

# Résistance à la rayure de revêtements de sol

**B. WITTMANN<sup>a</sup>, C. GAUTHIER<sup>b</sup>, A. BURR<sup>a</sup>, J-F. AGASSANT<sup>a</sup>, D. FAVIER<sup>b</sup>,  
P. MONTMITONNET<sup>a</sup>, A. CASOLI<sup>c</sup>**

a. Mines Paristech, PSL\* Research University, Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF), CNRS UMR 7635, 06904 Sophia Antipolis cedex, France

b. Université de Strasbourg, Institut Charles Sadron, 23 Rue du Loess, Strasbourg, 67200

c. Tarkett R&D Center, Z.A Salzbaach, L-9559, Wiltz, Luxembourg

## Résumé :

*Les revêtements de sol sont quotidiennement soumis à diverses sollicitations chimiques et/ou mécaniques : marche, glissement de chaises, indentation par des pieds de meubles, nettoyage etc. Toutes ces sollicitations, sont susceptibles de provoquer l'usure du produit, et donc de dégrader son aspect visuel. Un mécanisme d'usure particulièrement sévère est la rayure, c'est l'objet de ce travail. L'enjeu scientifique est d'identifier les types de rayures ayant un fort impact visuel et de les prévenir. Le but pratique est d'optimiser le matériau afin d'augmenter sa résistance à la rayure.*

*Les tests de rayure ont été faits sur un matériau composé d'un substrat en PVC plastifié recouvert d'un vernis anti-rayure en polyuréthane. Les endommagements sont observés pendant la rayure grâce à un microscope couplé à une caméra.*

*Selon les conditions dans lesquelles est effectué l'essai de rayure (géométrie de l'indenteur, force normale, température...) on observe différents régimes de déformation (élastique, élasto plastique, plastique) et 3 différents mécanismes de rupture du polyuréthane :*

- Fissure orientées à 45° de la direction de rayure, à l'arrière de l'indenteur.
- Déchirement sous l'indenteur, parallèlement à la direction de rayure.
- Faiënage et arrachement de matière à l'avant de l'indenteur.

*L'analyse des mécanismes engagés est complétée par une observation tomographique.*

*Ces différents types de rayures n'ont pas la même influence optique : une rayure fine et ductile avec peu de pentes résiduelles est quasiment invisible à l'œil nu, même avec des fissures à 45°, alors qu'une rayure avec écaillage est très visible à cause du blanchiment du matériau.*

*De par le grand nombre de facteurs qui rentrent en compte, l'interprétation mécanique de ces essais expérimentaux reste difficile. Un modèle numérique de cet essai de rayure a été développé afin de préciser localement les conditions mécaniques conduisant aux différents types de rayure et étudier les pistes d'amélioration du matériau (rhéologie et structure). C'est l'objet de cette présentation qui détaillera les enseignements que l'on peut en tirer.*

## Abstract :

*Floor coverings are daily submitted to various mechanical solicitations: walking, sliding chairs, furniture feet indentation, sliding objects, cleaning devices etc. All these solicitations are liable to cause wear of the product, which negatively impacts its visual aspect. A particularly severe wear mechanism is the scratch. The scientific challenge is to identify the kind of scratches having a high visual impact and to prevent them. The practical aim is to optimize the material in order to increase its scratch resistance.*

*Scratch tests have been performed on a material composed with a plasticized PVC substrate covered by an anti-scratch polyurethane coating. These tests are observed in situ thanks to a microscope coupled to a camera. Depending on the scratch test conditions (tip radius, normal force, temperature...), different deformation regimes (elastic, elastoplastic, plastic) and 3 different failure mechanisms are observed :*

- *Cracks oriented at 45° to the scratching direction, behind the tip.*
- *Tearing under the tip, parallel to the scratch direction.*
- *Cracking and pulling-out in front of the tip.*

*The analysis of these mechanisms is completed by a tomographic observation.*

*These mechanisms do not have the same optical influence: for example a ductile smooth scratch is almost invisible by naked eye, even with cracks at 45°, whereas a scratch with chipping is very visible by the whitening of the material.*

*Because of the great number of factors that enter into account, the interpretation of these experimental tests is difficult. A numerical model of this test has been developed in order to precise locally the mechanical conditions that lead up to these different kinds of scratches and to study the ways of improvement of the material (rheology and structure). This presentation details what can be learnt from these simulations for practical purposes.*

