

Analyse numérique du fluage et de la recouvrance d'un contact viscoélastique

T. CHATEL, C. GAUTHIER, H. PELLETIER, V. LE HOUEROU, D. FAVIER

CNRS Institut Charles Sadron, UPR22, 23 rue du Loess, BP 84047, F-67034 Strasbourg Cedex 2, FRANCE

Résumé :

Des essais de fluage de contact et de recouvrance des empreintes ont été réalisés pour analyser la "cicatrisation" d'une surface de PMMA sollicitée en microindentation par une bille rigide. Les résultats sont analysés grâce à des simulations numériques. L'identification du comportement viscoélastique du PMMA est obtenue à partir d'essais de relaxation. Les résultats permettent d'analyser les champs de déformation sous le contact lors de la phase de fluage. Ceux-ci montrent que la localisation du niveau maximal de déformation est prépondérante dans le caractère cicatrisant d'une empreinte.

Abstract:

Creep of the contact and recovery of residual imprint tests have been made to analyze the "self-healing" of a PMMA surface during a spherical microindentation. The results are analyzed with numerical simulations. Identification of the viscoelastic behavior of PMMA is obtained from relaxation tests. The results permit to analyze strain fields under the contact during the creep phase. Strain fields could indicate that the onset of permanent imprint is probably correlated to the location at the interface sphere / surface of yield strain.

Mots clefs : analyse numérique, indentation, viscoélasticité, polymère

1 Introduction

De précédents résultats expérimentaux ont montrés les difficultés de l'analyse mécanique lors d'un essai de fluage et de recouvrance par microindentation [1]. Ces résultats ont pu être obtenu à l'aide d'un dispositif de vision in-situ qui permettait de suivre l'évolution de contact lors de la phase de fluage puis l'évolution de l'empreinte résiduelle au cours de la phase de recouvrance. La Figure 1 présente deux images typiques de l'aire de contact, dont l'analyse géométrique a permis de ne pas être modèle dépendant. L'étude de la recouvrance des empreintes résiduelles permet d'améliorer la compréhension des mécanismes mais la prédiction globale du comportement viscoélastique d'un contact sur surface de polymère reste incomplète. L'analyse numérique est un outil qui permet d'obtenir plus d'informations sur l'évolution des champs de déformations et des champs de contrainte [2-4] dès lors qu'une identification

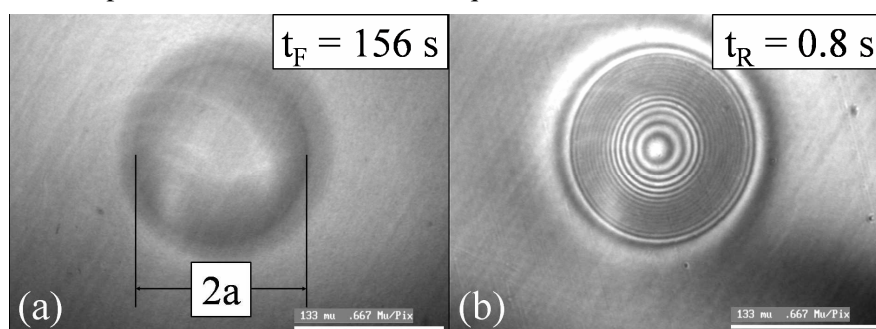


Figure 1 : (a) Aire réelle de contact lors de la phase de fluage (à $t_{\text{fluage}} = 156$ s) et (b) empreinte résiduelle lors de la phase de recouvrance (à 0.8 s après le retrait de la pointe en contact)

2 Identification du comportement viscoélastique

Les résultats des simulations numériques à suivre sont tributaires de la loi de comportement identifiée et mise en œuvre dans le code.

