



HAL
open science

Étude et caractérisation de l'usure de revêtement de sol à base de PVC : caractérisation des défauts consécutifs aux conditions réelles d'utilisation et aux simulations en laboratoire

Olivier Buchheit

► **To cite this version:**

Olivier Buchheit. Étude et caractérisation de l'usure de revêtement de sol à base de PVC : caractérisation des défauts consécutifs aux conditions réelles d'utilisation et aux simulations en laboratoire. Autre [cond-mat.other]. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004. Français. NNT : 2004INPL089N . tel-01750016

HAL Id: tel-01750016

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750016v1>

Submitted on 29 Mar 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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
Ecole des Mines de Nancy
Laboratoire de Science et Génie des Surfaces – UMR 7570

ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DE L'USURE DE REVÊTEMENTS DE SOL À BASE PVC :
CARACTÉRISATION DES DÉFAUTS CONSÉCUTIFS AUX CONDITIONS RÉELLES
D'UTILISATION ET AUX SIMULATIONS EN LABORATOIRE.

THESE

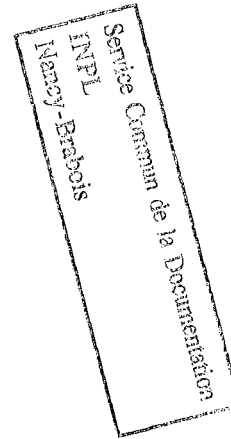
Présentée devant
L'Institut National Polytechnique de Lorraine
Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INPL

Spécialité : Science et Ingénierie des Matériaux

par

Olivier BUCHHEIT



Soutenue publiquement le 29 octobre 2004 devant la commission d'examen :

Rapporteurs : Mr. Christian GAUTHIER, Maître de Conférences (Institut Charles Sadron)
Mr. Yves BERTHIER, Directeur de Recherche CNRS (INSA Lyon)

Examineurs : Mr. Henri MICHEL, Directeur de Recherche INPL
Mr. Serge ETIENNE, Professeur (INPL)
Mr. Jürgen von STEBUT, Directeur de Recherche CNRS (INPL)
Mme Nathalie BONNEL de LONGCHAMP, Docteur (Centre de
Recherche Public Henri Tudor)
Mr. Herwig de ROECK, Directeur Recherche (Tarkett)



Pour toi, ma mère, ces quelques pages. Tu ne les liras jamais, mais nous savons tous les deux ce qu'elles représentent pour moi.

Pour vous, mes parents. Pour votre confiance et votre ouverture, conditions indispensables à l'épanouissement. Un grand merci.

Pour vous, mon frère, Carole, Lucas et Léa. Pour vos sourires et votre bonheur.

Pour toi, ma grand-mère. À ta jeunesse éternelle.

Pour vous, Carmen et Jean-Louis. Pour votre ouverture, votre gentillesse, votre courage.

Et enfin, pour toi, Stéphanie. Ça devient une habitude...

« La métaphysique, la morale, la religion, la science sont considérées comme des formes de mensonge : il faut leur aide pour croire à la vie. »

Friedrich Nietzsche

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme. »

François Rabelais

« La conscience qui nous manque ici n'est pas la conscience morale, c'est la conscience tout court, c'est-à-dire l'aptitude à se concevoir soi-même. D'où ces incroyables carences : comment se fait-il que la science demeure incapable de se concevoir comme praxis sociale ? Comment est-elle incapable, non seulement de contrôler, mais de concevoir son pouvoir de manipulation et sa manipulation par les pouvoirs ? Comment se fait-il que les scientifiques soient incapables de concevoir le lien entre la recherche « désintéressée » et la recherche de l'intérêt ? *Pourquoi sont-ils aussi totalement incapables d'examiner en termes scientifiques la relation entre savoir et pouvoir ? »*

Edgar Morin – réflexion autour de l'aphorisme de
F. Rabelais. La Méthode, t.1 : La nature de la Nature

<http://www.mcxapc.org>

AVANT-PROPOS

Ce manuscrit est le fruit du travail effectué au sein de l'Unité des Matériaux du Laboratoire de Technologies Industrielles (LTI, situé à Esch/Alzette, Luxembourg) du Centre de Recherche Public Henri Tudor (CRP Henri Tudor), en coopération avec le Laboratoire de Science et Génie des Surfaces de l'Ecole des Mines de Nancy (LSGS). Je souhaiterais donc exprimer, en premier lieu, ma gratitude à Messieurs Jean de la Hamette, Président du CRP Henri Tudor, Claude Wehenkel, Administrateur délégué du CRP Henri Tudor et Jos Schaeffers, Directeur du LTI, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail ; ainsi qu'à Mme le Ministre Erna Hennicot-Schoepges, du Ministère de la Recherche Luxembourgeois, pour l'avoir financé. De la même manière, je remercie vivement Monsieur Henri Michel, Directeur du LSGS, pour m'avoir accueilli dans ses locaux et avoir accepté de participer à ce jury.

Que Monsieur Christian Gauthier, Maître de Conférence à l'Institut Charles Sadron, et Monsieur Yves Berthier, Directeur de recherche CNRS à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir consacré une partie de leur temps à l'examen de ce travail, et pour avoir accepté d'en être les rapporteurs ; ainsi que Monsieur Serge Etienne, Professeur à l'INPL, pour l'intérêt qu'il a porté à cette étude en acceptant à son tour de participer à ce jury.