**Mots clefs : Rayure, Usure, Polymère, Couche mince**

## **1 Introduction**

La longévité d'un revêtement de sol dépend en grande partie de l'évolution de son aspect visuel. Or, de nombreuses sollicitations mécaniques sont susceptibles d'entraîner de l'usure et donc la dégradation de cet aspect visuel. Un mécanisme d'usure particulièrement sévère est la rayure; c'est l'objet de ces travaux. Une méthode couramment utilisée pour améliorer la résistance à la rayure est le dépôt d'un vernis anti-rayure. Cette méthode est souvent efficace pour des chargements faibles à modérés car elle permet de limiter la déformation plastique du substrat. Pour des charges importantes en revanche, on observe différents mécanismes de rupture du vernis, aggravant la visibilité de la rayure. Le mode de rupture du vernis qui intervient dépend de nombreux paramètres tels que l'épaisseur du vernis [1]. En effet, les auteurs montrent que dans le cas d'une pointe rugueuse, des micros-sillons ductiles se forment dans le macro-sillon, empêchant la relaxation de celui-ci. Le vernis doit alors être plus épais que la taille des aspérités se trouvant à la surface de la pointe. La réponse mécanique à la rayure d'un matériau revêtu dépend également des propriétés mécaniques relatives du substrat et du vernis : dans le cas d'un vernis dur déposé sur un substrat souple, on observe des fissures qui se propagent du vernis vers le substrat. Dans le cas d'un vernis rigide sur un substrat rigide en revanche, on observe un arrachement de particules [2]. L'adhérence substrat/vernis a également une importance de premier ordre. Lorsqu'une fissure est amorcée dans le vernis puis se propage jusqu'à l'interface, deux scénarios sont possibles : si l'adhérence vernis/substrat est forte, la fissure se propage du vernis vers le substrat. A l'inverse, si l'adhérence vernis/substrat est faible, la fissure se propage à l'interface, conduisant à une délamination du vernis [2,3]. Ce deuxième cas de figure a été étudié par Le Houereou et al [4], où les auteurs s'intéressent aux mécanismes observés sur un matériau composé d'un vernis rigide sur substrat souple avec une faible adhérence, à différentes températures. Ils observent à haute température un régime dans lequel le vernis est délaminé et forme une cloque à l'avant de l'indenteur. A faible température, le vernis est trop fragile pour supporter le flambage et

rompt avant la formation de la cloque. Cet exemple illustre bien l'influence, à la fois des propriétés mécaniques des matériaux et de l'adhérence, sur les mécanismes engagés.

L'objet de cette étude est de mettre en évidence les différents mécanismes de rupture qu'on observe, sur un PVC souple revêtu d'un vernis polyuréthane rigide, par vision in situ de l'essai de rayure, complété par une observation tomographique post mortem. Par ailleurs, un modèle numérique de l'essai de rayure a été développé afin de préciser les conditions mécaniques locales menant aux différents mécanismes de rupture.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Matériau étudié

Le matériau étudié est constitué d'un massif de PVC plastifié revêtu d'un vernis anti rayure en polyuréthane d'épaisseur 20  $\mu\text{m}$ . Les propriétés mécaniques des deux matériaux ont été caractérisées par essai de traction sur Instron 3344 à 22°C et une vitesse de déformation de 0,3  $\text{s}^{-1}$  monotone jusqu'à rupture, sur éprouvettes haltères. Le PVC a un comportement mécanique élasto-plastique avec durcissement tandis que le polyuréthane a un comportement élastique-fragile. Les propriétés mécaniques des deux matériaux sont présentées de manière adimensionnée en proportion du module de Young du PVC dans le tableau 1.

	<b>PVC</b>	<b>PU</b>
<b>Module de Young</b>	1	6.7
<b>Coefficient de Poisson</b>	0.3	0.4
<b>Contrainte d'écoulement plastique</b>	0.027	/
<b>Pente d'écrouissage</b>	0.11	/

Table 1 : Propriétés mécaniques adimensionnées du PVC et du PU, exprimées en proportion du module de Young du PVC.

### 2.2 Micro-Visio-Scratch

Le matériau décrit ci-dessus est étudié par test de rayure instrumenté. L'objectif de cet essai est de simuler le comportement à la rayure du matériau dans des conditions expérimentales bien contrôlées afin de dégager des tendances quant à l'influence des différents paramètres. Ce test correspond par exemple à la sollicitation subie par le matériau lors de la marche avec un caillou accroché à la semelle de la chaussure.

L'appareil est constitué d'un servomécanisme permettant la rayure en imposant à l'échantillon un mouvement relatif à l'indenteur. Une caméra couplée à un microscope, permet la vision in situ de la surface de contact indenteur/matériau sur des essais réalisés sur échantillons transparents. L'échantillon est placé dans une chambre permettant de contrôler la température (de -70°C à 120°C) et l'hygrométrie. L'essai peut être réalisé avec différentes géométries d'indenteur (cônes de différents angles ou sphère de différents rayons). Une force normale est imposée à l'indenteur (de 0.05 N à 35 N) et une vitesse tangentielle au matériau (de 1 à 10<sup>4</sup>  $\mu\text{m/s}$ ). L'appareil permet d'effectuer des paliers de force à vitesse constante, ou l'inverse. L'expérience est présentée plus en détails dans [5].

## 2.3 Tomographie

Une tomographie de la rayure a été réalisée par un tomographe RX Solution, modèle Easytom 150-160, avec une résolution de 2  $\mu\text{m}$  dans les 3 directions.

