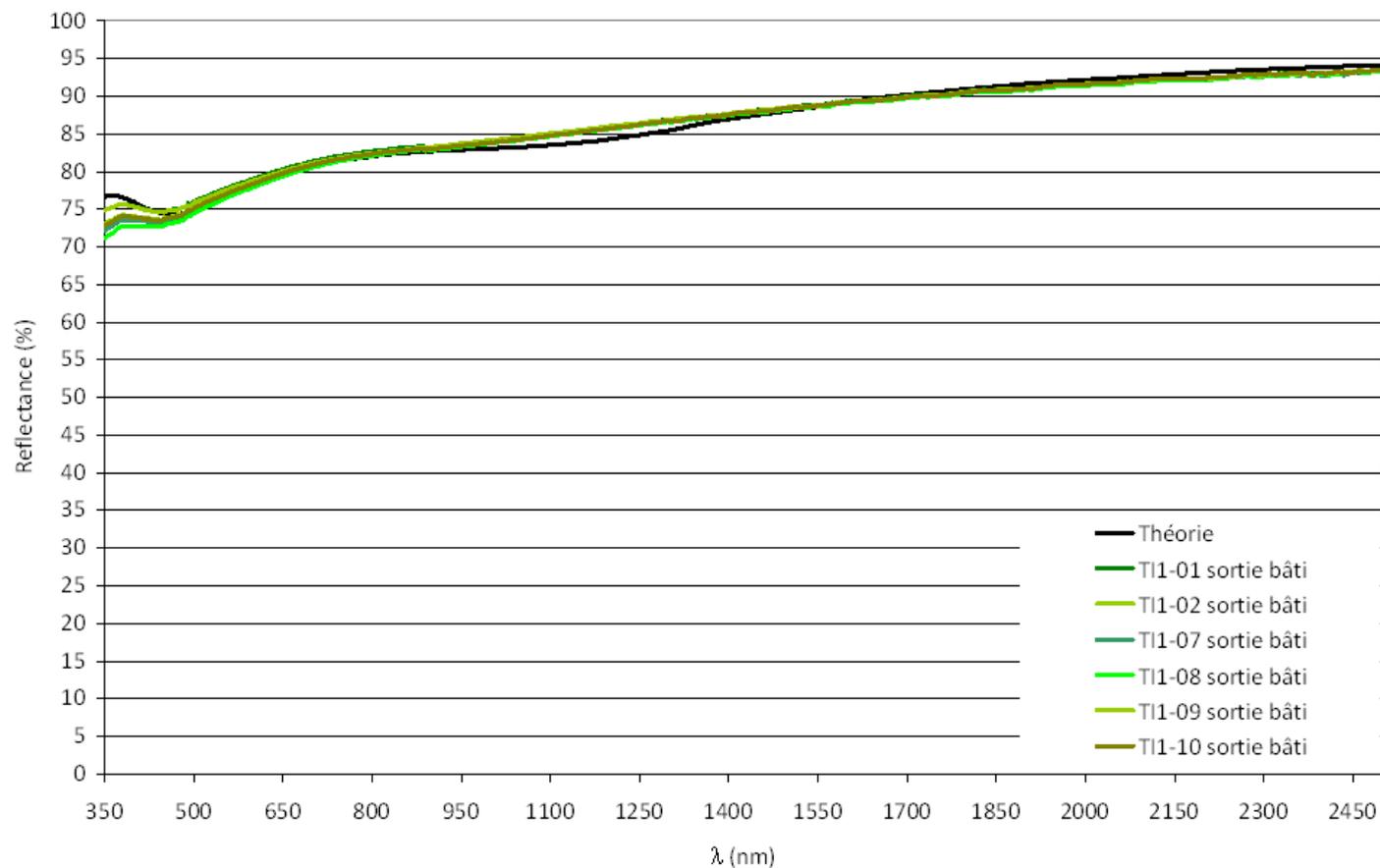
Oui



OK

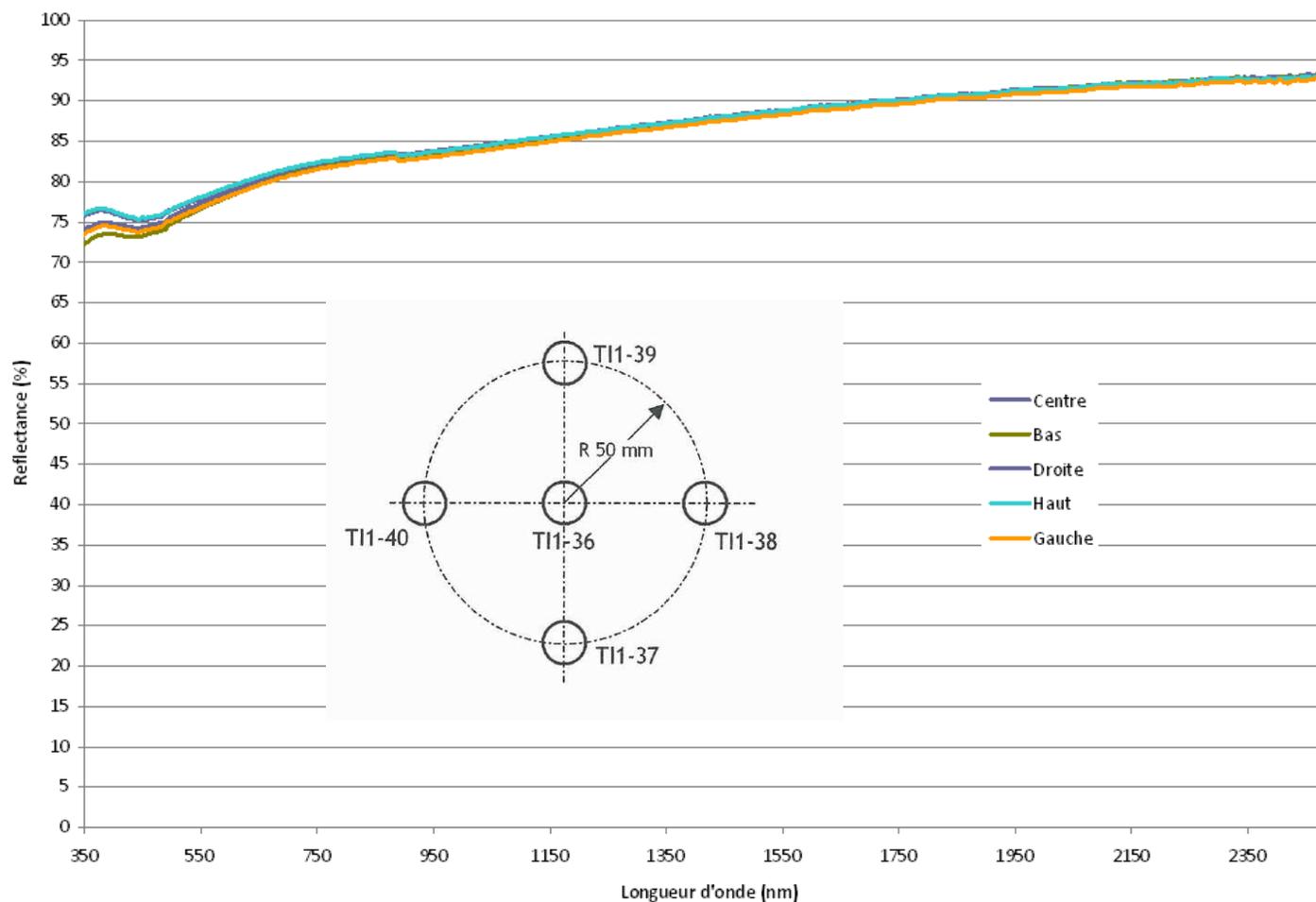
## • Le projet First Mirror mock-up

### ➤ Courbes de réflectivité du traitement Rh sur substrat Inox (Perkin Elmer $\lambda 950$ , SESO, sortie de bâti)

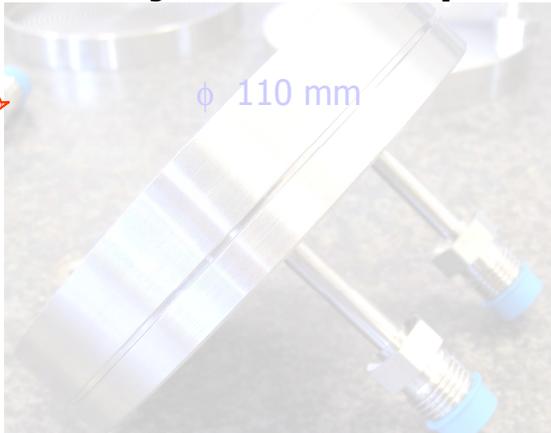
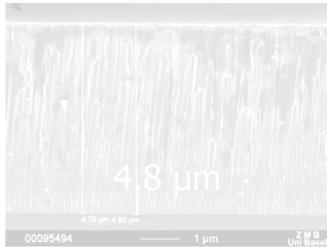


## • Le projet First Mirror mock-up

➤ **Homogénéité de R% sur  $\phi 100$  mm du traitement Rh sur Inox** (Perkin Elmer  $\lambda 950$ , SESO, sortie de bâti)