2.1 Loi de comportement utilisée

La loi de comportement viscoélastique utilisée dans le cadre de l'analyse numérique d'un contact essentiellement viscoélastique est celle décrite par un modèle de Maxwell. L'outil numérique à disposition propose l'écriture du modèle de Maxwell à partir de la description du module déviatorique et du module de compressibilité. Pour un essai de relaxation, l'écriture du modèle de Maxwell généralisé s'écrit :

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (1)$$

$$K(t) = K_{\infty} + \sum_{i=1}^N K_i \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2)$$

où G_i et K_i correspondent aux paramètres de lissage et G_{∞} et K_{∞} correspondent aux modules déviatoriques et de compressibilité relaxés. La relaxation du module de compressibilité est choisie ici pour plus de commodité. En effet, la prise en compte de la relaxation du coefficient de Poisson est possible mais reste une donnée délicate à obtenir lors des essais expérimentaux. Le coefficient de Poisson est donc considéré constant et égal à 0.35. Le mode d'identification retenu nécessite donc de réaliser des essais de relaxation pour différentes déformations vraies appliquées.

2.2 Essais de relaxation et identifications

Plusieurs essais de relaxation uniaxial en compression ont été réalisés pour différentes déformations vraies appliquées et égales à 0.75%, 1.4%, 2.4% et 4%. Ces valeurs sont choisies car elles sont comparables aux déformations moyennes de contact imposées lors des essais. Le module de relaxation obtenu peut être décomposé en un module déviatorique et un module de compressibilité. La Figure 2(a) présente l'évolution du module déviatorique (G_V) en fonction du temps pour différentes déformations vraies appliquées et une température de 30 °C. Les courbes correspondant à l'évolution du module de compressibilité ne sont pas présentées ici. On observe que le module diminue avec le temps et que la diminution observée est d'autant plus importante que la déformation vraie appliquée est grande. Chacune de ces courbes est représentative du comportement viscoélastique du PMMA pour une sollicitation donnée différente.

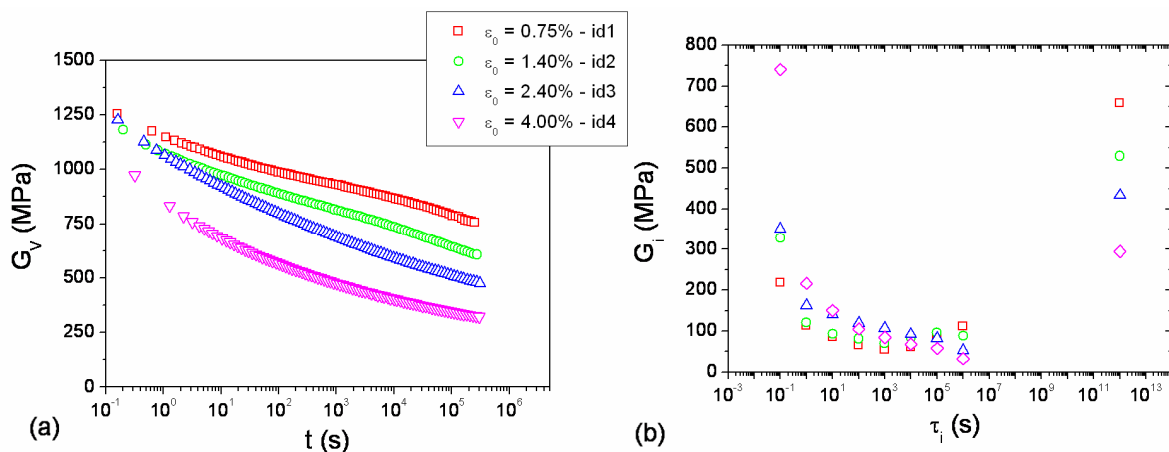


Figure 2 : Essai de relaxation – (a) Evolution du module déviatorique (G_V) en fonction du temps et (b) évolution des paramètres identifiés en fonction des temps caractéristiques pour différentes déformations vraies appliquées ($T = 30$ °C)

Le lissage des points expérimentaux obtenus est réalisé à l'aide des équations (1) et (2). Ce lissage nécessite de fixer le nombre de temps caractéristiques. Les différents lissages réalisés montrent qu'il est nécessaire de choisir un nombre de temps caractéristiques au moins égal au nombre de décades explorées

lors des essais expérimentaux. Dans notre cas, le nombre de décades couvertes par les mesures expérimentales est de 7, ce qui impose un nombre de temps caractéristiques égal à 8 pour un lissage de bonne qualité. Le nombre de paramètres importants de l'équation de lissage permet de fixer les valeurs des temps caractéristiques de la manière suivante :

$$\tau_i = [10^{-1} s ; 10^0 s ; 10^1 s ; 10^2 s ; 10^3 s ; 10^4 s ; 10^5 s ; 10^6 s]$$

