Effet de la contamination gazeuse de l'environnement sur la lubrification sèche dans les applications spatiales

M. DHIEB [a], J. SICRE [b], C. LEBRETON [c], C. TRIBILLON [c], G. COLAS [a], JB. SANCHEZ [a]

[a] Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France, [b] CNES, 31401 Toulouse, France , [c] ADR Alcen, 77810 Thomery, France

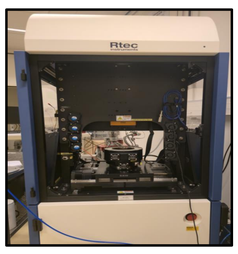
CONTEXTE & OBJECTIF

Le MoS2 est largement utilisé comme lubrifiant solide dans les mécanismes spatiaux. Ses performances tribologiques sont fortement influencées par l'environnement gazeux, aussi bien lors des opérations au sol que sous vide.

- Étudier l'influence de l'humidité, de la contamination moléculaire et du niveau de vide sur le frottement, l'usure et le comportement tribologique du MoS2.

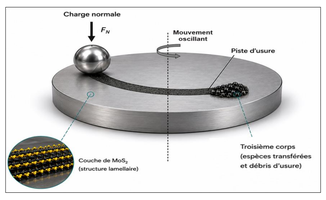
Essais au sol : Simulation des conditions d'assemblage et nettoyage en salle blanche

1. Dispositif et conditions expérimentales

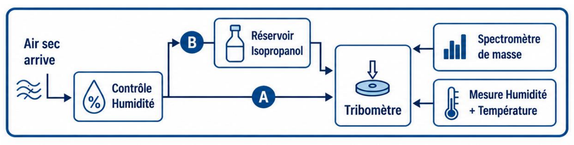


MFT 5000

- **Bille :** 440C
- **Disque :** MoS2 (PVD)
- **Charge :** 2 N
- **Contact :** oscillant
- **Durée :** 1000 cycles
- **Vitesse :** 16 rpm



- **L'isopropanol a été retenu en raison de son utilisation courante lors des opérations de montage et de nettoyage des mécanismes spatiaux.**

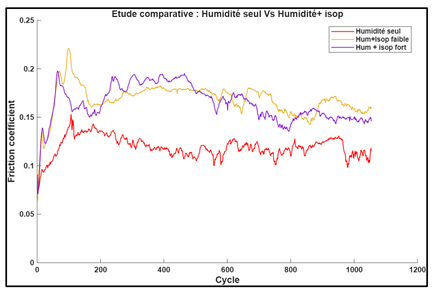


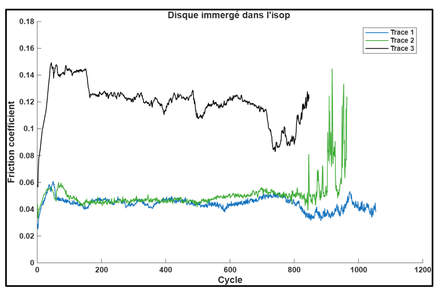
Environnements étudiés

A	**Option A** Humidité seule (50 ± 5 % ; T amb = 21–23 °C)	Air avec humidité contrôlée
B1	**Option B1** Humidité (50 ± 5 %) + Isopropanol faible quantité	Vapeur d'isopropanol (faible quantité), Isop + fibre
B2	**Option B2** Humidité (50 ± 5 %) + Isopropanol forte quantité	Vapeur d'isopropanol (forte quantité), Isop + fibre, Platine chauffante T = 40 °C
C	**Option C** Disque immergé dans l'isopropanol pendant 5 s (puis séchage à l'air, RH = 50 ± 5 %)	Disque immergé dans l'isopropanol (5 s)

Analyses post-essais : MEB / EDX · Spectroscopie Raman · XPS

2. Résultats tribologiques





Effet de l'isopropanol :

- **Air + IPA:** endommagement plus important → interaction de l'IPA avec le MoS2 pouvant perturber son mécanisme de lubrification et augmenter l'endommagement.

