

# **Recherche sur les matériaux possibles pour les miroirs et les rétro-rélecteurs internes d'un réacteur à fusion et leurs essais dans Tore Supra – Rapport d'étape EGIDE**

B. Schunke, V. Voytsenya, C. Gil, M. Lipa

Rapport d'étape (première année) de la collaboration entre le DRFC, CEA Cadarache, et le NSC, KIPT, Kharkov dans le cadre du programme des action intégré (PAI) de DNIPRO soutenu par EGIDE.

## **1. Introduction**

L'objectif du projet est d'étudier la qualité optique et la topologie de la surface des échantillons de miroirs métalliques (matériaux candidats pour miroirs internes (= "miroirs exposés") d'ITER) soumis aux effets de l'érosion et à la re-déposition pendant une exposition de longue durée aux plasmas dans le Tokamak Tore Supra (TS). **Trois matériaux différents ont été choisis : cuivre, acier (SS) et molybdène mono-cristallin.** On s'attend à ce que la durée de vie des miroirs exposés aux plasmas d'ITER soit très courte; or, tous les diagnostics utilisant le rayonnement ultraviolet (UV), visible et infrarouge (IR) devront regarder le plasma par l'intermédiaire d'un miroir. Ces miroirs doivent survivre dans un environnement extrêmement hostile et encore maintenir une bonne qualité optique. Deux processus s'opposent, pouvant avoir des effets importants, mais tous les deux menant à la dégradation des propriétés optiques des miroirs:

- La pulvérisation (ou sputtering) par des atomes d'échange de charge qui mène à l'érosion.
- La re-déposition de matériau contaminant qui a été érodé du divertor et du premier mur [1].

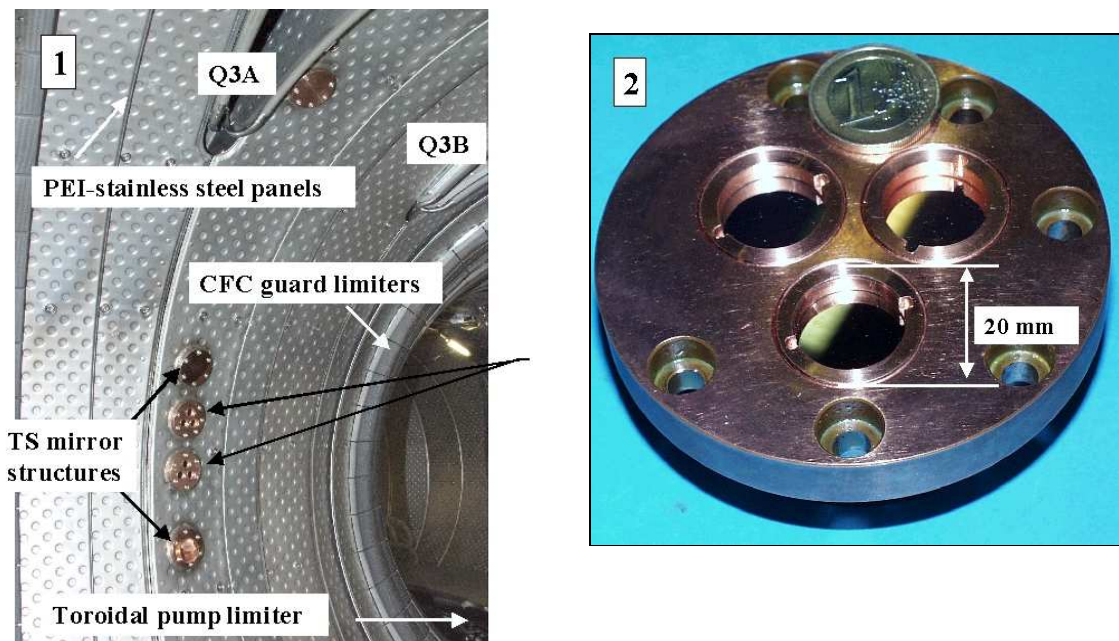
Selon un modèle simple, le processus de pulvérisation doit dominer le processus de re-déposition. L'analyse de la surface des miroirs après leur exposition dans TS permettra de vérifier le modèle proposé en [1]. En outre, les propriétés optiques peuvent également être détériorées, dû au conditionnement (décharge luminescente en deutérium ou hélium et boronisation de la paroi, qui est une procédure pour déposer une fine couche de carbure de bore sur l'enceinte interne du tokamak) utilisé dans TS pendant la campagne expérimentale.

