



HAL
open science

Simulation numérique de la rayure des matériaux

Guillaume Kermouche, Jean-Michel Bergheau

► **To cite this version:**

Guillaume Kermouche, Jean-Michel Bergheau. Simulation numérique de la rayure des matériaux. 7^e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812966

HAL Id: hal-01812966

<https://hal.science/hal-01812966>

Submitted on 12 Jun 2018

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.

Public Domain

Simulation numérique de la rayure des matériaux

Guillaume Kermouche — Jean-michel Bergheau

*LTDS UMR5513 CNRS/ECL/ENISE
58 rue Jean Parot
42023 Saint Etienne Cedex 2, France
guillaume.kermouche@enise.fr*

RÉSUMÉ. Les essais de rayure sont souvent utilisés pour étudier les phénomènes de frottement et d'usure ainsi que pour identifier localement les propriétés mécaniques des matériaux. La complexité du comportement des matériaux et des interfaces rend difficile l'analyse expérimentale de ce type de tests. La simulation numérique par éléments finis permet d'améliorer la compréhension de ces essais. Dans cet article, une méthode de remaillage dédiée spécialement à la modélisation numérique de l'essai de rayure est décrite. Une application est ensuite proposée concernant l'étude des effets de la vitesse de rayure sur des solides viscoélastiques et élastiques-viscoplastiques. Les effets sur la déformée en rayure et le coefficient de frottement sont étudiés.

ABSTRACT. The scratch test is often used to study friction and wear phenomena and to locally identify the mechanical properties of materials. The complexity of material and interface behaviours makes difficult the analysis of this test. The use of finite element simulations helps to improve the understanding of this process. In this paper, a remeshing procedure specially developed for numerical modelling of scratch test is described. Then, an application concerning the study of scratching speed effects on viscoelastic and elastic viscoplastic solids is proposed. Effects on the deformed shape of the surface and on the friction coefficient are studied.

MOTS-CLÉS : Rayure, Simulation numérique, Remaillage, Viscoélasticité, Viscoplasticité

KEYWORDS: Scratch, Numerical simulation, Remeshing, Viscoelasticity, Viscoplasticity

1. Introduction

La caractérisation mécanique des surfaces constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour le développement de certains secteurs industriels. Ainsi, par exemple, l'industrie optique [BUC 01a] et l'industrie automobile [BER 01] sont, pour des raisons évidentes, très demandeurs de films anti-rayure. La caractérisation mécanique des surfaces nécessite une connaissance approfondie des essais d'indentation et de rayure. En effet ceux-ci permettent d'identifier très localement et de façon non destructive, les propriétés mécaniques de surface (élasticité, viscoplasticité) et le comportement d'interfaces (frottement, adhérence, usure). De nombreux travaux, reposant sur une approche expérimentale, ont vu le jour au cours de ces 30 dernières années. Toutefois, le nombre de paramètres mis en jeu (conditions expérimentales, ...), rend la compréhension de ces essais difficile et onéreux. La méthode des éléments finis permet de palier à ces problèmes [BUC 01a]. En effet, elle permet de prendre en compte seulement certains paramètres et ainsi d'affiner la compréhension de ces essais [BAR 03]. A terme, elle pourrait même être un outil de prédiction pour le comportement à la rayure de tel ou tel matériau.

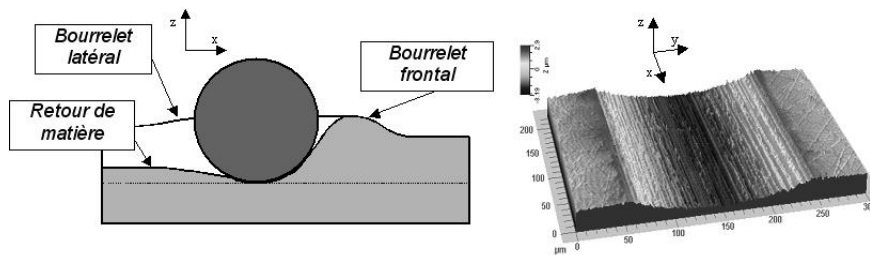


Figure 1. A gauche - Rayure avec une sphère en phase stationnaire, A droite - Sillon résiduel après un essai de rayage sur acier AISI316

