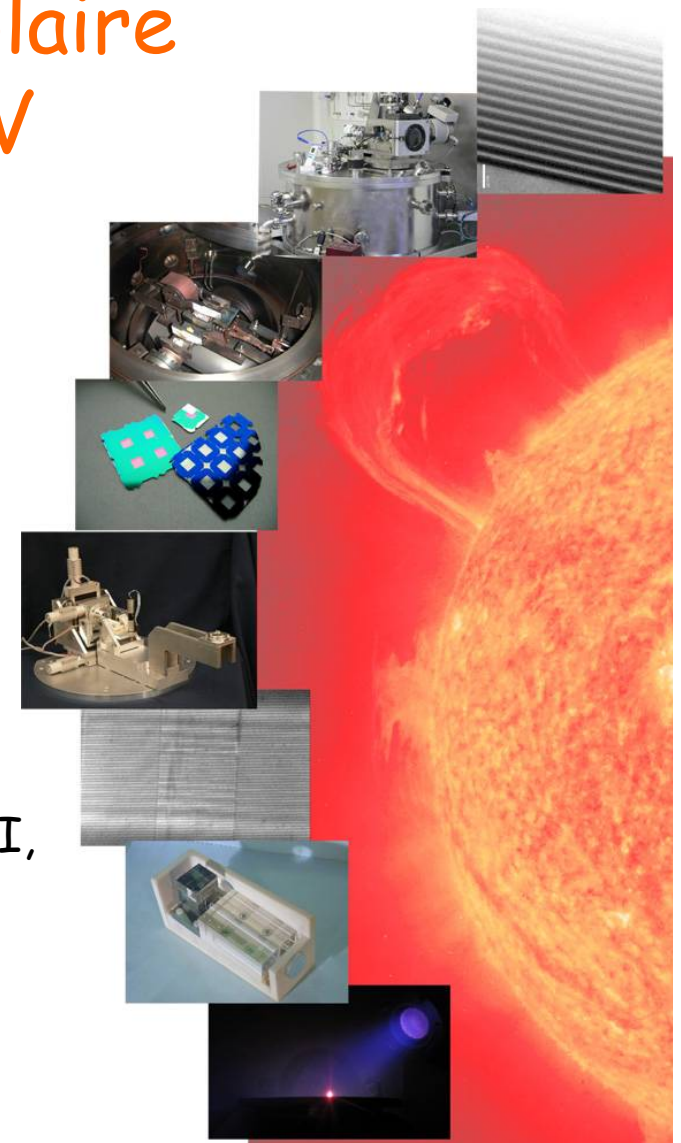


Stabilité des empilements multicouches pour l'imagerie solaire dans le domaine extrême UV

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique

Groupe SCOp (Systèmes et Composants Optiques)
Équipe « Optique XUV »

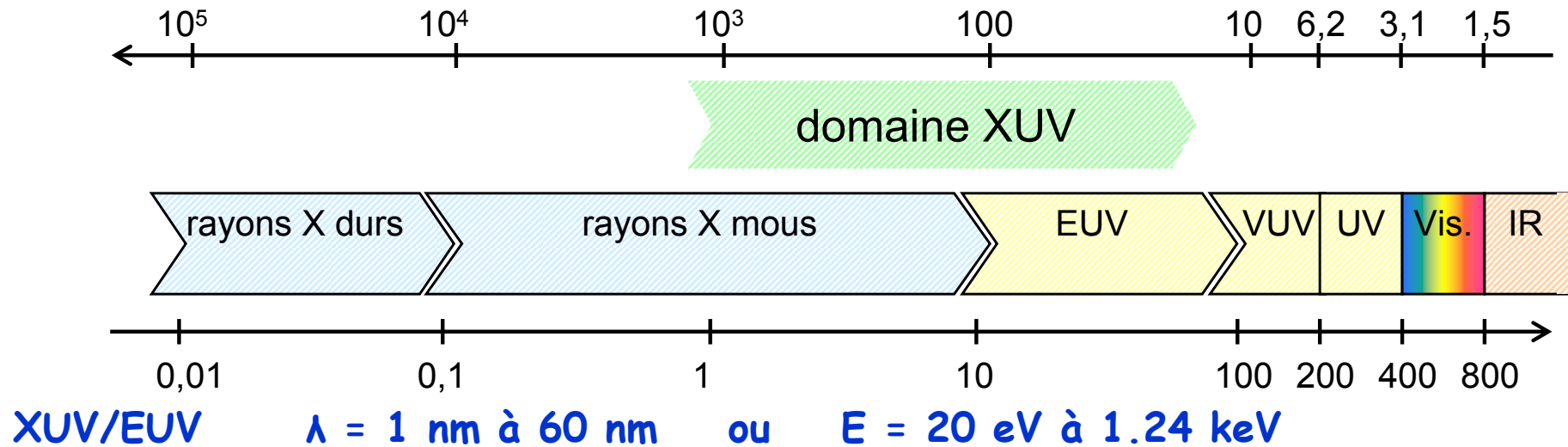
Charles BOURASSIN-BOUCHET, Françoise BRIDOU,
Fadi CHOUEIKANI, Franck DELMOTTE, Sébastien DE ROSSI,
Arnaud JEROME, Evgueni MELTCHAKOV, Bruno PARDO,
Françoise VARNIERE, Ahmed ZIANI



- Extrême UV pour l'imagerie solaire: Contexte
- HERITAGE: SOHO (1995) et STEREO (2006)
- Tri-matériaux: HECOR (2009)
- Multicouches à base d'Al: Préparation Solar Orbiter (2018 ?)
- Conclusions

- Extrême UV pour l'imagerie solaire: Contexte
- HERITAGE: SOHO (1995) et STEREO (2006)
- Tri-matériaux: HECOR (2009)
- Multicouches à base d'Al: Préparation Solar Orbiter (2018 ?)
- Conclusions

Extrême UV: applications



La lumière XUV a une longueur d'onde 10-500 fois plus courte que la lumière visible, ce qui permet :

- ✓ D'écrire et observer des motifs (de taille nanométrique):
Lithographie EUV, Microscopie X
- ✓ D'accéder aux niveaux de coeur dans les atomes :
Spectroscopie X, analyse X
- ✓ D'accéder à des phénomènes physiques aux échelles de temps ultra courtes:
Génération d'attoseconde 10^{-18} sec
- ✓ De sélectionner des raies émises par les plasmas chauds :
Sondage des plasmas denses, Spectroscopie d'étoiles, Imagerie solaire

$$2d \sin \theta \sqrt{1 - \frac{2\delta}{\sin^2 \theta}} = k\lambda$$

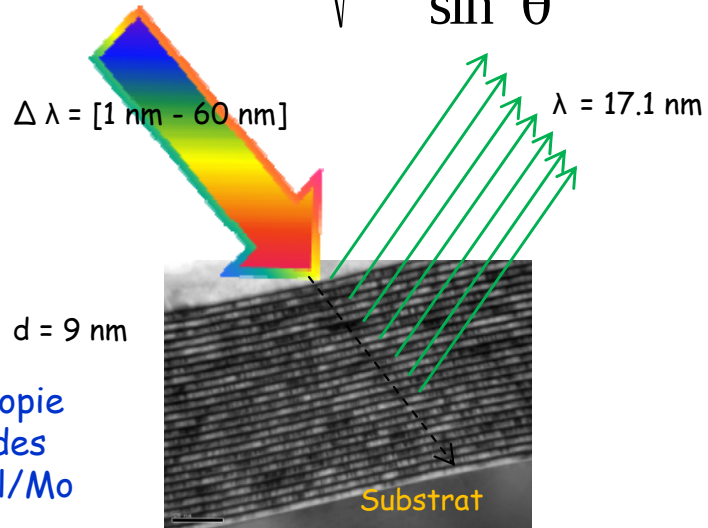
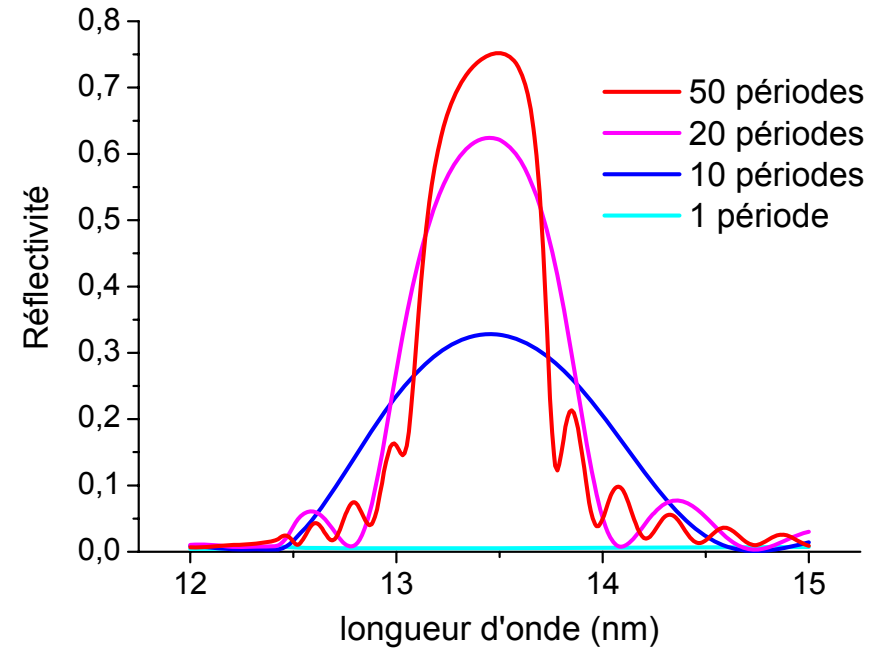
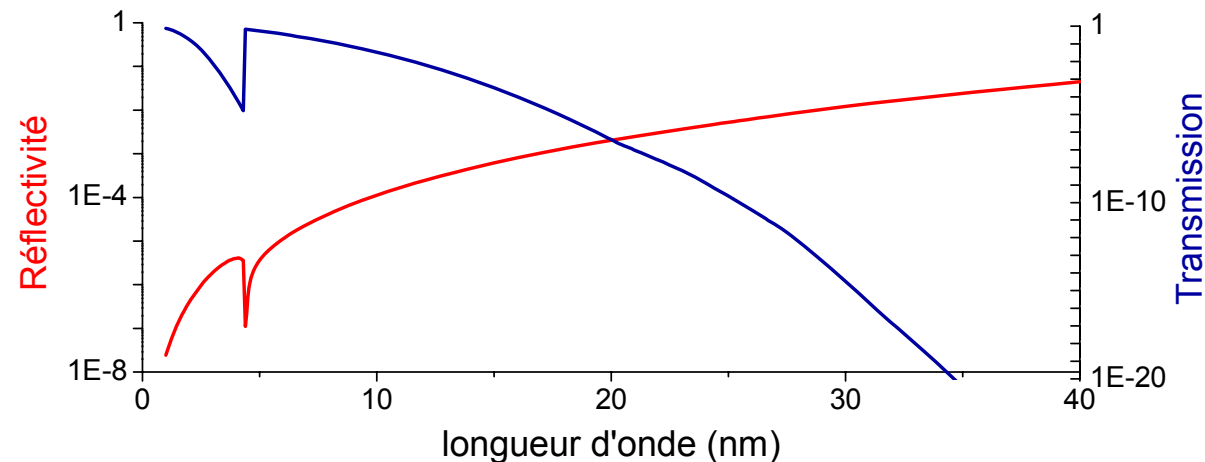


Image microscopie
électronique des
multicouches Al/Mo
&
Principe de miroirs
interférentiels



Exemple: a-C



Application Astrophysique
Sélection d'émission de
spectre solaire dans la gamme
[10 nm - 50nm]

HIGH-RESOLUTION OBSERVATIONS OF THE EXTREME ULTRAVIOLET SUN

133

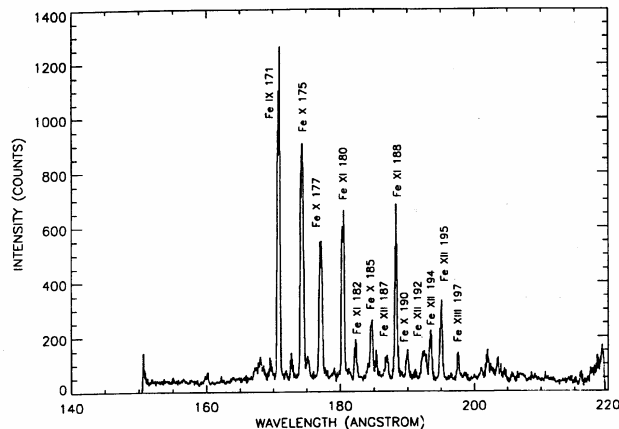


Figure 6. The GIS 151–221 Å band.

