



HAL
open science

Influence du “contraste” des propriétés élastiques des composites Carbone/Carbone (C/C) sous conditions dynamiques de contact frottant

Coumba Mbodj, Guillaume Peillex, Mathieu Renouf, Laurent Baillet, Yves Berthier, Pascale Jacquemard

► To cite this version:

Coumba Mbodj, Guillaume Peillex, Mathieu Renouf, Laurent Baillet, Yves Berthier, et al.. Influence du “contraste” des propriétés élastiques des composites Carbone/Carbone (C/C) sous conditions dynamiques de contact frottant. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413691

HAL Id: hal-01413691

<https://hal.science/hal-01413691>

Submitted on 10 Dec 2016

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Influence du "contraste" des propriétés élastiques des composites Carbone/Carbone (C/C) sous conditions dynamiques de contact frottant

C. Mbodj¹, G. Peillex^{1*}, M. Renouf¹, L. Baillet², Y. Berthier¹, P. Jacquemard³

¹ Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, F-69621, Villeurbanne, France
{Coumba.Mbodj, Mathieu.Renouf, Yves.Berthier}@insa-lyon.fr

* CEA, DAM, DIS, F-91297 Arpajon, France
guillaume.peillex@cea.fr

² Université Joseph Fourier de Grenoble, CNRS, LGIT, Maison des Geosciences, 38400 Saint Martin D'Hères France
laurent.baillet@ujf-grenoble.fr

³ Messier Bugatti, Division Carbone Industrie, 7 avenue Bel Air, 69100 Villeurbanne
pascale.jacquemard@messier-bugatti.com

Résumé — Ce travail propose une approche numérique pour l'étude de matériaux composites carbone/carbone sous sollicitations dynamiques et conditions de contact frottant. Elle repose sur l'utilisation d'une approche éléments finis (E.F.) et de techniques d'homogénéisation appliquées à une cellule élémentaire du matériau. Les effets du contraste des propriétés élastiques au contact sont étudiés et l'influence de la description du matériau sur le comportement tribologique est mise en évidence.

Mots clés — composite, homogénéisation, éléments finis, tribologie.

1 Introduction

Du fait de leurs propriétés thermomécaniques remarquables, leur permettant de supporter de hautes températures sans dégradation de leurs propriétés mécaniques, les matériaux composites Carbone-Carbone (C/C) sont utilisés pour réaliser des disques de freins d'avions, des tuyères de systèmes propulsifs, etc. Ils sont constitués d'une matrice en pyrocarbone renforcée par des fibres de carbone, disposées en strates, maintenues par des torons (assemblage de fibres) perpendiculaires dont la rigidité est plus importante que celle d'une fibre (cf. figure 1a et 1b). Du fait de cette structure, trois échelles peuvent être distinguées : une échelle macroscopique caractérisant le disque de frein dans son ensemble, une échelle microscopique qui est celle des fibres et une échelle intermédiaire appelée mésoscopique représentant un certain volume élémentaire représentatif (V.E.R.) du composite (cf. figure 1c).

Lors de l'utilisation de tels composites en freinage aéronautique, des couplages forts interviennent non seulement entre ces différentes échelles mais aussi entre les différents phénomènes mis en jeu notamment mécanique et physico-chimiques [7]. Les essais expérimentaux étant souvent coûteux et limités, il est donc nécessaire de prédire par simulation numérique le comportement dynamique

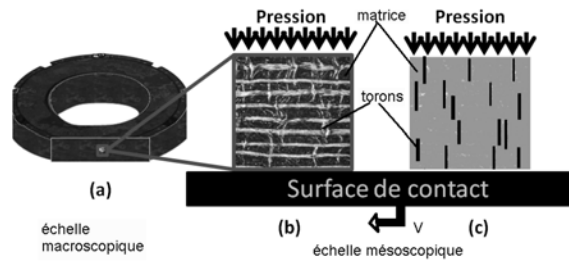


Figure 1 – De la réalité au modèle : (a) disque de frein, (b) structure du matériau réel et (c) composite modélisé

de ce matériau sous sollicitations tribologiques (pression et cisaillement).