Je souhaiterais remercier Madame Nathalie Bonnel de Longchamp pour ces trois années que j'ai passées sous sa direction. Je n'aurais jamais autant appris sur « le monde du travail » et sur moi-même que durant cette période, et ce, aussi bien sur la dimension économique que sur la dimension sociale de ces deux univers. Un grand merci pour ces années riches d'enseignements, qui auront marqué ma personnalité.

J'ai également eu la chance de profiter de l'encadrement scientifique de Monsieur Jürgen von Stebut ; qu'il trouve ici ma franche reconnaissance pour son enseignement épistémologique de qualité, ses orientations pertinentes dans nos travaux, ainsi que pour la confiance et le respect qu'il a su me témoigner tout au long de cette période, et plus particulièrement pendant la rédaction de ce document.

Ce travail n'aurait pas pu se faire sans l'impulsion de notre partenaire industriel, le groupe Tarkett. Je souhaiterais souligner l'intérêt que j'ai eu à travailler en collaboration avec cette

société. Je tiens donc à remercier ici son directeur de Recherche et Développement à Sedan, Monsieur Herwig de Roeck, sans oublier, bien entendu, Monsieur Gérard Pfeiffer.

Toujours dans cette société, je souhaiterais exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur Albert Roussel, pour sa disponibilité, son écoute et l'aide permanente qu'il n'a pas hésité à me fournir. Enfin, un grand merci à Monsieur Slawko Hajewski, pour son aide et sa disponibilité toutes aussi régulières.

Je souhaiterais également exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé, de près comme de loin, dans la conduite de ce projet.

Je pense notamment à Madame Marie Claude Lehmann pour son accueil extrêmement chaleureux au sein du LSGS, ainsi qu'à Mademoiselle Sylvie Colinet, pour son amabilité et sa disponibilité. De la même manière, je remercie Messieurs Jean-Pierre Arnould, Béranger Boreux et Christian Leroy pour leur aide et leur support, entre autres, expérimental.

J'aimerais également remercier mon tout récent voisin de bureau Rondolfo Villegas pour son accueil lui aussi chaleureux. Bon courage pour la suite de tes travaux.

Concernant le CRP Henri Tudor, mes remerciements risqueraient d'être épuisants à lire...

Néanmoins, je souhaiterais témoigner mon amitié à trois personnes en particulier : Corinne Gouy, débordante d'énergie et de sympathie - je suis heureux de pouvoir travailler avec toi ; Frédéric Faltot, une personnalité qu'il est à mon sens malheureusement trop rare de trouver ; et Rémi Fabbri qui, en plus d'un profond feeling relationnel, m'a ouvert les portes d'univers extraordinaires.

Bien entendu, je n'oublie pas mes collègues des matériaux, ainsi que ceux délocalisés : dans la fameuse Villa Bleue, Serge Gillé, qui m'est toujours d'une agréable compagnie ; Emmanuelle Boudinet ; Manon Wiroth et Laurence Jacob, pour leur gentillesse, leur amabilité et leur serviabilité ; et là aussi, à toutes les autres personnes travaillant dans ce bâtiment que je ne pourrais mentionner en quelques lignes, un grand merci.

Enfin, je souhaiterais dédier le remerciement final à mes parents. Merci pour votre aide précieuse, sous toutes ses multiples formes.

SOMMAIRE

Introduction	19
Chapitre I: Présentation du problème	23
I.1 Les revêtements de sol	25
I.1.1 Cycle de vie	25
I.1.2 Utilisation	26
I.2 Les revêtements de sol et les tests normalisés	27
I.2.1 Les groupes d'usure	27
I.2.2 Des normes actuelles aux futures normes	28
Chapitre II: Tribologie des polymères : concepts de base	33
II.1 Endommagements de surface	35
II.1.1 Endommagements dans les élastomères – principales fonctions d'usure	36
II.1.2 Usure	37
II.2 Propriétés des matériaux et endommagements de surface	39
Chapitre III: Les produits et l'approche expérimentale	45
III.1 Analyse des matériaux de référence	47
III.1.1 Chimie	47
III.1.1.1 Revêtement de sol PVC	47
III.1.1.2 Revêtement protecteur de PU	48
III.1.2 Processus de fabrication des revêtements de sol PVC	48
III.1.3 Observation visuelle de la surface	52
III.1.4 Mécanique : tests de nano-rayure	54
III.1.4.1 Principe	54
III.1.4.2 Données recueillies et réglage expérimental	55
III.1.4.3 Modes d'endommagement	56
III.1.4.4 Recouvrance visco-élastique	62
III.1.4.5 Observations transverses – niveau de déformation plastique	64
III.1.4.6 Micrographies transverses	67