Dans certain cas, il est possible d'atteindre une phase stationnaire en rayure. Cela dépend principalement des propriétés mécaniques des matériaux rayés et de la forme des indenteurs [BUC 01a]. Les conditions de chargement doivent être de type pénétration constante ou force normale constante. Pour les matériaux présentant un comportement dépendant du temps, une vitesse de rayure constante permet d'atteindre une phase stationnaire [JAR 03] [GAU 01]. Dans cette étude, seules les rayures de type labourage [CHA 79][BAR 03] sont considérées. Selon la loi de comportement du matériau, il y a création ou non d'un bourrelet frontal, de bourrelets latéraux et d'un sillon résiduel après passage de l'indenteur (figure 1). Par une étude expérimentale sur différents matériaux, Jardret et al [JAR 98] montrent l'influence des déformations élastiques et plastiques sur les pressions de contact et la déformée de la surface. Par la suite, Bucaille [BUC 01b] confirmera ces résultats à l'aide de simulations numériques par éléments finis en considérant des solides élastiques parfaitement plastiques.

La simulation numérique de la rayure est complexe car il est nécessaire de prendre en compte les grands déplacements, grandes rotations et grandes déformations. Un des obstacles majeurs à l'utilisation de l'outil numérique vient du fait qu'il est nécessaire de prendre en compte les grandes distorsions des éléments (non convergence des calculs) et le temps CPU considérable pour la réalisation d'une seule rayure. Pour cela, une méthode de remaillage dédiée spécialement à la simulation de l'essai de rayure est présentée dans une première partie. Celle-ci permet de reproduire la phase transitoire de la rayure jusqu'à la phase stationnaire. Dans une seconde partie, une application concernant la rayure de matériaux suivant des lois de comportement de type viscoélastique ou élastique-viscoplastique (représentatif du comportement de certains polymères) est ensuite présentée. On étudie alors l'effet de la vitesse de rayure sur certaines grandeurs caractéristiques comme le coefficient de frottement apparent, la profondeur résiduelle après rayure et la forme des bourrelets.

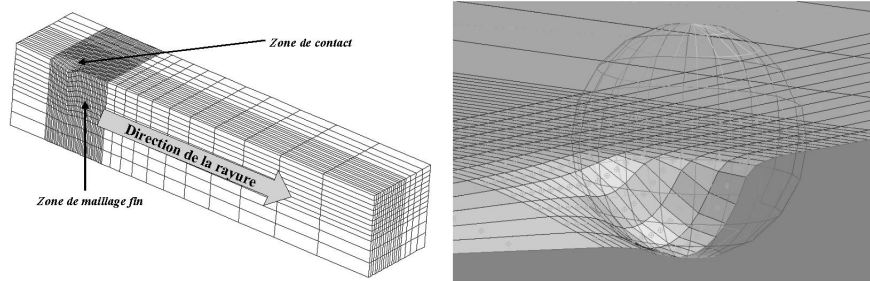


Figure 2. *A gauche - Remaillage par zone suivant la zone de contact, A droite - Rayure avec une sphère*

2. Modélisation numérique

Une méthode de remaillage, dédiée spécialement à la simulation de l'essai de rayure, a été développée et implantée dans le logiciel Systus/Sysweld [SYS 04]. Cette méthode repose sur la gestion de zone de maillage à fortes ou faibles concentrations d'éléments (voir figure 2-gauche). La taille de ces zones est déterminée par rapport à la position de l'indenteur et la taille de la surface de contact à l'avant et à l'arrière de l'indenteur, tel que le nombre de noeud en contact avec l'indenteur soit approximativement constant au cours du rayage. Les zones de maillage sont donc mobiles et s'adaptent automatiquement à la position de l'indenteur. Grâce à cette technique, le nombre d'éléments est indépendant de la taille du massif et est ainsi fortement diminué. De plus, les étapes de remaillage sont suffisamment fréquentes au cours du calcul pour éviter que la distorsion des mailles soit trop importante. Cette méthode permet de réaliser des rayures avec des conditions de chargement extrêmes. Par exemple, la figure 2-droite montre la rayure d'un massif élastoplastique par une sphère en considérant une profondeur de pénétration égale au rayon de celle-ci. Les éléments utilisés