Les échantillons de miroir doivent être caractérisés avant et après exposition au plasma de TS. Des expériences de simulation des effets du sputtering à long terme sur la réflectivité des miroirs métalliques seront faites en parallèle à l'IPP-Kharkov.

## 2. Installation des échantillons de miroir dans le Tokamak Tore Supra

Le bouclier thermique de TS est basé sur des composants CFC activement refroidis ( $\sim 7.5 \text{ m}^2$  de limiteur pompé toroïdal (LPT) et  $\sim 7.5 \text{ m}^2$  de limiteurs de garde); la surface de la paroi restante ( $\sim 80 \text{ m}^2$ ) est couverte par des panneaux d'acier inoxydable activement refroidis [2]. Il est à noter, qu'en 2003 jusqu'à  $\sim 750 \text{ MJ}$  d'énergie pourraient être injectés et extraits dans TS lors d'une décharge de  $\sim 4$  minutes [3].

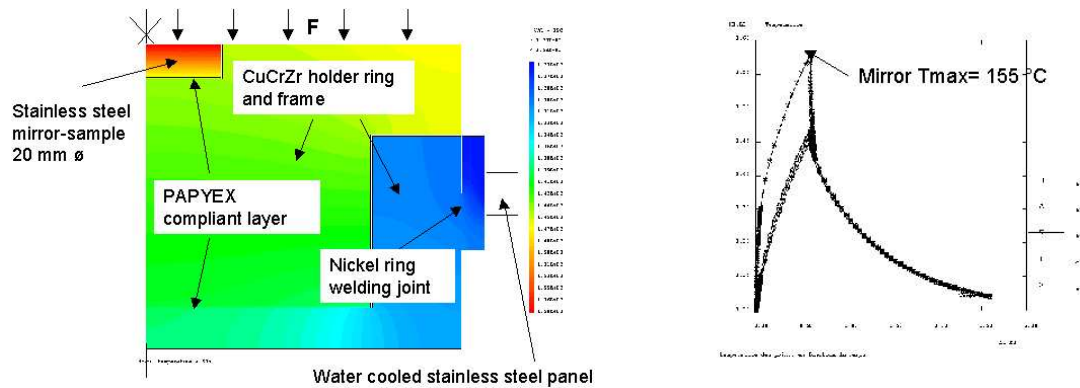
Le projet a commencé fin 2002 avec des calculs thermo-hydrauliques et la conception du système de support des miroirs. Les échantillons ont été insérés (par trois) dans des supports cylindriques en CuCrZr de 80 millimètres de diamètre, lesquels sont vissés sur des embases de CuCrZr (Fig.2) qui sont eux-même soudées à l'intérieur d'un panneau en acier, refroidi à l'eau (Fig.1). A l'origine les supports avaient été prévus pour des miroirs rétro-rélecteurs en cuivre du diagnostic interféro-polarimétrie. Une couche garantissant un bon contact thermique (PAPYEX) est insérée entre les échantillons de miroir, le support cylindrique et l'embase afin d'améliorer le transfert thermique par rapport au panneau refroidi.



**Figures 1 & 2:** Echantillons de miroir de Kharkov (droit) dans le support et l'installation sur la paroi interne de Tore Supra (longues flèches) ainsi que le miroir de CuCrZr et le rétro-rélecteur fabriqué en Angleterre (flèches courtes).

Des calculs 2D ont été exécutés en utilisant le code d'éléments finis Castem 2000. Il montre par exemple pour les différents échantillons de miroir que l'élévation de température maximale est approximativement de 25 à 35°C ( $T_{\text{H}_2\text{O}} = 120^\circ\text{C}$ ) pour un flux de la chaleur absorbé prévu de  $0.05 \text{ MW/m}^2$  (puissance rayonnée de 5MW) pendant une décharge de 60s

(scénario "Gigajoule" de TS). Après la fin de la décharge du plasma, la température décroît jusqu'à celle initiale en 300s (Fig. 3+4).



**Figure 3 & 4:** Iso-températures et évolution de la température d'un échantillon de miroir-d'acier inoxydable pendant un cycle d'opération typique de plasma dans Tore Supra ont été calculées ( $F=0.05MW/m^2$ ,  $t=60s$ ,  $T_{H2O} = 120\text{ }^{\circ}C$ ).

