



**HAL**  
open science

# Identification et Rôle des Paramètres Significatifs dans les Modélisations des Composites Carbone/Carbone (C/C) sous Sollicitations Tribologiques

Coumba Mbodj, Mathieu Renouf, Laurent Baillet, Yves Berthier

► **To cite this version:**

Coumba Mbodj, Mathieu Renouf, Laurent Baillet, Yves Berthier. Identification et Rôle des Paramètres Significatifs dans les Modélisations des Composites Carbone/Carbone (C/C) sous Sollicitations Tribologiques. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592951

**HAL Id: hal-00592951**

**<https://hal.science/hal-00592951>**

Submitted on 3 May 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Identification et rôle des paramètres significatifs dans les modélisations des composites Carbone/Carbone sous sollicitations tribologiques

M. Mbodj<sup>1</sup>, M. Renouf<sup>1</sup>, L. Baillet<sup>2</sup>, Y. Berthier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, LaMCoS, Villeurbanne, France, {Coumba.Mbodj, Mathieu.Renouf, Yves.Berthier}@insa-lyon.fr

<sup>2</sup> Université Joseph Fourier de Grenoble, CNRS, LGIT, St Martin D'Hères, France, Laurent.Baillet@univ-grenoble.fr

**Résumé** — Pour comprendre le comportement des composites carbone/carbone sous sollicitations tribologiques, une approche numérique est développée pour permettre d'observer la dynamique locale au contact et le rôle des différentes échelles. Afin de s'approcher des conditions de freinage réelles, un contact entre deux composites (avec ou sans porosités) est effectuée afin de déterminer les paramètres significatifs et leur rôle dans le comportement tribologique des composites C/C. Une analyse locale et globale est faite à partir des résultats obtenus.

**Mots clés** — composite C/C, tribologie, instabilité de contact.

## 1 Introduction

Les matériaux composites carbone/carbone (C/C), utilisés dans la fabrication des disques de frein, sont aujourd'hui l'une des meilleures solutions technologiques pour assurer le freinage aéronautique dit à haute énergie. Les composites C/C sont constitués d'une matrice en pyrocarbone renforcée par des fibres de carbone, disposées en strates, maintenues par des paquets de fibres (appelés torons) perpendiculaires aux strates dont la rigidité est plus importante qu'une simple fibre. Lors de l'utilisation de tels composites en freinage, différentes physiques entrent en jeu (mécanique, thermique, physico-chimique,...) et ce, à différentes échelles allant de l'échelle caractérisant le disque de frein dans son ensemble (échelle dite macroscopique), l'échelle caractérisant une simple fibre (échelle dite microscopique) et une échelle intermédiaire, appelée mésoscopique, désignant un certain volume élémentaire représentatif (VER) du composite.

Différents travaux, tant expérimentaux que numériques, ont été réalisés pour comprendre le comportement des composites C/C sous conditions de freinage. Ainsi, pour comprendre le comportement tribologique des composites C/C sous conditions dynamiques et de contact frottant, une approche mécanique et numérique du composite a été développée pour permettre de déterminer la dynamique locale du contact et le rôle des différentes échelles. Elle repose sur l'utilisation d'une approche par éléments finis et des techniques d'homogénéisations [1] appliquées à une cellule élémentaire du matériau [5]. L'approche utilisée se base sur l'approche "semi-explicite" (ou "semi-implicite") proposée par Carpenter & al [3] implémentée dans un code d'E.F. PLAST2 [2]. Le caractère semi-explicite vient de la combinaison de la discrétisation des équations du mouvement à partir d'un schéma explicite et de la gestion implicite des contacts. Ainsi, les outils de la méthode sont l'utilisation d'un schéma d'intégration de type Newmark  $\beta_2$ , d'un amortissement de Rayleigh, d'une gestion locale des contacts par multiplicateurs de Lagrange et d'une résolution globale des contacts utilisant un algorithme de type Gauss-Seidel non linéaire [3]. La loi de frottement utilisée est une loi simplifiée de Prakash-Clifton [6].