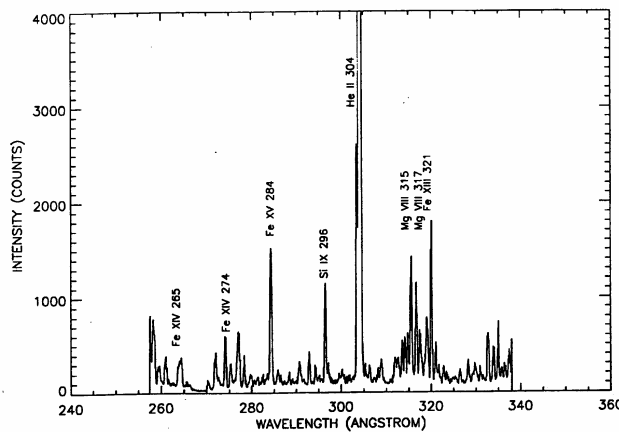


Figure 7. The GIS 256–338 Å band.

Problématique des optiques des télescopes
pour les missions spatiales

Les optiques doivent :

✓ être stable en réflectivité spectrale
durant le stockage et le temps de vol
(chaleur humide, cyclage thermique,
oxydation, ...)

dans le même temps...

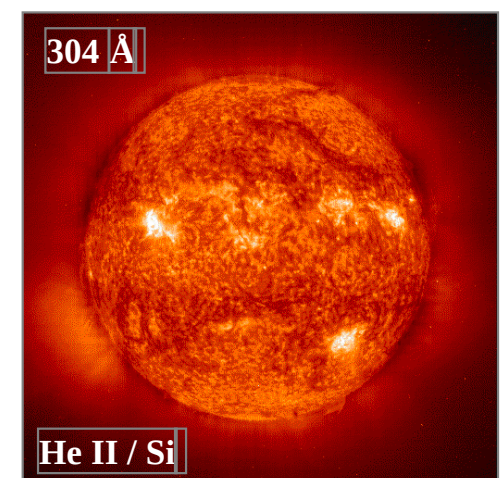
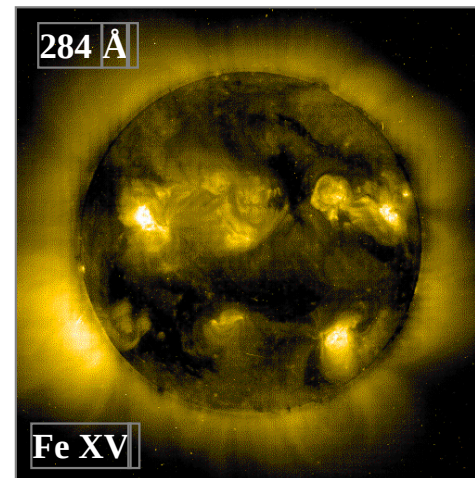
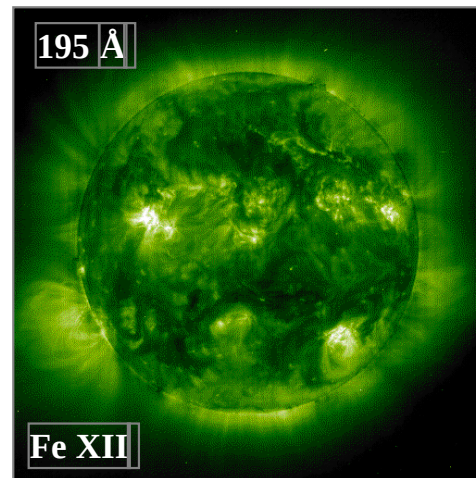
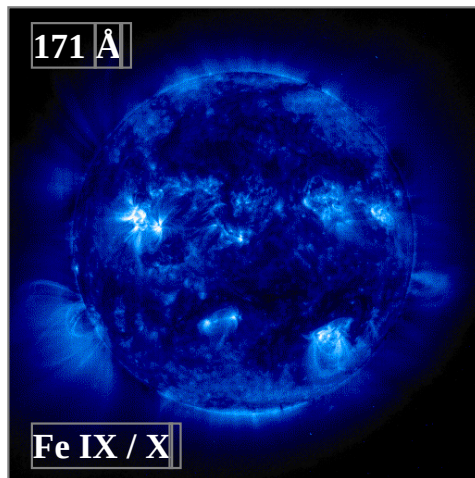
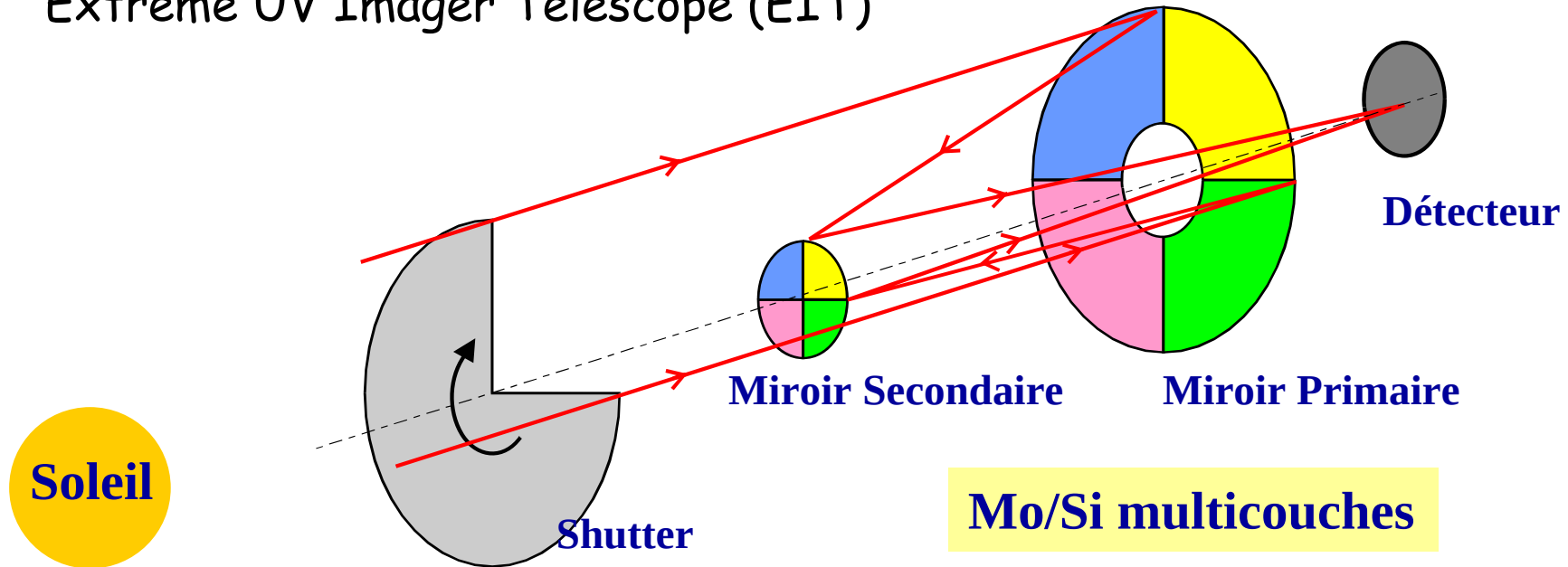
- ✓ améliorer la réflectivité
- ✓ améliorer la sélectivité spectrale
- ✓ alléger les télescopes

Motivations

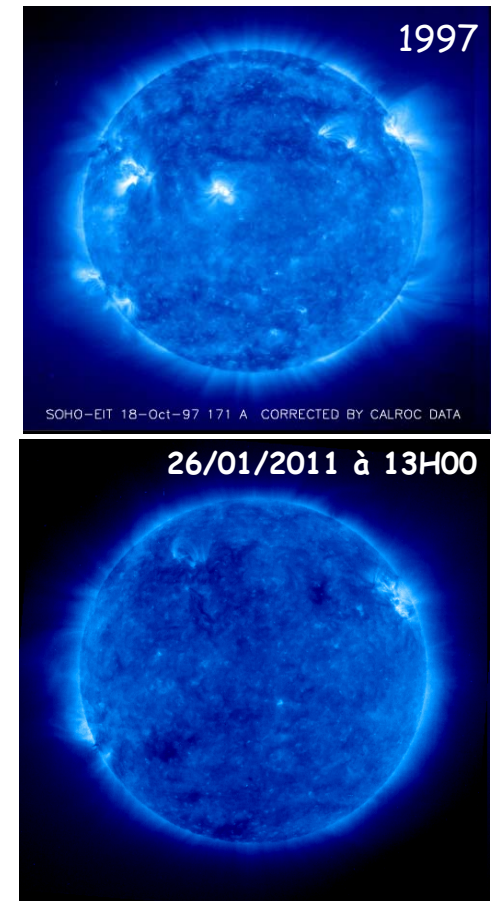
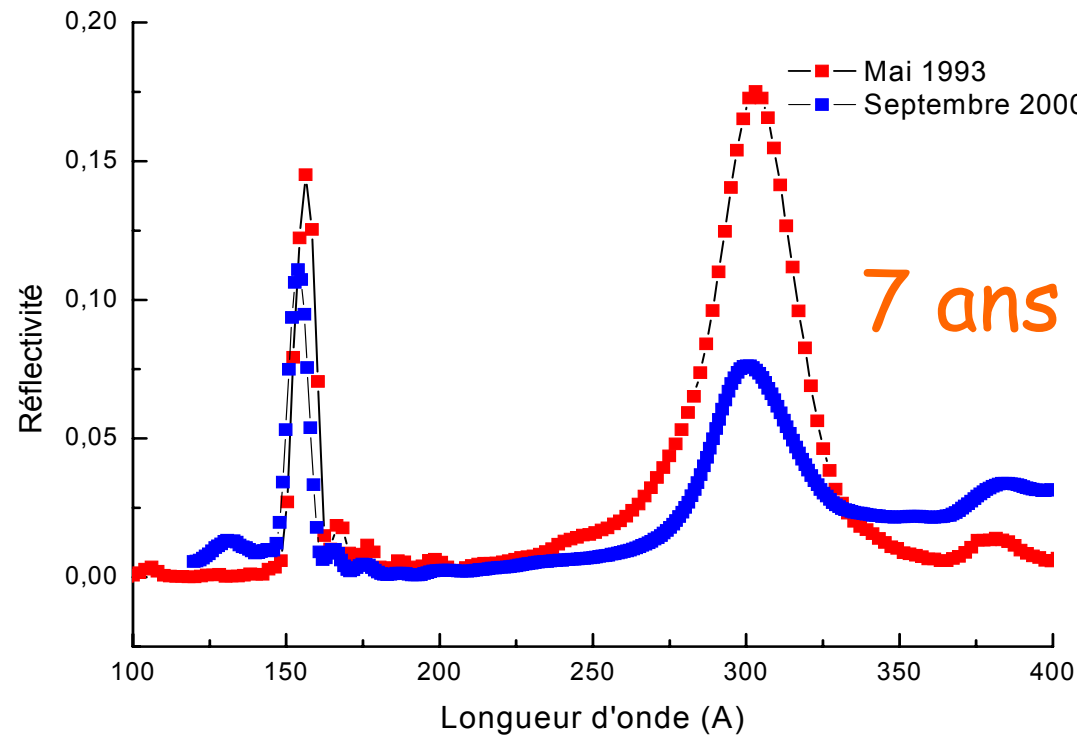
- Qualification de nouvelle structure de matériaux
- Conception, réalisation et métrologie de nouveaux miroirs

- Extrême UV pour l'imagerie solaire: Contexte
- **HERITAGE: SOHO (1995) et STEREO (2006)**
- Tri-matériaux et HECOR (2009)
- Multicouches à base d'Al: Préparation Solar Orbiter (2018 ?)
- Conclusions

Extreme UV Imager Telescope (EIT)



Échantillon témoin EIT/ SiO₂ stocké sous air



* Réflectivité mesurée sous un angle d'incidence normale 10 ° sur la ligne IAS / LURE par faisceau synchrotron SuperACO

- Oxydation du Mo sur les couches de surface
- Contamination par des hydrocarbures