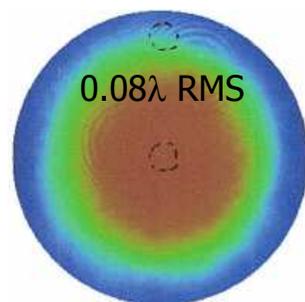
# • Le projet First Mirror mock-up

| Besoin ITER                              | Etat de l'art en 2009  | Projet FM mock-ups   |
|--|--|--|
| Miroirs métalliques $\phi$ 100 à 500 mm  | $\phi$ 20 à 50 mm<br> | $\phi$ 110 mm<br> |
| Circuit de refroidissement               | Non  | Oui  |
| Dépôt épais 4-5 $\mu$ m                  | 1.5 $\mu$ m<br>     | 4.8 $\mu$ m<br>  |
| R% @ 350nm-11 $\mu$ m                    | OK   | OK   |
| Rugosité < 2 nm Ra                       | OK   | OK   |
| Aspect selon MIL 60/40                   | OK   | OK   |
| Uniformité <0.1 $\mu$ m sur $\phi$ 100mm | /  | $\Delta$ PV $\approx$ 1 à 2 $\mu$ m  |

## • Le projet First Mirror mock-up

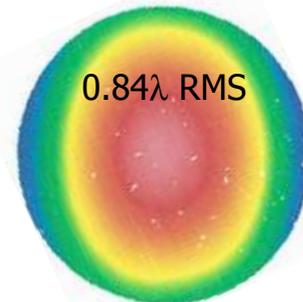
### ➤ **Homogénéité du dépôt** (Interféromètre @ 633 nm, SESO)

*SFE après polissage*



MI1-03 (Inox)

*SFE après traitement*



MI1-03 (Inox + Rh 5 $\mu$ m)

