

Comportement à la rayure de surfaces de polymères : comparaison entre mesures expérimentales et simulations numériques

Hervé Pelletier, Christian Gauthier, Robert Schirrer

Institut Charles Sadron, UPR 22,
6 rue Boussingault, F-67083 STRASBOURG Cedex.
pelletier@ics.u-strasbg.fr

Résumé :

Dans ce travail, nous présentons les premiers résultats de simulations numériques du test de rayure sur matériaux massifs. Nous avons supposé des lois de comportement de type G'Sell – Jonas, identifiées expérimentalement par indentation pour deux matériaux polymères PMMA et CR39. Nous avons modélisé la rayure générée par un indenteur sphérique de rayon R pour différents rapports a/R (avec a , le rayon de contact), pour un facteur de frottement adhésif local supposé constant $\mu_{loc} = 0.3$. Pour un rapport $a/R = 0.3$, nous avons étudié l'influence du frottement adhésif local avec μ_{loc} compris entre 0 et 0.4. Les résultats obtenus par analyse numérique confirment en grande partie les observations expérimentales obtenues à l'aide de la machine de micro-rayage. Nous montrons un couplage fort entre déformation plastique sous l'indenteur, frottement, et morphologies du contact. Il est possible d'estimer en fonction des conditions de rayage, une déformation plastique moyenne représentative de la nature du contact. Cette déformation est utilisée pour analyser les essais expérimentaux.

Abstract :

For a thermosetting resin (CR39) and a thermoplastic polymer (PMMA), numerical results of scratch test obtained with finite element modelling are presented. Assuming linear behaviour and a plastic law with a large strain hardening capacity, scratch generated by a spherical indenter has been modelled for different ratios a/R (with a , the contact radius and R , the tip radius) and various friction coefficient μ_{loc} , varying between 0 and 0.4. Numerical analyses confirm mainly experimental results, obtained with a micro-scratch tester allowing in situ observation of the contact area during tests. Correlations have been found between plastic deformation beneath the indenter tip, friction coefficient and geometrical parameters used for describing the contact area. As a function of the scratch parameters (a/R , μ_{loc}), we have defined an average plastic deformation representative of the contact.

Mots clés : Rayure, polymères, simulation numérique, frottement, déformation représentative

1 Introduction :

Dans ce travail, nous présentons les premiers résultats obtenus en simulation numérique par la méthode des éléments finis, réalisée à l'aide du code de calculs MSC MARC ®. Nous avons supposé des lois de comportement de type G'Sell – Jonas, identifiées expérimentalement par indentation pour deux matériaux polymères PMMA et CR39 (Bucaille *et al.* 2006). Nous avons modélisé la rayure générée par un indenteur sphérique de rayon R , supposé rigide, pour différents rapports a/R compris entre 0.2 et 0.6 (avec a , le rayon de contact), pour un facteur de frottement adhésif local supposé constant $\mu_{loc} = 0.3$. Pour un rapport $a/R = 0.3$ constant, nous avons étudié l'influence du frottement adhésif local avec μ_{loc} compris entre 0 et 0.4. Les résultats obtenus par analyse numérique confirment en grande partie les observations expérimentales obtenues à l'aide de la machine de micro-rayage, développée à l'ICS (Gauthier *et al.* 2000). Nous montrons un couplage fort entre déformation plastique sous l'indenteur, frottement, et morphologies du contact. L'apparition de la plasticité dans les contacts tangentiels est directement influencée par le niveau de frottement adhésif local. Enfin, pour une rhéologie donnée, la géométrie du contact (formation des bourrelets frontaux et latéraux) et le sillon résiduel (angle de retour élastique) sont directement reliés au frottement μ_{loc} et à la déformation moyenne du contact imposée par la forme macroscopique de la pointe. Pour les deux rhéologies étudiées, il est possible d'estimer en fonction des conditions de rayage, une déformation plastique moyenne représentative de la nature du contact.