Environnement en salle blanche et balayage azote

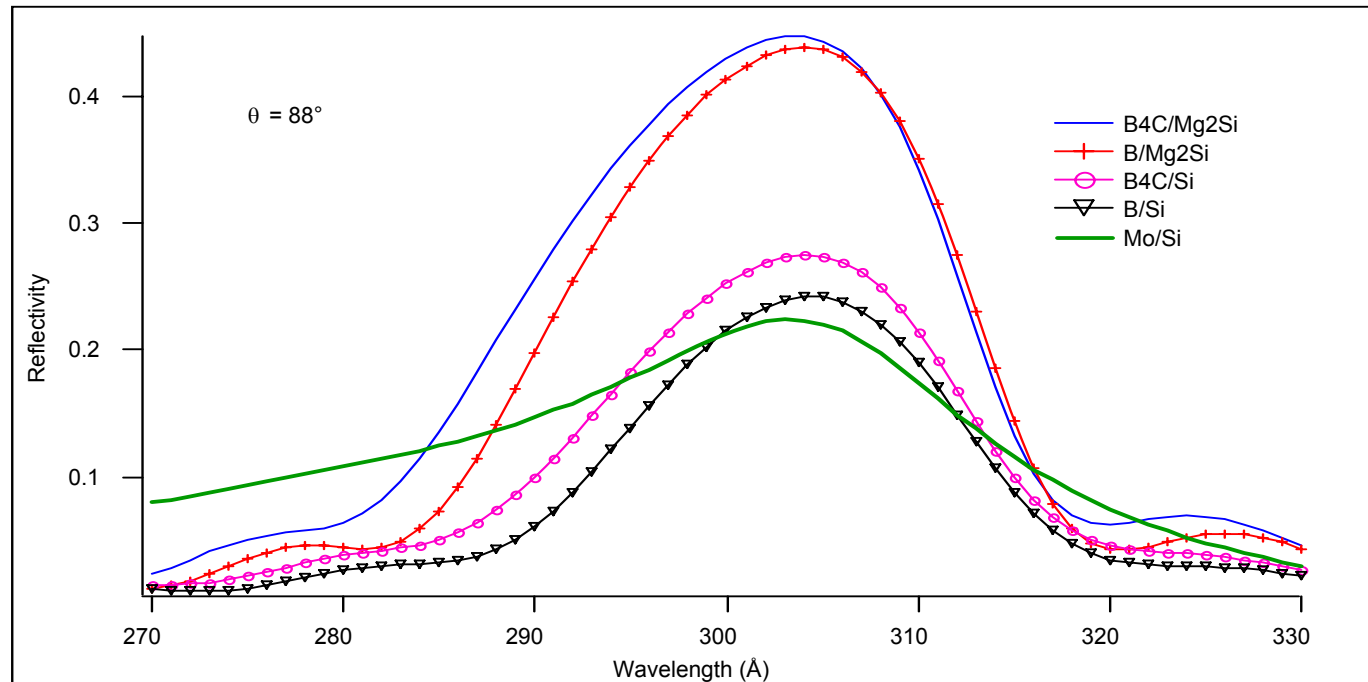


Stockage des optiques traitées et des témoins de dépôt

Transport des optiques et des témoins

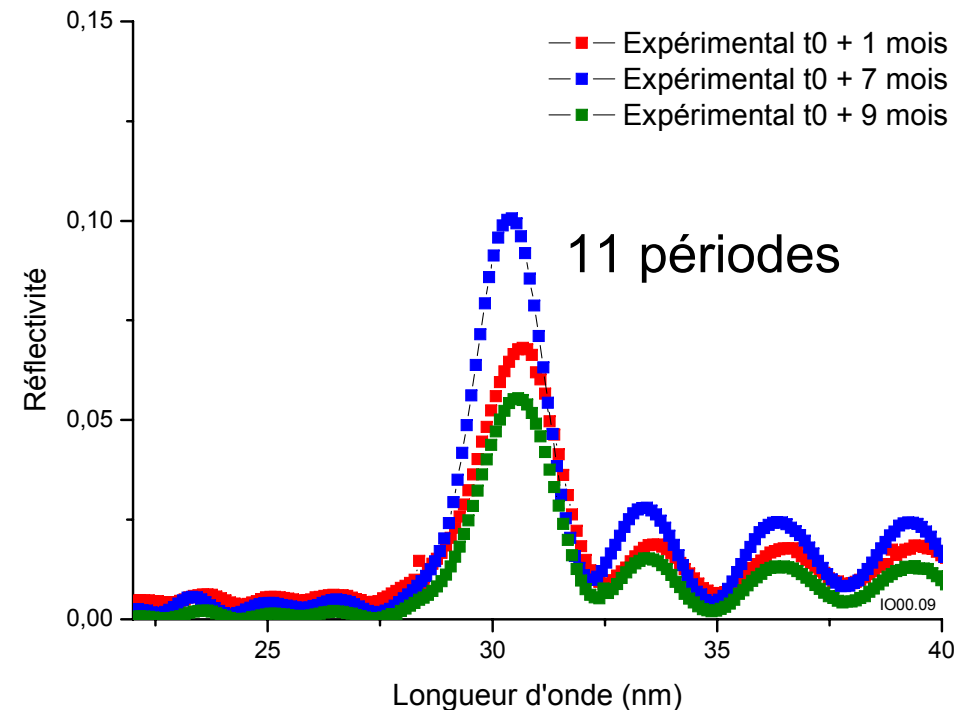
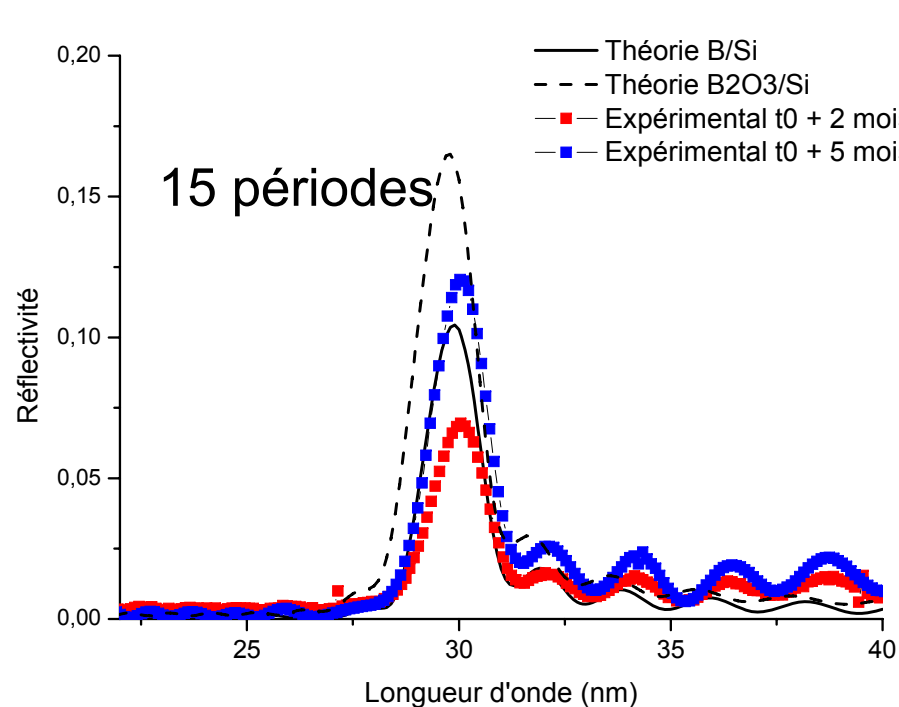


Comparaison des réflexions théoriques dans la région de 30 nm pour multicouches optimales **B/Si**, **B/Mg₂Si**, **B₄C/Si**



15 bicouches
Ratio des épaisseurs de couches optimisé

Le vieillissement de multicouches B/Si SiO₂ couche surfacique / substrat de verre



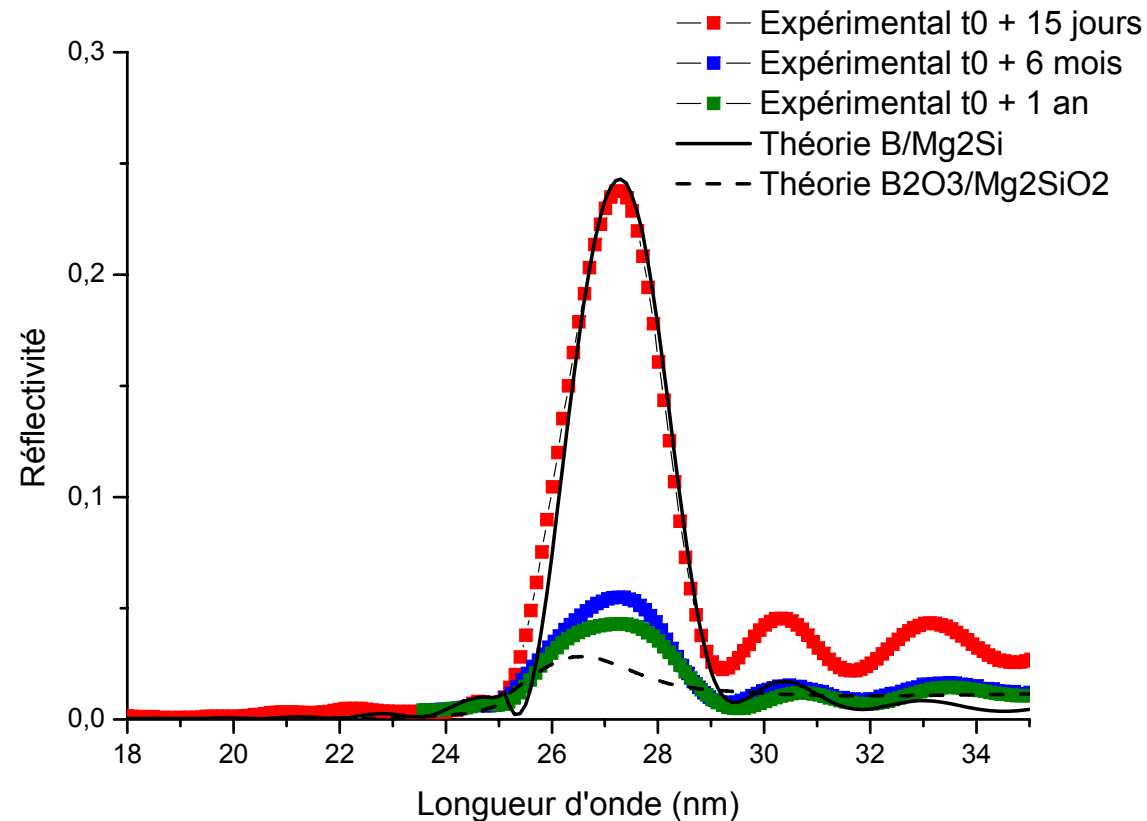
*Réflectivité mesurée sous 10° en incidence quasi normale
sous faisceau de la ligne IAS/LURE du synchrotron SuperACO

L'oxydation des couches B induit une augmentation de la réflectivité

l'oxydation de la couche supérieure du Si induit une diminution de la réflectivité

Vieillessement des multicouches B/Mg₂Si

Mg₂Si couche surfacique/11 bicouches / Mg₂Si couche tampon / substrat de verre

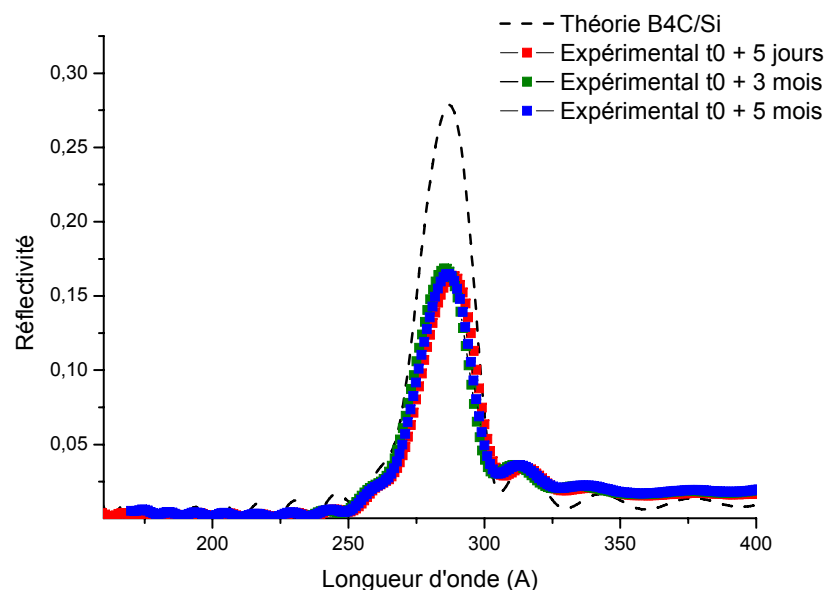


*Réflectivité mesurée sous 10° en incidence quasi normale
sous faisceau de la ligne IAS/LURE du synchrotron SuperACO