## 3 Résultats expérimentaux : Essai de rayure

### 3.1 Les différents mécanismes observés

L'essai présenté a été réalisé à force normale croissante (de  $F_n = 0.2 \text{ N}$  à  $F_n = 3 \text{ N}$ ) avec un indenteur sphéro-conique ( $R_{\text{ind}} = 100 \mu\text{m}$ ,  $\alpha_{\text{ind}} = 60^\circ$ ), à  $T = 22^\circ\text{C}$ ,  $\text{HR} = 64\%$ , et  $V_{\text{rayure}} = 30 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

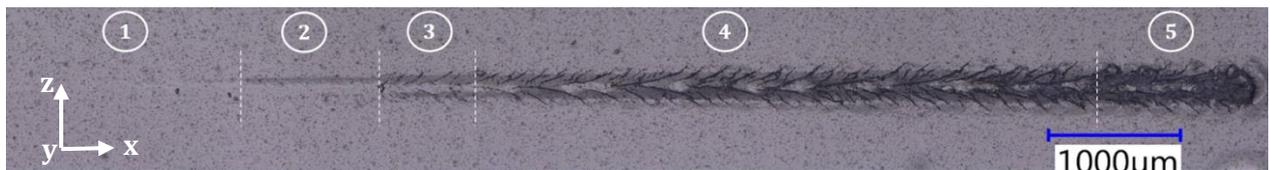


Figure 1: Photographie post mortem de la rayure.

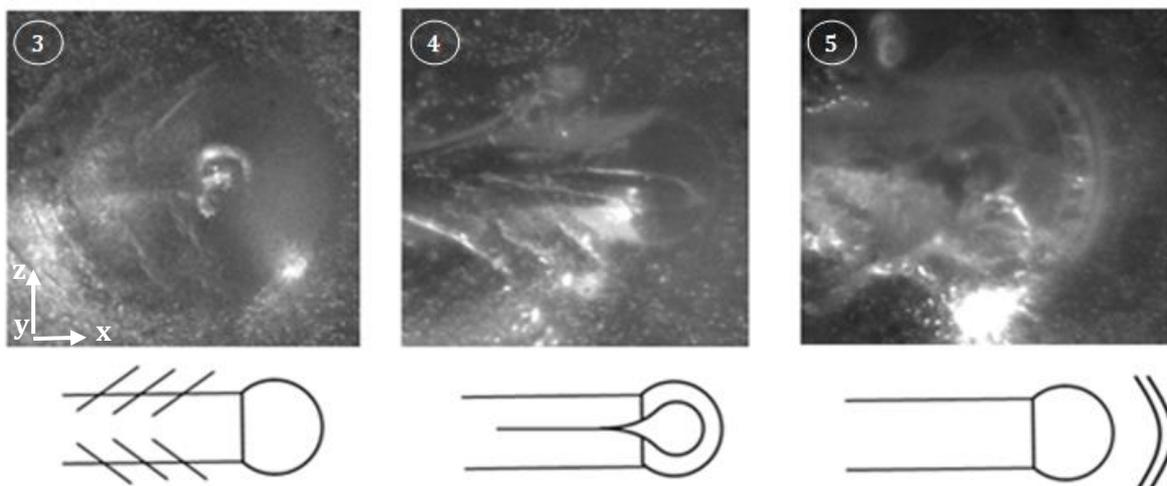


Figure 2 : Photographies in situ et schémas des différents modes de rupture observés sur la figure 1

On observe deux régimes de déformation et trois modes de ruptures différents :

- 1 : Déformation élastique.
- 2 : Déformation plastique.
- 3 : Fissures orientées à  $45^\circ$  à l'arrière de l'indenteur.
- 4 : Déchirement du PU sous l'indenteur, parallèlement au sens de rayure
- 5 : Faïençage et arrachement du PU à l'avant de l'indenteur.

Le mécanisme de fissuration à l'arrière de l'indenteur a déjà été observé sur matériau non revêtu [6] ainsi que sur matériau revêtu [1] et est lié à des contraintes de traction parallèlement à la direction de rayure. Les mécanismes de déchirement sous l'indenteur ainsi que de faïençage et arrachement du vernis à l'avant en revanche sont moins bien compris.

### 3.2 Analyse de la rayure par tomographie

La vision in situ de l'essai de rayure est riche d'information car elle permet d'observer les mécanismes de rupture engagés selon le plan de la surface (xz), comme illustré par la figure 2. Cependant, cette méthode ne donne aucune information dans le plan (yz) perpendiculaire au plan de la surface. Une possibilité serait de découper l'échantillon après l'essai afin d'étudier les endommagements dans le plan (yz), mais cette façon de faire est périlleuse car on risquerait de créer de nouvelles fissures lors de la découpe et de les interpréter comme des fissures consécutives à l'essai de rayure. Afin de s'affranchir de ces problèmes de découpe, nous proposons de caractériser la rayure par tomographie. Dans notre cas, nous cherchons à étudier la propagation des fissures dans la profondeur du matériau lors du mécanisme de déchirement sous l'indenteur (partie 4 des figures 1 et 2). D'autre part, nous observons in situ lors du mécanisme de faïençage (partie 5) des particules qui sont arrachées. La question est de savoir s'il s'agit d'une rupture adhésive à l'interface PVC/PU ou d'une rupture cohésive, soit du PVC, soit du PU.

La tomographie a été faite sur la partie 5 de la rayure de la figure 1, où le mécanisme de déchirement sous l'indenteur et le mécanisme de faïençage à l'avant de celui-ci ont lieu en même temps.

