

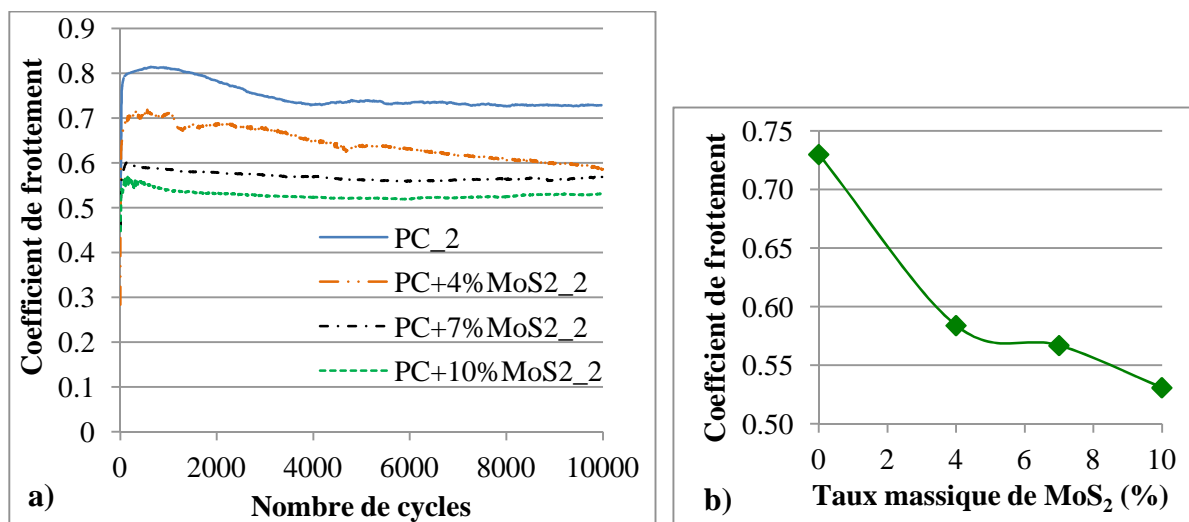
## Impact du prétraitement des poudres de lubrifiants solides sur la réponse tribologique des composites

L'objet de ce volet est d'investiguer l'effet de la méthodologie d'élaboration sur les propriétés en frottement et en usure des composites de l'étude. Comme on l'a signalé au chapitre précédent (séquence 2.3), cette méthodologie comporte une première phase de prétraitement des poudres suivie d'une seconde phase de mélangeage et de micro-injection.

### 5.1 Cas des composites en PC

#### 5.1.1 Frottement et usure des composites en PC/MoS<sub>2</sub>

La figure 3.26-a présente les courbes superposées de l'évolution du coefficient de frottement moyen en fonction du nombre de cycle pour les composites en PC à différents taux massiques de MoS<sub>2</sub> prétraité. En faisant la comparaison avec la méthode d'injection directe, l'allure générale des courbes et la variation du coefficient de frottement en fonction du taux massique de MoS<sub>2</sub> apparaissent similaires.