L'oxydation des couches Mg₂Si et B induit une perte de réflectivité

Vieillessement multicouches B_4C/Si

B_4C couche surfacique / 11 bicouches / Mo couche tampon / substrat de verre

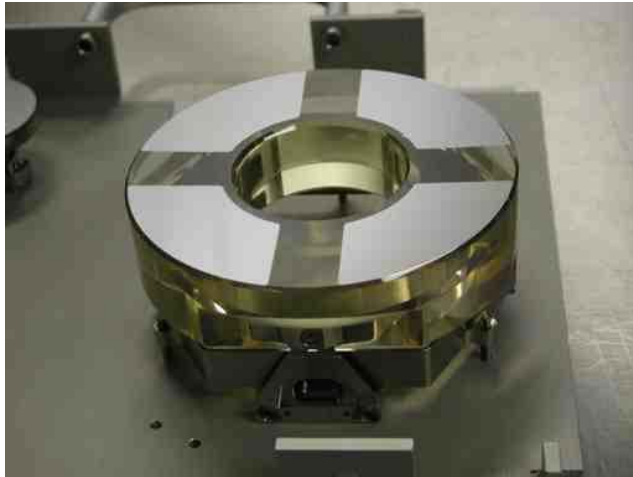


	B_4C/Si	Mo/Si
Réflectivité	+	+
Sélectivité	++	+
Stabilité	++	++
Contraintes	-	+

*Réflectivité mesurée sous 10° en incidence quasi normale
sous faisceau de la ligne IAS/LURE du synchrotron SuperACO

Grande stabilité par rapport à B/Si et B/Mg_2Si

Mission STEREO: Inspiration SOHO



Miroir primaire $\phi 105$ mm

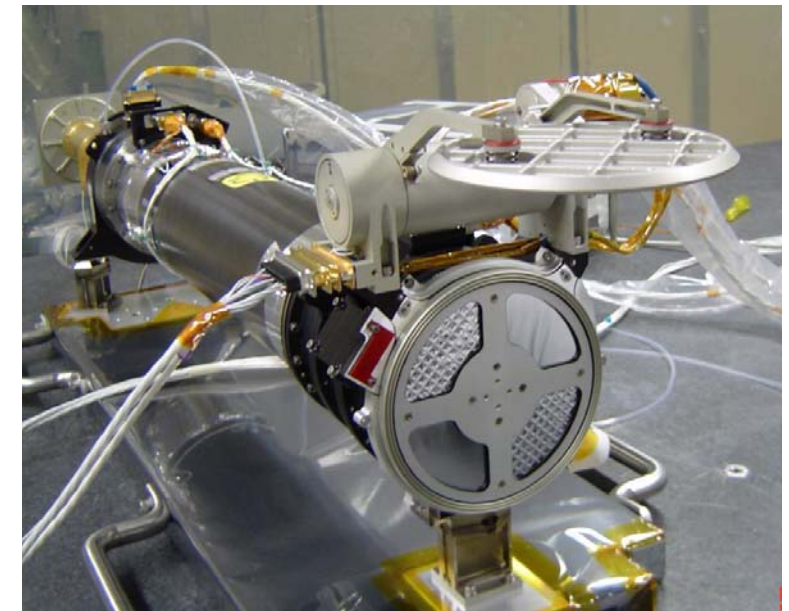
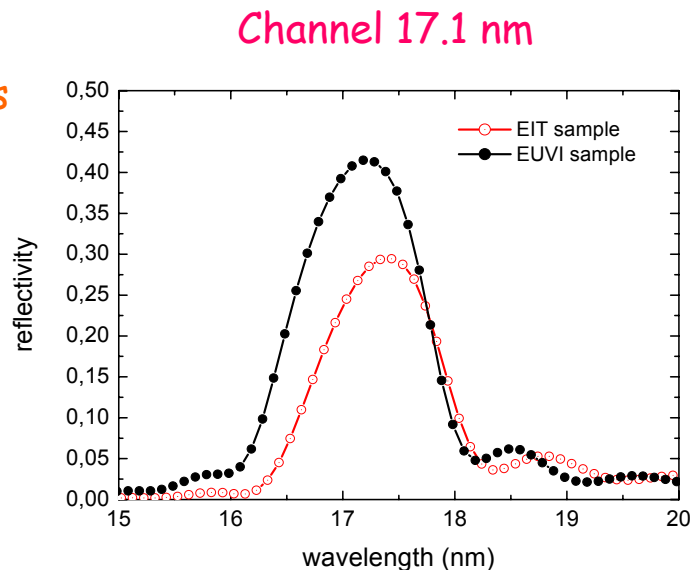


Miroir secondaire $\phi 48$ mm

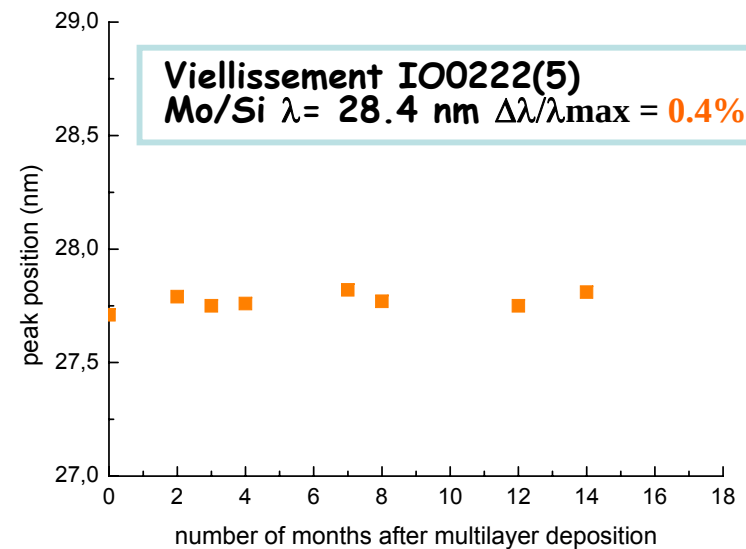
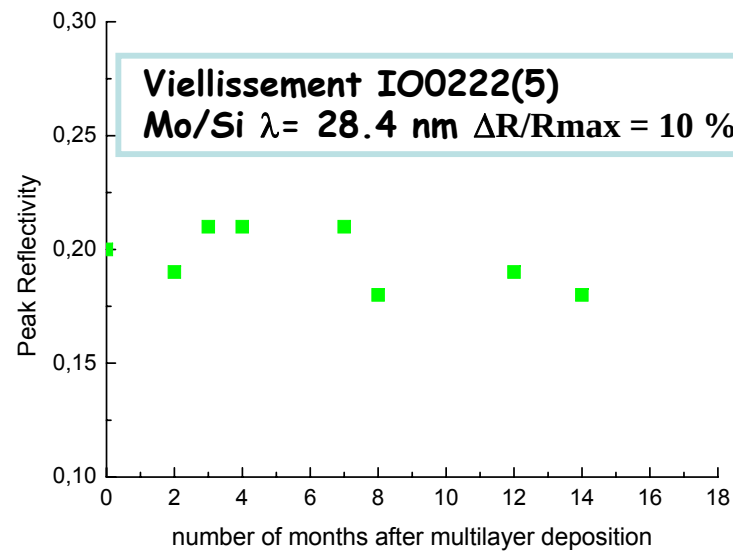
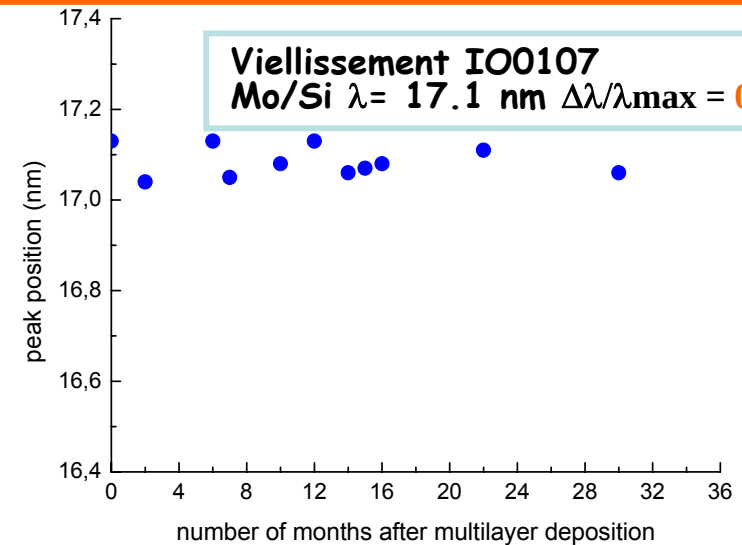
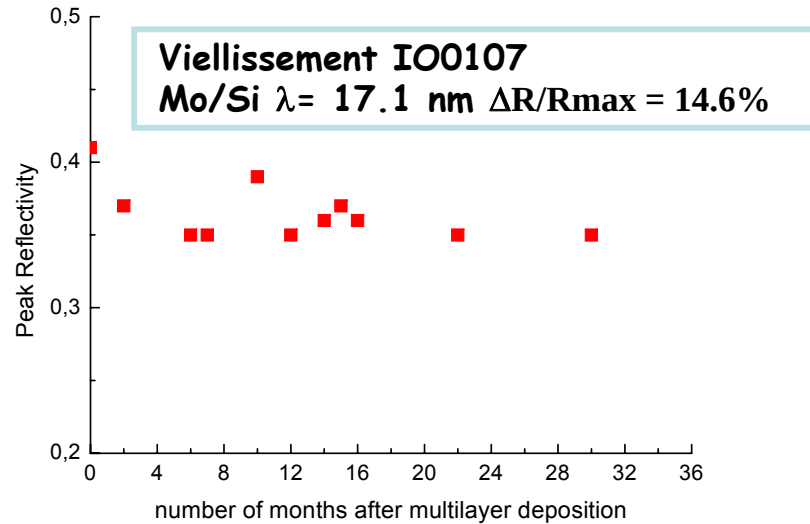
4 quadrants
 $\lambda = 17.1$ nm
 $\lambda = 19.5$ nm
 $\lambda = 28.4$ nm
 $\lambda = 30.4$ nm

Héritage de
 SOHO/EIT
 Amélioration de la
 réflectivité
 Pour STEREO/EUVI

M-F. Ravet et al.
 SPIE Proceedings
 Vol: 5250-12
 (2003)



Télescope EUVI en cours d'intégration
 au LMSAL



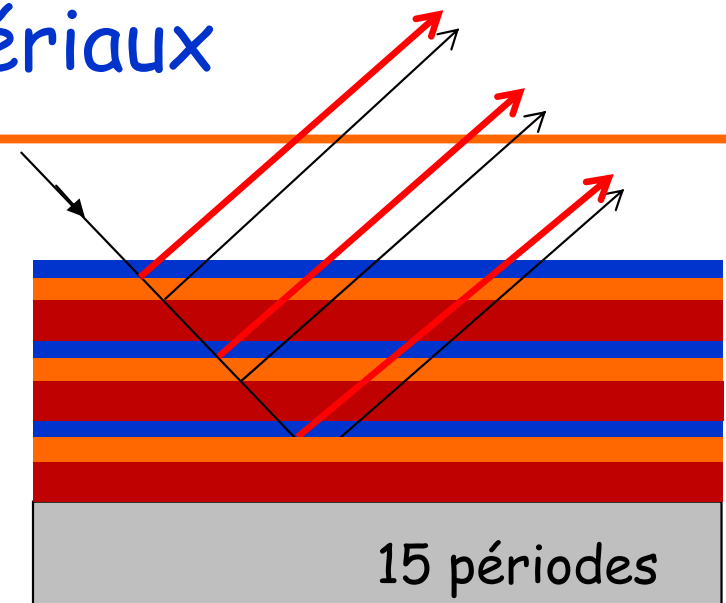
Bonne stabilité spectrale sur plus de 2 ans

- Extrême UV pour l'imagerie solaire: Contexte
- HERITAGE: SOHO (1995) et STEREO (2006)
- Tri-matériaux et HECOR (2009)
- Multicouches à base d'Al: Préparation Solar Orbiter (2018 ?)
- Conclusions