III.1.4.7 Test de nano-rayure : conclusions	67
III.1.5 Topographie	69
III.1.5.1 Caractérisation topographique	69
III.1.5.2 Topographie des revêtements de sol étudiés : état de référence	72
III.1.5.3 Mesures 2D : sensibilité de paramètres topographiques pertinents à une troncature mathématique abrasive	73
III.1.5.4 Approche Ek-Sk : définition des états de référence	79
III.2 Tests d'usure – principes de base	84
III.2.1 Le test Frick Taber	84
III.2.2 Le test Lisson	86
III.2.3 Le test grandeur nature	87
III.2.4 Tests d'usure étudiés : conclusions	91
Chapitre IV: Analyse des résultats sur l'usure des revêtements de sol	95
IV.1 Les résultats du test Frick Taber	97
IV.1.1 Perte de masse et de volume	97
IV.1.2 Inspection visuelle et mesures topographiques 3D après le test Frick Taber	100
IV.1.2.1 Usure Frick Taber des produits PVC	100
IV.1.2.2 Usure Frick Taber des produits PU+PVC	101
IV.1.3 Evolution de l'épaisseur de la couche de PU	102
IV.1.4 Evolution des paramètres de rugosité	102
IV.1.4.1 Produits PVC	102
IV.1.4.2 Produits PU+PVC	103
IV.1.5 Les résultats du test Frick Taber étudiés via l'approche Ek-Sk	104
IV.1.6 Le test Frick Taber test : conclusions sur le processus d'usure globale	107
IV.2 Résultats du test d'usure Lisson standard	109
IV.2.1 Observation visuelles et mesures topographiques 3D	109
IV.2.1.1 Usure Lisson des produits PVC	109
IV.2.1.2 Uure Lisson des produits PU+PVC	110
IV.2.2 Evolution de l'épaisseur de la couche PU	111
IV.2.3 Evolution des paramètres de rugosité	112
IV.2.3.1 Produits PVC	112
IV.2.3.2 Produits PU+PVC	113

IV.2.4 Résultats du test Lisson étudiés via l'approche Ek-Sk	114
IV.2.5 Le test Lisson : conclusions sur le processus d'usure globale	120
IV.3 Résultats du test grandeur nature	122
IV.3.1 Inspection visuelle et mesures topographiques 3D	122
IV.3.1.1 Produits PVC	122
IV.3.1.2 Produits PU+PVC	128
IV.3.1.3 Défauts de surface sur le test grandeur nature : conclusions	129
IV.3.2 Evolution de l'épaisseur de la couche de PU	132
IV.3.3 Evolution des paramètres de rugosité	133
IV.3.3.1 Produits PVC	133
IV.3.3.2 Produits PU+PVC	134
IV.3.4 Les résultats du test grandeur nature étudiés via l'approche Ek-Sk	136
IV.3.5 Test grandeur nature : conclusions	139
IV.3.6 Le test Lisson par rapport au test grandeur nature	141
IV.4 Usure des revêtements de sol : conclusions générales	142
Chapitre V: Le test Lisson – optimisation du tribosystème et de la procédure de test	145
V.1 Un tribosystème amélioré pour le test Lisson	147
V.1.1 Observation visuelle et mesures topographiques 3D	147
V.1.1.1 Produits PVC	147
V.1.1.2 Produits PU+PVC	149
V.1.2 Evolution de l'épaisseur de la couche de PU	152
V.1.3 Evolution des paramètres de rugosité	152
V.1.3.1 Produits PVC	152
V.1.3.2 Produits PU+PVC	154
V.1.4 La nouvelle procédure Lisson étudiée via l'approche Ek-Sk	155
V.1.4.1 Paramètres d'amplitude	156
V.1.4.2 Courbes Ek-Sk	157
V.1.4.3 Courbes d'Abbott-Firestone	157
V.1.5 Conclusions sur le test Lisson test enrichi d'un troisième corps	158
V.2 Etude des rayures	160
V.2.1 Représentation 3D	160

V.2.2 Observations transverses – niveau de déformation plastique	162
V.3 Optimisation du test Lisson : conclusions	165
Conclusion	169
Bibliographie	173
Annexe A – Modes d'endommagement en rayure pour les polymères	179
Annexe B - Mesure 2D : traitement des données	183

INTRODUCTION

L'industrie du revêtement de sol doit faire face à deux enjeux : proposer régulièrement des produits nouveaux et améliorés (à l'aide, notamment, de nouveaux matériaux - polymères), qui satisfassent également les tests normés existants. Le problème est que les normes actuelles ont été développées dans les années 60, et que les produits et les technologies ont fortement évolués (et avec eux, la tenue à l'usure des revêtements de sol).

L'usure est principalement décrite en termes de perte de volume (ou d'épaisseur) du produit en cours d'utilisation. De manière à garantir un temps de vie donné, les normes préconisent d'ajouter une épaisseur minimale de couche protectrice sur le produit. Actuellement, cette épaisseur est irréaliste (bien trop importante), principalement à cause des améliorations dans la formulation des polymères utilisés. De plus, les méthodes de vieillissement artificiel semblent générer des endommagements bien trop violents comparés aux résultats issus de tests grandeur nature.

L'industrie du revêtement de sol étudie actuellement les relations entre les matériaux, leurs conditions d'utilisation et les tests accélérés. Cette recherche est maintenant possible grâce aux nouvelles technologies disponibles depuis quelques années (notamment, le test de nano-rayure). Ces technologies annoncent une nouvelle étape dans la science des surfaces ; mais elles sont encore relativement émergentes, et ne sont pas encore totalement implantées dans l'industrie.

Ce travail a été mené avec deux objectifs principaux :

- Démontrer que les normes actuelles sont dépassées ;
- Proposer de nouvelles solutions, avec l'aide de ces technologies émergentes.

Ainsi, la tribologie des revêtements de sol résilients, et plus particulièrement leurs processus d'usure, ont été explorés au cours de cette étude.