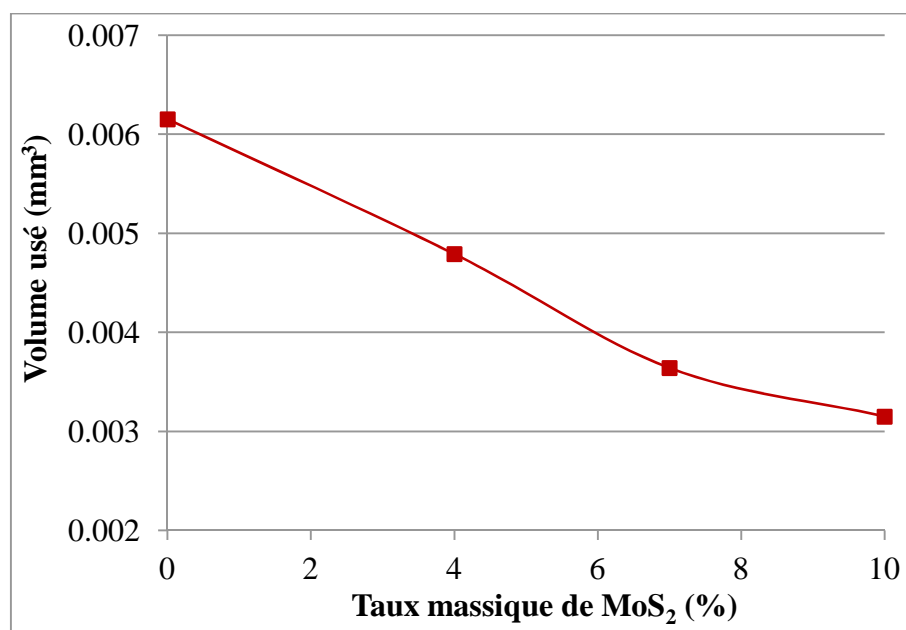


**Figure 3.26** (a) : Évolution du coefficient de frottement moyen en fonction des nombres de cycles pour les composites en PC à différents taux massiques de MoS<sub>2</sub> prétraité ; (b) : Évolution du coefficient de frottement moyen à 10 000 cycles des composites en PC à différents taux de MoS<sub>2</sub> prétraité

La figure 3.26-b présente l'évolution du coefficient de frottement en fonction du taux massique (en %) de MoS<sub>2</sub> à 10 000 cycles de frottement par glissement. Le coefficient de frottement diminue remarquablement en fonction du taux de MoS<sub>2</sub>, il passe de 0,73 dans le

cas du PC à 0,53 suite à l'insertion de 10% en masse de poudre de MoS<sub>2</sub> prétraitée. La valeur stabilisée (à 10 000 cycles) du coefficient de frottement du PC mélangé et micro-injecté (PC\_2) est légèrement supérieure à celle obtenue avec le PC injecté directement (égale à 0,70).

Similairement, le volume d'usure montre une diminution progressive de ses valeurs en fonction du taux massique de la poudre de MoS<sub>2</sub> prétraitée (Figure 3.27). La valeur initiale à 0% de MoS<sub>2</sub> est de  $6,15 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  et elle passe à  $3,15 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  pour un taux massique de MoS<sub>2</sub> égal à 10%. Le volume d'usure du PC\_2 semble augmenter aussi en le comparant à celui du PC directement injecté, il varie de  $4,03 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  pour le directement injecté à  $6,15 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  pour le mélangé micro-injecté. D'une manière générale, les mêmes conclusions peuvent être tirées de l'apport bénéfique porté à une matrice en PC en termes de frottement et d'usure suite à l'ajout de certaines fractions massiques de MoS<sub>2</sub>.