Des travaux précédents ont montré les effets du contraste des propriétés élastiques au contact ainsi que l'influence de la description du matériau sur le comportement tribologique sur la réponse mécanique des matériaux composites C/C [4]. Ces derniers travaux ont permis de mettre en évidence l'influence de la distribution des torons dans le matériau, en particulier au niveau de la surface de contact. Cependant de fortes hypothèses, telles que la forte rigidité de la surface antagoniste et son homogénéité, ont été prises sur les conditions de contact pouvant influencer la réponse mécanique du matériau. De ce fait, dans le

but de réaliser une modélisation plus réaliste du freinage, les conditions de contact sont étendues vers des modèles de contact entre composites (cf. figure ??) afin de déterminer les paramètres significatifs et leur rôle dans les comportements tribologiques des composites C/C.

Pour faire un pas de plus dans la modélisation des composites C/C et leur utilisation en freinage aéronautique, un modèle de contact entre composites est réalisé. Les résultats sont discutés aussi bien à l'échelle du contact que l'échelle du volume représentatif.

## 2 Modèle

Dans la continuité des travaux précédents [4], un modèle homogène équivalent est construit à partir de modèles homogènes reliés à quatre modèles hétérogènes. Ces modèles hétérogènes, appelés morphologies, ont un taux volumique de torons identique ( $9\% \pm 0,5\%$ ), répartis aléatoirement dans la matrice. Leur longueur  $L$  et leur hauteur  $H$  sont respectivement égales à  $56mm$  et  $16mm$ . Les modules d'Young des torons et de la matrice sont respectivement égaux à  $240GPa$  et  $30GPa$ . La matrice et les torons ont une masse volumique ( $\rho = 1770kg/m^3$ ) et un coefficient de Poisson ( $\nu = 0,2$ ) identique.

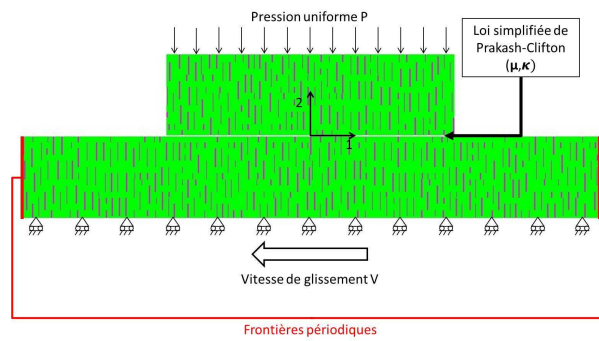


FIG. 1 – Modèle de contact composite C/C sur composite C/C

Ainsi la matrice de raideur homogène du modèle homogène moyen équivalent,  $\underline{\underline{C}}_{moyen}$ , est obtenue à partir de la moyenne et de l'homogénéisation des quatre modèles hétérogènes :

$$\underline{\underline{C}}_{moyen} = \frac{1}{4} \left( \sum_{i=1}^4 \underline{\underline{C}}_i \right), \quad (1)$$

où  $\underline{\underline{C}}_i$  est la matrice de raideur homogène de morphologie  $i$ .

Ces différents modèles (homogènes et hétérogènes) sont soumis à des sollicitations tribologiques (pression et cisaillement) contre une surface antagoniste. La vitesse de glissement imposée  $V$  est égale à  $2m/s$ . Le coefficient de frottement  $\mu$  est égal à  $0.25$  et le temps de régularisation, donné par le rapport  $\kappa = L/V$ , est égal à  $1500ns$ .

Un coefficient de frottement global,  $\bar{\mu}$ , est "mesuré" sur la face supérieure du modèle au cours de la simulation. Ce coefficient correspond à celui mesuré expérimentalement, et prend en compte l'influence de la dynamique ainsi que la propagation des ondes dans le matériau. Les vibrations au contact sont également déterminées localement au cours de la simulation [4]. Les énergies interne et externe sont calculées à partir de l'équations (??) :

$$\mathbf{E}_{dt}^* = \mathbf{V}_{n-\frac{1}{2}} \left( \frac{\mathbf{F}_n^* + \mathbf{F}_{n-1}^*}{2} \right) dt \quad (2)$$

où  $\mathbf{V}_{n-1/2}$  est la vitesse à mi-temps,  $\mathbf{F}_n^*$  et  $\mathbf{F}_{n-1}^*$  les forces au temps  $t_n$  et  $t_{n-1}$ , et  $dt$  le pas de temps de simulation. L'exposant \* correspondant soit aux forces intérieure soit aux forces extérieures.