- 1 — IPA piégé dans les pores → faible μ
- 2 — L'IPA commence à s'évaporer → μ augmente
- 3 — Évaporation totale de l'IPA → comportement proche de l'humidité seule

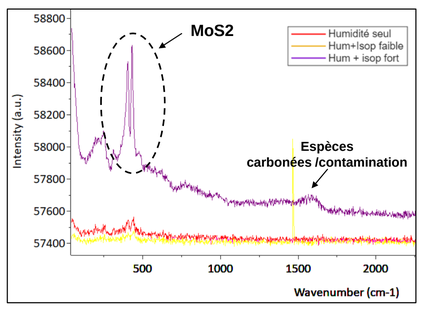
- L'IPA pourrait perturber le mécanisme de lubrification et la stabilité du troisième corps.

3. Analyses de surface

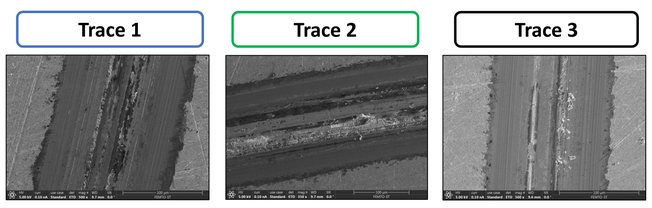
❖ Effet de l'isopropanol :



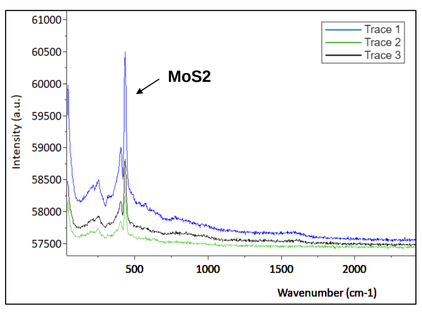
Spectres Raman des traces d'usure



❖ Disque immergé dans l'isopropanol :



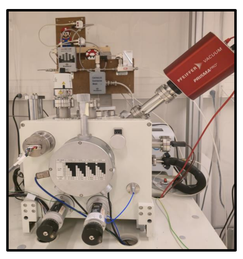
Spectres Raman des traces d'usure



- **Toutes les traces sont dégradées**, malgré un faible frottement pour les traces 1 et 2.
- **Trace 3 : morphologie différente de l'humidité seule**, malgré un coefficient de frottement similaire.

Essais sous vide : conditions représentatives de l'environnement spatial

1. Dispositif et conditions expérimentales

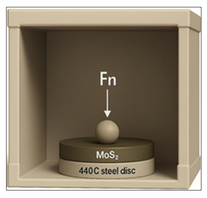


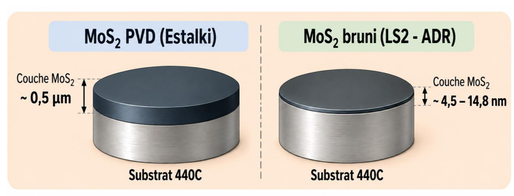
TRIBO-SPIN

- **Bille :** 440C
- **Disque :** MoS2 (PVD/LS2)
- **Charge :** 2 N
- **Contact :** oscillant
- **Durée :** 500 cycles
- **Vitesse :** 8 rpm

Environnements étudiés

- **N2**
- **10^{-7} mbar**
- **10^{-6} mbar**
- **10^{-5} mbar**



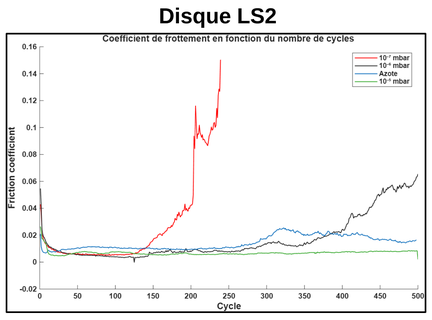




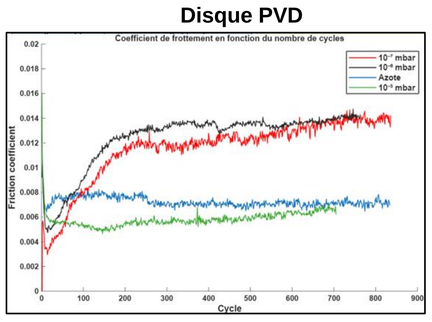
Analyses post-essais : MEB / EDX · Spectroscopie Raman · XPS