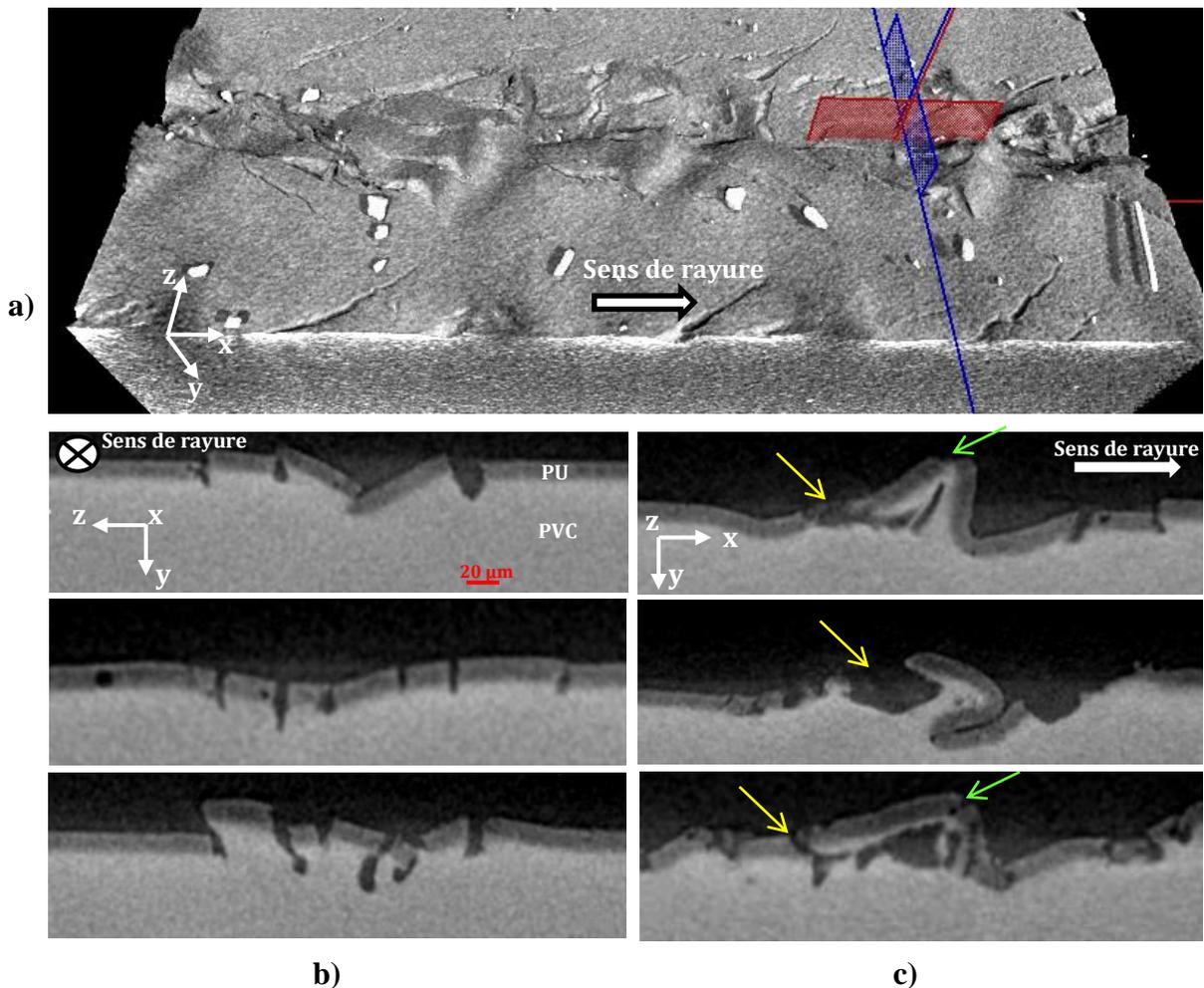


Figure 3 : Tomographie de la rayure de la figure 1 (partie 5). Représentation 3D (a), coupes transversales selon des plans (yz) (b), coupes transversales selon des plans (xy) (c)

Les coupes transversales perpendiculairement à la direction de rayure (figure 3b) indiquent qu'il n'y a aucune rupture interfaciale mais que les fissures se propagent du PU vers le PVC, ce qui est caractéristique des matériaux revêtus avec une forte adhésion.

Concernant les éclats, nous ne pouvons plus les observer par tomographies puisqu'ils sont détachés de la surface. On cherche donc des éclats qui ont "presque" été arrachés mais qui sont encore accrochés à la surface.

On observe ce type de particules sur la figure 3c), sur des coupes transversales parallèles à la direction de rayure. Sur les trois images, une fissure a été amorcée dans le PU à l'arrière du bourrelet (flèche jaune), et s'est propagée vers l'avant dans le PVC. D'autre part, une fissure a été amorcée au sommet du bourrelet, sans se propager dans le PVC (flèche verte). Un mécanisme d'arrachement de particules est proposé dans la partie 5.

## 4 Simulation numérique

### 4.1 Modèle

Un modèle numérique de l'essai de rayure a été développé sur Abaqus. L'objectif est de préciser les conditions mécaniques locales menant à la rupture sous l'indenteur et au façonnage à l'avant de celui-ci (parties 4 et 5 des figures 1 et 2). Cependant, la rupture n'est pas explicitement modélisée à ce stade de l'étude.