La démarche suivie est la suivante :

- Compréhension des mécanismes d'endommagement initiés dans les tests d'usure accéléré ;

- Comparaison avec les résultats issus d'un test grandeur nature ;
- Compréhension des bases de l'usure des revêtements de sol résilients ;
- Nouvelle approche pour tester les revêtements de sol résilients, basée sur les tests existants et sur de nouveaux outils d'investigation.

Le premier chapitre contient des connaissances de base concernant les revêtements de sol, et il présente la problématique étudiée. Le second chapitre rassemble certains éléments au sujet de la tribologie des polymères, en relation avec cette problématique.

Le chapitre trois présente les produits étudiés, et les outils utilisés pour les caractériser. L'étude des propriétés mécaniques des revêtements de sol (dans leur état de référence) via le test de nano-rayure permet de mettre en évidence certaines différences dans la rhéologie des produits, et aide à la définition de l'échelle d'observation de leur topographie.

Les tests de résistance à l'usure étudiés durant ce travail sont ensuite décrits, et les résultats de ces tests sur les produits étudiés sont donnés dans le chapitre quatre. Une approche topographique nous aide à mieux comprendre les résultats issus de ces tests d'usure.

Grâce à ces quatre chapitres, nous pouvons, dans le chapitre cinq, proposer des fondations solides pour un nouveau test d'usure (principalement basé sur un des tests d'usure actuellement utilisés dans l'industrie du revêtement de sol textile), qui vise à reproduire en laboratoire les conditions réelles d'utilisation d'un revêtement de sol résilient. Nous sommes très confiants dans ce test ; il semble être une base robuste pour un nouveau test normé de résistance à l'usure.

Chapitre I: Présentation du problème

I.1 LES REVÊTEMENTS DE SOL

Les revêtements de sol sont utilisés pour leurs fonctionnalités [1]:

1. de protection ;
2. d'esthétique ;
3. de confort et de sécurité.

Pour pouvoir satisfaire les différents besoins du client, les fabricants de revêtements de sol doivent concevoir leurs produits en se basant sur une large gamme de conditions d'utilisation et de matériaux en rapport : céramiques (cuisine et salle de bain), textiles (chambre), élastomères (gymnase), béton et composites (sites de production) ...

Nous présentons ici brièvement le cycle de vie du revêtement de sol, de la ligne de production à l'utilisation qui en est faite par le client (en référence aux produits que nous avons étudiés, à savoir des revêtements de sol homogènes à base de polychlorure de vnyle). Nous nous concentrerons ensuite sur les objectifs de cette étude : les revêtements de sol polymères et les tests d'usure normalisés.

I.1.1 Le cycle de vie

De la ligne de production à l'utilisation par le client, la surface d'un revêtement de sol est soumise à des contraintes variées (chimiques, mécaniques, thermiques) qui peuvent engendrer l'apparition de différents endommagements, de l'échelle nanométrique à l'échelle macrométrique.

Nous pouvons brièvement résumer et commenter le cycle de vie d'un revêtement de sol :

1. **Fabrication** : les procédés de fabrication industriels induisent des hétérogénéités à l'échelle à laquelle nous souhaitons étudier ces produits. Par la suite, nous devons donc utiliser des outils statistiques pour observer nos produits.
2. **Conditions de stockage** : en rouleaux dans le cas de revêtements de sol flexibles, en piles dans le cas de revêtements de sol rigides. Le stockage implique :
→ *des pressions de contact constantes*, qui peuvent induire un fluage important du produit et, potentiellement, des déformations permanentes ;

→ *des contacts entre les surfaces visibles (face supérieure) et les surfaces de pose (en contact avec le sol)*, qui peuvent engendrer des contaminations de surface, avec d'éventuelles modifications dans les propriétés de surface ;

→ *des variations des niveaux d'humidité, de température, d'irradiation UV*, tous potentiellement importants dans les modifications des propriétés chimiques du revêtement de sol.

Les produits que nous analysons ici sont directement issus de la ligne de production. Ils ne sont pas soumis aux sollicitations de transport et de stockage.

3. Transport : habituellement réalisé par camion.

→ *vibration de la bobine ou de la pile*, induisant des conditions de fretting, et donc des dégradations potentielles de la surface (initiation de fissure...);

→ *chocs lors des opérations de chargement/déchargement*, avec localement d'importantes déformations permanentes possibles ;

4. Installation :

→ *déroulement du rouleau* : risques de contamination avec les poussières, sable... et en conséquence, apparition de rayures à la surface ;

→ *utilisation de colle* : réactions chimiques avec le produit, et donc changements potentiels dans les propriétés physiques du revêtement de sol ;

5. Maintenance, nettoyage :

→ *l'agent chimique nettoyant (si différent des recommandations du fabricant)* peut interagir chimiquement avec le revêtement de sol, et donc engendrer des modifications des propriétés de surface ;

→ *utilisation d'une machine abrasive/de polissage*, qui peut entraîner une disparition totale de la couche protectrice du revêtement de sol (s'il en possède une).

I.1.2 Utilisation

Les spécifications des revêtements de sol résilients sont directement liées à leur utilisation (voir tableau I.1) : plus l'application est sévère, plus les spécifications sont sévères.