Six échantillons métalliques de miroir provenant d'IPP Kharkov (deux en cuivre OFHC, deux en acier inoxydable et deux en molybdène mono-cristallin) d'un diamètre de 20mm et de 4mm d'épaisseur ont été installés côté fort champ dans la chambre à vide de TS près du secteur Q3A (Fig.1). Ils sont situés à 7.5 et 15 degrés hors du plan équatorial. En outre, deux autres éléments réfléchissants en CuCrZr, utilisés pour le diagnostic d'interféropolarimétrie de TS (longueur d'onde = 119 et 195 $\mu$ m), ont été installés sur le même panneau et seront également analysés. L'un d'entre eux est un prototype de corner cube de 50mm de diamètre et le second a une surface plane d'environ 85mm, polie pour le visible. Un cinquième élément non poli a été installé sur le haut du panneau. Excepté le corner cube, toutes les surfaces réfléchissantes sont orientées parallèlement aux lignes de flux magnétiques.

### 3. Préparation des échantillons de miroir

4 ensembles identiques d'échantillons de miroir ont été fabriqués à Kharkov. Chaque ensemble est composé de:

- acier inoxydable poly-cristallin de la marque O4Cr16Ni11Mo3Ti,
- cuivre pur (sans oxygène) poly-cristallin,
- molybdène mono-cristallin, suivant l'orientation de surface (110).

Un ensemble est resté à Kharkov comme échantillon de référence, et trois ensembles ont été envoyés à Cadarache. En raison des différences apparentes dans les propriétés optiques des échantillons de Cu et des échantillons de SS, (voir ci-dessous) un échantillon additionnel de chacun de ces derniers a été envoyé à Cadarache pour laisser le choix pour l'installation dans TS.

Les échantillons de SS et MO ont été mécaniquement polis par une méthode abrasive nommée "deep grinding-polishing". La taille moyenne des particules abrasives utilisées était de  $\sim 0.1\mu\text{m}$ . La surface des échantillons de Cu a été réalisée par tournage à l'outil diamant.

Les raisons pour lesquelles ces matériaux ont été choisis pour la fabrication des échantillons de miroir sont les suivantes :

3.1 Le matériau choisi pour les rétro-rélecteurs (RR) de l'interféropolarimétrie de TS est un alliage de cuivre CuCrZr, avec un contenu de Cu de près de 98%. Par conséquent on peut supposer que le taux de pulvérisation de la surface du RR sera comparable à celui du cuivre pur. Ainsi, des résultats des expériences de simulation employant la source d'ion DSM-2 à Kharkov sur le cuivre pur pourront être comparés aux résultats obtenus après expositions des échantillons de Cu installés à l'intérieur de la chambre à vide de TS.

3.2. Dans des expériences de simulation avec des miroirs de SS soumis au bombardement des ions de plasma de deutérium à long terme, des particularités de morphologie de surface ont été trouvées qui n'ont pas été observées pour des miroirs d'autres métaux. Ainsi, la structure "en marche d'escalier" des grains vue sur des photos de SEM était lisse [3], sans développer de micro-reliefs de petite taille dans des grains séparés, contrairement à ce qui avait été observé pour des miroirs d'autres métaux : Be, Cu, Mo, et W.

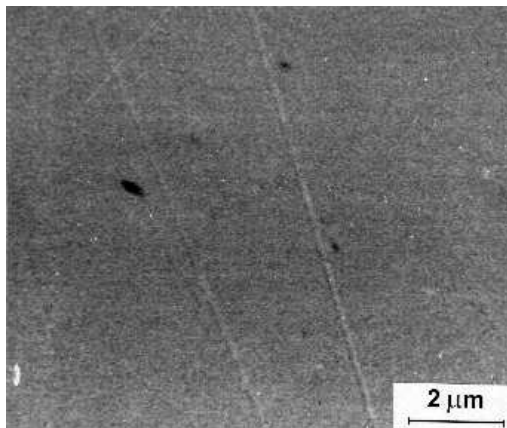
3.3. Les prévisions des expériences de simulation à Kharkov montrent [5] que des miroirs de molybdène mono-cristallins, semblables à ceux installés dans TS, pourraient garder les mêmes propriétés optiques pour plusieurs campagnes expérimentales de TS. Par conséquent l'exposition de tels miroirs à l'intérieur du tokamak permettra une vérification expérimentale.