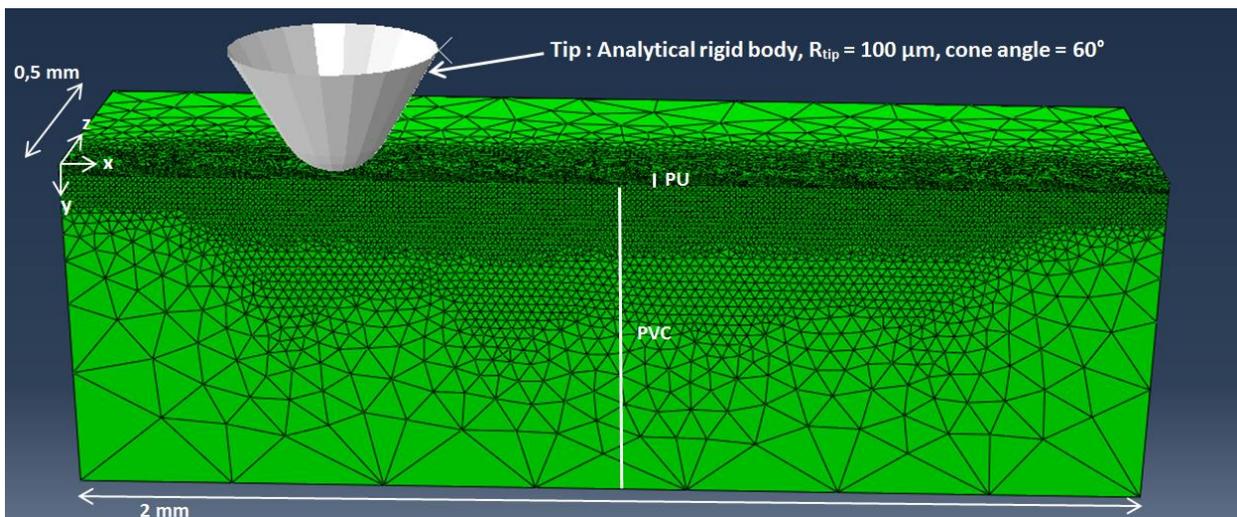


Figure 4 : Modèle numérique de l'essai de rayure

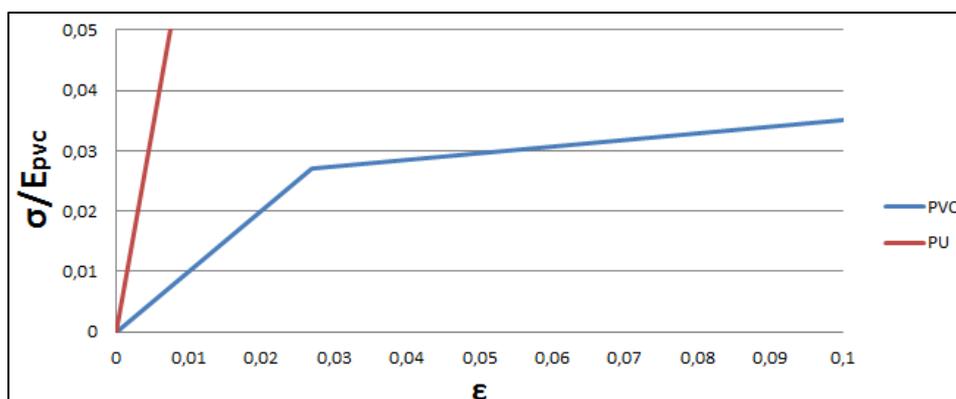


Figure 5 : Propriétés mécaniques des matériaux. L'axe des contraintes est représenté sans unité, en proportion du module de Young du PVC.

Le matériau est modélisé par un parallélépipède de PVC de 2mm de longueur par 0.5 mm de largeur revêtu parallélépipède de PU. L'indenteur est modélisé par un solide rigide analytique, sphéro-conique avec  $R_{ind} = 100 \mu\text{m}$  et  $\alpha_{ind} = 60^\circ$ . Les éléments sont des tétraèdres linéaires  $C_3D_4$ . Le maillage est très fin dans le PU sous l'indenteur (longueur d'arête  $5 \mu\text{m}$ ) et plus grossier sur les bords.

Le PU est modélisé comme un solide élastique, le PVC est modélisé comme un solide élastoplastique avec écrouissage. Les lois de comportements, dont les paramètres sont issus d'essais de traction, sont représentées sur la figure 5. L'axe des contraintes est représenté sans unité, en proportion du module de Young du PVC. Le coefficient de frottement local est  $\mu_{local} = 0,4$ . C'est la valeur du frottement apparent qu'on mesure expérimentalement à faible chargement. En effet à faible chargement, la composante d'obstacle à l'avant de l'indenteur est négligeable. On peut donc considérer que le frottement apparent mesuré à faible chargement correspond au frottement local.

Le maillage du PU et celui du PVC sont liés par « tie formulation » : Les nœuds du PU coïncidant avec ceux du PVC suivent le même déplacement, les autres nœuds du PU se déplacent selon le déplacement moyen des nœuds voisins afin d'assurer la continuité du déplacement. Autrement dit, l'adhésion PU/PVC est modélisée comme idéale, interdisant tout phénomène de délamination. Ceci est légitime au vu des observations tomographiques où on n'observe aucune rupture adhésive.

## 4.2 Résultats

Les essais sont réalisés en deux phases : 1) Indentation à force imposée. 2) Maintien de la force imposée + déplacement tangentiel.