Pour cela les approches par éléments finis (E.F.) [6, 3] permettent d'une part de découpler les différents phénomènes mis en jeu et d'autre part de dégager le rôle des différentes échelles, et ainsi déterminer son comportement dynamique au contact (i.e. les contraintes, les déformations et les vibrations au contact). Des travaux réalisés antérieurement, utilisant ces types d'approches [8], ont permis de mettre en évidence les vibrations au contact de type stick-slip sous sollicitations tribologiques. Ainsi, quatre catégories d'ondes générées au niveau du contact se distinguent : glissement-décollement, glissement-adhérence-décollement, adhérence-décollement et adhérence-glissement. Pour les ondes de glissement-décollement, deux régimes sont définis :

- régime 1 : régime à fort taux de glissement, les points en contact glissent beaucoup plus qu'ils ne décollent,
- régime 2 : régime à fort taux de décollement, les points décollent beaucoup plus qu'ils ne glissent.

Dans cette étude, ces approches par éléments finis sont appliquées à l'échelle mésoscopique du matériau. Afin d'assurer la représentativité du matériau, plusieurs modèles hétérogènes (i.e. différentes répartitions de torons au sein de la matrice) avec un pourcentage en volume de torons identique sont étudiés. Cependant l'utilisation des modèles hétérogènes pour ce type d'étude peut conduire à des temps de simulation prohibitifs. Ces temps de calculs peuvent être réduits en ayant recourt à des techniques d'homogénéisation largement utilisées dans l'étude de matériaux composites [1]. Mais la principale difficulté reste ici d'utiliser ces techniques sous des conditions de dynamique de contact.

Dans ce but, un premier modèle numérique a été développé [9]. Les premières simulations ont supposé que le composite frottait sur un disque rigide. Elles ont permis de relier régimes d'instabilités et modèles hétérogènes. Cependant sous certains chargements (pressions imposées différentes), les simulations montrent que les modèles hétérogènes présentent des régimes d'instabilités différents. Ces différences semblent avoir pour origine la dynamique locale de contact. Pour caractériser ces différences, il est nécessaire de déterminer s'il existe une influence du "contraste" des propriétés élastiques des deux corps en contact sur le comportement tribologique du composite. Pour cela, ce travail propose d'étudier un contact (déformable/déformable) entre un composite et un disque en acier sous les mêmes types de sollicitations que le contact déformable/rigide [9].

2 Approche numérique

L'approche "semi-explicite" proposé par Carpenter et al. [4] et implémenté dans le code d'E.F. Plast2 [2, 8] est utilisée. Les équations de mouvement sont discrétisées à partir d'un schéma explicite, couplées à une gestion implicite du contact [2, 4]. Les principaux ingrédients de la méthode sont : un schéma d'intégration de type Newmark β_2 , l'utilisation d'un amortissement de Rayleigh et une gestion des contacts par multiplicateurs de Lagrange.

Le frottement local est géré par une loi de frottement de type Prakash-Clifton [10]. Cette loi suggère qu'il n'y a pas de relation instantanée entre l'évolution des contraintes normale et tangentielle mais plutôt un changement graduel qui intervient au bout d'un certain temps ou sur une certaine distance. Pour cela deux paramètres sont nécessaires : un coefficient de frottement μ décrivant le rapport entre la contrainte normale et la contrainte tangentielle en glissement stationnaire, et un temps de régularisation κ durant lequel intervient la perturbation. Pour plus de détails sur la loi, les lecteurs sont invités à lire les papiers initiaux [10].

3 Influence de la description du contact

3.1 Mise au point des modèles

Dans la continuité des travaux précédents [9], quatre modèles hétérogènes de longueur $L = 56mm$ et de hauteur $H = 16mm$ frottant sur un "disque" en acier ont été étudiés. Ces modèles hétérogènes ont un taux volumique de torons identique ($\approx 10\%$ de torons répartis aléatoirement dans la matrice) et des taux surfaciques différents (% de torons au niveau du contact). Les modules d'Young des torons, de la matrice et de l'acier sont respectivement $240GPa$, $30GPa$ et $210GPa$; la matrice et les torons ont la même masse volumique $1770kg/m^3$ et le même coefficient de Poisson 0.2 . Les propriétés élastiques moyennes du modèle homogène équivalent sont obtenues à partir de l'homogénéisation des quatre modèles hétérogènes. La vitesse de glissement imposée V est égale à $2m/s$. Le coefficient de frottement est égal à 0.25 , et le temps de régularisation, donné par le rapport $\kappa = \frac{L}{V}$, est égal à 300 fois le pas de temps ($\Delta t = 5ns$).