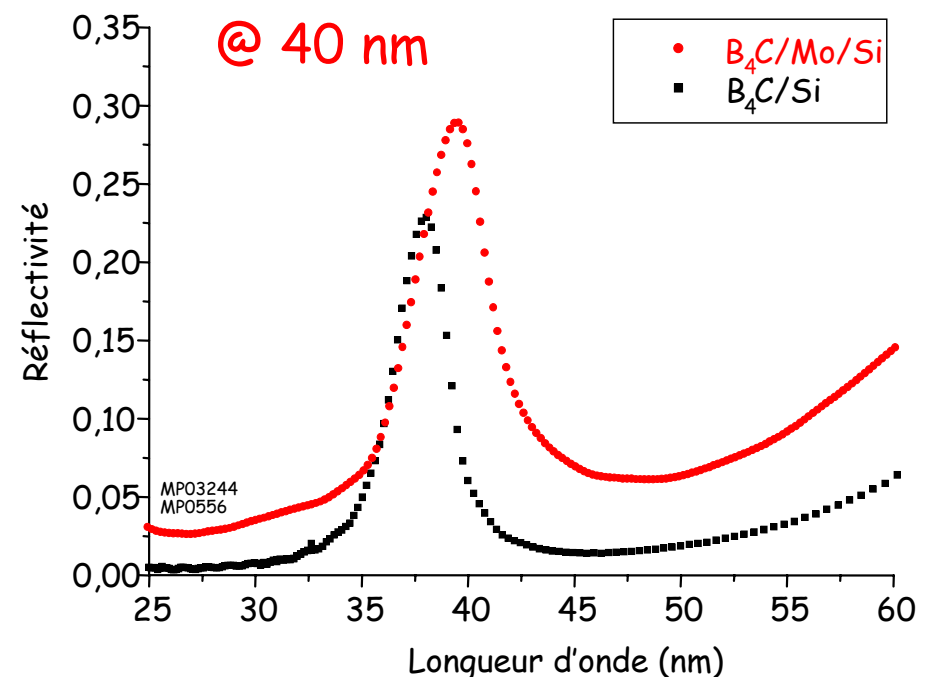
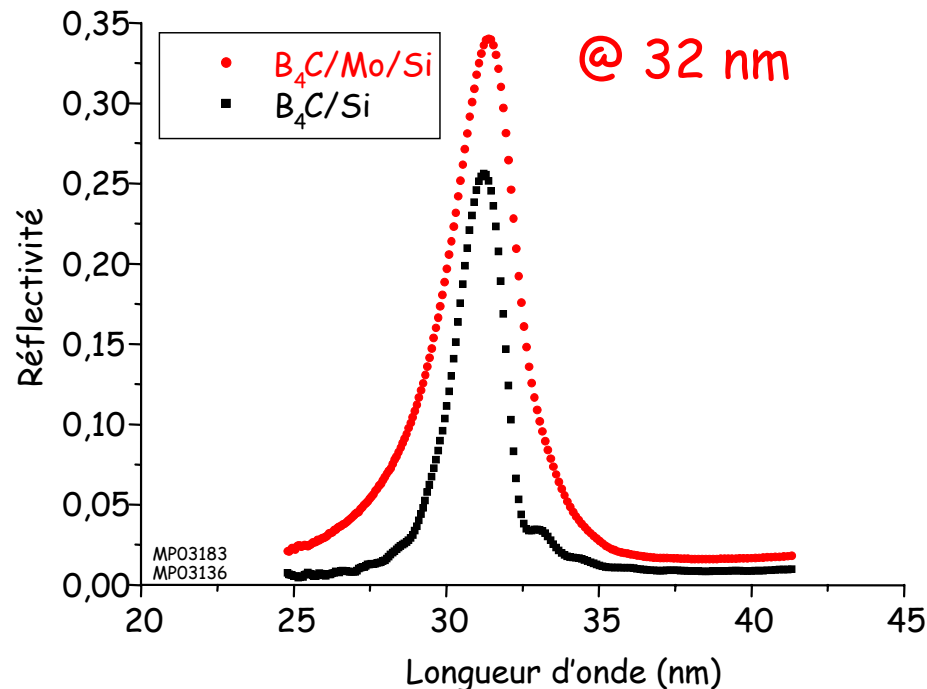
L'épaisseur de chaque matériau est optimisée pour augmenter la réflectivité

J. Gautier et al., *Applied Optics*
44, 384-390 (2005)

B_4C
Mo
Si

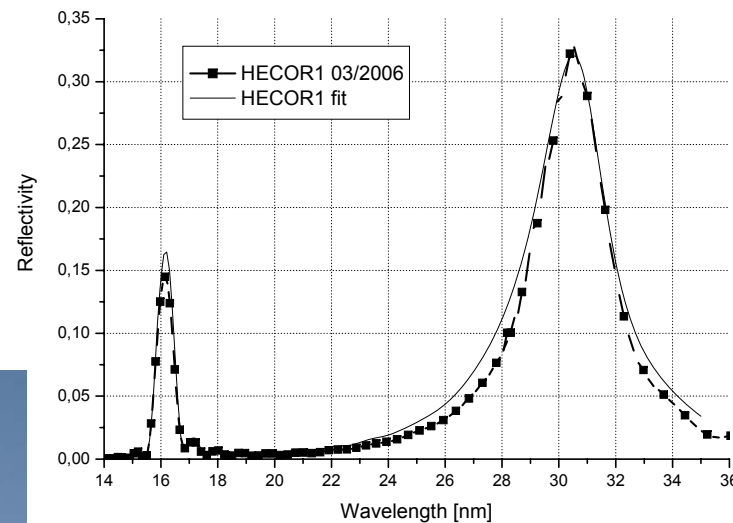


Résultats expérimentaux



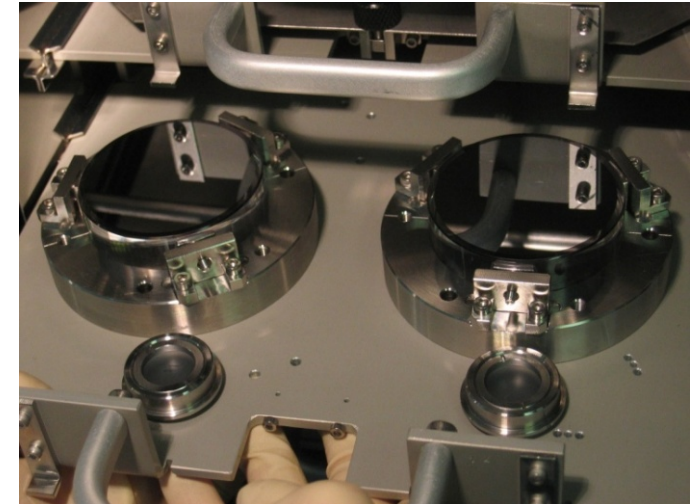
HElium CORonagraph à bord de la fusée sonde Herschel (2009)

- Coronographe avec un occulteur , géométrie hors axe
- Miroir EUV revêtu de multicouche Si/Mo/B4C optimisée à 30.4 nm



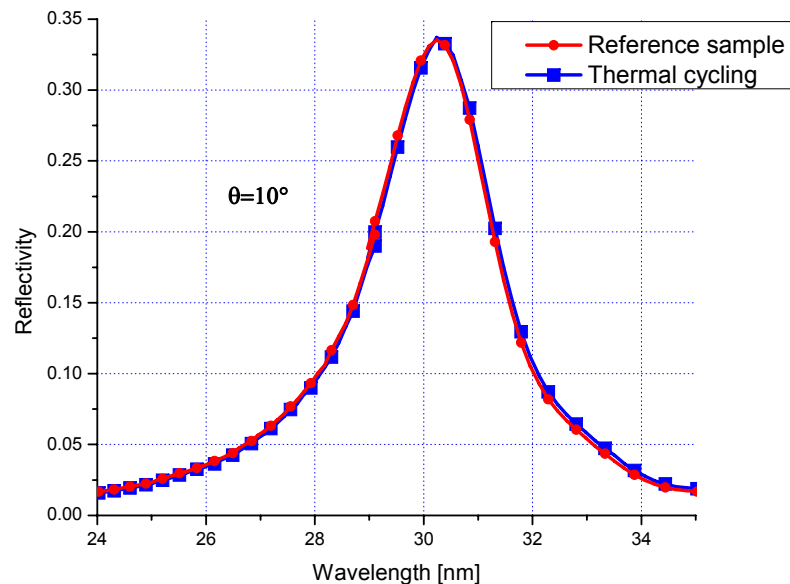
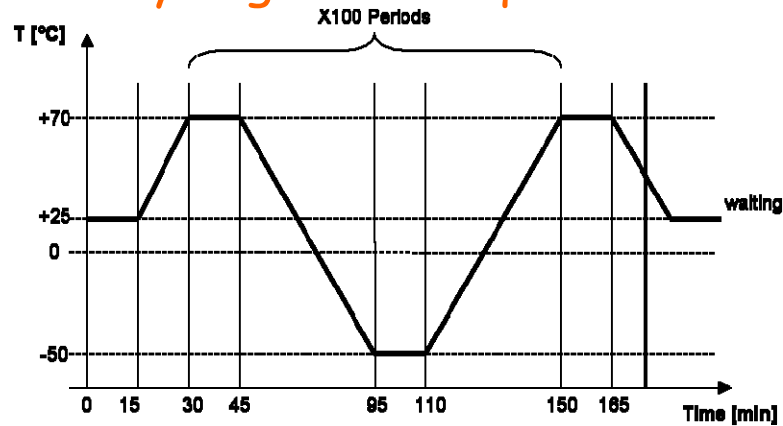
Ch. Hecquet et al.
SPIE Proceeding,
Vol: 6586 (2007)

F. Auchère et al.
SPIE Proceeding,
Vol: 6688 (2007)

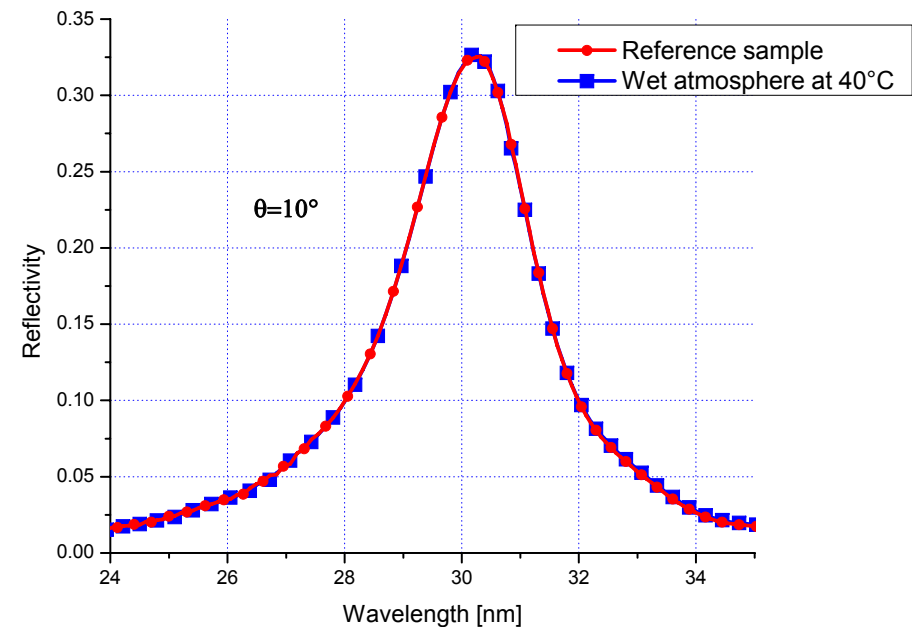


Miroirs de vol, de rechange
et deux témoins

Cyclage thermique



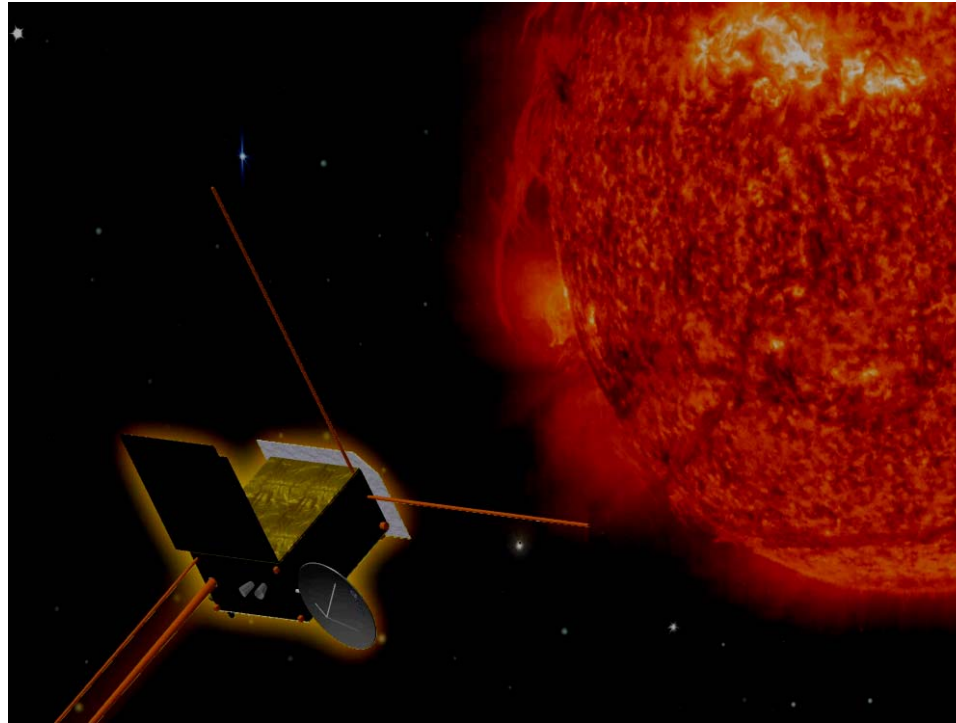
Atmosphere humide à 40°C pendant 48 h



Reflectivité inchangée après cyclage thermique et atmosphère humide

$B_4C/Mo/Si$ est très stable vis à vis des conditions de stockage

- Extrême UV pour l'imagerie solaire: Contexte
- HERITAGE: SOHO (1995) et STEREO (2006)
- Tri-matériaux: HECOR (2009)
- Multicouches à base d'Al: Préparation Solar Orbiter (2018 ?)
- Conclusions