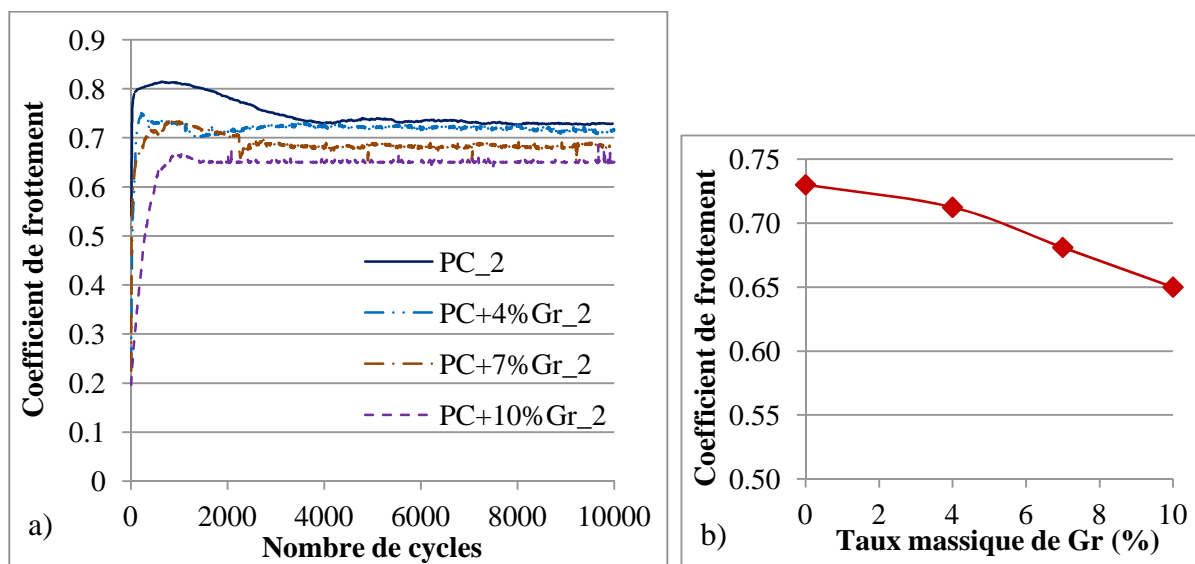


**Figure 3. 27** Evolution du volume usé (mm<sup>3</sup>) des composites en PC élaborés avec la deuxième méthodologie en fonction du taux massique de MoS<sub>2</sub> prétraité, 10 000 cycles de frottement par glissement

### 5.1.2 Frottement et usure des composites en PC/Gr

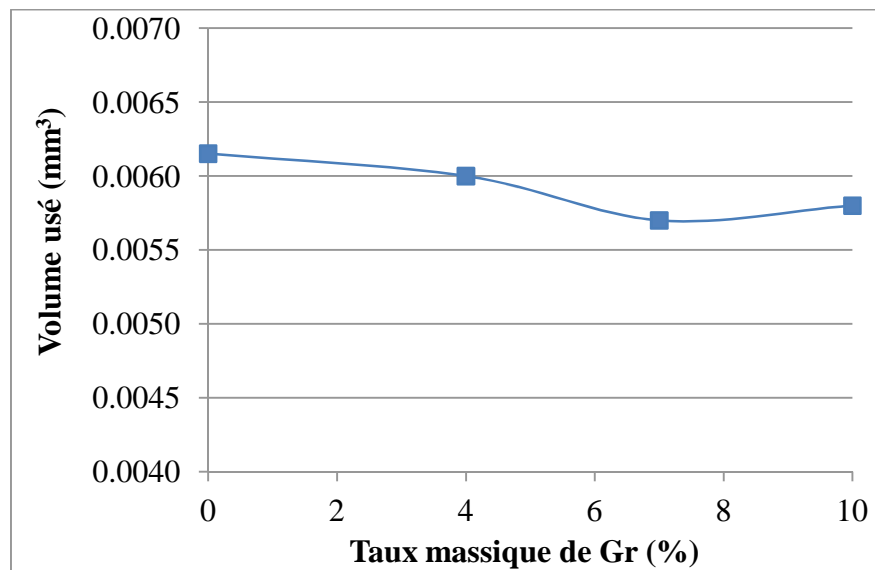
Les paragraphes suivants se focaliseront sur l'impact du second procédé d'élaboration sur le comportement tribologique des composites PC/Gr. L'allure générale des courbes de

frottement des composites (Figure 3.28-a) montre une diminution de l'intensité du pic de frottement par rapport à celle du PC\_2. De légères instabilités sont présentes au cours des cycles de frottement, leur fréquence est moindre que celle obtenue avec les composites en PC/Gr directement injectés. On note aussi une légère amélioration du coefficient de frottement en fonction du pourcentage massique de la poudre de graphite ajoutée. À 10 000 cycles de frottement par glissement (Figure 3.28-b), le coefficient de frottement diminue à fur et à mesure que le taux massique de graphite augmente, sa valeur passe de 0,73 dans le cas du PC\_2 à 0,65 dans le cas du composite à 10% massique de poudre de graphite prétraitée.