2 Détails expérimentaux

2.1 Tests de micro-rayures instrumentées

Le dispositif expérimental utilisé en rayure, développé en interne à l'Institut Charles Sadron (Gauthier *et al.* 2000), présente l'avantage de pouvoir visualiser *in-situ* l'aire de contact entre l'indenteur (de forme sphérique de rayon $R = 116 \mu\text{m}$) et la surface du matériau polymère transparent. Le principe est décrit sur la figure 1. Pour des tailles de contact de l'ordre de quelques dizaines de micromètres, il est possible de réaliser des essais de rayures à différentes charges normales comprises entre 0 et 25N, tout en contrôlant la température de la chambre ($-70^\circ\text{C} \leq T \leq +100^\circ\text{C}$) et la vitesse de rayage ($1 \mu\text{m.s}^{-1} \leq V \leq 10 \text{mm.s}^{-1}$). On pourra trouver dans les références Gauthier *et al.* (2001) une description plus précise des capacités de la machine de micro-rayure instrumentée. Dans ce travail, sur des surfaces de PMMA et de CR39, possédant des frottements différents ($\mu_{10c} \approx 0.1 - 0.2$ et $\mu_{10c} \approx 0.3 - 0.4$), nous avons réalisé des essais à température ambiante et à vitesse V constante, à différentes charges normale F_N comprises entre 0.1 et 5 N, afin d'obtenir pour chaque surface des rayures à des rapports (a/R) compris entre 0.17 et 1.11.

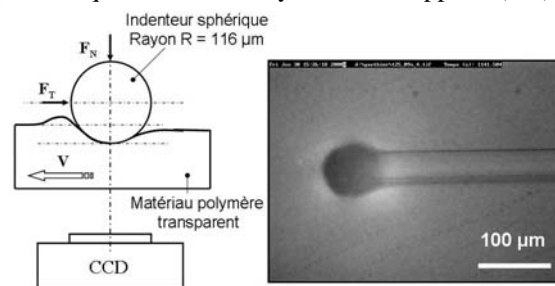


FIG. 1 – Description du principe de fonctionnement de l'appareil de micro-rayure équipé d'un système de vision *in-situ* et exemples de micrographie optique réalisée au cours d'une rayure.

2.2 Présentation du modèle numérique

Les simulations du contact glissant entre un indenteur sphérique supposé rigide et la surface d'un matériau élasto-plastique ont été réalisées à l'aide du code de calculs MSC MARC ®. Sur la figure 2, nous pouvons observer différentes vues du maillage progressif utilisé. Le massif, modélisé par un quart de cylindre de longueur $L_m = 21 \mu\text{m}$ et de rayon $r_m = 9.4 \mu\text{m}$, est subdivisé en plusieurs zones, présentant des tailles d'éléments différentes. Le maillage est plus dense au niveau du contact et dans la zone de forte déformation, pour assurer la convergence des calculs et garantir la précision des résultats. Pour éviter la mise en oeuvre d'une cellule de remaillage automatique, classiquement utilisée pour simuler une rayure (Bucaille *et al.* 2001), nous avons tout d'abord optimisé la taille et la forme des éléments dans le contact, pour supporter les fortes déformations plastiques et l'introduction du frottement interfacial. Ce type de maillage présente l'avantage de travailler avec un nombre d'éléments constant et donc de calculer des grandeurs moyennes, notamment une déformation plastique moyenne, représentative du contact sur des volumes donnés. La cinématique se décompose en deux phases : (i) une phase d'indentation avec le pilotage en déplacement de l'indenteur dans une direction normale à la surface jusqu'à une profondeur de consigne h_i et (ii) une phase de rayure avec le déplacement de l'indenteur dans une direction longitudinale à vitesse constante $V = 6 \mu\text{m.s}^{-1}$ et sur une distance totale de $L_R = 6 \mu\text{m}$. Nous avons introduit pour les deux matériaux polymères étudiés (PMMA et CR39) des lois réalistes de type G'sell – Jonas simplifiée, identifiées expérimentalement par indentation instrumentée à température ambiante (supposée constante) et à vitesse de déformation constante (Bucaille *et al.* 2005) :

$$\sigma = K \exp(h_g \varepsilon_p^2) \quad \text{Eq. 1}$$

Avec $\sigma \geq \sigma_y$, ε_p la déformation plastique, K et h_g deux constantes intrinsèques au matériau indenté.