Premièrement à  $F_n = 1 \text{ N}$ , puis à  $F_n = 3 \text{ N}$ , ce qui correspond respectivement aux parties 4 et 5 de la figure 2.

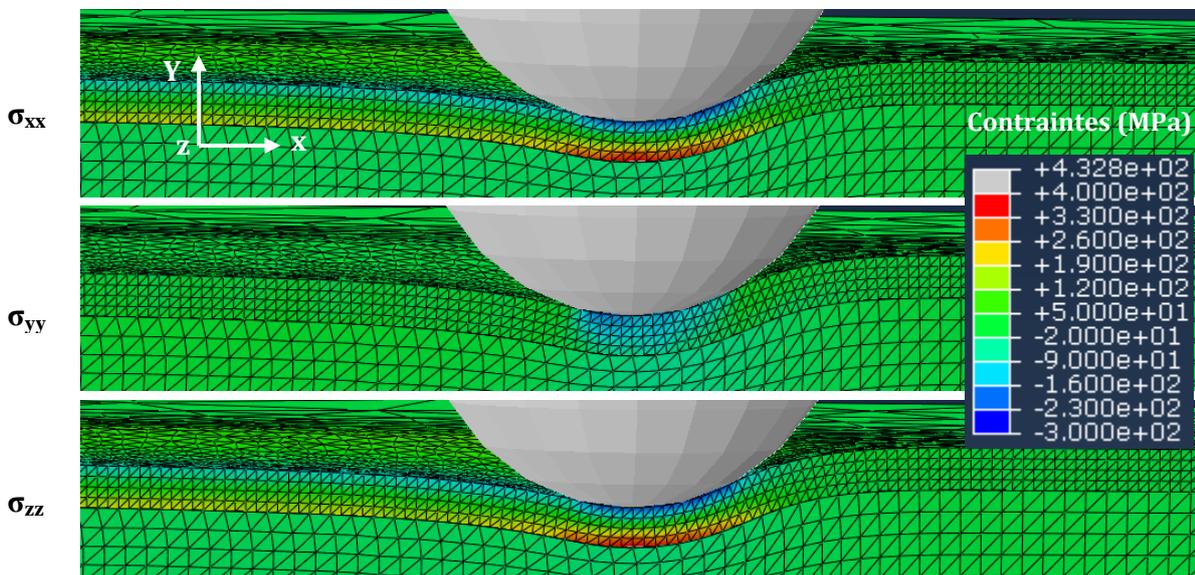


Figure 6 : Contraintes  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$ .  $F_n = 1\text{N}$ . Sens de rayure : de gauche à droite

On voit sur la figure 6 que pour une force normale de 1N, les contraintes sont localisées sous l'indenteur, au voisinage de l'interface PVC/PU : c'est donc ici a priori que la fissure est amorcée. La contrainte maximale est orientée selon la direction z (430 MPa contre 414 MPa dans la direction x), soit perpendiculairement au sens de rayure. Ceci correspond bien au mode de rupture sous l'indenteur. Comme on le voit in situ sur la figure 2, le PU cède selon la direction z, puis l'indenteur qui avance dans la direction x fait se propager la fissure dans cette direction.

Cette rupture selon  $z$  est due à une mise en flexion du PU dans cette direction : Le PVC étant souple et ductile se déforme puis plastifie facilement sous la charge de l'indenteur, obligeant le PU à suivre cette déformation. Or, le PU a un comportement élastique – fragile. Par conséquent, celui-ci cède à partir d'une certaine déformation, amorçant la fissure sous l'indenteur.