### ➤ **Conclusion en sortie de bâti :**

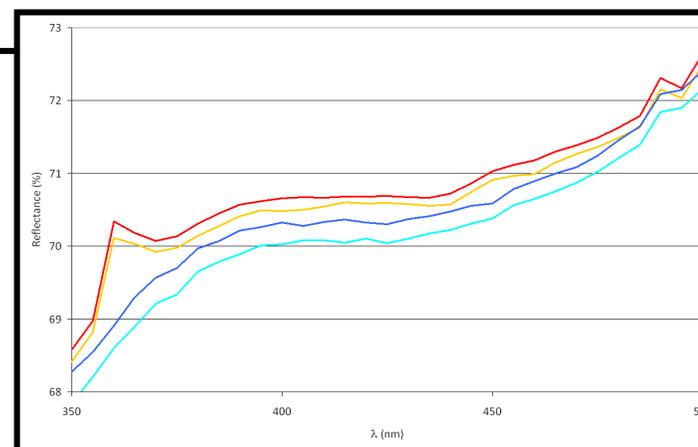
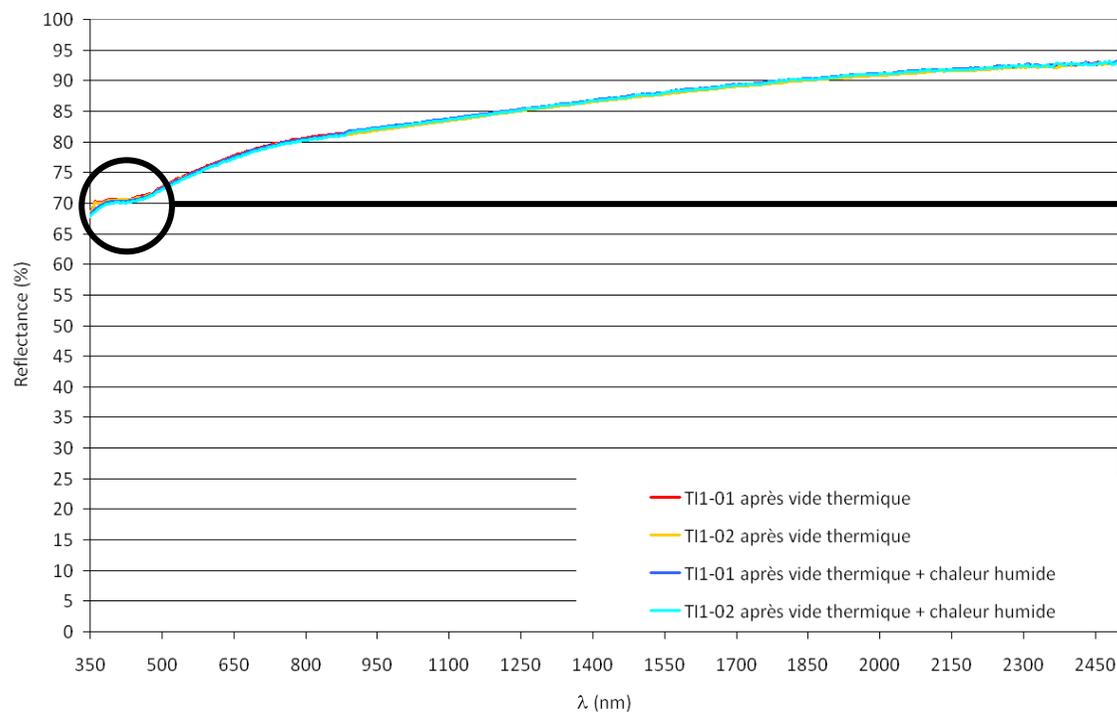
- ✓ Faisabilité de réalisation des traitements Mo et Rh en épaisseur 4-5  $\mu$ m
- ✓ Bonnes propriétés optiques de rugosité, réflectivité et aspect
- ✗ Défaut d'homogénéité d'épaisseur des dépôts lié au process, qui devrait être corrigé par l'utilisation d'un équipement adapté