Matériau	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	K (MPa)	h_g (u.a.)
PMMA	4.2	0.3	100	81.20	0.5
CR39	2.1	0.3	72	70.69	4.5

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des matériaux introduits dans le modèle numérique.

Nous avons regroupé les valeurs des différentes propriétés mécaniques dans le tableau 1. L'érouissage du matériau est supposé isotrope, et nous avons associé un critère de plasticité de Von Mises. Le

frottement local vrai ou adhésif, noté μ_{loc} , caractérisant le contact entre l'indenteur rigide et la surface déformable, est matérialisé par une loi de Coulomb.

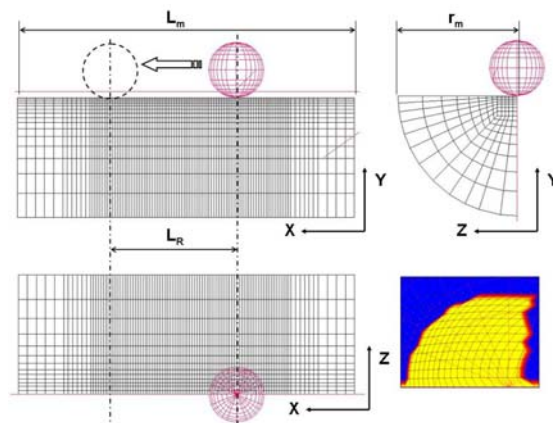


FIG. 2 – Description du maillage utilisé en modélisation numérique du test de rayure d'une surface de polymère.

3 Résultats

3.1 Analyse des essais expérimentaux

Sur la figure 3, nous montrons l'évolution des morphologies du contact et du sillon en fonction du rapport a/R et du frottement local pour le PMMA et le CR39. Nous pouvons noter tout d'abord la différence de comportement à la rayure des deux surfaces de polymères, associée directement à leur rhéologie, notamment leur comportement dans le domaine plastique. Cette figure illustre l'effet du frottement local sur la géométrie du contact en particulier pour des valeurs de a/R comprises entre 0.2 et 0.5. Pour un rapport a/R donné, on observe une augmentation de la pression moyenne avec l'augmentation du frottement local. Dans le cas du PMMA, pour $a/R = 0.47$, on observe une diminution de l'angle de retour élastique et la formation d'un bourrelet frontal plus important quand μ_{loc} augmente. Par ailleurs, le bourrelet frontal rejoint de part et d'autre du contact les bourrelets latéraux, qui apparaissent nettement dans la décharge élastique. A plus forte charge normale ($a/R = 0.9$), l'augmentation du frottement conduit à un début d'endommagement de la surface de PMMA, avec des défauts qui apparaissent dans le fond du sillon (Gauthier *et al.* 2006). Dans le cas du CR39, pour $a/R = 0.32$ et $\mu_{loc} = 0.32$, le contact est déjà plastique avec un angle de retour élastique nul et les bords du sillon résiduel relativement parallèles, tandis qu'à $a/R = 0.5$ et $\mu_{loc} = 0.15$, l'angle de retour élastique est plus important et on peut observer des flammes viscoélastiques à l'arrière de l'indenteur.

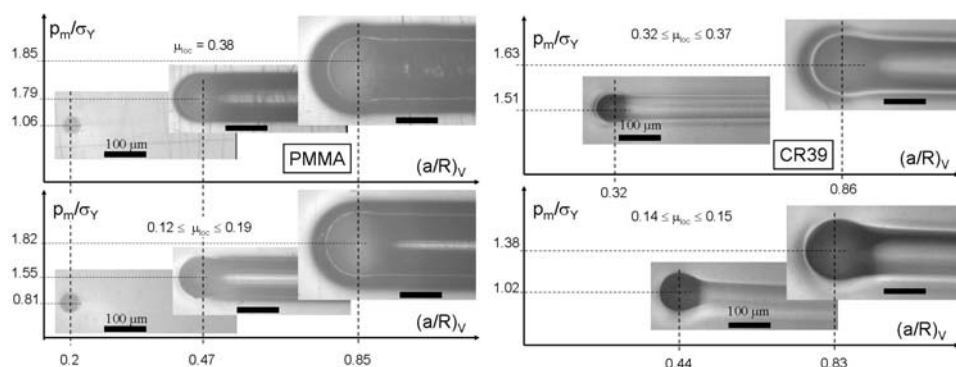


FIG. 3 – Morphologie du contact en fonction du rapport $(a/R)_V$ pour différentes valeurs de frottement μ_{loc} (a) PMMA et (b) CR39.