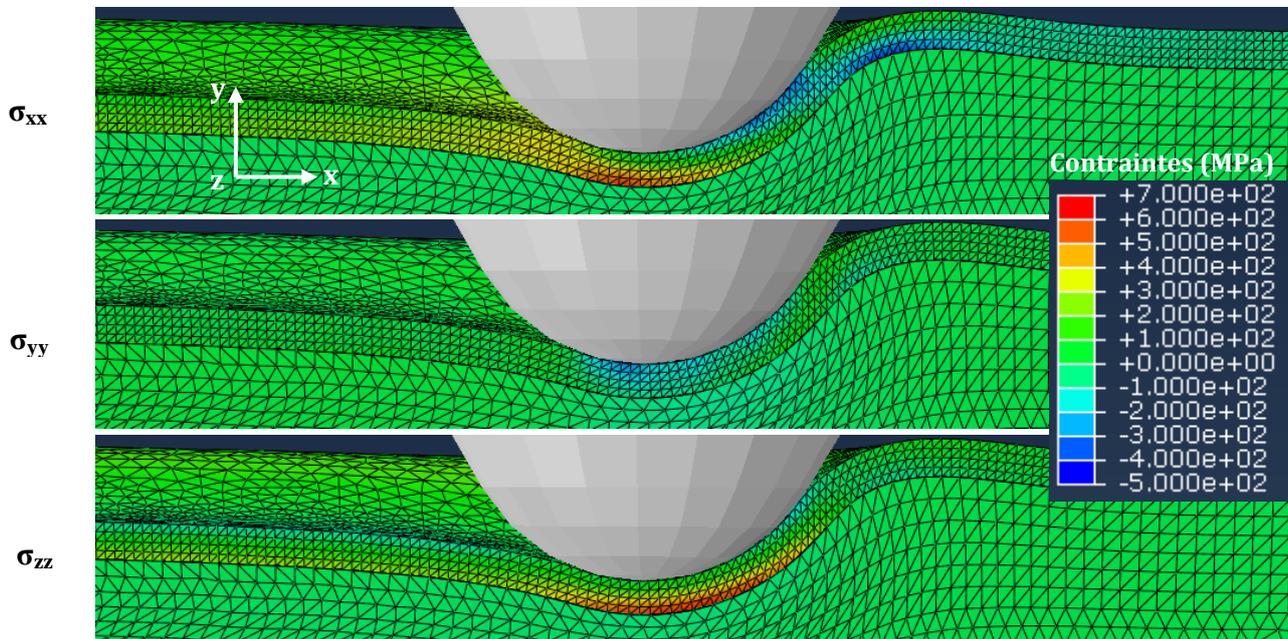


Figure 7 : Contraintes  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$ .  $F_n = 3N$ . Sens de rayure : de gauche à droite

Pour  $F_n = 3N$ , on observe à nouveau des contraintes maximales en traction sous l'indenteur selon la direction  $z$  (700 MPa contre 630 MPa selon la direction  $x$ ). Cette contrainte correspond toujours au mode de rupture sous l'indenteur, parallèlement à la direction de rayure.

Expérimentalement on observe en même temps un faïençage et un arrachement de matière à l'avant de l'indenteur. Il est délicat d'essayer d'interpréter ce mode de rupture via cette simulation numérique car nous ne modélisons pas la rupture. Or, lors de la rupture sous l'indenteur il y a des relâchements de contraintes qui modifient la distribution des sollicitations dans le PU. Toutefois, un mécanisme est proposé dans la partie 5.2.