Les tests de résistance à l'usure sont décrits dans des normes spécifiques, plus ou moins liées aux conditions de trafic et aux conditions environnementales en utilisation réelle. Les tests d'usure accélérée sont conçus pour simuler les conditions réelles d'utilisation dans l'intervalle de temps le plus court possible. De manière à différencier les revêtements de sol, l'industrie

défini différents “groupes d'usure” normalisés d'après le niveau de résistance à l'usure du produit.

Tableau I.1: Domaines d'application des revêtements de sol résilients à base PVC, d'après la norme NF EN 685 [2].

Classe	Intensité d'utilisation	Description	Exemples
21	Domestique modéré	Traffic bas/intermittent	Chambre
22	Domestique général	Traffic moyen	Hall, salon
23	Domestique important	Traffic élevé	Hall, salon
31	Commercial modéré	Traffic bas/intermittent	Chambre, hôtel Salle de réunion
32	Commercial général	Traffic moyen	Hôtel Petits commerces
33	Commercial important	Traffic élevé	Salles de classe, Hall Bureau
34	Commercial très important	Traffic très élevé	Centres commerciaux, aéroports
41	Industriel léger modéré	Travail sédentaire, utilisation occasionnelle de véhicules légers	Assemblage électronique, mécanique de précision
42	Industriel léger général	Travail debout et/ou trafic de véhicules	Zones de stockage
43	Industriel léger important	Autres	Zones de stockage, de production

I.2 LES REVÊTEMENTS DE SOL ET LES TESTS NORMALISÉS

I.2.1 Les groupes d'usure

Les produits peuvent être classés dans un “groupe d'usure” défini d'après :

- une perte d'épaisseur maximale (NF EN 660-1 [3]);
- une perte de volume maximale (NF EN 660-2 [4]).

En regardant les tests d'usure actuels, nous pouvons constater que :

- **Les endommagements apparaissant durant ces tests semblent être bien plus sévères qu'en réalité.** Le meilleur exemple est probablement le test Frick Taber (NF EN 660-2 [4]). Les rapports de tests montrent que dans le cas de produits revêtus, le revêtement

protecteur est très attaqué dès les premières étapes de ce test d'abrasion (après les cent premiers cycles). Être trop agressif pour simuler une usure réelle est très souvent inadapté *à moins que le mécanisme d'usure principal soit correctement compris et simulé ([1]).*

- **La classification des produits d'après les résultats du test peut ne pas être pertinente :** comme nous le verrons plus loin, le test Frick Taber conclut sur des niveaux d'usure (usure abrasive) équivalents entre un revêtement de sol PVC et le même revêtement de sol recouvert d'un revêtement protecteur PU¹. Ce test est donc inadapté pour simuler correctement la réalité, car ces deux produits ont un comportement inverse en test grandeur nature.
- **Certaines hypothèses** comme la masse volumique des produits testés supposée constante durant le test ; la nature, la géométrie et la quantité de deuxième et troisième corps utilisés, peuvent expliquer, au moins partiellement, les mauvaises corrélations entre les simulations en laboratoire et la réalité.

I.2.2 Des normes actuelles aux futures normes

Les objectifs des travaux présentés ici sont :

1. Comprendre les processus d'usure fondamentaux des revêtements de sol PVC et des revêtements de sol PVC/revêtu PU.
2. Identifier les propriétés principales impliquées dans ces processus d'usure.
3. Etudier la pertinence d'autres tests normés utilisés actuellement (pertinence à reproduire des sollicitations réelles).
4. Trouver un test adapté aux produits revêtus d'élastomère, d'après l'analyse des résultats issus d'un test grandeur nature.

¹ Il convient de noter que la norme définissant le test Frick Taber spécifie clairement que ce test "n'est pas adapté pour comparer la résistance à l'usure de matériaux différents, comme par exemple le caoutchouc et le PVC". Néanmoins, ce test est toujours utilisé dans le cas des revêtements de sol à base PVC, même revêtus de PU. En effet, cette norme "peut être utilisée pour déterminer la résistance à l'usure par abrasion, et particulièrement pour classer les différentes couches fonctionnelles qu'un produit peut avoir". De plus, nous verrons que même dans le cas d'un revêtement de sol PVC sans couche d'usure, ce test ne reproduit pas les sollicitations appliquées en conditions réelles d'utilisation (chapitre trois).

Nous avons décidé de comparer certaines des différences topographiques et mécaniques entre un revêtement de sol PVC sans couche protectrice, et le même revêtement de sol revêtu d'une fine couche de PU, lorsqu'ils sont soumis :

1. Au test Frick Taber, le test normé actuel pour les revêtements de sol résilients ;
2. Au test Lisson, le test normé actuel pour les produits textiles (moquettes) ;
3. À un test grandeur nature, effectif durant une année dans notre laboratoire.

Cette approche (illustrée par la figure I.1) devrait permettre une meilleure compréhension du comportement réel d'un revêtement de sol, car :

- l'usure réelle (en test grandeur nature) et l'usure simulée (en laboratoire, à l'aide des tests d'usure normalisés) seront décrites en terme de **modifications de propriétés topographiques**, et constitueront par là une *base objective* (couplée aux observations visuelles - *subjectives*) pour l'appréciation de la pertinence des tests d'usure normalisés ;
- une partie importante des différences entre "l'usure simulée" et "l'usure réelle" devrait être mise en évidence.