Nouveaux Challenges → Meilleure réflectivité → **Aluminium**

Étude très proche du Soleil, jusqu'à 0.29 u.a

Très haute résolution

Exploration de régions inconnues

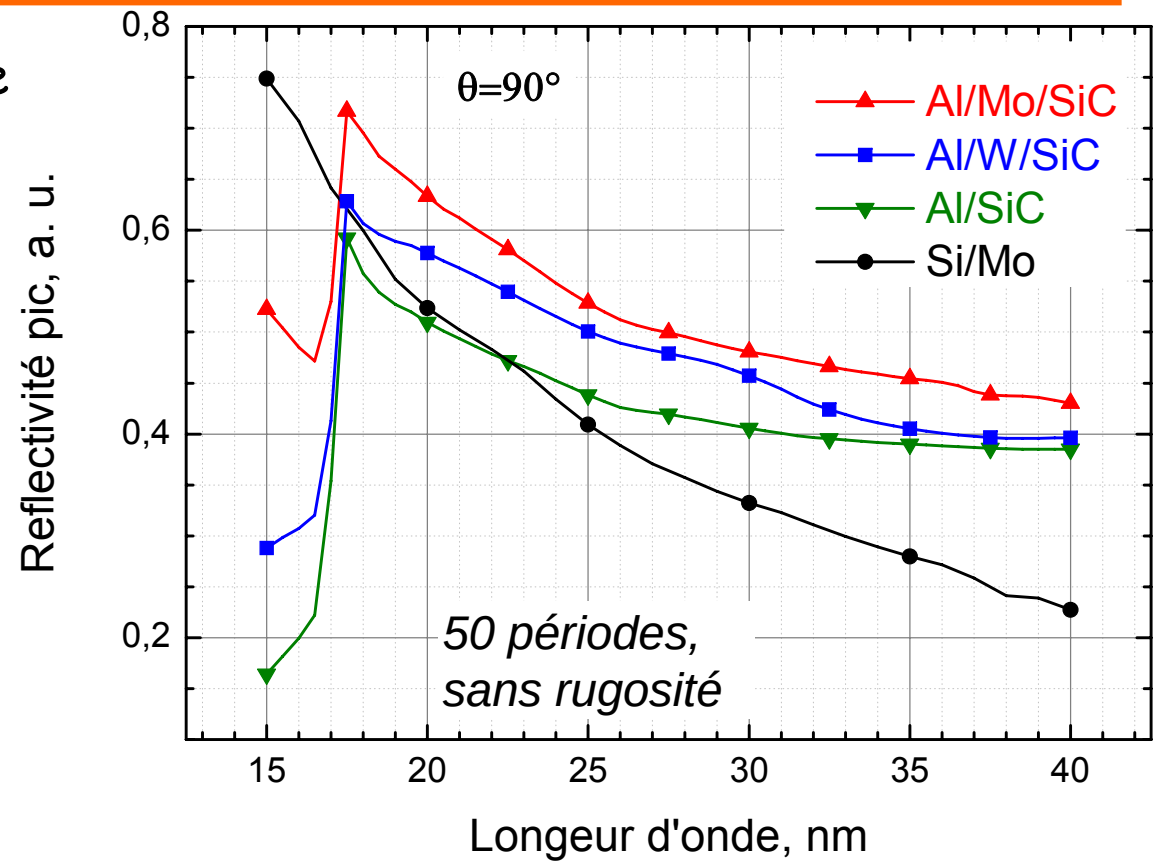
Co-rotation avec le Soleil

Images du Soleil autour des régions polaires à des latitudes de 30°

Multicouches à base d'Al (MP800)

- Réflectivité théorique plus élevée
- Nombre de périodes réduit
=> moins de rugosité

Pulvérisation cathodique
magnétron RF/DC - 4 cibles



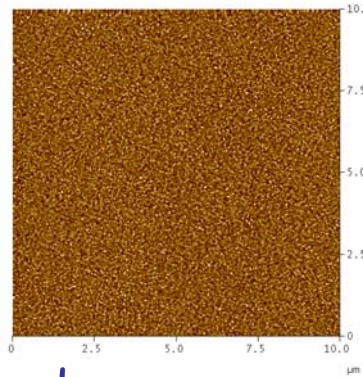
Plus forte réflectivité des
multicouches à base d'Al dans la
gamme spectrale [17 nm - 40 nm]

Le double effet « tri-matériau »

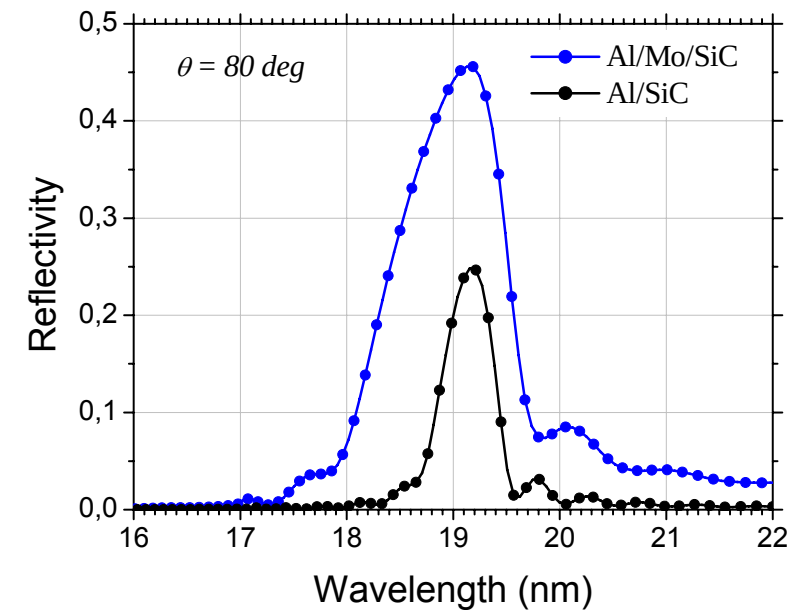
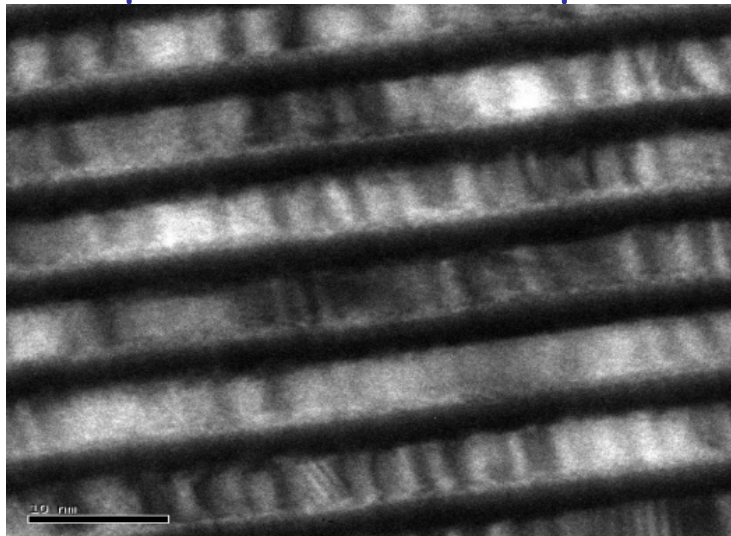
☹ Al/SiC

Rugosité ≈ 1.2 nm rms

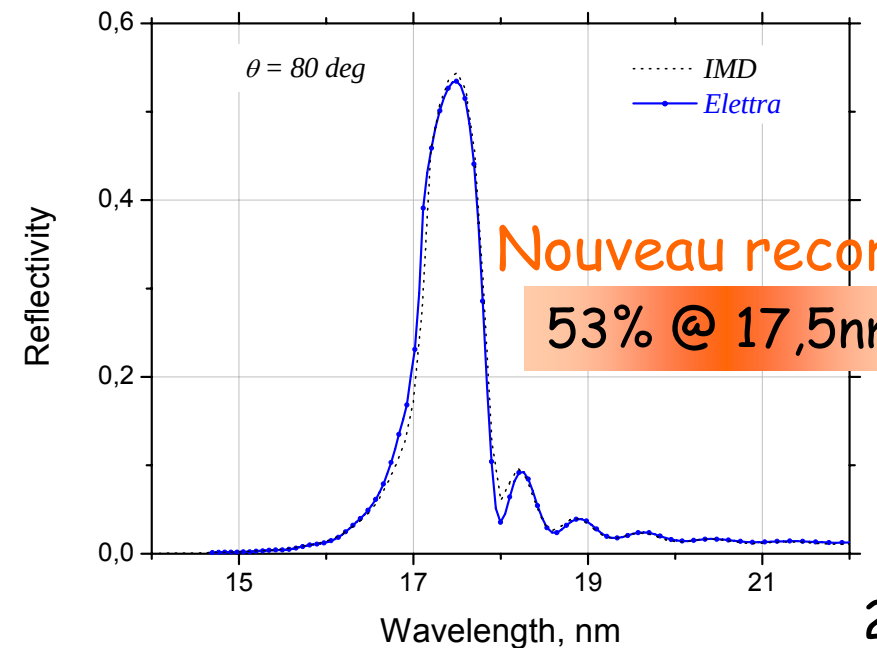
Cristallisation des
couches Al



😊 Al/Mo/SiC + optimisation des
paramètres de dépôt



Al/Mo/SiC, $d=8.7$ nm, $N=25$

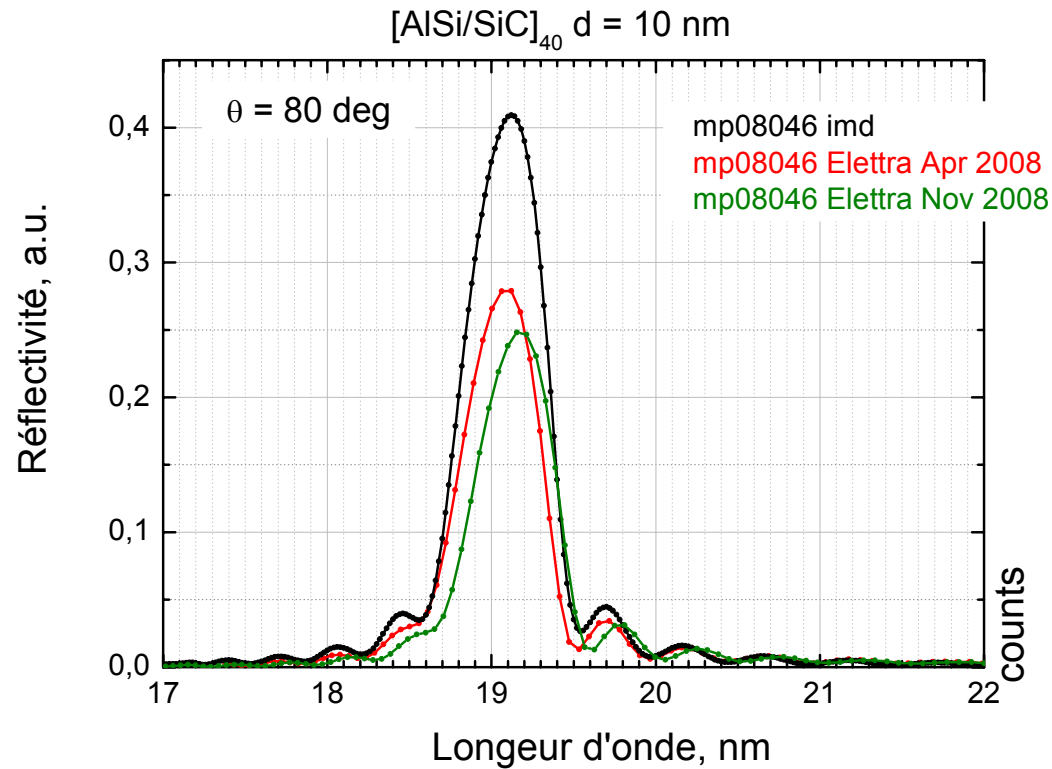


Nouveau record

53% @ 17,5nm

E. Meltchakov et al., Appl. Phys. A98, 111 (2010)

M-H Hu, OE 18, 20019 (2010)