## 5 Discussions

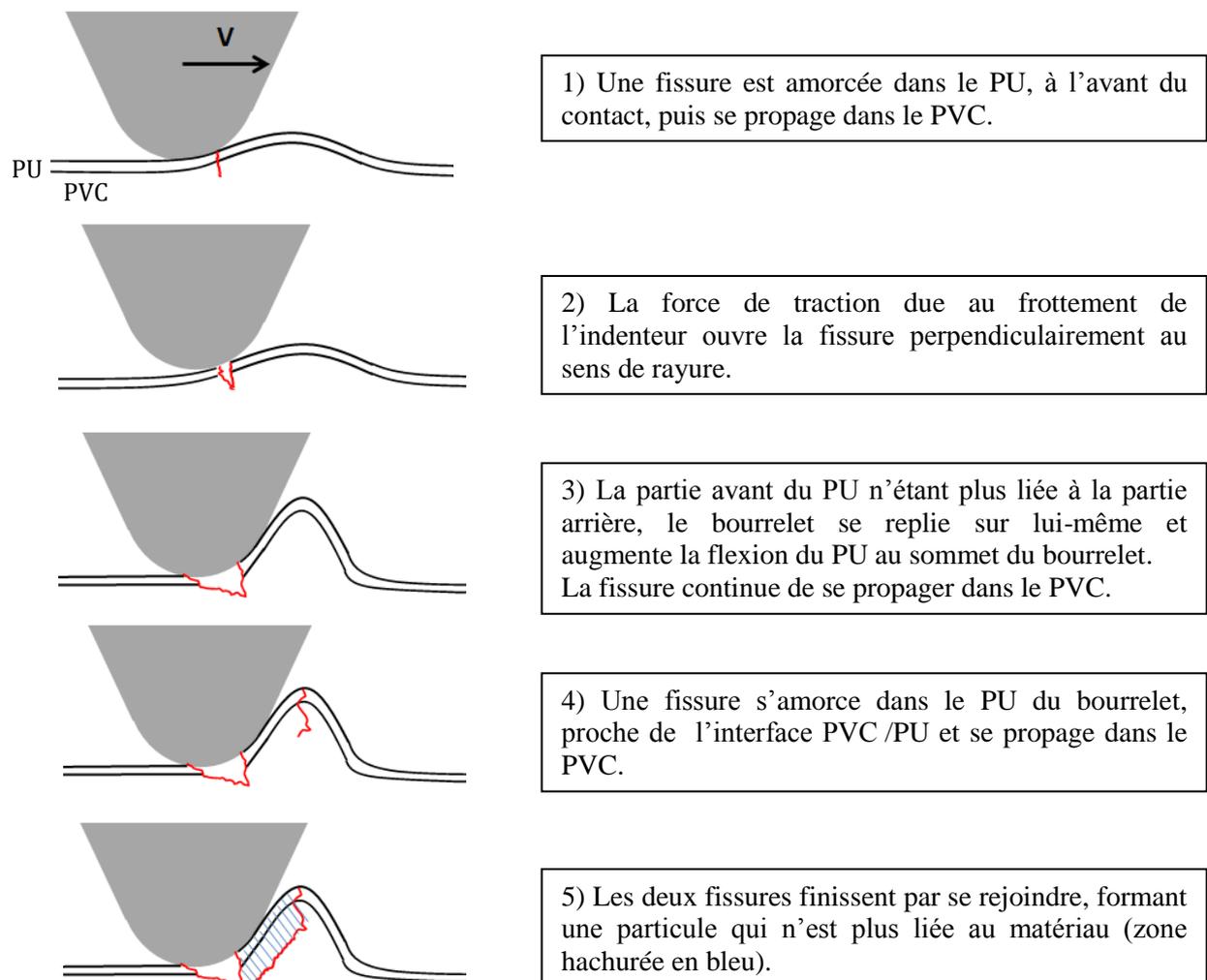
### 5.1 Rupture sous l'indenteur

Les caractérisations expérimentales ainsi que les simulations numériques permettent de bien comprendre ce mécanisme : une fissure est amorcée dans le PU, sous l'indenteur, au voisinage de l'interface PVC/PU à cause de contraintes de traction dues à la flexion du PU. Cette fissure se propage ensuite verticalement dans le PU et dans le PVC. Le fait que la fissure se propage dans le PVC plutôt qu'à l'interface témoigne d'une très bonne adhésion PVC/PU. Par la suite, le déplacement tangentiel de l'indenteur impose à la fissure de se propager parallèlement au sens de rayure (figure 2, partie 4). Puis, la fissure dévie de l'axe central, soit à cause de relaxations de contraintes suite à la rupture, soit à

cause de défauts locaux qui asymétrisent le champ de contraintes, faisant dévier la fissure (variation d'épaisseur de PU, variation local de frottement ...)

## 5.2 Arrachement de particules à l'avant de l'indenteur

La vision in situ de l'essai de rayure montre que les arrachements de PU apparaissent en amont de l'indenteur. Toutefois, les informations obtenues se limitent au plan parallèle à la surface, rendant difficile la proposition d'un mécanisme. La tomographie permet de préciser la propagation de fissures dans le plan transversal à la surface, parallèlement à la direction de rayure. On observe une rupture au sommet du bourrelet dans le PVC. De plus, on voit une fissure qui s'est propagée dans le PVC depuis l'arrière du bourrelet. La simulation numérique permet uniquement de décrire l'état des contraintes avant la rupture sous l'indenteur. Toutefois, on voit sur la figure 7 que sous l'indenteur, le PU est sollicité en traction dans la direction  $x$  et dans la direction  $z$ . Lors de la rupture sous l'indenteur, la contrainte selon  $z$  qui en est à l'origine se relâche. On peut donc supposer qu'après cette rupture, le PU n'est sollicité plus que selon la direction  $x$  et que cette contrainte  $\sigma_{xx}$  atteint une valeur suffisante pour amorcer une rupture à l'avant du contact, perpendiculairement à la direction de rayure. En admettant cette hypothèse, nous proposons le mécanisme suivant :



Sur les images de tomographie (figure 3c), le bourrelet est dans une configuration où les deux fissures ne se sont pas rejointes, rendant possible leur observation.

## 6 Conclusion / Perspectives

La rayure d'un matériau souple revêtu d'un vernis rigide-fragile peut conduire à différents mécanismes de rupture du vernis. Nous en mettons trois en évidence, dont les interprétations sont appuyées d'une part par une tomographie de la rayure, et d'autre part par des simulations numériques : rupture à l'arrière de l'indenteur à faible charge à cause de contraintes de traction dans la direction de rayure, rupture sous l'indenteur à charge moyenne à cause de contraintes de flexion du PU dans la direction perpendiculaire au sens de rayure, rupture devant le contact à forte charge à cause d'une mise en flexion du PU à l'avant de l'indenteur. Un mécanisme est proposé pour interpréter l'arrachement de particules à fort chargement, en s'appuyant notamment sur la tomographie.

Ces résultats sont valables à une échelle de sollicitation suffisamment grande (indenteur de rayon 100  $\mu\text{m}$ ) pour qu'il y ait un effet de structure PU/PVC (épaisseur du PU, propriétés mécaniques relatives des deux, adhérence...). Toutefois, l'usure du produit peut se faire à toutes les échelles, et on s'intéressera dans la suite du projet à l'échelle inférieure (indenteur de rayon 10  $\mu\text{m}$ ) afin d'étudier l'usure intrinsèque du PU, sans effet de structure PVC/PU.

## Références

- [1] I. Demirci, C. Gauthier, R. Schirrer, Mechanical analysis of the damage of a thin polymeric coating during scratching : role of the ratio of the coating thickness to the roughness of a scratching tip, *Thin Solid Films* 479 (2005) 207-215
- [2] S.J. Bull, Failure mode maps in the thin film scratch test, *Tribology International*. 1997, vol.30, no.7, pp491-498,
- [3] P.J. Burnett, S. Rickberry, The relationship between hardness and scratch adhesion, *Thin Solid Films*, 154 (1987) 403-416
- [4] V. Le Houérou, C. Gauthier, R. Schirrer, Mechanical analysis of the blistering of a thin film deposited on a glassy polymer, *Tribology International* 43 (2010) 129-135
- [5] C. Gauthier, R. Schirrer, Time and temperature dependence of the scratch properties of poly(methylmethacrylate) surfaces, *Journal of Materials Science* 35 (2000) 2121-2130
- [6] V. Jardet, P. Morel, Viscoelastic effects on the scratch resistance of polymers : relationship between mechanical properties and scratch properties at various temperatures, *Progress in Organic Coatings* 48 (2003) 322-331