### 3 Contact composite/composite

#### 3.1 Cas de référence : modèle homogène / modèle homogène

Dans un premier temps, les simulations sont réalisées avec le modèle homogène équivalent. Le couple pression/vitesse appliqué ( $P, V$ ) est égal à ( $0.5 \text{ MPa}, 2 \text{ m/s}$ ). L'évolution temporelle du coefficient de frottement global est caractérisée par un changement d'amplitude périodique (cf. figure 2a).

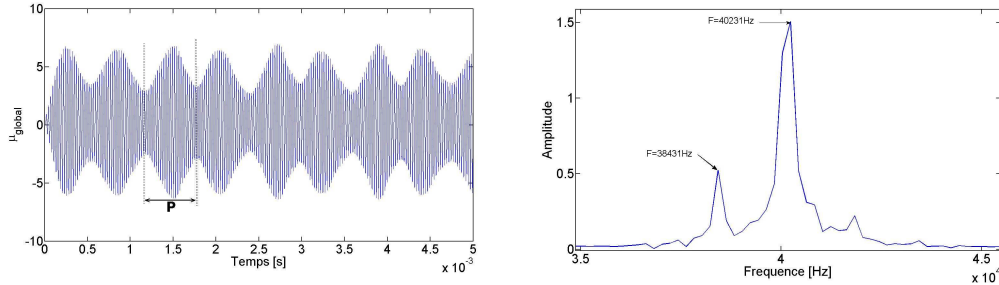


FIG. 2 – (a) Evolution temporelle et (b) spectre fréquentiel du coefficient de frottement global du modèle homogène équivalent

Ce phénomène, bien connu en acoustique, est appelé phénomène de battements. Ces "battements" sont le résultat des vibrations de deux corps en contact ayant des fréquences propres voisines. La transformée de fourier rapide (FFT) du coefficient de frottement global permet de mettre en évidence deux pics de fréquence  $F = 38431 \text{ Hz}$  et  $F = 40231 \text{ Hz}$  (cf. figure 2b) qui correspondent aux fréquences principales des corps en contact.

Nous allons passer dans la section suivante à l'étude des différentes morphologies. La période des battements pouvant être différente selon les morphologies et les sollicitations, nous allons étudier deux cas de contact en considérant un couple de corps en contact noté (candidat, antagoniste) :

- **cas de contact 1** : couple de contact "morphologie/modèle homogène équivalent" ;
- **cas de contact 2** : couple de contact "morphologie/morphologie".

#### 3.2 Cas de contact : morphologie / modèle homogène équivalent

Ce cas de contact permet d'étudier l'influence de la distribution des torons dans le matériau en ne prenant en compte que la distribution du corps candidat. Dans un premier temps, l'évolution de  $\bar{\mu}$  pour les différentes morphologies est représentée par son enveloppe (cf. figure 3). Comme pour le cas de référence, on retrouve le phénomène de battements.

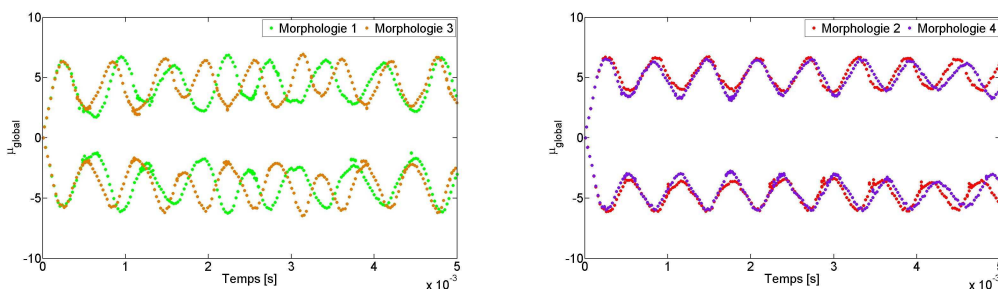


FIG. 3 – Enveloppe de l'évolution temporelle du coefficient de frottement global dans le cas d'un contact entre morphologie et modèle homogène équivalent