3.2 Analyse des rayures obtenues par simulation numérique

La figure 4 montre pour les deux matériaux simulés l'influence du frottement μ_{loc} sur la formation du bourrelet frontal et sur le retour élastique à l'arrière de l'indenteur. On peut observer pour un rapport a/R

$= 0.3$ et un frottement donné, l'influence de la rhéologie du matériau sur la réponse en rayure. Le PMMA montre la formation d'un bourrelet plastique frontal plus important que le CR39, et relativement sensible au frottement local. Le retour élastique du fond du sillon est plus grand dans le cas du CR39. La modélisation numérique fournit également en fonction des conditions de rayage (a/R , μ_{loc}) et de la rhéologie des champs de déformation élastique et de déformation plastique sous l'indenteur et dans le sillon résiduel. La figure 4 montre l'évolution du gradient de déformation plastique pour $a/R = 0.3$ pour deux valeurs de frottement. Avec l'augmentation de μ_{loc} , on peut observer une modification importante des dimensions du volume déformé en plasticité, ainsi qu'une augmentation de la déformation plastique maximale. L'augmentation du frottement tend à faire remonter la plasticité en surface, en réduisant la profondeur d'influence de la cavité plastique. On peut noter également un déplacement du point de déformation plastique maximale, d'un point situé dans le volume sous l'indenteur pour $\mu_{loc} = 0$ à un point situé à l'arrière de l'indenteur en surface pour $\mu_{loc} = 0.3$. Cette variation des dimensions du volume déformée en plasticité ainsi que le déplacement de déformation plastique maximale en surface est d'autant plus important dans le cas de matériau possédant un faible écrouissage (cas du PMMA).

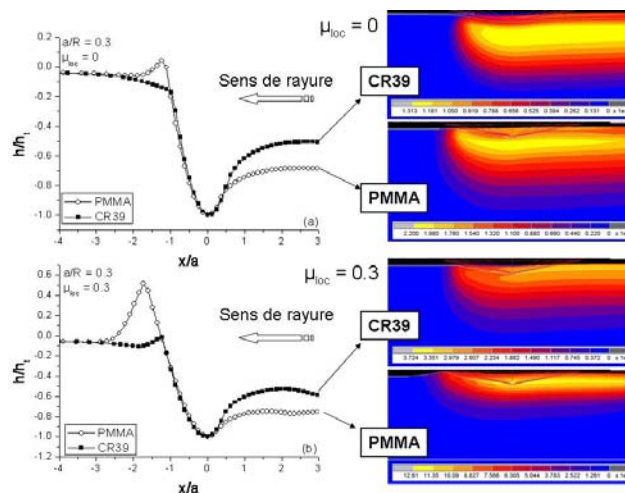


FIG. 4 – Topographies du contact sous l'indenteur pour $a/R = 0.3$ (a) $\mu_{loc} = 0$ et (b) $\mu_{loc} = 0.3$, pour le PMMA et le CR39, déterminées par modélisation numérique ; champs de déformation plastique sous l'indenteur associés aux topographies.

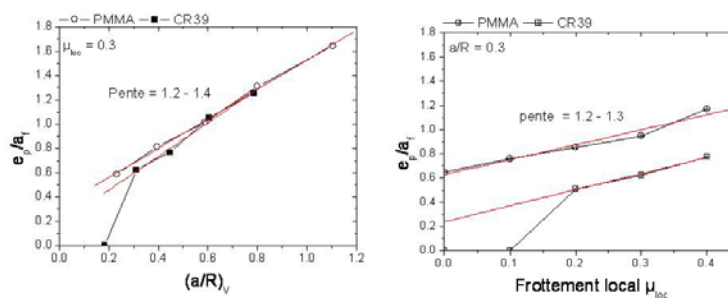


FIG. 5 – Evolutions du rapport du rapport e_p/a_f en fonction du rapport $(a/R)_v$ (a) et du frottement local μ_{loc} (b) déterminées par simulation numérique pour le PMMA et le CR39.