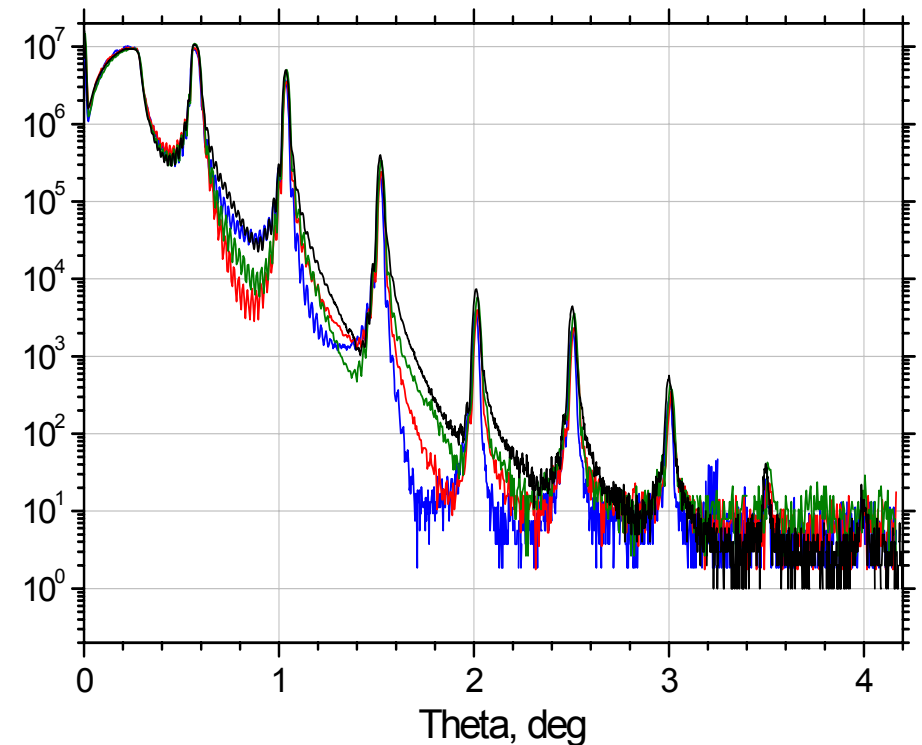
PROBLEMES :

- Forte rugosité
- Oxydation de la surface ?
- Stabilité des interfaces ?

Réflectométrie rayons x en incidence rasante XRR@ 0.154

P08123 nm

— Al/Mo/SiC N=20 d=9nm (Al: 150W Jul 2008 GRX1)
— Al/Mo/SiC N=20 d=9nm (Al: 150W Apr 2009 GRX1)
— Al/Mo/SiC N=20 d=9nm (Al: 150W Feb 2010 GRX1)
— Al/Mo/SiC N=20 d=9nm (Al: 150W Jan 2011 DISCO)



Étude comparative
Pulvérisation cathodique
et par faisceau d'ions

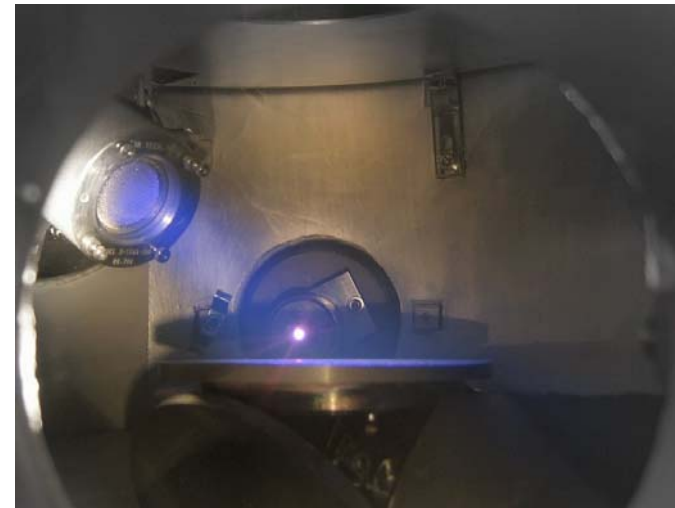
Pulvérisation par faisceau d'ions - 3 cibles



En salle blanche classe 1000

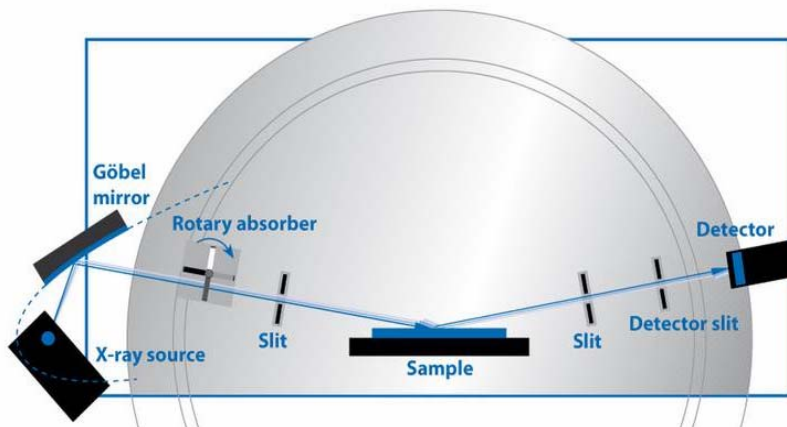
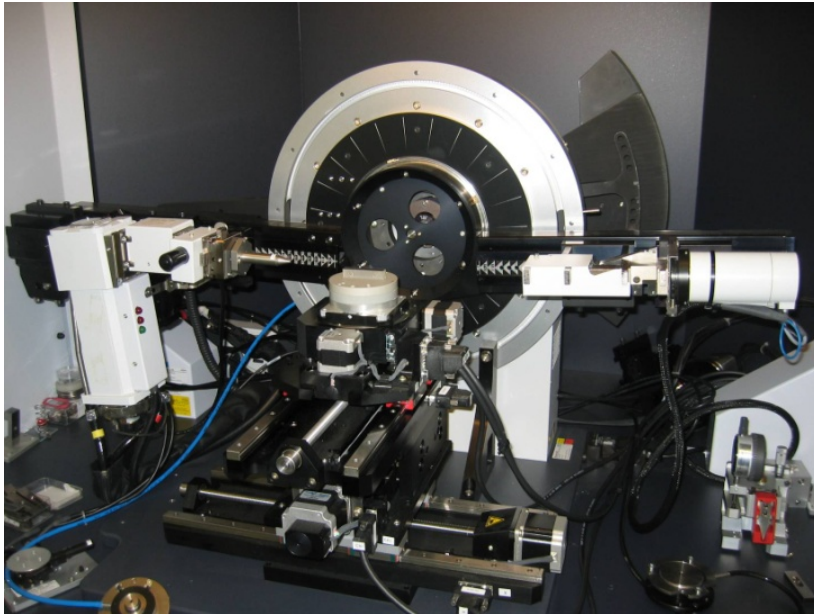
Utilisation de l'héritage !

Optimisation du dépôt d'Al
(faisceau d'ions, angle de
pulvérisation...)

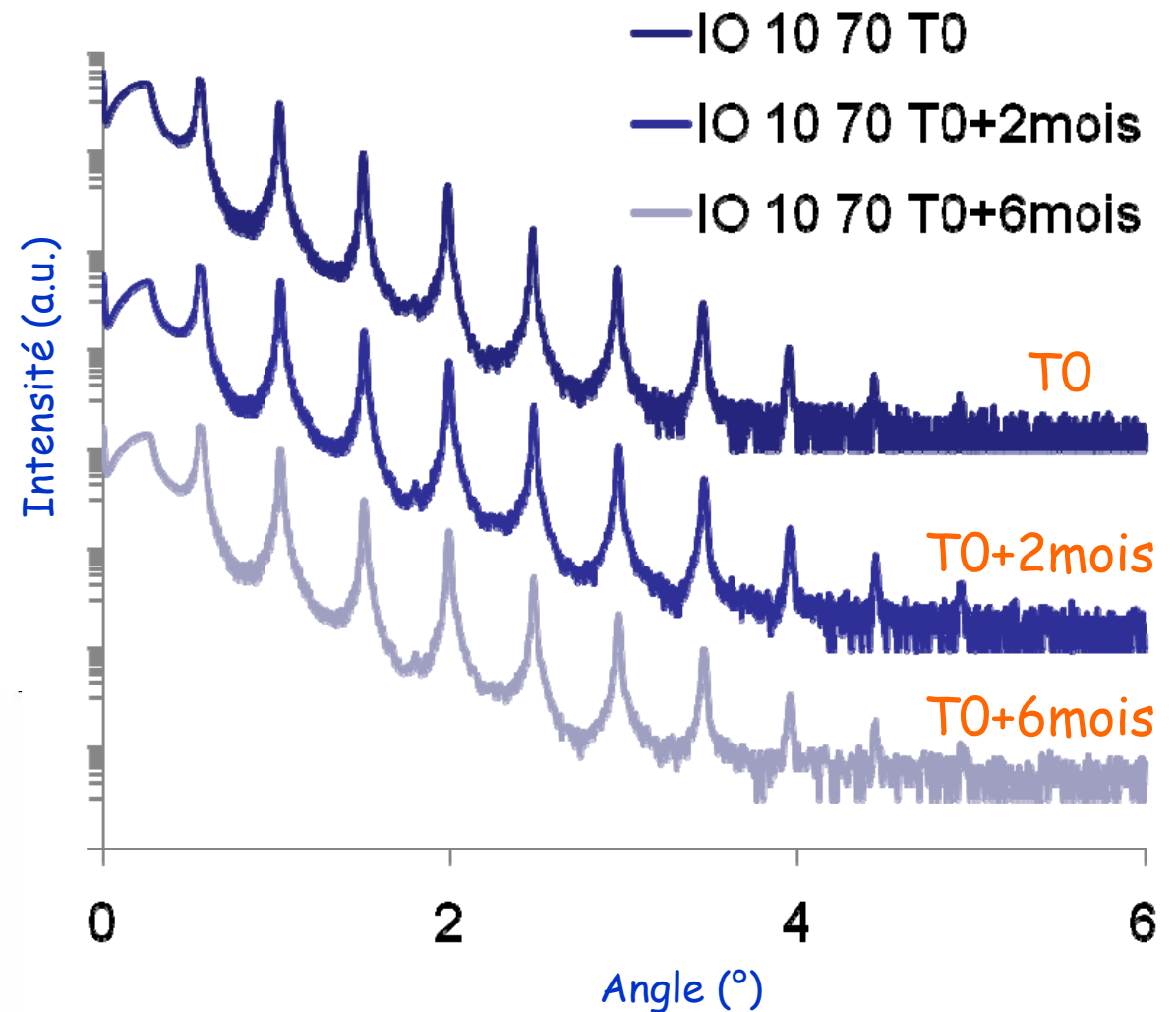


Voir Poster A. Ziani et coll.