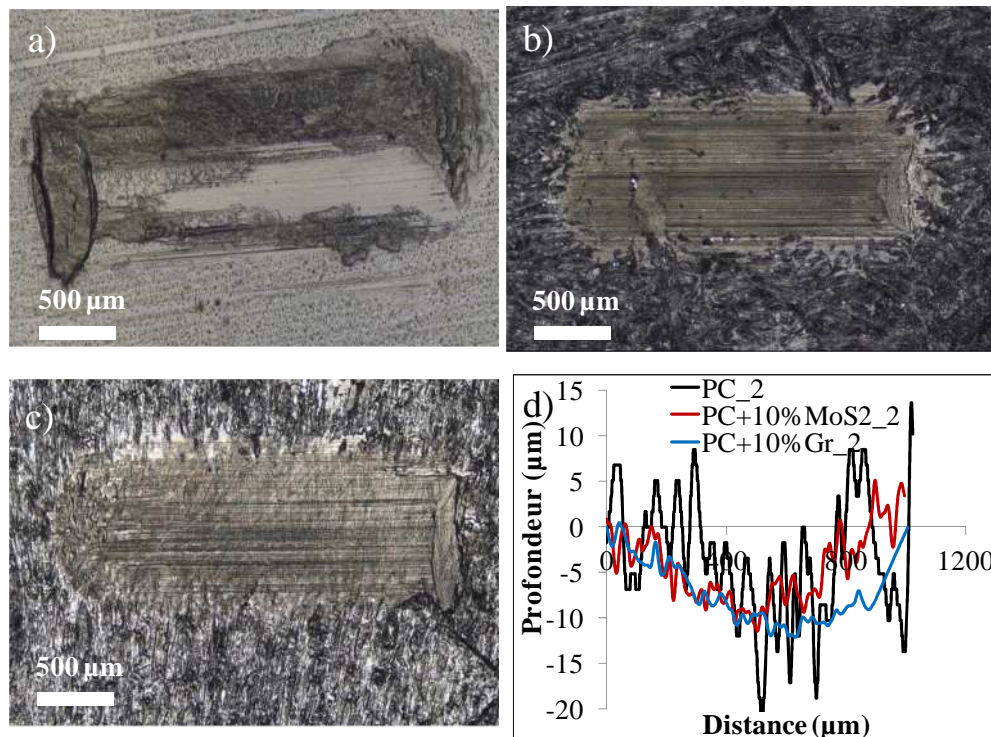
**Figure 3.28** (a) : *Évolution du coefficient de frottement moyen en fonction des nombres de cycles pour les composites en PC à différents taux massiques de poudre de graphite prétraitée ; (b) : Évolution du coefficient de frottement moyen à 10 000 cycles des composites en PC à différents taux de poudre de graphite prétraitée*

L'examen de la figure 3.29 montre une légère diminution du volume d'usure des composites en PC en fonction du pourcentage massique de la poudre de graphite incorporée. La valeur passe de  $6,1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  pour le PC\_2 à  $5,8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  pour le composite en PC\_2 avec 10% massique de graphite. Ces résultats indiquent que l'ajout du graphite à la matrice en PC par la deuxième méthodologie d'élaboration améliore appréciablement la réponse en frottement et légèrement celle en usure.



**Figure 3.29** Evolution du volume usé ( $\text{mm}^3$ ) des composites en PC élaborés avec la deuxième méthodologie en fonction du taux massique de Gr prétraité, 10 000 cycles de frottement par glissement