Nous avons représenté l'évolution des rapports e_p/a_f (Fig. 5) et a_r/a_f (Fig. 6) en fonction du rapport $(a/R)_v$ pour $\mu_{loc} = 0.3$ et en fonction du frottement pour $a/R = 0.3$. Le rapport a_r/a_f caractérise de la même façon que l'angle de retour élastique ω la dissymétrie du contact (Lafaye 2002). L'évolution du rapport e_p/a_f associé à la formation du bourrelet frontal déterminé à partir des simulations numériques montre des tendances similaires à celles observées expérimentalement. Pour $\mu_{loc} = 0.3$, le bourrelet frontal apparaît à partir d'une valeur seuil du rapport $(a/R)_v$ de l'ordre de 0.3 pour le CR39. Dans le cas du PMMA, le bourrelet frontal se forme rapidement, certainement pour un rapport $(a/R)_v$ compris entre 0.1 et 0.15. Pour des rapports $(a/R)_v$ supérieures, l'évolution du rapport e_p/a_f est linéaire. Enfin, l'augmentation du frottement pour $a/R = 0.3$ amplifie le bourrelet frontal, en particulier dans le cas du PMMA, avec une diminution du rapport $(a/R)_v$ seuil d'apparition du bourrelet. L'évolution linéaire avec des pentes

identiques observée pour les deux rhéologies est surprenante. Expérimentalement, l'évolution de e_p/a_f est effectivement linéaire mais avec une pente différente pour les deux matériaux. Par ailleurs, les valeurs seuil des rapports $(a/R)_V$ déterminées expérimentalement sont plus élevées que celles estimées à partir des résultats numériques.

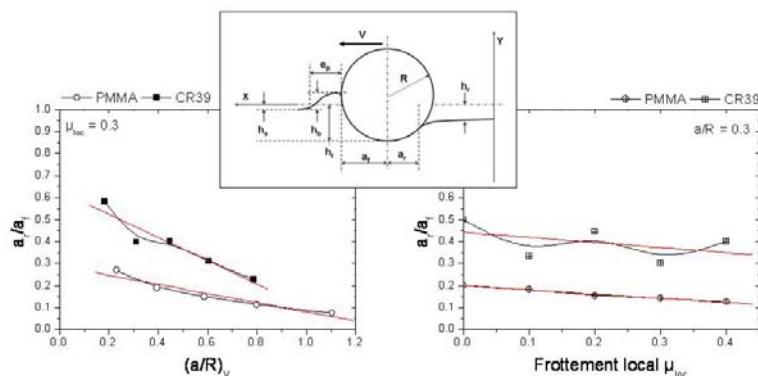


FIG. 6 – Evolutions du rapport a_r/a_f en fonction du rapport $(a/R)_V$ (a) et du frottement local μ_{loc} (b) déterminées par simulation numérique pour le PMMA et le CR39 ; (c) modélisation analytique du contact entre un indenteur sphérique et une surface de polymère lors d'une rayure.

Le rapport a_r/a_f donne des informations similaires quant à la nature du contact que l'angle de retour élastique (Lafaye 2002) : (i) quand a_r/a_f tend vers 1, le contact est élastique avec une faible dissymétrie du contact ($\omega \rightarrow \pi/2$) et (ii) quand a_r/a_f tend vers 0, le contact devient de plus en plus plastique, avec un contact uniquement sur l'avant de l'indenteur ($\omega \rightarrow 0$). Sur la figure 6, on observe pour les deux matériaux simulés une décroissance du rapport a_r/a_f pour des valeurs de $(a/R)_V$ croissantes. On peut noter l'effet de la rhéologie sur l'évolution du rapport a_r/a_f , avec un contact plus plastique dans le cas du PMMA quel que soit le rapport $(a/R)_V$ compris entre 0.2 et 0.6. Ces tendances sont en accord avec les observations expérimentales et avec les cartographies des champs de déformation plastique équivalente de la figure 4. En fonction du frottement pour $a/R = 0.3$, on observe une faible décroissance du rapport a_r/a_f (Fig. 6). Ce résultat montre l'effet du frottement sur la nature du contact avec une augmentation de la plasticité dans le contact avec une augmentation de μ_{loc} .