sont des hexaèdres du premier ordre à intégration sélective pour prendre en compte correctement la condition d'incompressibilité plastique. Un des inconvénients des algorithmes de remaillage concerne le temps de calcul relatif à l'étape de remaillage elle-même. Pour optimiser ce processus, le nombre de noeud et d'élément est constant au cours de la simulation et une numérotation particulière a été adoptée. Les temps de calculs relatifs aux différentes opérations de tri sont ainsi fortement diminués. Le transport des quantités physiques du maillage source vers le maillage cible s'effectue de la façon suivante. Les quantités physiques obtenues à la fin d'une étape de calcul sont moyennées aux noeuds de l'ancien maillage. Chaque point d'intégration du nouveau maillage est alors projeté sur l'ancien maillage. Un algorithme de tri particulier est alors utilisé pour déterminer l'élément de l'ancien maillage le contenant et les valeurs des fonctions de forme associées. Les quantités physiques lui sont alors affectés par l'intermédiaire des fonctions de formes de l'élément. Cette méthode ne permet malheureusement pas de satisfaire la loi de comportement du matériau ainsi que l'équilibre mécanique. Il est alors nécessaire d'effectuer un nouveau calcul à l'instant de remaillage. L'algorithme de contact repose sur l'utilisation de cibles rigides afin de faciliter la gestion des grands déplacements entre l'indenteur et le matériau. Les inéquations du contact unilatéral sont résolues par une méthode de pénalisation. Pour simplifier l'étude, le frottement interfacial entre l'indenteur et le massif n'est pas pris en compte. Le coefficient de frottement calculé dépend alors seulement de la déformation du massif sous sollicitation de rayure. Concernant les conditions de chargement, la pénétration et la vitesse de rayure sont constantes. Les indenteurs considérés dans cette étude sont des sphères.

3. Effets de la vitesse de rayure

Considérons un solide viscoélastique linéaire de type Maxwell généralisé à deux branches [LEM 96] avec $G_0=70$ MPa, $G_1=800$ MPa et $\tau_1=0.05$ s et $\nu = 0.4$. Le rayon de la sphère est $R=10$ mm et la pénétration de l'indenteur est $h=2,5$ mm. La vitesse varie de 0.5 mm/s à 625 mm/s. Les résultats sont tracés sur la figure 3. Ceux-ci montrent qu'il existe une transition du comportement du matériau. Lorsque la vitesse de rayure est très petite, le solide se comporte comme un solide élastique de module de cisaillement G_0 . Lorsque la vitesse de rayure est très importante, il se comporte comme un solide élastique de module de cisaillement $G_0 + G_1$. Dans ces deux cas, le coefficient de frottement est quasi-nul (figure 3-gauche) et la surface de contact à l'arrière de l'indenteur est très voisine de celle à l'avant de l'indenteur (figure 3-droite). Ces figures montrent aussi qu'il existe une vitesse de rayure critique correspondant à un coefficient de frottement maximum.

Considérons maintenant un solide élastique-viscoplastique de type Bingham-Norton [LEM 96]. La loi de comportement s'écrit $\varepsilon^p = \left(\frac{\sigma - Y - R}{K}\right)^m$ sur un essai uniaxial. Les propriétés mécaniques considérées ici sont $E=3200$ MPa, $Y=40$ MPa, $K=150$ MPa.s^{-m}, $m=3$ et R une variable d'écrouissage isotrope linéaire de pente 700 MPa. Ces propriétés sont proches de certains polymères. Dans cette étude, $R=10$ μm et $h=3$

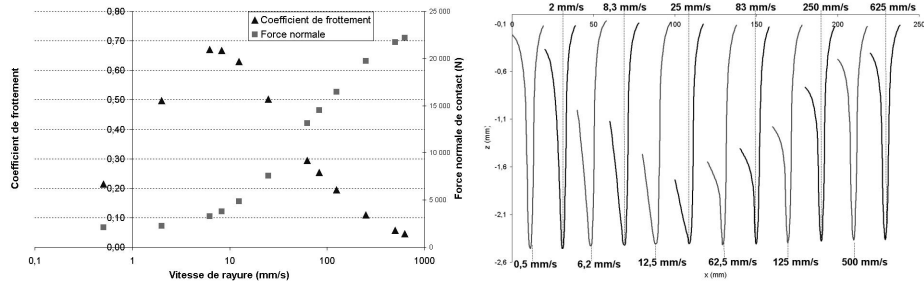


Figure 3. Rayure d'un solide viscoélastique linéaire, A gauche - Effort de contact et coefficient de frottement en fonction de la vitesse de rayure, A droite - Profil longitudinal pour différentes vitesses de rayure

μm . La vitesse de rayure varie de 0,1 mm/s à 1000 $\mu\text{m/s}$. Les résultats sont tracés sur la figure 4. Lorsque la vitesse de rayure est très petite, le bourrelet frontal et le coefficient de frottement sont maximaux (figure 4-gauche) et la surface de contact à l'arrière de l'indenteur est minimale (figure 4-droite). Ces résultats sont caractéristiques d'une rayure sur un solide élastoplastique [JAR 98][BUC 01b]. Lorsque la vitesse de rayure est très importante, il se comporte comme un solide élastique. Il n'y a pas de bourrelet frontal mais plutôt un affaissement devant l'indenteur. Le coefficient de frottement est nul et la surface de contact à l'arrière de l'indenteur est très proche de la surface de contact à l'avant de l'indenteur. Cette transition de comportement avec la vitesse de rayure a été observée expérimentalement par Gauthier et Coll [GAU 01] en considérant une force normale constante.