La figure 3.30 représente les micrographies optiques et les profils transversaux (obtenus à l'aide de l'Alicona) d'une sélection de faciès de frottement des composites en PC\_2 à 10 000 cycles de frottement. L'examen des micrographies optiques montre la persistance des mêmes mécanismes que ceux cités précédemment. En effet, on peut discerner clairement les phénomènes de détachement et de redéposition des débris d'usure suite à de sévères déformations plastiques du faciès de frottement du PC\_2 (Figure 3.30-a), de plus, le profil transversal typique de sa trace d'usure (Figure 3.30-d) montre la prépondérance des reliefs positifs et négatifs. De même, la micrographie optique du faciès de frottement du composite en PC\_2 à 10% en masse de la poudre de  $\text{MoS}_2$  prétraitée montre une abondante présence de stries d'abrasion et une diminution remarquable de la quantité de matière accumulée à l'extrémité de sa trace d'usure. Le profil transversal enregistre aussi la quasi-absence de reliefs positifs ce qui nous mène aux mêmes constatations que précédemment en termes de transformation de l'usure à un mécanisme plutôt abrasif. Pareillement, la trace d'usure du composite à 10% en masse de graphite montre la présence de fines stries peu profondes et une légère accumulation de la matière frottée à l'extrémité de la trace. Son profil transversal enregistre une trace creusée à l'intérieur de la zone de contact et la disparition des reliefs positifs. Dans ce cas, l'usure se transforme en une usure abrasive douce alors qu'une usure abrasive/adhésive sévère a été identifiée pour les composites formés par injection directe.



**Figure 3.30** Micrographies optiques des pistes d'usure du PC\_2 net (a), à 10% en masse de poudre de MoS<sub>2</sub> prétraitée (b) et à 10% en masse de poudre de Gr prétraitée (c) ; (d) : Profils transversaux superposés des pistes d'usure du PC\_2 et ses composites, 10 000 cycles de frottement par glissement

### 5.1.3 Conclusion sur les essais de frottement des composites en PC

Toutes les observations effectuées confirment l'action bénéfique des poudres de lubrifiant solide prétraitées sur le comportement en frottement et en usure de la matrice en PC. En effet, l'utilisation de la seconde méthodologie d'élaboration a montré une amélioration des propriétés tribologiques des composites en PC surtout dans le cas des composites élaborés avec la poudre de graphite. Cette amélioration ne peut être, à priori, entraînée que par la modification des forces d'adhésion à l'interface particules de lubrifiant solide/matrice en PC. Cet effet sera mieux mis en évidence et discuté au chapitre suivant. Les tableaux ci-dessous récapitulent la variation des paramètres de frottement et d'usure observée pour le PC.

**Tableau 3.5** Récapitulatif du coefficient de frottement à 10 000 cycles en fonction de la méthodologie d'élaboration pour les composites PC/lubrifiant solide

<i>% de MoS<sub>2</sub></i> <i>Frottement</i>	0	4	7	10	<i>% Gr</i>	4	7	10
<i>Méthodologie_1</i>	0,704	0,595	0,559	0,541	–	0,714	0,793	0,710
<i>Méthodologie_2</i>	0,730	0,584	0,567	0,531	–	0,712	0,681	0,650

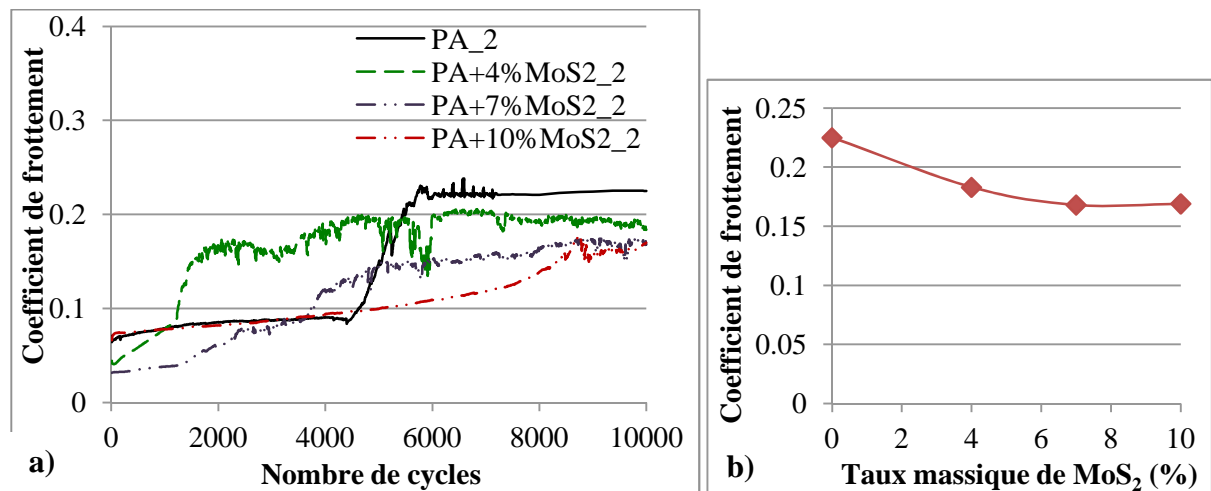
**Tableau 3.6** Récapitulatif du volume usé en fonction de la méthodologie d'élaboration pour les composites PC/lubrifiant solide après 10 000 cycles de frottement