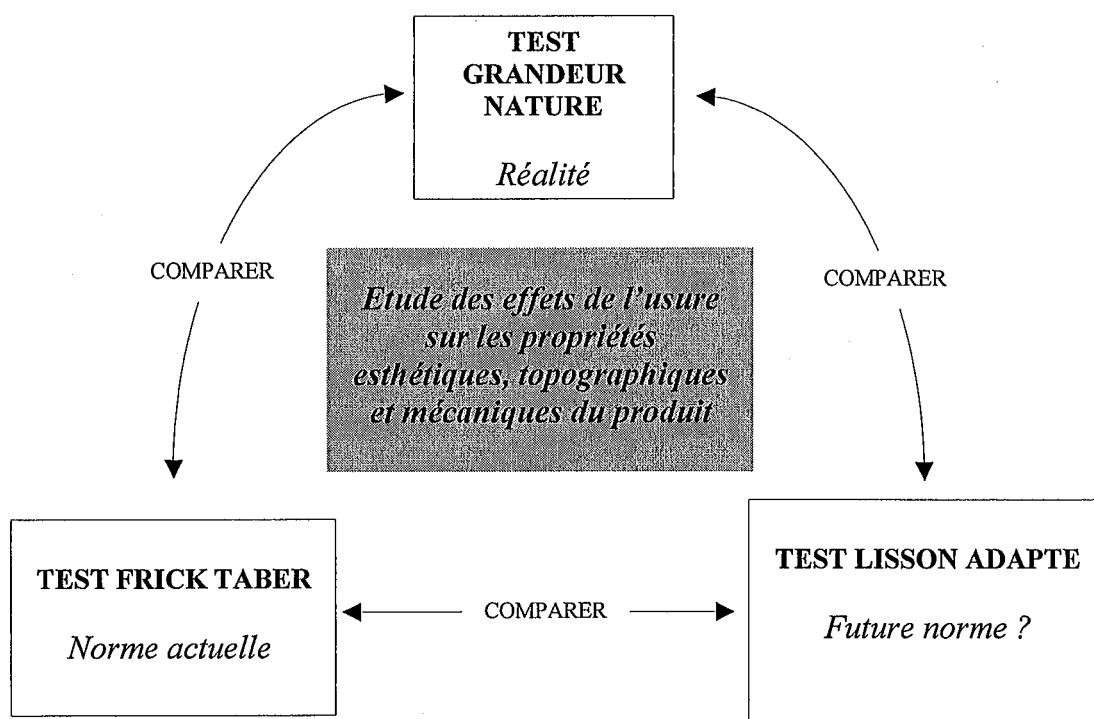


Figure I.1: Méthodologie proposée pour étudier et caractériser les processus d'usure des revêtements de sol.

Chapitre II : Tribologie des polymères : concepts de base

L'étude de l'usure des revêtements de sol du point de vue des propriétés esthétiques, topographiques et mécaniques de leur surface, doit être réalisée en adéquation avec leurs applications tribologiques².

² La tribologie (du Grec classique *tribos*, pour frottement, et *logos*, pour loi ou connaissance), est définie comme *la science et les technologies des surfaces en contact et en mouvement relatif, et englobe l'étude du frottement, de l'usure et de la lubrification* [5].

II.1 ENDOMMAGEMENT DE SURFACE

La nature des endommagements de surface susceptibles d'apparaître sur un produit est fortement dépendante du tribosystème qui l'intègre. Parmi les principaux paramètres impliqués dans l'initiation de processus d'endommagement spécifiques, nous pouvons distinguer [6] :

- **Le mode de contact :**
 - a) *Circuit ouvert* : le frotteur glissant sur la surface est en contact avec une zone constamment renouvelée (non usée) de la surface ;
 - b) *Circuit fermé (cyclique)* : après un certain nombre de passages (cycles) dans la trace d'usure, l'interface frotteur/produit testé peut être constituée par une couche de transfert, modifiant par là les conditions de contact locales.
- **La micro-géométrie des surfaces en contact** : de la seconde loi d'Amonton sur le frottement (“la résistance au frottement est indépendante de l'aire [de contact apparente] des surfaces en mouvement” [8]) à des études plus récentes (“la rugosité de surface [...] a souvent une forte influence sur les caractéristiques de frottement à l'échelle micro/nano” [8] ; “il est maintenant bien établi que les surfaces [...] sont rugueuses à l'échelle microscopique [...], avec des conséquences critiques sur la tenue à la fatigue, les comportements au frottement et à l'usure [...]” [9]), l'importance de la micro-géométrie de surface sur les processus d'usure est évidente. Cette micro-géométrie conditionnera fortement la surface de contact réelle et, jusqu'à un certain niveau, les champs de contraintes/déformations pour les surfaces en contact.
- **Le niveau de sollicitation** : Briscoe [10] a montré l'influence de la charge normale (parmi d'autres paramètres) sur l'initiation de modes d'endommagements spécifiques durant un test de rayure sur du PMMA.
- **La vitesse de glissement** : les polymères sont des matériaux sensibles aux échelles de temps et de température ; la notion de taux de contrainte/déformation, et donc de vitesse de glissement, peut devenir prédominante (en fonction de l'échelle de temps considérée).
- **Les matériaux en contact** : leur rhéologie, leurs affinités chimiques...