#### **4. Mesures des propriétés des miroirs avant exposition au plasma**

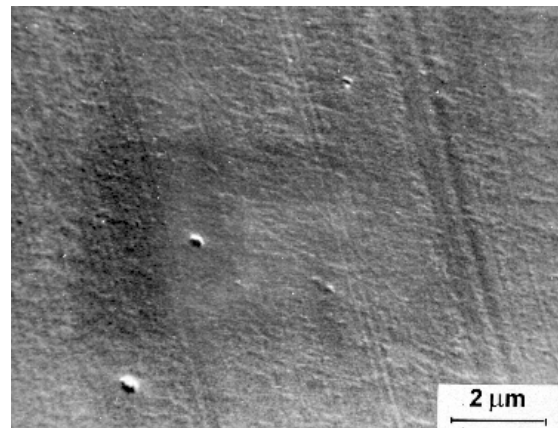
Les réflectivités absolues de tous les échantillons de miroir, mesurée à Kharkov dans la gamme de longueurs d'onde de 240 à 650nm avant l'envoi à Cadarache, sont présentées Tableau 1. Comme montré par les données, il y a une dispersion tout à fait significative de la réflectivité pour des miroirs de SS dans l'intervalle UV. Le même phénomène a été trouvé pour des échantillons de Cu. La raison de cette dispersion n'a pas pu être étudiée, en raison du temps limité entre ces mesures et l'envoi des échantillons à Cadarache. Il a été décidé d'envoyer un ensemble d'échantillons supplémentaires pour avoir un choix des miroirs pour l'installation dans TS.

Miroir	Réflectivité (%) pour chaque échantillon à la longueur d'onde indiqué										
	240	253	300	350	400	450	500	550	600	632.8	650
SS #1	29	29.9	35.9	43.3	47.8	52.7	56.7	59.8	62	62.9	62.7
SS #2	34.1	34.5	41.4	47.3	51.5	55.1	57.3	59	61.1	61.7	62.2
SS #3	31.3	32.1	39	45.3	51.6	54.9	58.2	60.3	62.1	62.6	63.2
SS #4	32.5	33.2	39.8	46	51.6	55.1	58.3	60.	63.1	63.4	63.6
Cu #1	29.3	27.7	27.1	33.7	41.3	49.3	54.4	60	86	89.8	90.3
Cu #2	29.8	29	27.9	34.3	42.7	51.1	56.8	63	89.7	94.3	95.3
Cu #3	32.3	30.3	28.7	34.5	42.4	50.9	55.9	61.5	87.6	91.3	92.9
Cu #4	29.7	28	27.5	33.1	41.4	49.2	54.9	60.8	87	91.8	92
Mo #1	51.2	52.4	55.2	52.3	53	56	59	59.7	59.9	61.1	61.1
Mo #2	51	52.3	54.3	52.4	52.8	55.7	59.5	60.2	59.6	60.5	61.4
Mo #4	52.4	53.9	55.1	53.1	53.2	56.4	59	60	60.4	61.1	61.5

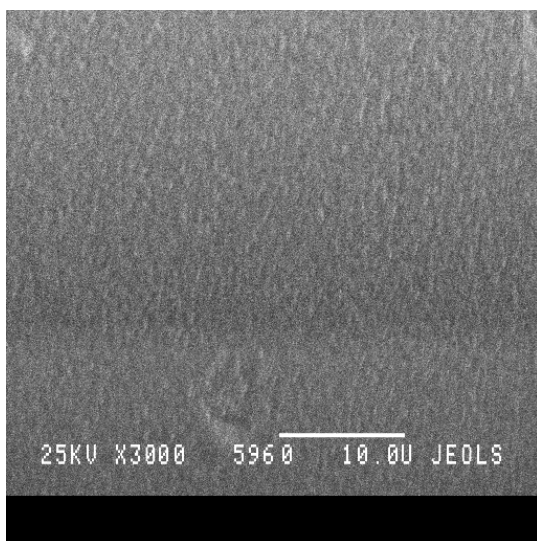
**Table 1:** Réflectivité des échantillons de miroirs envoyés à Cadarache.