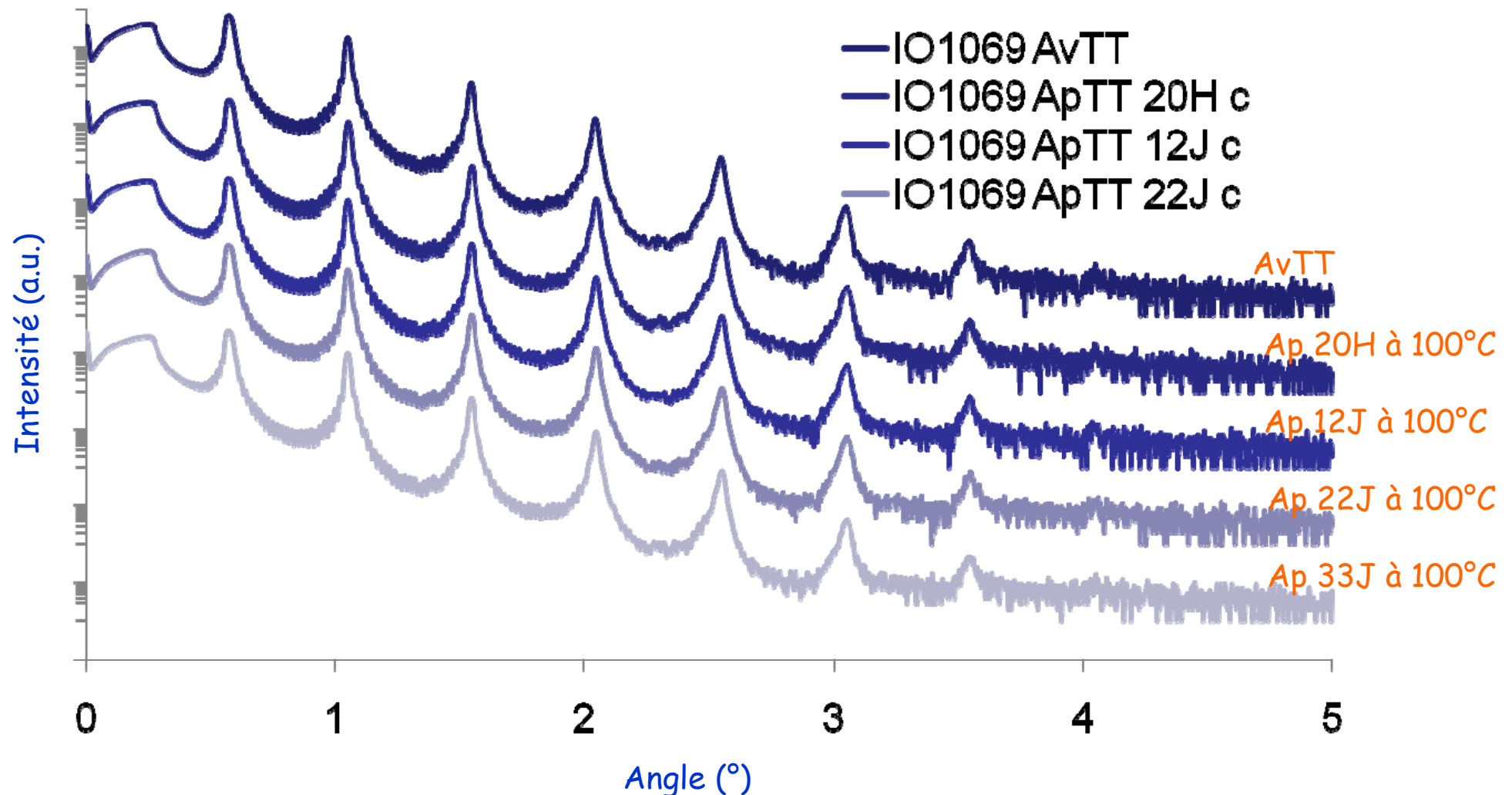
Réflectométrie rayons x en
incidence rasante
@ 0.154 nm



Stabilité temporelle $ML[Al/Mo/SiC]_{25}$



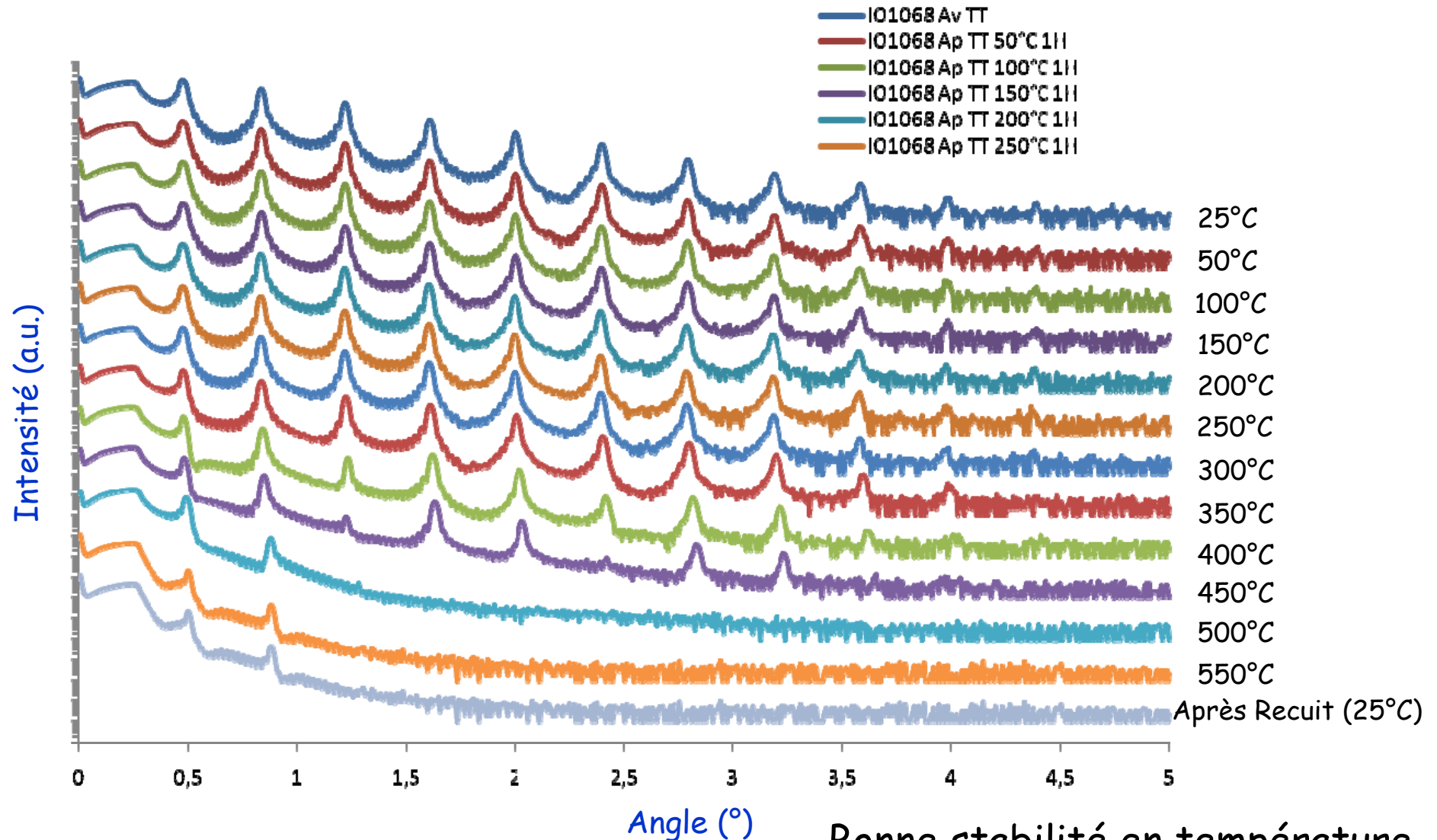
Positions des pics conservées !
Très bonne stabilité temporelle



ML [Al/Mo/SiC]₂₅ Recuit à 100 °C sous air

Très bonne stabilité malgré une très légère baisse de l'intensité du premier pic de diffraction dû à une probable oxydation en surface

Stabilité en température $ML[Al/Mo/SiC]_{25}$: mesures XXR in situ



Bonne stabilité en température
Jusqu'à 350°C

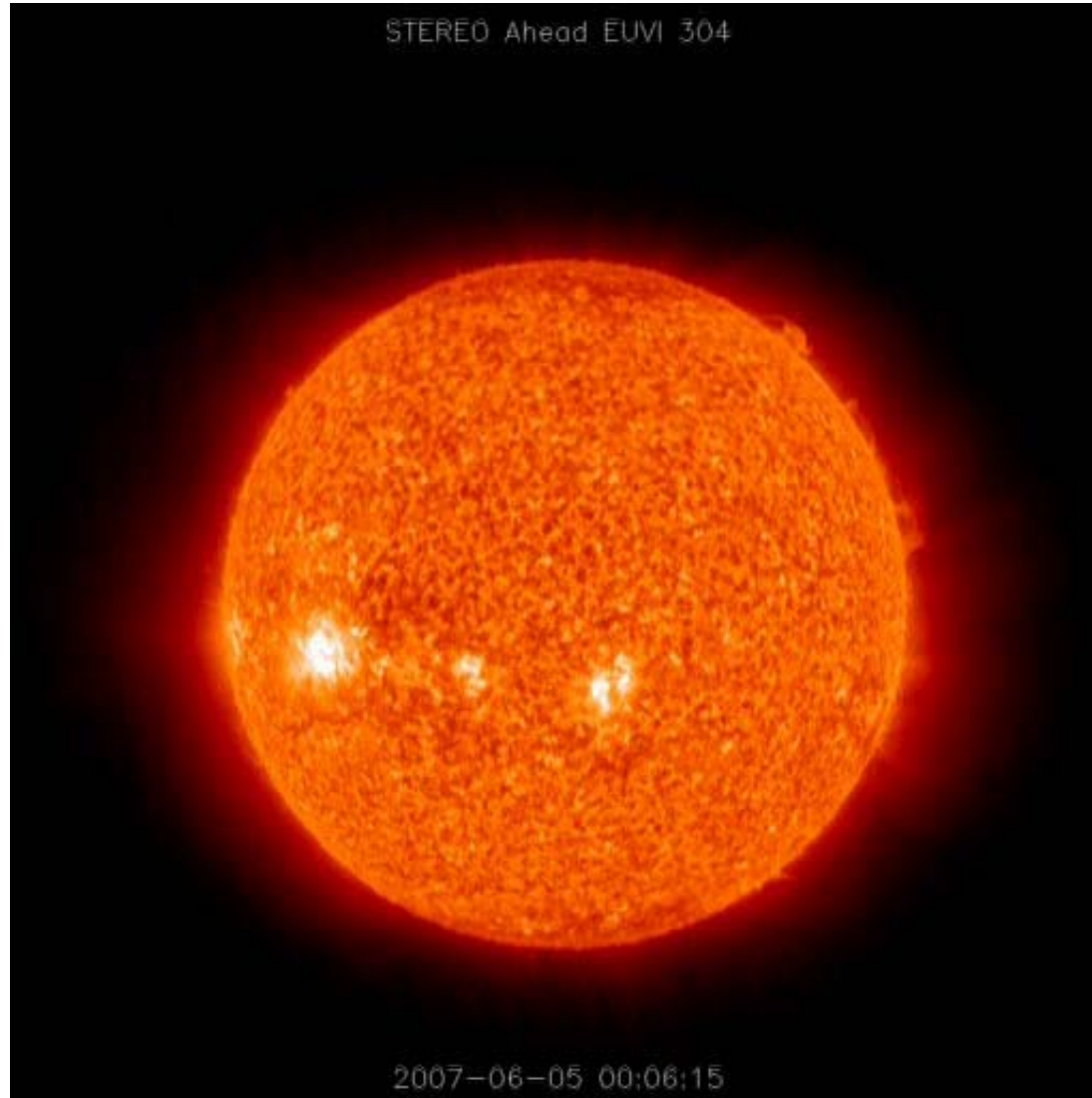
- Extrême UV pour l'imagerie solaire: Contexte
- HERITAGE: SOHO (1995) et STEREO (2006)
- Tri-matériaux: HECOR (2009)
- Multicouches à base d'Al: Préparation Solar Orbiter (2018 ?)
- Conclusions

Évolution de la stabilité:

- Meilleures qualités de dépôt (technique de dépôt)
- Meilleurs compréhensions des sources de dégradations des multicouches (stockage, couche d'encapsulation, couches barrières...)

Évolution de la réflectivité :

- Plus forte réflectivité (nouveaux matériaux, nouvelles des structures, optimisation des paramètres de dépôt...)
- Exemple de la longueur d'ondes 17.1 nm:
 - Héritage: 30% Si/Mo Évaporation par canon d'ions (SOHO),
41% Si/Mo Pulvérisation par faisceau d'ions (STEREO),
 - Aujourd'hui: 53% Al/Mo/SiC Pulvérisation cathodique (SOLAR ORBITER)
47.5% Al/Mo/SiC Pulvérisation par faisceau d'ions



Remerciement pour les anciens de l'équipe XUV:

Marie-Françoise Ravet

Julien Gautier

Christophe Hecquet



M. Rouillay



A. Giglia, N. Mahne,
S. Nannarone



K. Gasc et coll.



F. Auchère, X. Song
et coll.