Notre premier objectif est donc de voir quels sont, en conditions réelles de trafic, les effets de la couche élastomère utilisée comme couche de résistance à l'usure sur les revêtements de sol.

II.1.1 Endommagements dans les élastomères – principales fonctions d'usure

Comme l'a synthétisé Petitet [11], les quatre principales fonctions d'usure reconnues dans les élastomères sont les rides, les stries, les rouleaux et les cratères.

□ Rides

Consécutives à des “ondes de détachement” (plis à la surface avec des niveaux de déformations supposés importants, voir figure II.1), perpendiculaires à la zone de contact (dans le cas du glissement, par exemple), les rides (figure II.2-a) sont supposées prendre naissance lors de “la cission et la coalescence de liaisons moléculaires dans la zone de contact” [12] (hypothèse confirmée par des observations au MEB [13][14]). Ces ondes de détachement sont produites par “enroulement” de la surface, dû aux contraintes tangentielles de compression en avant du contact. Des travaux ont été effectués récemment pour étudier la déformation au niveau des rides et la relation entre les forces de frottement et la taille des rides [16][17]. La longueur des rides s'étale de la centaine de micromètres à quelques millimètres, avec une hauteur caractéristique dix fois plus grande.

□ Stries

Fonctions topographiques parallèles à la direction de glissement (figure II.2-b).

□ Rouleaux

Débris d'usure adhérent à la surface élastomère usée (voir figure II.2-c). Plus proches d'un troisième corps, les rouleaux restent encore un sujet d'étude à explorer ([18][19]).

□ Cratères

Les cratères (voir figure II.2-d) – trous circulaires, diamètre de l'ordre de la centaine de micromètres, profondeur aux alentours de dix micromètres – sont reliés à une usure douce.

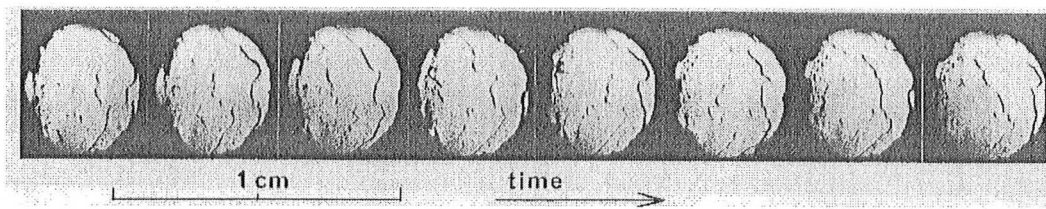


Figure II.1: progression des “ondes de détachement” – lignes noires – durant le contact entre une sphère dure glissant sur un caoutchouc transparent à 0.0043 cm/s [12]. Chaque image est prise à un intervalle de 1/32 s.

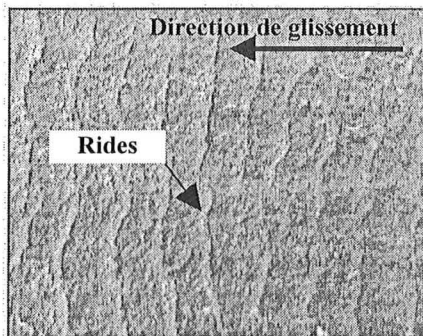


Figure II.2-a: Micrographie optique des rides [11]

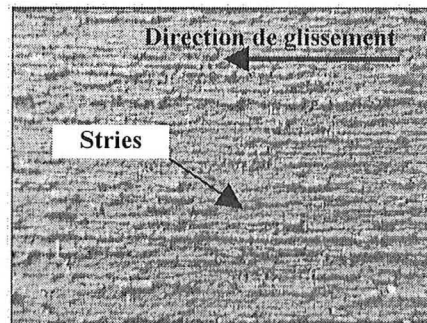


Figure II.2-b: Micrographie optique des stries [11]

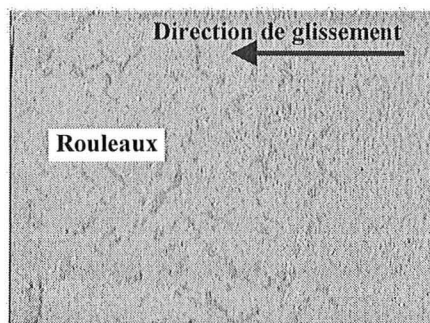


Figure II.2-c: Micrographie optique des rouleaux [11]

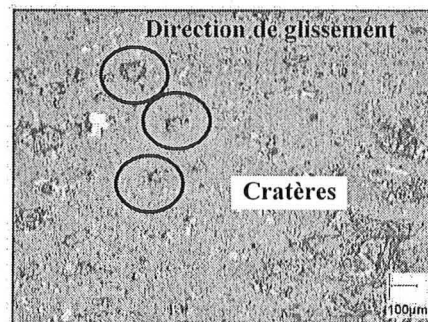


Figure II.2-d: Micrographie optique des cratères [11]

Figure II.2: Micrographies optiques des principales fonctions d'usure pour les élastomères [11]. Comme la longueur des rides, des stries et des rouleaux (micrographies a), b) et c)) s'étale de la centaine de micromètres à quelques millimètres, aucune échelle n'a été indiquée sur ces graphes.

II.1.2 Usure

Dans le cas des revêtements de sol à base PVC en application domestique modérée, les principaux processus d'endommagement sont consécutifs à une usure abrasive (deux/trois corps) ou adhésive³.