Les enveloppes de l'évolution temporelle de  $\bar{\mu}$  pour les morphologies 2 et 4 sont caractérisées par un changement périodique d'amplitude quasi constant (cf. figure 3b). Ce premier regroupement de morphologies coincide avec le regroupement de morphologies observé dans de précédents travaux considérant un corps antagoniste rigide [5] ou déformable (type acier)[?]. Sur la figure 3a, l'évolution temporelle de  $\bar{\mu}$  pour les morphologies 1 (vert) et 3 (orange) présente des changements d'amplitude irréguliers,

différents l'un de l'autre. Ces différences sont observées également dans les valeurs moyennes du coefficient de frottement global. Le modèle homogène équivalent a un frottement moyen égal à 0.219, les morphologies 2 et 4 un frottement moyen respectivement égal à 0.218 et 0.222, tandis que les morphologies 1 et 3 ont un frottement moyen respectivement égal à 0.228 et 0.0224, plus important que les autres morphologies et le modèle homogène équivalent.

Afin de vérifier la relation entre les différences et le regroupement obtenus, nous évaluons l'énergie interne cumulée par les modèles au cours de la simulation (cf. figure 4a). Elle révèle également le regroupement des morphologies : les courbes d'évolution d'énergie des morphologies 2 et 4 ont des pentes respectivement égales à  $185 J/s$  et  $171 J/s$  mais et les courbes d'évolution d'énergie des morphologies 1 et 3 ont des pentes respectivement égales à  $139 J/s$  et  $131 J/s$ . Le modèle homogène équivalent rejoint le groupe 2 (ie les morphologies 2 et 4).

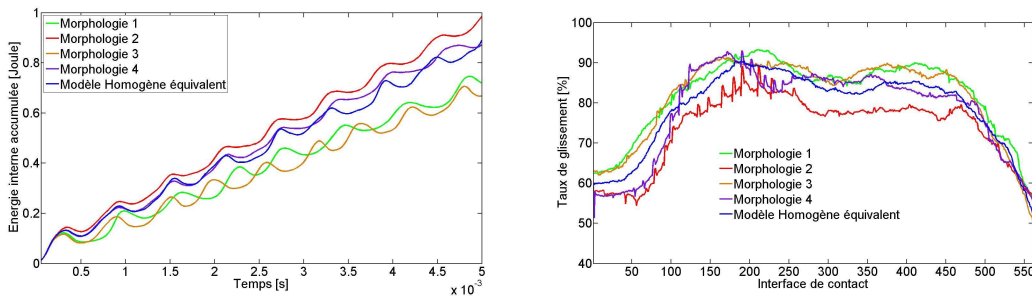


FIG. 4 – a) Énergie interne emmagasinée au cours de la simulation et b) profils du taux de glissement à la surface de contact

Si l'on représente le taux de glissement de la surface de contact (cf. figure 4b), autrement dit le taux de glissement de chaque point de contact au cours de la simulation on trouve des profils différents suivant le taux surfacique de torons présent au niveau de la surface de contact. Les profils des morphologies 2 et 4 (respectivement des morphologies 1 et 3) présentent de fortes similarités. Cependant, contrairement à l'évolution de l'énergie interne, le profil d'instabilités du modèle homogène se situe entre celui des morphologies 1 et 3 et celui des morphologies 2 et 4.

Le taux d'instabilités moyenné à la surface de contact montre que les différents modèles évoluent avec un type d'instabilités glissement-décollement avec un fort taux de glissement avec des pourcentages différents, égaux à 82% pour les morphologies 1 et 3, et à 74% et 78% pour les morphologies 2 et 4, le modèle homogène moyen ayant un taux égal à 79%

Ces derniers résultats soulignent ainsi la nécessité d'effectuer des investigations à l'échelle locale puisque même si les modèles évoluent avec un régime d'instabilités identique en moyenne, la dynamique locale à la surface de contact n'est pas homogène. L'observation des champs de contrainte de cisaillement maximale dans les morphologies au cours de la simulations (cf. figure 5) montre également une localisation des contraintes maximale dans les torons. Du fait des regroupements de morphologies, nous ne présentons le champ de contrainte de cisaillement maximale uniquement pour les morphologies 3 et 4 au temps  $t = 5 ms$ .