<i>% de MoS<sub>2</sub></i> <i>Usure (×10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>)</i>	0	4	7	10	<i>% Gr</i>	4	7	10
<i>Méthodologie_1</i>	4,03	3,51	2,33	2,21	–	13,35	28,38	30,36
<i>Méthodologie_2</i>	6,15	4,79	3,64	3,15	–	6,00	5,70	5,80

## 5.2 Cas des composites en PA

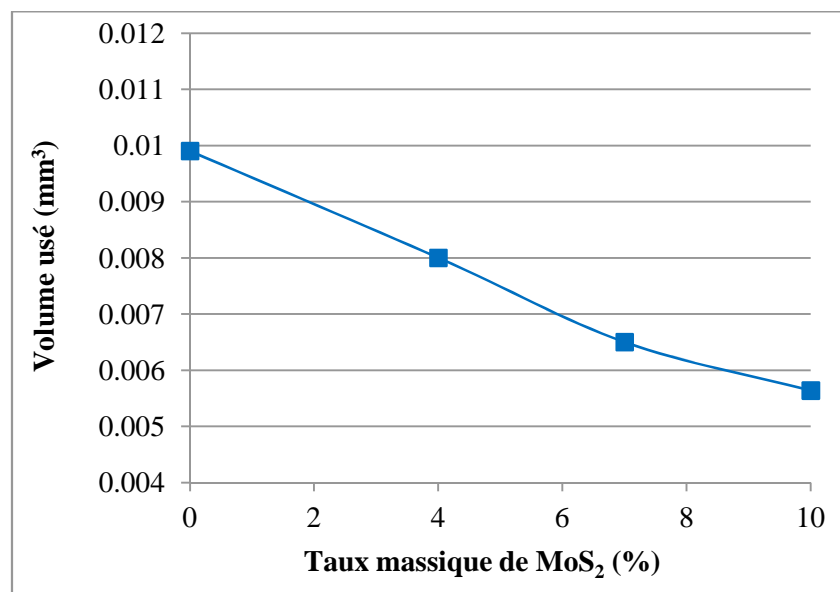
### 5.2.1 Frottement et usure des composites en PA/MoS<sub>2</sub>

Nous allons maintenant porter notre attention sur le comportement tribologique des composites en PA préparés avec la deuxième méthode d'élaboration. Les courbes suivantes montrent l'évolution du coefficient de frottement du PA en fonction du taux massique de poudre prétraitée de MoS<sub>2</sub> (en %). Les courbes de la figure 3.31-a montrent les mêmes allures que celles obtenues précédemment avec les composites en PA obtenus par injection directe. On observe en effet de nouveau la présence d'une zone de transition entre deux régimes de frottement ; l'un est faible et l'autre est plus fort. À 10 000 cycles de frottement, le coefficient de frottement du PA diminue en fonction du pourcentage de MoS<sub>2</sub> ajouté (Figure 3.31-b). Il passe de 0,225 pour le PA<sub>2</sub> net à 0,169 pour le composite en PA<sub>2</sub> avec 10% en masse de MoS<sub>2</sub>.