4 Discussion

Malgré les progrès apportés par les nouveaux appareils de rayures équipés de système de vision *in-situ* du contact, la compréhension et l'interprétation des résultats expérimentaux restent encore délicates. La description complète des champs de déformations élastiques et plastiques en fonction des conditions de rayage reste encore inaccessible, car la plupart des travaux antérieurs (Bucaille 2001) supposent des contacts entre l'indenteur et la surface sans frottement. Classiquement, on utilise la définition de la déformation moyenne introduite par Tabor (1951) dans le cas d'indentation avec des indenteurs de géométrie sphérique. La déformation moyenne sous l'indenteur est proportionnelle au rapport $(a/R)_V$. Gauthier *et al.* (2000, 2006) utilisent en première approximation cette définition pour analyser les courbes de pression moyenne déterminées expérimentalement en rayure. Cependant, comme le montrent les figures précédentes, le frottement modifie le gradient de déformation plastique sous l'indenteur au cours de la rayure, et donc sur les paramètres associés à la description de la géométrie du contact (ω , a_r/a_f , e_p/a_f). Nous avons isolé un volume représentatif, noté V_p , de forme parallélépipédique délimitant la cavité plastique sous l'indenteur. Les dimensions de ce volume représentatif décrit sur la figure 7 ont été déterminées en première approximation sur la base de travaux en indentation (Johnson 1970). A partir des différentes simulations numériques nous avons estimé une déformation plastique moyenne, représentative du contact. Cette déformation plastique moyenne correspond à la moyenne des déformations plastiques de chaque élément plastifié dans le volume représentatif et est définie par l'équation suivante :

$$(\varepsilon^P)_{eq} = \frac{\sum_{V_i} \varepsilon_i^P V_i}{\sum_{V_i} V_i} \quad \text{Eq. 2}$$

Avec V_i le volume d'un élément dans le volume représentatif et ε_i^P la déformation plastique associée de l'élément. La déformation plastique moyenne augmente avec le rapport $(a/R)_V$ et avec le frottement adhésif (Fig. 7). Ces figures confirment les tendances qualitatives observées sur les cartographies de

champ de déformation plastique (Fig. 4). Ces courbes indiquent sans ambiguïté l'influence du frottement adhésif sur la plasticité dans le contact : en fonction du rapport a/R , le frottement adhésif favorise l'apparition de la déformation plastique et donc la part importante des propriétés de surfaces dans le processus de rayure de surface polymères observées expérimentalement. On peut également noter l'influence de la rhéologie du matériau, avec une déformation plastique moyenne plus grande dans le cas du PMMA, possédant un faible écrouissage.

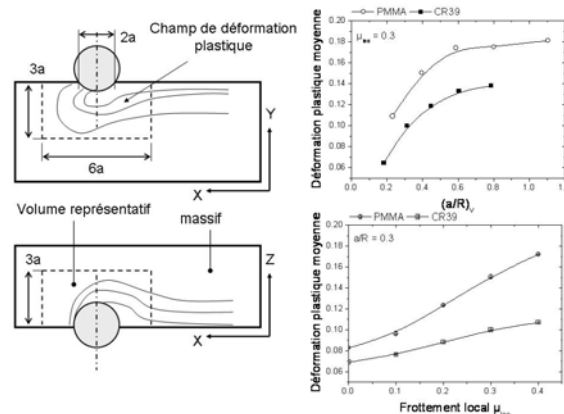


FIG. 7 – (a) Description schématique du volume représentatif utilisé pour calculer la déformation plastique moyenne dans le contact et évolution de la déformation plastique moyenne en fonction du rapport $(a/R)_v$ (b) et du frottement local μ_{loc} (c).