Le coefficient de frottement global est "mesuré" à 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.

3.2 Cas d'une pression $P=0.5MPa$

Pour une pression de $0.5MPa$, les résultats montrent que l'ensemble des modèles hétérogènes ainsi que le modèle homogène ont les mêmes comportements au cours de la simulation (cf. figure 2a). Ceci est confirmé par l'évolution temporelle et le spectre fréquentiel du coefficient de frottement global (cf. figure 2b).

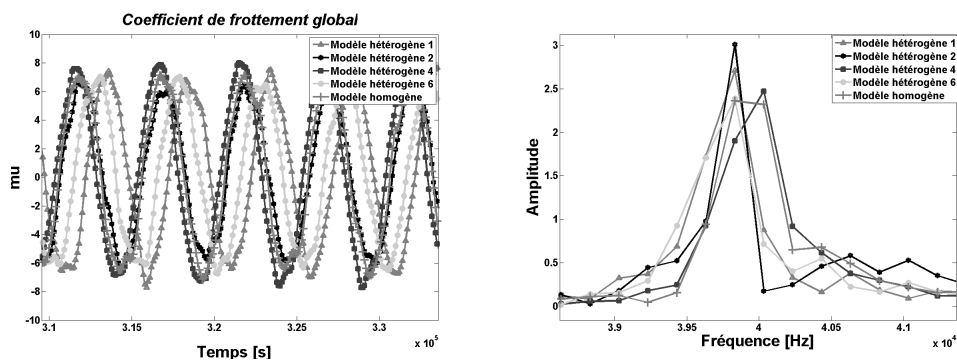


Figure 2 – (a) évolution temporelle du coefficient de frottement global et (b) spectre fréquentiel au cours du temps pour une pression P de $0.5MPa$

Le spectre fréquentiel montre que les modèles vibrent à une fréquence moyenne de $39932Hz$ et à des amplitudes semblables. Les résultats locaux montrent que l'ensemble des modèles ont

aussi le même régime d'instabilités au niveau du contact, régime de glissement-décollement avec un fort taux de décollement ($\approx 80\%$).

Ces résultats peuvent être comparés globalement à ceux obtenus dans le cas du contact déformable/rigide avec la même pression. L'ensemble des modèles hétérogènes ainsi que le modèle homogène évoluaient selon le même régime d'instabilités : régime de glissement-décollement avec un fort taux de glissement ($\approx 75\%$) avec une fréquence moyenne de vibration de $41233Hz$ [9]. Pour le contact entre composite et disque rigide ou déformable, à un chargement de $0.5MPa$, l'ensemble des modèles hétérogènes ainsi que le modèle homogène équivalent évoluent au même régime d'instabilités, mais ce régime d'instabilités peut être différent selon le type de contact.

3.3 Cas d'une pression $P=1MPa$

Pour une pression de $1MPa$, les résultats montrent que les quatre modèles hétérogènes et le modèle homogène ont des comportements différents au cours de la simulation (cf. figure 3).

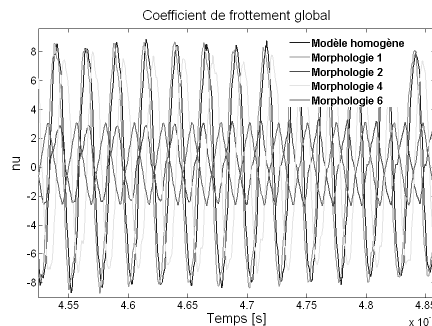


Figure 3 – Evolution temporelle du coefficient de frottement global en régime périodique établi

Deux groupes de comportements sont distingués selon le modèle et lorsque le régime est établi :

- groupe 1 : les modèles hétérogènes 1 et 4 et le modèle homogène.
- groupe 2 : les modèles hétérogènes 2 et 6.