**Figure 3.31(a) :** Évolution du coefficient de frottement moyen en fonction des nombres de cycles pour les composites en PA à différents taux massiques de poudre de MoS<sub>2</sub> prétraitée ;  
**(b) :** Évolution du coefficient de frottement moyen à 10 000 cycles des composites en PA à différents taux de poudre de MoS<sub>2</sub> prétraitée

Nous présentons sur la figure 3.32 les résultats issus des volumes d'usure obtenus avec les composites PA/MoS<sub>2</sub> évoqués ci-dessus.

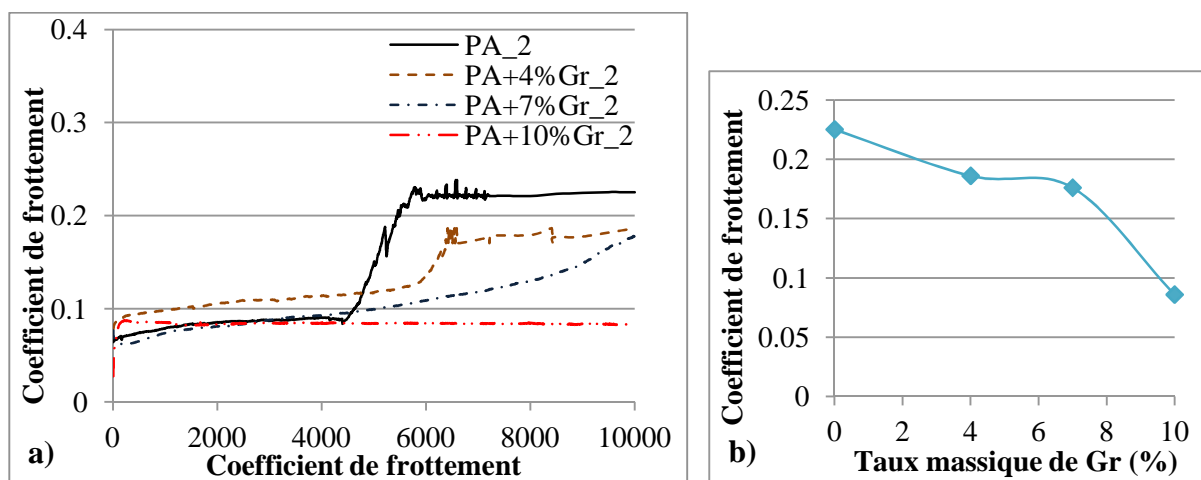


**Figure 3.32** Evolution du volume usé (mm<sup>3</sup>) des composites en PA élaborés avec la deuxième méthodologie en fonction du taux massique MoS<sub>2</sub> prétraité, 10 000 cycles de frottement par glissement

À partir de la figure, il est aisé de constater que nous retrouvons bien le fait que l'insertion des particules de  $\text{MoS}_2$  dans la matrice en PA donne un effet positif sur le volume d'usure. Le volume d'usure diminue de la valeur de  $9,9 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  pour le PA\_2 net à  $5,63 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  pour le composite en PA\_2 à 10% en masse de  $\text{MoS}_2$ . L'ampleur de cet effet positif semble être plus considérable en comparaison avec les composites élaborés par injection directe.

### 5.2.2 Frottement et usure des composites en PA/Gr

Étudions maintenant le cas des composites en PA élaborés avec une poudre de graphite prétraitée en utilisant la deuxième méthodologie. La figure 3.33-a compare le comportement en frottement des composites en PA\_2 en fonction du nombre de cycles à différents taux massiques de graphite.