La Figure 2(b) présente l'évolution des paramètres d'identification en fonction des temps caractéristiques pour les différentes déformations vraies appliquées. Par commodité, les valeurs de G_∞ ont été placées pour un temps caractéristique égal à 10^{12} s. Les résultats obtenus montrent que les paramètres identifiés diminuent avec le temps. Compte tenu de l'allure des courbes, il semble difficile de décrire un comportement viscoélastique général s'affranchissant de la déformation appliquée lors des essais. L'identification utilisée sera donc choisie pour que la valeur de la déformation vraie appliquée se rapproche le plus de la déformation moyenne de contact initial défini par Tabor et égale à $0.2 a_0/R$.

3 Moyens numériques mis en œuvre

3.1 Modèles numériques utilisés

Le logiciel de simulation numérique utilisé est MSC Software MARC® et deux modèles numériques axisymétriques ont été développés dans le cadre de cette étude. Le premier est utilisé pour simuler les essais uniaxiaux réalisés dans le cadre de l'identification du comportement viscoélastique. Le second est utilisé pour simuler les essais de microindentation réalisés. L'une des spécificités de ces modèles numériques est que le pilotage de chaque simulation réalisée est identique au pilotage obtenu lors des essais expérimentaux. Les tables de déplacement (essai de relaxation) et de force (essai de microindentation) sont intégrées au modèle numérique correspondant. Ainsi, les simulations intègrent l'existence d'un "overshoot" lors de l'application de la charge ainsi qu'une éventuelle dérive des capteurs avec le temps. Le rapport a_0/R , rapport entre le rayon de contact et le rayon de la bille (représentatif de la déformation imposée, définie par Tabor [5]), ainsi que la pression moyenne de contact (p_m) à $t_F = 0.5$ s sont également identiques aux valeurs relevées expérimentalement. Les conditions aux limites relatives aux simulations numériques réalisées sont garanties identiques aux conditions expérimentales.

3.2 Paramètre d'analyse

3.2.1 Phase de fluage

A partir de la connaissance du rayon de l'indenteur utilisé et de la mesure du rayon de contact, il est possible de définir une déformation représentative de contact $a(t)/R$. Pour une comparaison plus globale des essais réalisés, la déformation moyenne de contact est normée de la manière suivante :

$$\frac{a(t)/R}{a_0/R} \quad (3)$$

où $a(t)$ est le rayon de contact évoluant avec le temps de fluage, R le rayon de l'indenteur valant $400 \mu\text{m}$ et a_0 le rayon de contact à $t_F = 0.5$ s. Comme pour les essais expérimentaux, l'analyse numérique permet de s'affranchir de la part de déflexion élastique (ou viscoélastique) au bord du contact.

3.2.2 Phase de recouvrance

Lors de la phase de recouvrance, la mesure du rayon de l'empreinte résiduelle n'est pas le seul paramètre d'analyse possible. Le rayon de la cavité sphérique de l'empreinte résiduelle varie également avec le temps comme le rayon de courbure de l'empreinte en recouvrance. La déformation représentative normée devient :

$$\frac{a(t)/R(t)}{a_{t_0}/R} \quad (4)$$

où $R(t)$ est le rayon de courbure de l'empreinte résiduelle et a_{t_0} le rayon du contact réel à la fin de la phase de fluage. Les modèles numériques utilisés, la gestion du pilotage mis en place et le post traitement proposé permettent de se rapprocher au maximum des conditions expérimentales. L'identification du comportement viscoélastique du polymère étudié est la difficulté majeure à résoudre pour essayer de corréler les résultats expérimentaux et les résultats obtenus numériquement.

4 Simulation numérique d'un contact viscoélastique

4.1 Phase de fluage d'un contact sphère / plan

La Figure 3(a) présente l'évolution de la déformation représentative (3) en fonction du temps de fluage pour différents temps d'application de charge et une déformation moyenne de contact initial égale à 4%. Les résultats expérimentaux sont également confrontés à l'analyse numérique d'un contact viscoélastique dont le comportement est identifié à partir de l'essai de relaxation dont la déformation vraie appliquée est égale à 4% (*id4*).