L'analyse du spectre fréquentiel calculé à partir de l'évolution temporelle du coefficient de frottement global montre que les deux groupes vibrent à une fréquence proche, égale environ à $40000Hz(\pm 1000Hz)$. Cependant ils évoluent avec des régimes d'instabilités différents au niveau du contact : le groupe 1 suit un régime d'instabilités glissement-décollement avec un "fort" taux de décollement ($\approx 60\%$), tandis que le groupe 2 évolue à un régime glissement-décollement avec un fort taux de glissement ($\approx 90\%$).

La comparaison de ces résultats à ceux obtenus avec le modèle de contact déformable/rigide montre le même regroupement de comportement des modèles (groupe 1 et 2). Cependant la différence se situe au niveau des amplitudes. Pour une pression de $1MPa$ et selon le type de contact utilisé, les modèles peuvent donc conduire à des régimes d'instabilités différents au cours de la simulation.

3.4 Caractérisation des différences de comportements tribologiques

Pour comprendre l'origine de la différence des régimes d'instabilités pour des modèles hétérogènes ayant le même taux volumique de torons, une analyse par seuillage des différents modèles hétérogènes est proposée. Le but est de voir l'influence de la répartition des torons dans le volume, particulièrement au niveau du contact, ainsi que la répartition du gradient des contraintes, obtenu après un test de traction numérique en statique, sur les régimes d'instabilités.

3.4.1 Effets de la répartition des torons

Le pourcentage de torons dans la matrice, de chaque modèle hétérogène, est calculé par seuillage. Le seuillage d'une image consiste à mettre à zéro tous les pixels ayant un niveau de gris inférieur à une valeur seuil, et à la valeur maximale tous les pixels ayant une valeur supérieure. Ainsi le résultat du seuillage est une image binaire de hauteur H et de longueur L contenant des pixels noirs et blancs (cf. figure 4).

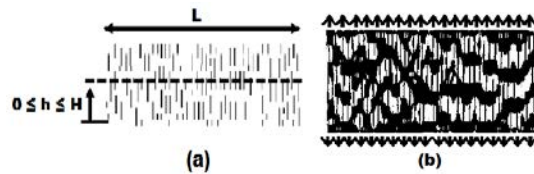


Figure 4 – Images binaires d'un modèle hétérogène après seuillage : (a) structure (torons en noir et matrice en blanc), (b) gradient de contraintes du modèle sollicité en traction

Après avoir obtenu une image binaire, le taux de pixels noirs rencontré est calculé en balayant l'image sur des fenêtres de différentes hauteurs h et de longueur L (cf. figure 4), permettant ainsi d'obtenir une évolution des taux surfacique dans la matrice.

3.4.2 Résultats

Les graphes de la figure ?? montrent que, pour $h = H$, tous les modèles hétérogènes ont quasiment le même taux volumique de torons ($9\% \pm 1\%$), valeur imposée lors de la construction des échantillons. Lorsque les fenêtres de seuillage diminuent ($h \rightarrow 0$), des différences aussi bien en terme de répartition de torons que de gradient de contraintes apparaissent.

Dans le premier cas (cf. figure 4a), le taux surfacique de torons en surface de contact des modèles hétérogènes 1 et 4 diminuent en fonction de la hauteur h , tandis que celui des modèles hétérogènes 2 et 6 augmente. La répartition de torons au niveau du contact est différente pour les deux groupes de modèles. Ceci peut alors expliquer la capacité des modèles hétérogènes 2 et 6 à avoir des réponses différentes selon le chargement.

Dans le deuxième cas (cf. figure 4b), le gradient de contraintes diminue en fonction de la hauteur h . Cependant pour des faibles hauteurs ($h \rightarrow 0$), le groupe des modèles hétérogènes 1 et 4 présente un gradient de contraintes supérieur au groupe de modèles hétérogènes 2 et 6.