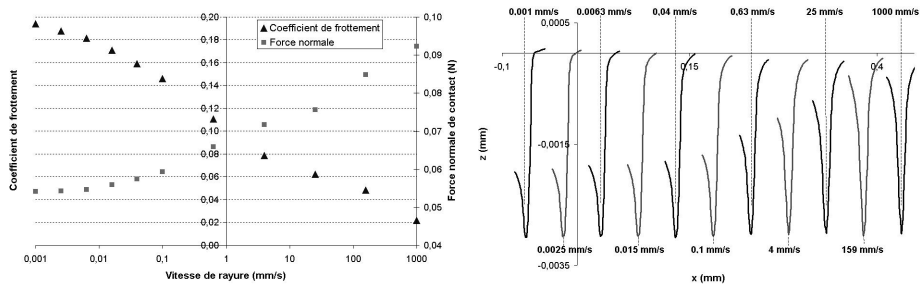


Figure 4. Rayure d'un solide élastique-viscoplastique, A gauche - Effort de contact et coefficient de frottement en fonction de la vitesse de rayure, A droite - Profil longitudinal pour différentes vitesses de rayure

4. Conclusions

Dans cette étude, une méthode de remaillage adaptée à la rayure des matériaux a été développée. Celle-ci a été utilisée pour comprendre les effets de la vitesse de rayure. D'un point de vue phénoménologique, le frottement entre deux surfaces dont les matériaux sont viscoélastiques ou viscoplastiques dépendra fortement de la vitesse de glissement et de la micro-géométrie des surfaces en contact. Une approche de type Coulomb pour modéliser le frottement de manière macroscopique peut donc être remise en cause. Plus particulièrement, il a été montré que le coefficient de frottement dépend fortement de la vitesse de rayure. Cette méthode va être étendue à la simulation numérique de la rayure de matériau de type couche mince sur substrat en utilisant la même stratégie de remaillage. L'objectif à terme est de pouvoir simuler la décohésion [MON 01] de films minces sous sollicitation de rayure.

5. Bibliographie

- [BAR 03] BARGE M., KERMOUCHE G., GILLES P., BERGHEAU J., « Experimental and numerical study of the ploughing part of abrasive wear », *Wear*, vol. 255, 2003, p. 30-37.
- [BER 01] BERTRAND-LAMBOTTE P., LOUBET J.-L., VERPY C., PAVAN S., « Nano-indentation, scratching and atomic force microscopy for evaluating the mar resistance of automotive clearcoats : study of the ductile scratches », *Mech. Mat.*, vol. 398-399, 2001, p. 306-312.
- [BUC 01a] BUCAILLE J., « *Simulation numérique de l'indentation et de la rayure des verres organiques* », PhD Thesis, ENSMP, 2001.
- [BUC 01b] BUCAILLE J., FELDER E., HOCHSTETTER G., « Mechanical analysis of the scratch test on elastic and perfectly plastic materials with the three-dimensional finite element modelling », *Wear*, vol. 249, 2001, p. 422-432.
- [CHA 79] CHALLEN J.-M., OXLEY P.-L.-B., « An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models », *Wear*, vol. 53, 1979, p. 229-243.
- [GAU 01] GAUTHIER C., LAFAYE S., SCHIRRER R., « Elastic recovery of a scratch in a polymeric surface : experiments and analysis », *Trib. Int.*, vol. 34, 2001, p. 469-479.
- [JAR 98] JARDRET V., ZAHOUANI H. ND LOUBET J.-L., MATHIA T.-G., « Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test », *Wear*, vol. 218, 1998, p. 8-14.
- [JAR 03] JARDRET V., MOREL P., « Viscoelastic effects on the scratch resistance of polymers : relationship between mechanical properties and scratch properties at various temperatures », *Progress in Organic Coatings*, vol. 48, 2003, p. 322-331.
- [LEM 96] LEMAITRE J. CHABOCHE J.-L., « *Mécanique des matériaux solides* », Dunod, 1996.
- [MON 01] MONERIE Y., ACARY V., « Formulation dynamique d'un modèle de zone cohésive tridimensionnel couplant endommagement et frottement », vol. 10, 2001, p. 489-503.
- [SYS 04] SYSTUS/SYSWELD, « *User's manual* », ESI Group, 2004.