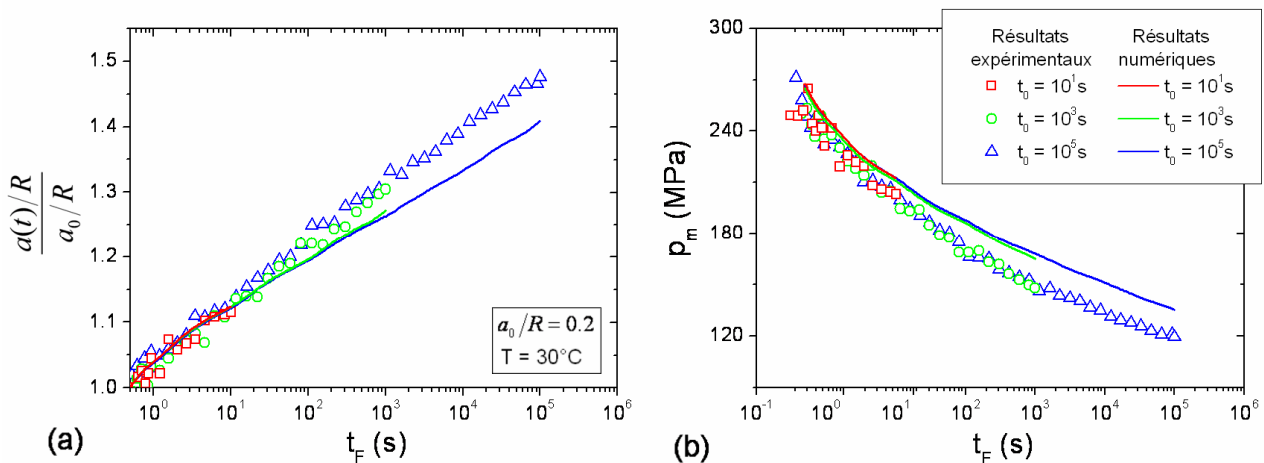


Figure 3 : Phase de fluage pour un contact sphère / plan – Comparaison entre l'analyse numérique et les résultats expérimentaux – (a) Evolution de la déformation représentative et (b) évolution de la pression moyenne de contact en fonction du temps de fluage pour différents temps de maintien en charge ($\langle \varepsilon_0 \rangle = 4\%$, $R = 400 \mu\text{m}$, $T = 30^\circ\text{C}$, *id4*)

On observe une bonne corrélation entre les résultats obtenus par analyse numérique et les résultats expérimentaux. Néanmoins, la déformation représentative correspondant au temps d'application de charge de 10^5 s est sous-estimée par rapport aux résultats obtenus expérimentalement. La Figure 3(b) présente l'évolution de la pression moyenne de contact en fonction du temps de fluage pour différents temps d'application de charge et une déformation moyenne de contact égale à 4%. Les résultats expérimentaux sont confrontés à l'analyse numérique d'un contact viscoélastique pour un comportement identifié à partir de l'essai de relaxation dont la déformation vraie appliquée est égale à 4% (*id4*). Les résultats obtenus par analyse numérique sont en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. Néanmoins, les pressions moyennes de contact surestiment sensiblement les valeurs expérimentales.

4.2 Phase de recouvrance des empreintes résiduelles

La Figure 4 présente l'évolution de la déformation représentative (4) en fonction du temps de recouvrance des empreintes résiduelles pour différents temps d'application de charge. Les résultats expérimentaux sont confrontés à l'analyse numérique du retour viscoélastique de l'empreinte résiduelle. L'identification du

comportement viscoélastique est réalisée à partir de l'essai de relaxation dont la déformation vraie appliquée est égale à 4% (*id4*). Les résultats numériques suivent plus ou moins bien les résultats obtenus expérimentalement. Pour un temps d'application de charge égal à 10 s, la simulation numérique décrit la bonne tendance du résultat obtenu expérimentalement, à savoir une cicatrisation totale et très rapide de l'empreinte résiduelle. Pour un temps d'application de charge égal à 10^3 s, la cicatrisation complète de l'empreinte résiduelle est également simulée. En effet, il est possible de considérer l'empreinte résiduelle obtenue expérimentalement comme complètement cicatrisée. Par contre, pour un temps d'application de charge égal à 10^5 s, la simulation numérique ne prévoit pas le comportement non linéaire du PMMA et la déformation permanente observée.