**Figure 5:** Microphoto du miroir SS.



**Figure 6:** Microphoto du miroir de cuivre sans contenu d'oxygène.



**Figure 7:** Microphoto de molybdène mono-cristallin.

La topographie des échantillons maintenus à KIPT a été analysée par microscopie électronique de balayage (SEM). Les photos de SEM (Figures 5 – 7) montrent la haute qualité du polissage pour tous les échantillons.

A l'arrivée à Cadarache, l'état de la surface des échantillons a été mesurée par microscopie optique, les mesures de réflectivité dans le visible ont été répétées, confirmant les mesures du groupe de Kharkov. Les mesures prévues dans l'infrarouge (IR) et l'infrarouge lointain (FIR) n'ont pu être effectuées parce que ni le laser ni le spectromètre IR n'étaient disponibles à ce moment-là, à cause de l'arrivée tardive des échantillons sur le site. Ces mesures et aussi probablement des mesures par photographie Speckle et par ellipsométrie seront effectuées sur les miroirs de référence fournis. Des mesures des principaux paramètres de rugosité ( $R_a$ ,  $R_{max}$ ) de la surface des échantillons de référence d'IPP Kharkov ont été effectuées à Cadarache (Tableau 2). Des valeurs en rugosité moyenne  $R_a$  dans la gamme de 0.03-0.06 $\mu\text{m}$  ont été mesurées à différents endroits, principalement près des bords des échantillons afin d'éviter des rayures de la surface. On a observé des valeurs de rugosité  $R_{max}$  entre 0.22 et 1 $\mu\text{m}$ .

Kharkov échantillons de référence	Condition de la surface	Rugosité $R_a/R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )
Molybdène mono-crist.-4	Poli	0.03-0.05/ 0.25-0.34
SS-2	Poli	0.03-0.05/ 0.32-0.39
SS-4	Poli	0.03-0.07/ 0.23-1.0
Cuivre OFHC-1	ournée avec diamant	0.04-0.06/ 0.37-0.62
Cuivre OFHC-4	ournée avec diamant	0.03-0.05/ 0.22-0.4
<b>Miroirs CEA</b>		
CuCrZr miroir plat	ournée	1.6/?
CuCrZr corner cube	Poli à la main	0.4/?

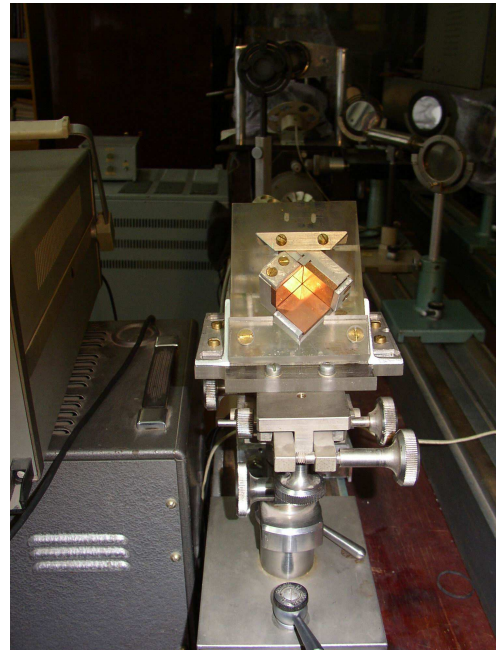
**Table 2:** Mesure de la rugosité de la surface des échantillons de référence de l'IPP Kharkov (longueur de mesure 8 mm) et des miroirs de la CEA (Perthometer M4P).

Le corner cube de TS (trois surfaces orthogonales polies à la main) a une rugosité de la surface de  $R_a = 0.4\mu\text{m}$  et une planéité de la surface – crête à crête - mieux que 25 $\mu\text{m}$ , alors que la structure cylindrique plate non polie a une rugosité d'environ  $R_a \sim 1.6\mu\text{m}$ . Des mesures de la réflectivité à la longueur d'onde de 119 $\mu\text{m}$  montrent des valeurs de 95.4% pour le corner cube et de 96% pour le miroir non poli, par rapport à un miroir diélectrique de référence de  $\text{AlSiO}_2$ .