2. Résultats tribologiques

Disque LS2



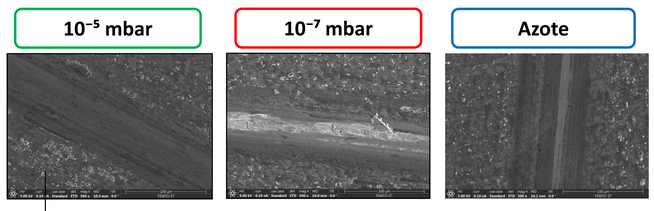
Disque PVD



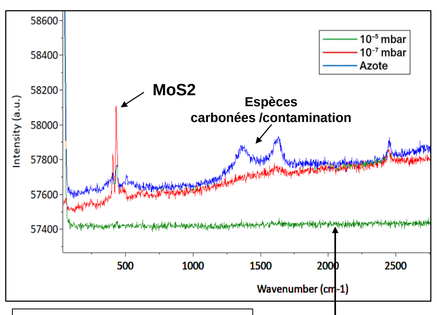
- **Sous N_2 :** meilleur comportement tribologique → les molécules de N_2 pourraient s'intercaler entre les couches de MoS2, facilitant leur glissement. **Simulation de dynamique moléculaire en cours** pour étudier ce mécanisme.
- **A 10^{-5} mbar :** bonnes performances → présence d'espèces résiduelles/carbonées pouvant participer à la formation ou à la stabilisation du tribofilm. **Analyses XPS en cours** pour identifier ces espèces.
- **A 10^{-7} mbar :** frottement plus élevé → moins d'espèces gazeuses disponibles → troisième corps moins stable / lubrification moins efficace.
- **LS2 et PVD** montrent la même tendance → l'effet semble principalement lié à l'environnement du contact, plutôt qu'au procédé de dépôt.

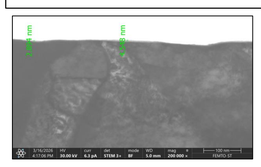
3. Analyses de surface

❖ Disque LS2 :

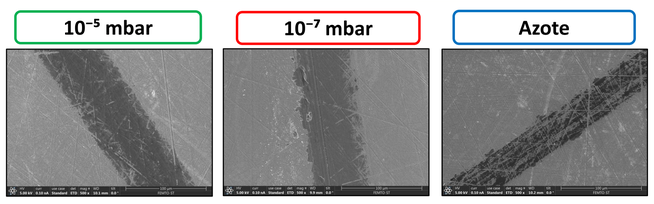


Spectres Raman des traces d'usure

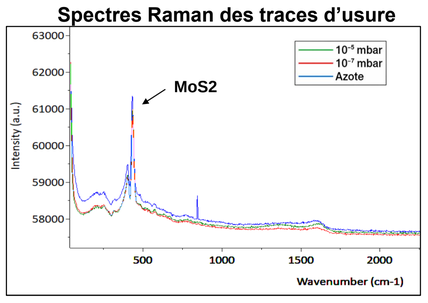




❖ Disque PVD :



Spectres Raman des traces d'usure



CONCLUSION

- La performance du MoS2 ne dépend pas uniquement du niveau de vide, mais de la nature des espèces présentes à l'interface.
- L'environnement agit directement sur les mécanismes de lubrification, en modifiant la formation et la stabilité du tribofilm / troisième corps.
- Un faible coefficient de frottement ne traduit pas nécessairement un faible endommagement de la surface, soulignant l'importance de coupler les mesures tribologiques aux analyses de surface.
- La maîtrise de l'environnement, depuis les opérations au sol jusqu'aux conditions sous vide, est donc essentielle pour assurer la fiabilité des mécanismes spatiaux lubrifiés au MoS2.

PERSPECTIVES

Dynamique moléculaire →Essais de durée de vie → Injection contrôlée de COV → Effet de la température ±120 °C → Conditions représentatives de l'environnement spatial