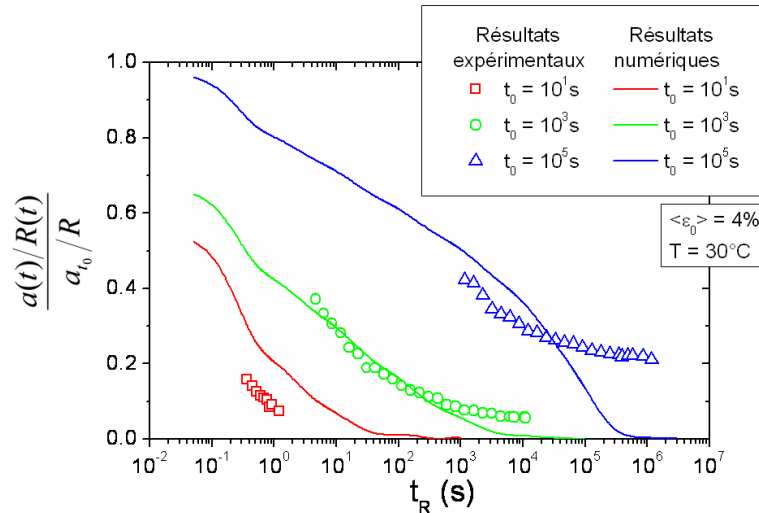


Figure 4 : Phase de recouvrance de l'empreinte résiduelle – Comparaison entre l'analyse numérique et les résultats expérimentaux - Evolution de la déformation représentative en fonction du temps de recouvrance pour différents temps de maintien en charge ($\langle \epsilon_0 \rangle = 4\%$, $R = 400 \mu\text{m}$, $T = 30^\circ\text{C}$, *id4*)

4.3 Etude des champs de contraintes et de déformations

Les champs de contraintes, non présentés ici montrent que, dès la phase de chargement terminée, la contrainte équivalente de von Mises admet un maximum égal à 235 MPa à t_F égal à 0.5 s. Cette valeur est bien supérieure à la contrainte d'écoulement plastique du PMMA (~ 130 MPa). Néanmoins des cicatrisations pouvant être considérées comme complètes sont observées pour les temps d'application de charge les plus courts. Or, pour ces niveaux de contrainte, de la plasticité est présente dans le volume déformé. Les résultats expérimentaux semblent montrer qu'il y a lieu de dissocier, l'apparition de plasticité dans un volume situé sous la surface, de la plasticité développée dans un volume à la surface. La Figure 5 présente les champs de déformations (ϵ_{11}) lors d'un contact sphère / plan pour deux temps de maintien en charge ($t_F = 0.5$ s et $t_F = t_0$), un temps de recouvrance ($t_R = t_0/10$), une déformation moyenne initiale égale à 4% et une température de 30°C . L'identification correspond à une déformation vraie imposée égale à 4% (*id4*). L'analyse de ses champs de déformation est un bon indicateur de l'évolution du matériau avec le temps. A $t_F = 0.5$ s, la valeur maximale atteinte est égale à 8%. Le champ de déformation correspondant à un temps de maintien en fluage égale à 10^3 s admet un maximum égal à 10%, néanmoins les courbes correspondant au temps de maintien en charge les plus faibles, présenté Figure 4, admettent une cicatrisation considérée comme complète. Le champ de déformation correspondant au temps de maintien en fluage le plus long admet un maximum égal à 14.6% et une déformation à la surface du matériau égale à 10%. La recouvrance obtenue pour cet essai n'est pas complète et une déformation permanente est obtenue. De la plasticité s'est développée dans le volume sollicité. Cette plasticité confinée dans un volume sous le contact freine le retour viscoélastique comme le montre la courbe correspondant à un temps de maintien en charge égal à 10^3 s. En première approche, compte tenu des résultats présentés Figure 4 il semble que c'est à partir d'une déformation supérieure à 10% et développée à la surface du contact que l'empreinte résiduelle admet une déformation permanente.