## 5. Développement d'un rétro-rélecteur démontable à Kharkov

5.1. La construction d'un RR démontable a été développée. Les miroirs de (taille 22x22x4mm) sont assemblés sans nécessiter aucun ajustement après montage. Toutefois les mesures sur toutes les surfaces sont encore possibles si le diamètre du laser IR est plus petit que la taille d'un miroir, c.-à-d., que le faisceau frappe seulement une face du RR après l'autre. Cela sera possible parce que la position du laser FIR ( $\lambda=119\mu\text{m}$ ) est réglable, et qu'il est aligné à l'aide d'un laser He-Ne ( $\lambda=632.8\text{nm}$ ).

5.2. Deux supports identiques pour les retro-rélecteurs démontable ont été fabriqués. Sur la figure 8, la photo d'un tel support avec des miroirs de cuivre installés est montrée. Le support est fixé sur une base qui a 3 degrés de liberté.



**Figure 8:** Le *retro-reflector démontable* sur la base avec mouvement 3-D.

## 6. Modifications des lasers IR de Kharkov

Pour modifier les lasers IR, des nouveaux miroirs de haute qualité ont été fabriqués, quelques composants des lasers CO<sub>2</sub> et CH<sub>3</sub>OH ont été remplacés et les cavités des lasers ont été optimisées. En conséquence, les paramètres indiqués du laser dans le régime continu ont été obtenus, c.-à-d. une puissance de 60 mW avec une divergence acceptable de faisceau. Les mesures relatives de la réflectivité ont été effectuées à l'incidence normale, avec - comme référence - un miroir d'or.

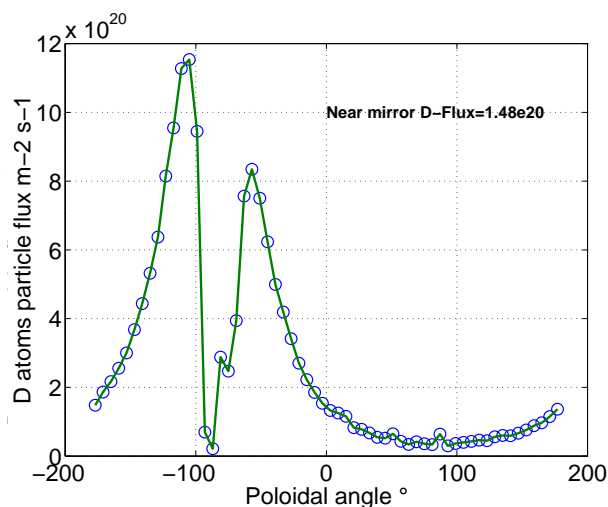
Pendant la visite de Drs. B.Schunke et Ch.Gil à Kharkov les conditions pour la mesure des caractéristiques optiques ont été définies et le schéma expérimental a été corrigé. Ainsi, le montage expérimental pour vérifier la variation des propriétés de miroir à  $\lambda=119\mu\text{m}$  dû à l'impact à long terme par des ions de plasma dans des expériences de simulation à Kharkov est prêt pour des mesures prévues pendant l'année prochaine.

On peut noter que les propriétés optiques des rétro-rélecteurs peuvent sensiblement changer au cours du temps, à cause du bombardement par des atomes d'échange de charge, malgré la grande longueur d'onde du laser ( $\lambda=119\mu\text{m}$ ). On peut estimer le taux de pulvérisation en prenant une densité de flux d'atome semblable à celle qui a été mesurée dans ASDEX,

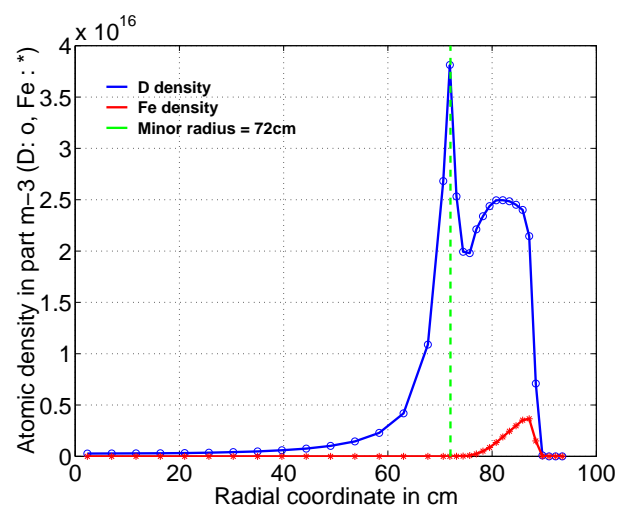
$5 \times 10^{15}$  atomes/cm<sup>2</sup>, c.-à-d., deux fois plus que celle qui est prévue pour ITER FEAT. Une estimation montre qu'après 800 décharges en deutérium de 250s, une couche de ~6mm sera érodée de la surface de miroir. En conséquence, la rugosité moyenne pourra atteindre ~4.5mm, conduisant à une diminution de la réflectivité de ~20% pour l'incidence normale (à  $\lambda=119\mu\text{m}$ ), selon la formule donnée dans l'article de Bennett [6]. Par conséquent, la réflectivité totale d'un retro-rélecteur diminuera de ~50%. De plus, la divergence du faisceau réfléchi pourra également être dégradée à cause de l'augmentation de rugosité.