Les résultats obtenus dans le cas d'un contact entre morphologies et modèle homogène équivalent ont permis de confirmer que l'influence du taux surfacique de torons au niveau de la surface de contact intervient dans le comportement dynamique du matériau mais aussi sur la dynamique locale au contact. En effet, la répartition des contraintes maximales observées rejoint celle qui a été effectuée dans les études précédentes [4].

### 3.3 Cas de contact : morphologie / morphologie

Dans la section précédente, seule l'influence de la distribution des torons du corps candidat est prise en compte. Dans cette section, nous supposons que les morphologies candidates sont en contact avec une morphologie similaire (cf. figure ??). Ainsi, nous allons considérer qu'un modèle est caractérisé par un couple "morphologie  $i$  / morphologie  $j$ " et est noté modèle  $i_j$  (avec  $i, j = 1, 2, 3, 4$ ).

La figure 6 montre l'évolution temporelle du coefficient de frottement global des modèles  $i_j$  (on se

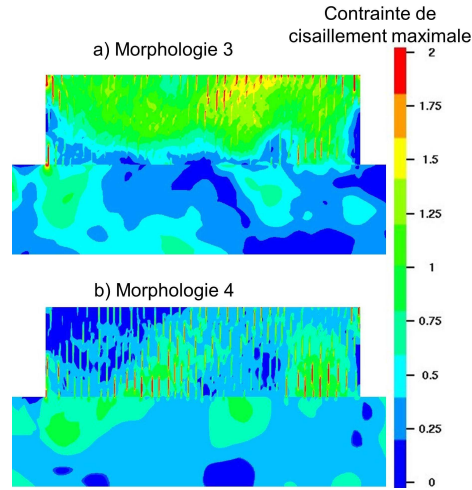


FIG. 5 – Champ de contrainte de cisaillement maximale des morphologies 3 et 4 à  $t = 5 \text{ ms}$

restreint au cas où les morphologies  $i$  et  $j$  sont identiques).

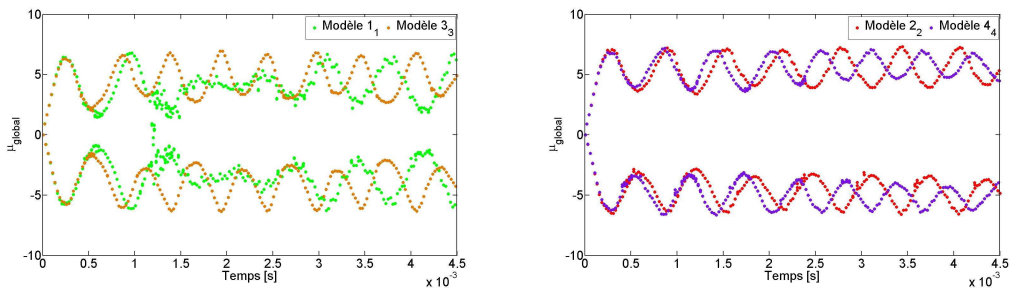


FIG. 6 – Evolution temporelle du coefficient de frottement global des modèles dans le cas de contact entre deux morphologies

Nous remarquons que les morphologies 2 et 4 présentent toujours une évolution temporelle de  $\bar{\mu}$  caractérisée par un changement périodique d'amplitude constant qui semble similaire. Cependant on observe un déphasage entre les deux modèles contrairement au cas précédent. Pour les morphologies 1 et 3, le début et la fin de l'évolution semblent similaire, mais la comparaison devient difficile du à la présence d'une perturbation qui se manifeste par une diminution d'amplitude et de période des battements.

On retrouve cette perturbation sur la figure 7, illustrant les variations des énergies interne et interne cumulée par les différents modèles au cours du temps. Nous observons une augmentation de l'énergie interne de la morphologie 1 au temps  $t = 1.15 \text{ ms}$ .