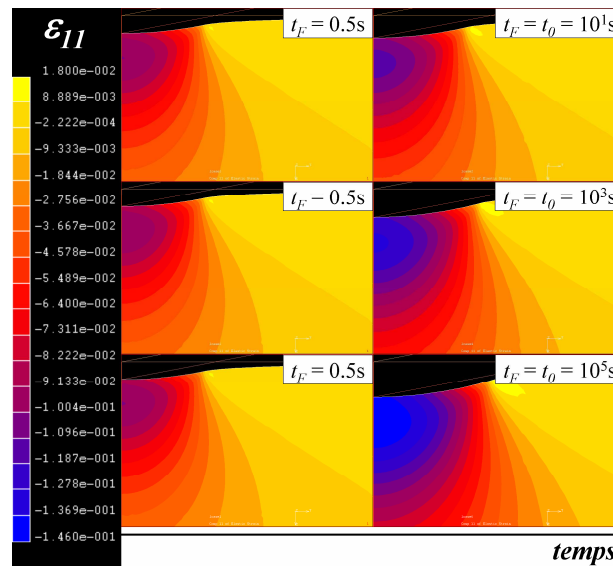


Figure 5 : Champs de déformations 11 pour deux temps de maintien en charge à $t_F = 0.5$ s et $t_F = t_0$ et différents temps de maintien en charge ($\langle \epsilon_0 \rangle = 4\%$, $R = 400 \mu\text{m}$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, id4)

5 Conclusion

Les modèles numériques développés permettent une première description du comportement viscoélastique du PMMA lors d'un essai de microindentation en fluage et recouvrance. Les particularités de ces modèles permettent de modéliser les essais expérimentaux de la manière la plus proche possible des conditions expérimentales. L'identification du comportement viscoélastique à partir des essais de relaxation permet d'obtenir des résultats intéressants dans le domaine de la description d'un comportement viscoélastique linéaire. Les résultats numériques des essais de microindentation mettent à jour plusieurs points importants concernant l'apparition de plasticité dans le contact. Malgré des déformations importantes relevées dans le volume sollicité et la forte probabilité de la présence d'un volume plastifié sous le contact, une cicatrization considérée comme complète peut être observée. Il apparaît que lorsque la déformation atteint une valeur de l'ordre de 10% à la surface du contact, la cicatrization n'est plus réalisée complètement. Cet aspect rend difficile la prise en compte de la viscoplasticité dans les modèles développés. Il semble qu'un critère d'apparition de la plasticité en fonction de la déformation doit être choisi. Ce type de critère est abordé dans quelques études [6, 7] et est une des perspectives de ce travail.

References

- [1] Chatel, T., et al., *Creep of the contact with a spherical tip and recovery of the imprint on amorphous polymer surfaces*. Soumis à Journal of Physics D-Applied Physics, 2011.
- [2] Dooling, P.J., C.P. Buckley, and S. Hinduja, *The onset of nonlinear viscoelasticity in multiaxial creep of glassy polymers: A constitutive model and its application to PMMA*. Polymer Engineering and Science, 1998. **38**(6): p. 892-904.
- [3] Cheng, L., et al., *Flat-punch indentation of viscoelastic material*. Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics, 2000. **38**(1): p. 10-22.
- [4] Pelletier, H., et al., *Viscoelastic and elastic-plastic behaviors of amorphous polymeric surfaces during scratch*. Tribology International, 2008. **41**(11): p. 975-984.
- [5] Tabor, D., *The hardness of solids*. Rev Phys Technol, 1970: p. 145-179.
- [6] Kameda, J., Y. Yokoyama, and T.R. Allen, *Strain-controlling mechanical behavior in noncrystalline materials I: Onset of plastic deformation*. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2007. **448**(1-2): p. 235-241.
- [7] Marano, C. and M. Rink, *Shear yielding threshold and viscoelasticity in an amorphous glassy polymer: A study on a styrene-acrylonitrile copolymer*. Polymer, 2001. **42**(5): p. 2113-2119.