## 7. Modélisation des conditions du plasma au voisinage des échantillons de miroir

Afin de comparer les résultats concernant l'érosion et la re-déposition obtenus dans TS, le plasma près des échantillons de miroir doit être estimé, malgré l'absence des mesures disponibles, pour comparer les flux et les énergies des particules au bord des TS à ceux prévues pour ITER. À cette fin, des simulations préliminaires avec un code 3-D Monte Carlo (EIRENE [ 7 ]) ont été effectuées. Le code calcule le transport dans la région de bord du plasma où les effets des processus atomiques et les interactions des particules avec les surfaces sont dominants. Dans un premier temps, la nouvelle géométrie de TS a été prise en compte, les premières simulations se concentrant sur l'hydrogène et le fer. Les premiers résultats sont montrés dans les Figures 9 et 10. Ce travail est en cours. Une fibre connectée à un petit télescope a été installée dans un hublot en face des échantillons de miroir pour observer le plasma de bord avec un spectromètre large bande. Ces mesures seront employées pour déterminer certaines des conditions aux limites rentrant dans le code de simulation d'Eirene.



**Figure 9:** Flux de deutérium – les échantillons sont positionnée à une angle poloidal de  $-180^\circ$



**Figure 10:** Distribution radiale des particules



## 8. Conclusion

Le travail, planifié pour 2003, sur la préparation et la réalisation du projet de KIPT-Cadarache dans le cadre du programme Ukrainien-Français Dnipro a été réalisé.

1. Des supports d'échantillons ont été conçus et installés dans le tokamak Tore Supra après un calcul thermomécanique. Un spectromètre à large bande a été installé pour diagnostiquer les conditions du plasma près des échantillons.
2. Des échantillons de miroir de trois matériaux (Cu, SS, Mo) de structure différente (monocristallin, poly-cristallins) ont été préparés par Kharkov, qui a également mesuré les caractéristiques optiques dans la gamme UV et visible des tous les échantillons.
3. Des photos SEM de tous les matériaux ont été fournies par l'Université de Kiev.
4. L'analyse des échantillons de miroir arrivés à Cadarache a inclus les mesures de la réflectivité dans le visible, la mesure de la qualité de la surface par microscopie optique et des mesures de rugosité des surfaces.
5. Les échantillons sont maintenant installés dans la chambre à vide de Tore Supra et exposés aux plasmas jusqu'à mi-2004.
6. Des simulations avec un code Monte Carlo (EIRENE) ont été faites pour déterminer les flux et les énergies des particules au voisinage des échantillons.
7. Un rétro-réfecteur démontable a été développé à Kharkov, et deux prototypes ont été fabriqués. De plus, le laser IR de Kharkov ( $\lambda=119\mu\text{m}$ ) a été modifié. Les mesures de la réflectivité des miroirs de cuivre ont démontré qu'on pourrait faire des mesures détaillées de la modification de la réflectivité due au bombardement par des ions plasmas.

## Références

- [1] V. Voitsenya, A. Costley, V. Bandourko, et al., Rev. Sci. Instr. 72 (2001) 475.
- [2] M. Lipa et al., IEEE catalogue number 97CH36131, pp. 353-356.
- [3] Equipe Tore Supra, IAEA-CN-94/PD/T-3
- [4] A.Bardamid, V.Bryk, V.Konovalov et al., Vacuum, 58 (2000) 10-15.
- [5]. V.S.Voitsenya, RSI, Vol.70, #1, Pt. II (1999) pp. 787-789
- [6] H.E.Bennett, JOSA, 53 (1963) 1389
- [7] D. Reiter, J. Nucl. Mater. 196-198, (1992) 80