Sur la figure 8, nous avons représenté les évolutions des rapports a_r/a_f et e_p/a_f en fonction de la déformation plastique moyenne calculée à partir de l'équation 2 pour les deux matériaux et pour toutes les conditions de rayure (a/R , μ_{loc}). Nous pouvons observer que les rapports a_r/a_f et e_p/a_f sont directement reliés à la déformation plastique moyenne. Pour une géométrie de pointe donnée, la rhéologie (en l'occurrence l'écrouissage du matériau dans le domaine de déformation plastique) modifie le taux de plasticité dans le contact. Ce taux de plasticité est également fonction du frottement local interfacial. Cependant, pour un taux de plasticité, quelques soient la rhéologie du matériau, le rapport a/R ou encore le frottement local, la géométrie du contact, caractérisée par le bourrelet frontal et le rapport a_r/a_f , est unique.

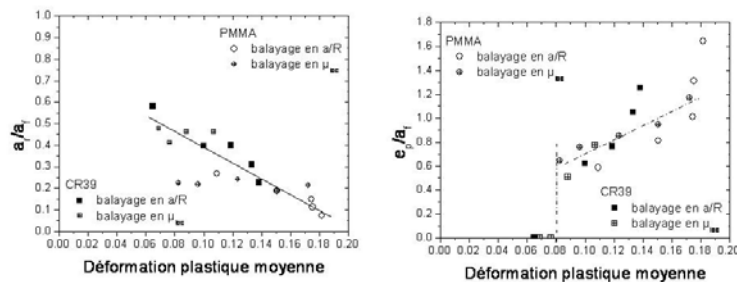


FIG. 8 – Evolutions du rapport a_r/a_f (a) et du rapport e_p/a_f (b) en fonction de la déformation plastique moyenne pour le PMMA et le CR39.

5. Conclusions

Dans ce travail, les résultats obtenus par modélisation numérique, en introduisant des rhéologies réalistes et en réalisant des rayures dans différentes conditions (a/R , μ_{loc}), montrent l'influence de la rhéologie et du frottement adhésif μ_{loc} à la fois sur les profils de contact et sur les champs de déformation plastique sous l'indenteur. Ces résultats sont confirmés par les observations expérimentales de rayure sur deux polymères amorphes (PMMA et CR39). Les champs de déformation plastique montrent des niveaux de plasticité entre les deux matériaux d'autant plus importants que le frottement est élevé pour un rapport a/R donné. Le frottement affecte la forme, les dimensions et donc le gradient associé à la déformation plastique, avec notamment une déformation plastique maximale plus élevée et localisée en surface pour des frottements importants. Dans ce travail, nous proposons une méthode pour estimer une déformation plastique moyenne représentative du volume déformée sous l'indenteur. Cette déformation plastique est fonction du rapport a/R mais aussi du frottement adhésif. Les paramètres associés à la géométrie du contact sont reliés à cette déformation plastique de façon indépendante de la rhéologie des matériaux.

Références :

- Bucaille J.L. 2001 Simulation numérique de l'indentation et de la rayure des verres organiques, thèse ENSMP, Nice – Sophia Antipolis.
- Bucaille J.L., Felder E. & Hochstetter G. 2001 Mechanical analysis of the scratch test on elastic and perfectly plastic materials with the three-dimensional finite element modelling. *Wear* **249**, 422-432
- Bucaille J.L., Gauthier C., Felder E. & Schirrer R. 2006 The influence of strain hardening of polymers on the piling-up phenomenon in scratch tests: experiments and numerical modelling, *Wear* **260**, 804-814.
- Gauthier C. & Schirrer R. 2000 Time and temperature dependence of the scratch properties of poly(methylmethacrylate) surfaces. *J. Mater. Sci.* **35**, 2121-2130
- Gauthier C, Durier A.-L., Fond C. & Schirrer R. 2006 Scratching of a polymer and mechanical analysis of a scratch resistance solution, Special Issue 180 Years of Scratch Testing, Edited by S.K. Sinha, *Tribology International* **39**, 88-98
- Lafaye S. 2002, Propriétés mécaniques de friction et de déformation des surfaces de polymères solides, thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I.
- Johnson K.L. 1985 Contact Mechanics, Cambridge University Press.
- Tabor D. 1951 The hardness of Metals Clarendon Press, Oxford