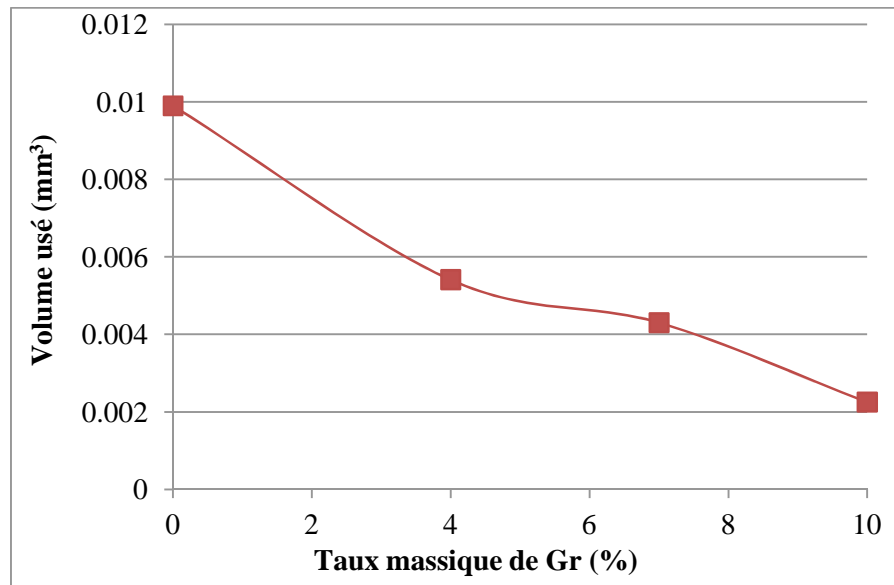


**Figure 3.33** (a) : Évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles des composites en PA à différents taux massiques de poudre de Gr prétraitée ; (b) : Évolution du coefficient de frottement moyen à 10 000 cycles des composites en PA à différents taux massiques de poudre de Gr prétraitée

Une transformation de l'allure des courbes est observée avec le composite à 10% de graphite marquée par l'absence de la zone de transition et la maintenance d'un frottement faible tout au long des 10 000 cycles. À 10 000 cycles de frottement par glissement, la contribution positive du graphite est particulièrement visible sur la figure 3.33-b car le coefficient de frottement initial du PA\_2 net est divisé quasiment par 3 suite à l'ajout de 10% en masse de poudre de graphite.



De même, le volume d'usure enregistre une réduction importante de ses valeurs, observée dès l'addition de 4% en masse de graphite (Figure 3.34). Ce dernier passe de  $9,9 \times 10^{-3} \text{mm}^3$  pour le PA\_2 net à  $5,41 \times 10^{-3} \text{mm}^3$  pour le composite en PA\_2 à 4% de graphite ajouté. Il atteint une valeur minimale, presque égale au cinquième du volume usé du PA, suite à l'insertion d'un taux 10% de graphite.



**Figure 3.34** Evolution du volume usé ( $\text{mm}^3$ ) des composites en PA élaborés avec la deuxième méthodologie en fonction du taux massique de Gr prétraité, 10 000 cycles de frottement par glissement

Même si la micrographie optique de la trace d'usure du PA\_2 net n'apporte pas beaucoup d'informations à propos des micro-mécanismes d'usure obtenus suite à 10 000 cycles de frottement, il est possible de distinguer une usure adhésive marquée par la présence de déformations plastiques et de détachements de particules (Figure 3.35-a). Le profil transversal de la trace d'usure (Figure 3.35-d) enregistré à peu près en son milieu montre la présence de plusieurs pics d'aspérités de transfert et un faciès extrêmement rugueux. La micrographie optique du faciès de frottement du composite à 10% en masse de  $\text{MoS}_2$  (Figure 3.35-b) montre un mécanisme de détachement de particules par délamination. Son profil transversal présente une forme proche de celle du PA\_2 mais avec une plus faible profondeur (Figure 3.35-d). Cependant, la trace d'usure du composite à 10% en masse de graphite montre bien l'atténuation de l'intensité des mécanismes d'usure qui se transforme en une usure douce. On