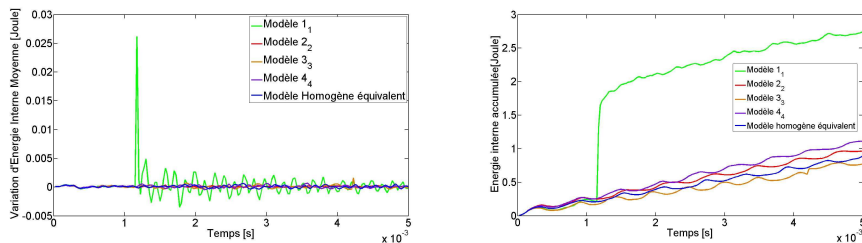


FIG. 7 – Énergie interne des différents modèles

Au moment où intervient l'augmentation de l'énergie de la morphologie 1, on observe une forte concentration de la contrainte de cisaillement maximale au niveau du coin gauche du corps 1 (cf. figure 8).

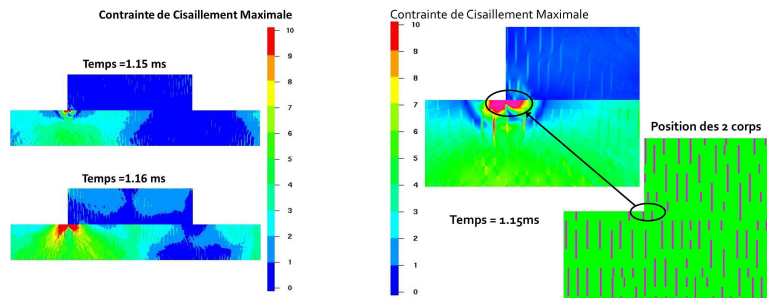


FIG. 8 – a) Localisation des contraintes de cisaillement maximales dans le modèle  $1_1$  et (b) comparaison de la position des corps au champ de contrainte de cisaillement maximale à  $t = 1.15 \text{ ms}$

Cette forte concentration de contraintes est provoquée par un coincement du corps 1 sur le corps 2. Une partie de la matrice inférieure se retrouve bloquée contre un toron créant une forte résistance au cisaillement (cf. figure 8b). Mais ce n'est pas ce coincement en lui-même qui perturbe le frottement.

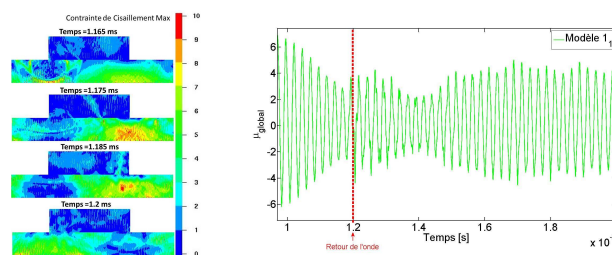


FIG. 9 – Parallèle entre la propagation des ondes dans le modèle  $1_1$  et l'apparition des perturbations sur l'évolution temporelle de  $\bar{\mu}$

En effet si l'on regarde la propagation de cette onde dans le corps 2 (cf. figure 9a) on remarque que c'est le retour d'onde qui entraîne la perturbation de l'évolution temporelle du coefficient de frottement global ( $t \simeq 1.2 \text{ ms}$ ) (cf. figure 9b). Le coincement crée ainsi une onde parasite perturbant le frottement qui retrouve un régime "normal" une fois cette onde dissipée.

On retrouve les mêmes types de perturbations lors des simulations des modèles  $1_j$  avec  $j = 2, 3, 4$  (cf. évolutions temporelles de  $\bar{\mu}$ , figure 10a). Le début et la durée des perturbations varient en fonction du type de la morphologie antagoniste. Ces différentes perturbations observées avec le modèle  $1_1$  peuvent être des conséquences de la faible présence de torons au niveau de la surface de contact de la morphologie 1.

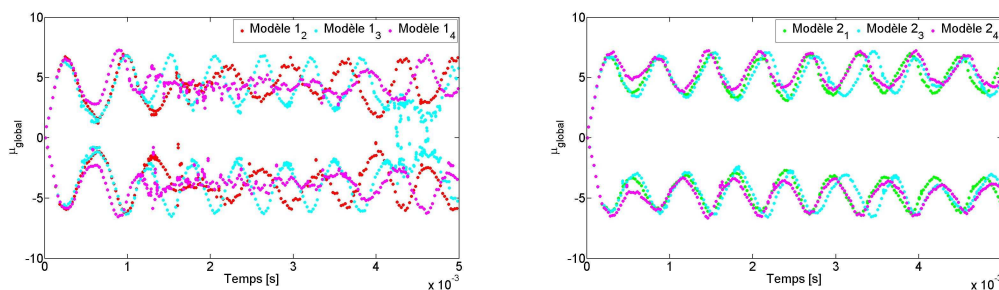


FIG. 10 – Evolution temporelle de  $\mu_{global}$  des cas de modèles  $i_j$  avec  $i \neq j$

Ainsi, elles soulignent l'influence de la description de la surface antagoniste sur le comportement global et local des modèles.