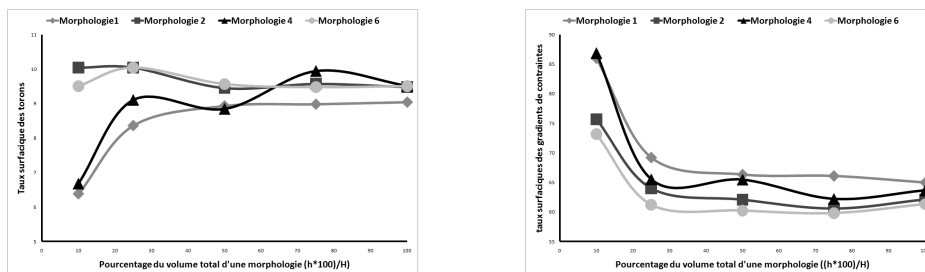


Figure 5 – Variation du taux surfacique : (a) des torons dans la matrice ; (b) des gradients de contraintes des modèles

Ces résultats montrent que les modèles 2 et 6, qui ont plus de torons en surface de contact, ont moins de gradient de contraintes à la surface de contact. En conclusion, il existe donc une

dépendance de la répartition des torons en surface de contact sur les régimes d'instabilités des modèles hétérogènes.

3.5 Conclusions

Pour une pression et un type de contact donnés, un modèle hétérogène peut avoir des régimes d'instabilités distincts, cependant un ensemble de modèles hétérogènes qui a un régime d'instabilités similaire en contact déformable/rigide, aura un régime d'instabilités similaire en contact déformable/déformable. Mais les régimes d'instabilités en contact déformable/déformable et déformable/rigide peuvent être différents. De ce fait, il ressort que la différence des modules d'élasticité des corps (composite, disque) en contact a une influence sur le régime d'instabilité d'un modèle hétérogène, mais elle n'influence pas le comportement global d'un ensemble de modèles hétérogènes. Par conséquent, le contact déformable/rigide reste suffisant pour l'étude de l'influence de la description du composite, sur les régimes d'instabilités de contact, et permet aussi un gain de temps de calcul.

Les différences de régimes d'instabilités de contact étant dépendantes de la répartition des torons en surface de contact, la microstructure du composite peut être optimisée afin de contrôler le type de régime d'instabilités ainsi que les contraintes. Pour cela des études de microstructures régulières sont en cours pour permettre une meilleure compréhension et un meilleur contrôle de la répartition des torons.

Références

- [1] P. Alard, F. Lebon Numerical study of a stratified composite coupling homogeneization and frictional contact. *Mathematical and Computer Modeling*, Volume 28(4-8), p. 273–286, 1998.
- [2] L. Baillet and T. Sassi Finite element method with lagrange multipliers for contact problems with friction. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Volume I 334, p. 917–922, 2002.
- [3] T. Belytschko, W. K. Liu and B. Moran Nonlinear finite elements for continua and structures. *Wiley*, 2000
- [4] N. J. Carpenter, R. L. Taylor and M. G. Katona Lagrange Constraints for transient finite element surface contact *Int. Numer. Methods Engrg.*, Volume 32, p. 103–128, 1991.
- [5] Cochard, A. and Rice, J. R. Fault rupture between dissimilar materials : Ill-posedness, regularization, and slip-pulse response. *J. of Geophys. Research*, Volume 105, p.25–891, 2000.
- [6] T. J. R. Hughes *The finite element method - Linear static and dynamic finite element analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1987.
- [7] H. Kasem, S. Bonnamy, B. Rousseau, H. Estrade-Szwarcckopf, Y. Berthier and P. Jacquemard Interdependence between wear process, size of detached particules and CO2 production during carbon/carbon composites friction. *16th International Conference on Wear of Materials. Elsevier Montreal, Canada*, Volume 2, p. 1220–1229, 2007
- [8] V. Linck, L. Baillet and Y. Berthier Modeling the consequences of local kinematics of the first body on friction and on third body sources in wear. *Wear*, Volume 255/1–6, p. 299–308, 2003.
- [9] G. Peillex, L. Baillet, and Y. Berthier Homogeneization in non-linear dynamics due to frictional contact. *Int. J. Solids Struct.*, Volume 45(9), p. 2451–2469, 2008.
- [10] V. Prakash and R. J. Clifton Time resolved dynamic friction measurements in pressure-shear. *Experimental Techniques in Dynamics of Deformable Solids.*, Volume 165, p. 33–48, 1993.