# • Le projet First Mirror mock-up

## ➤ Tenue des traitements :

✓ Bonne tenue globale

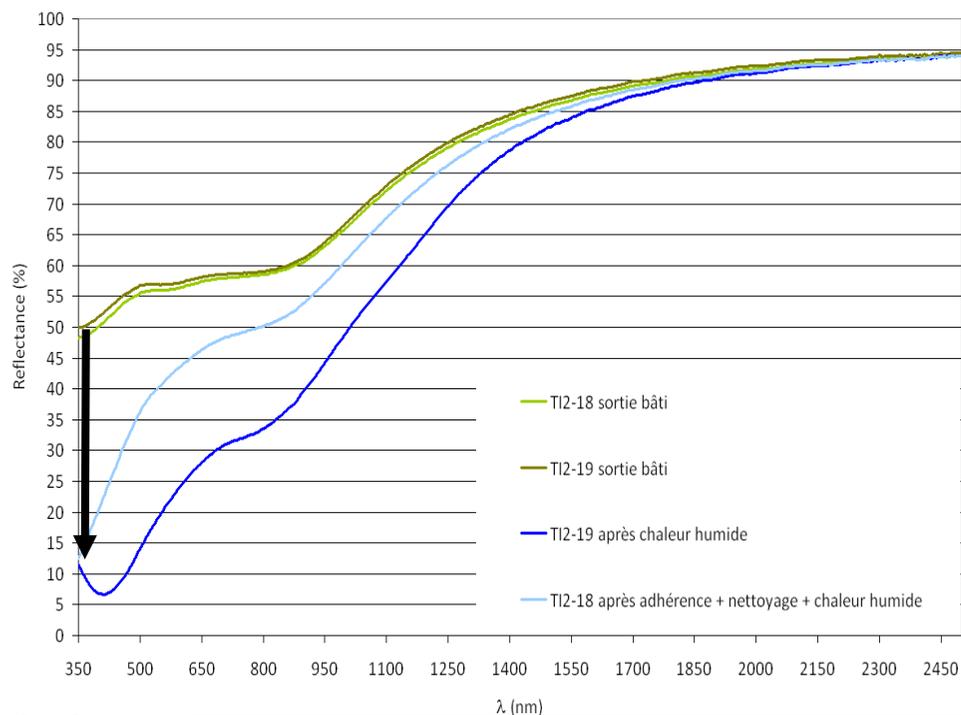
|   | Rh sur Inox | Mo sur TZM nickelé | Mo sur Inox |
|---|-------------|--------------------|-------------|
| Adhérence   | ✓           | ✓                  | ✓           |
| Nettoyage   | ✓           | ✓                  | ✓           |
| Cycles thermiques<br>5x3h @ 240°C/10 <sup>-6</sup> mbar | ✓           |                    | ✓           |
| Chaleur humide  | ✓           |                    |             |
|   | ✓           | ✓                  | ✓           |



## • Le projet First Mirror mock-up

### ➤ Tenue des traitements :

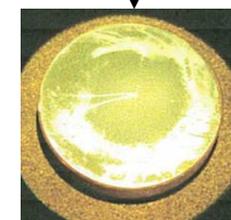
✓ Bonne tenue globale



|   | Rh sur Inox | Mo sur TZM nickelé | Mo sur Inox     |
|---|-------------|--------------------|-----------------|
| Adhérence   | ✓           | ✓                  | ✓               |
| Nettoyage   | ✓           | ✓                  | ✓               |
| Cycles thermiques<br>5x3h @ 240°C/10 <sup>-6</sup> mbar | ✓           | Risque de fâiçage  | ✓               |
| Chaleur humide<br>24h @ 48°C/HR100%                     | ✓           | Coloration         | Coloration      |
|   | ✓           | ↘R% @350-1500nm    | ↘R% @350-1500nm |
|   | ✓           | ✓                  | ✓               |



Chaleur humide



# Sommaire

- La fusion par confinement magnétique et le projet ITER
- Les diagnostics optiques et les traitements de surface d'ITER
- Statut des R&D menées sur les First Mirrors d'ITER
- **Conclusion**



## • Les traitements de surface pour ITER...

- Constituent des **éléments importants** des diagnostics optiques du projet
- Pour les **First Mirrors** :
  - les points durs ont été identifiés
  - les tâches de **R&D** ont été réparties entre les partenaires et sont en cours de réalisation
  - un premier résultat majeur du projet FM mock-ups :  
une **installation de traitement de surfaces adaptée** est nécessaire ; pour cela une collaboration étroite entre le CEA (*expérience diagnostics FCM*), les laboratoires (*expertise et process*) et les industriels (*industrialisation*) semble incontournable
- Pour les **composants dioptriques** du diagnostic Vis/IR d'ITER (IRFM, CEA Cadarache) :
  - les points durs sont en cours d'étude (2011)
  - des **collaborations** doivent se mettre en place avec des industriels et laboratoires pour mener les programmes de R&D nécessaires



**Merci de votre attention**

8 prototypes de First Mirror d'ITER  $\phi$  109 mm et une trentaine d'échantillons  $\phi$  25 mm fabriqués