La prise en compte d'un modèle hétérogène comme surface antagoniste entraîne également une augmentation des contraintes maximales localisées à la surface de contact, même si le type de régime d'in-

stabilités reste de type glissement-décollement à fort taux de décollement. La figure 11 illustre l'augmentation des pics de contraintes maximales locales dont les valeurs maximales peuvent atteindre 60% des valeurs maximales obtenues dans le cas d'un contact "morphologie / modèle homogène". Cette augmentation est liée, encore une fois, à la forte localisation des contraintes maximales dans les torons. Par conséquent, on peut dire qu'un matériau avec une distribution de torons importante à la surface de contact présentera une plus forte localisation des contraintes maximales à l'interface de contact.

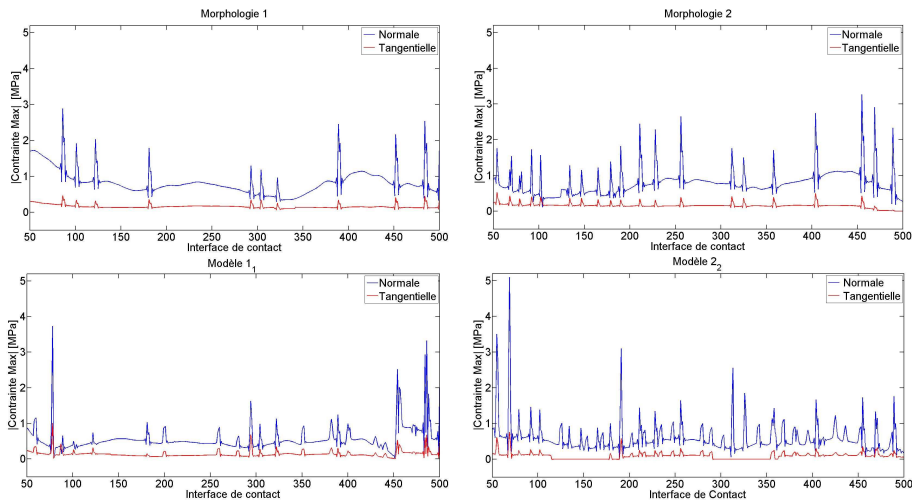


FIG. 11 – Comparaison des contraintes maximales localisées en surface de contact des morphologies 1 et 2 dans les deux cas de contact entre composites

Cette comparaison met en évidence les limites de l'utilisation des techniques d'homogénéisations sous des conditions de contact frottant puisque le modèle homogène ne permet pas de reproduire les phénomènes observés dans cette section. Cette limitation se manifeste également dans la valeur des énergies emmagasinées par les modèles. En effet, comme illustrées par la figure 12, l'énergie emmagasinée dans les modèles de contact "morphologie/morphologie" sont supérieures à celles de contact "morphologie/modèle homogène". Ceci est lié à la valeur des contraintes de cisaillement maximales, qui sont plus importantes dans le cas 2.

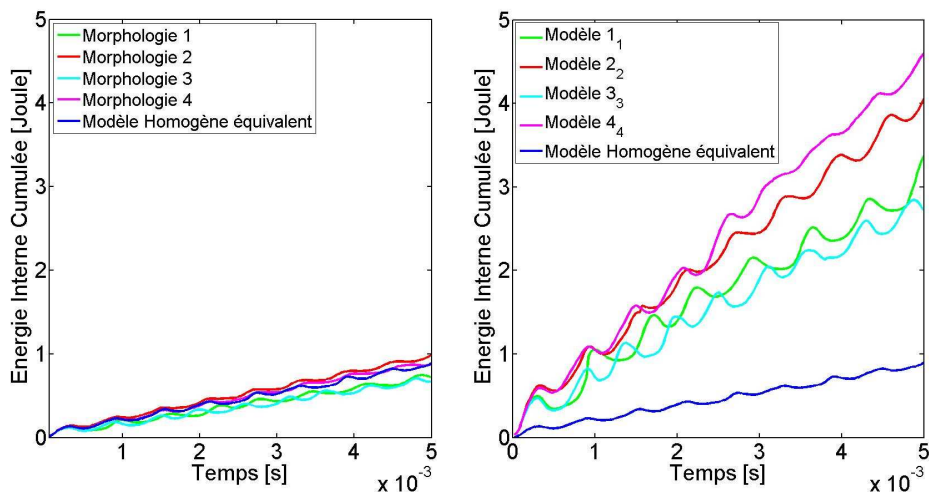


FIG. 12 – Comparaison des énergies internes cumulées des morphologies dans les deux cas de contact entre composites pour un chargement de 1 MPa.

Ces travaux ont permis de mettre évidence la nécessité de prendre en compte une surface antagoniste en composite pour comprendre le comportement tribologique des matériaux composites. En effet, nous avons observé une augmentation des contraintes maximales à la surface de contact fortement localisées



dans les torons, par conséquent le comportement tribologique du matériau est également influencé par le type du matériau de la surface antagoniste utilisé.

Notons que cette étude est faite pour ce couple  $\mu, \kappa$  donné, paramètres caractérisant la loi de frottement, et donc le comportement à l'interface. Une étude consistant à faire varier ces paramètres et de voir leur influence sur le comportement des composites a été réalisé mais n'est pas exposé ici.

## 4 Conclusion

L'extension du modèle numérique vers un modèle de contact entre composites constitue un premier pas vers une modélisation plus "réaliste" du problème de freinage. Celle-ci a permis de mettre en évidence les effets de la distribution des torons dans la dynamique locale au contact, et ainsi la localisation des contraintes maximales qui peuvent influencer la capacité des modèles d'emmagasiner de l'énergie. L'ensemble des résultats montre le rôle des torons dans le matériau, particulièrement sur la dynamique locale. Cependant, les conclusions faites dans ces travaux se basent sur un matériau constitué de torons et matrice, alors que dans le matériau réel on note la présence de porosités. La suite directe de ce travail est de faire évoluer le modèle numérique en introduisant des porosités afin de déterminer le rôle que joueront ces dernières dans le comportement tribologique des composites C/C.

Ces travaux ont également soulevé le problème de l'utilisation des techniques d'homogénéisation sous des conditions de contact frottant. Ils ont montré en effet la possibilité de perte de l'information ou d'avoir une mauvaise restitution des phénomènes locaux pouvant avoir une influence sur le comportement global du modèle, comme la capacité à emmagasiner de l'énergie par exemple. Il semble donc que pour avoir recours à de telles techniques, un travail est à faire au niveau de l'interface comme l'introduction d'un champ de surface, un enrichissement du maillage, ou l'introduction d'une loi de frottement plus complexe.

## Références

- [1] P. Alart, F. Lebon. *Numerical Study of a Stratified Composite Coupling Homogenization and Frictional Contact*, Mathematical and Computer Modelling 28, 273-286, 1998.
- [2] L. Baillet. [http://www-igit.obs.ujf-grenoble.fr/users/lbaillet/logiciel\\_plast2.htm](http://www-igit.obs.ujf-grenoble.fr/users/lbaillet/logiciel_plast2.htm), PLASTD Software.
- [3] N.J. Carpenter, R.L. Taylor, M.G. Katona. *Lagrange Constraints for transient finite element surface contact*, Int. J. Numer. Methods Engrg. 32, 103-128, 1991.
- [4] C. Mbodj, M. Renouf, L. Baillet, G. Peillex, Y. Berthier, P. Jacquemard. *Influence du contraste des propriétés élastiques des composites carbone/carbone (C/C) sous conditions de contact frottant*, Mécanique & Industries, à paraître, 2010.
- [5] G. Peillex, L. Baillet, Y. Berthier. *Homogenization in non-linear dynamics due to frictional contact*, Int. J. Solids Struct. 45, 2451-2469, 2008.
- [6] J.R. Prakash, R.J. Clifton. *Time resolved dynamic friction measurements in pressure-shear*, Exp. Tech. Dyna. Deform. Solids 165, 33-48, 1993.