³ Même si nous essayons de réduire l'usure globale d'un corps placé dans un tribosystème donné en processus d'usure fondamentaux, nous devons garder à l'esprit que "l'usure des surfaces solides est un processus complexe qui inclut, dans beaucoup de cas, des attaques chimiques et des endommagements physiques" [7].

□ Usure Abrasive

L'usure abrasive est due à des particules dures, ou des protubérances, pressées contre une surface solide, et entraînées en déplacement. On peut distinguer deux configurations :

- **Le contact deux corps**, dans lequel une protubérance d'un des corps glisse sur la surface en contrepartie, et engendre sur ce dernier des marques parallèles à la direction de glissement ;
- **Le contact trois corps**, où les troisièmes corps (débris d'usure, particules abrasives...) sont piégés entre les deux surfaces, et peuvent être (jusqu'à un certain degré) libres de se déplacer. Cette configuration peut engendrer un motif aléatoire sur la surface, qui a généralement été fortement déformée (déformation plastique).

Différents mécanismes ont été proposés pour expliquer l'enlèvement de matière d'une surface durant l'abrasion, comme par exemple le labourage, la coupe, la micro-fissuration [11]...

L'usure abrasive (deux/trois corps) peut être une composante prépondérante dans le cas des revêtements de sol. Par exemple, le revêtement de sol peut être en contact avec une semelle dont le motif contient quelques gravillons piégés à l'intérieur. Durant la marche de la personne, les processus de labourage et/ou de coupe peuvent alors s'initier, avec des impacts importants sur l'esthétique du revêtement de sol.

□ L'usure adhésive

Lorsque deux surfaces sont en contact, des liaisons locales au niveau du contact (c.à-d. au niveau des aspérités de surface) peuvent apparaître en fonction des propriétés chimiques des surfaces. Ces liaisons vont résister au déplacement relatif des surfaces en contact. Si au cours de ce déplacement les forces d'adhésion sont inférieures aux forces de cohésion, l'enlèvement de matière aura lieu au niveau de ces liaisons plus faibles. Nous appelons ce processus "usure adhésive" [20], un des processus élémentaires définissant le frottement global d'après Bowden et Tabor dans le cas des métaux [8].

Ce processus peut être important dans notre tribosystème. De nos jours, les semelles des chaussures sont principalement composées d'élastomères. Ainsi, dans notre cas, les affinités chimiques (et donc l'usure adhésive) peuvent être très importantes. Plus globalement, comme l'ont conclu Bowers et Zisman [21], "le glissement d'un polymère sur un métal ou sur un autre polymère produit souvent des endommagements de surface importants. Des particules d'usure de plastique transféré, adhérant fortement à la surface de contact, ont été observées".

II.2 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX ET ENDOMMAGEMENTS DE SURFACE

Nous pouvons brièvement lister les propriétés les plus importantes pour l'endommagement des surfaces polymère [22] :

- **Les affinités chimiques** avec la contrepartie/l'environnement vont directement conditionner l'usure, particulièrement pour les matériaux avec un fort taux d'additifs. Dans notre cas, nous étudierons une formulation PVC, 50 % en masse d'additif, partiellement cristalline, partiellement amorphe, et une formulation PU, plus pure, sous forme d'élastomère, donc majoritairement amorphe.
- **Les propriétés mécaniques** : depuis le travail d'Archard [23], les lois prédictives ont été fortement développées. Les propriétés mécaniques sont les fondations de la plupart de ces modèles visant à prédire des évolutions reliées à l'usure. Les modèles d'usure sur les élastomères peuvent être séparés en deux catégories (figure II.3 [24]) :

1. **L'usure cohésive**, contrôlée par les propriétés massives des matériaux comme les modules de conservation/de perte, la ductilité, les énergies de contact, ... impliquant des volumes basés sur des échelles de l'ordre de la longueur de contact. L'usure abrasive et l'usure par fatigue appartiennent à l'usure cohésive.
2. **L'usure interfaciale**, dans laquelle les énergies de contact sont dissipées au niveau de la surface (l'usure adhésive et corrosive font partie de l'usure interfaciale). Les volumes sollicités étant ici confinés dans une couche de faible épaisseur sous la surface, d'importantes modifications physico-chimiques peuvent se produire (fortes augmentations de la température de surface, corrosion...).

Parmi tous les modèles disponibles pour les élastomères, nous pouvons mentionner les travaux de :

- Kragel'skii [25], adaptés à l'usure par fatigue;
- Reznikovskii [26], pour prédire la formation des rouleaux ;
- Thomas [27], décrivant la formation des rides.

Une autre propriété mécanique de grande importance est la **viscosité** de nos produits : la déformation résultant d'une contrainte spécifique est une fonction du temps, même à température ambiante⁴.

⁴ Les modèles rhéologiques prennent en compte la viscosité en introduisant un élément amortisseur, responsable de la dépendance au temps grâce à ses caractéristiques d'amortissement. Des combinaisons d'éléments rhéologiques particuliers comme par exemple les ressorts et amortisseurs (et leurs associations en éléments de Maxwell/Voigt/...) permettent de modéliser la viscoélasticité, c.à-d. la dépendance au temps entre la contrainte appliquée et la déformation résultante sur un polymère visqueux contraint dans son domaine élastique.

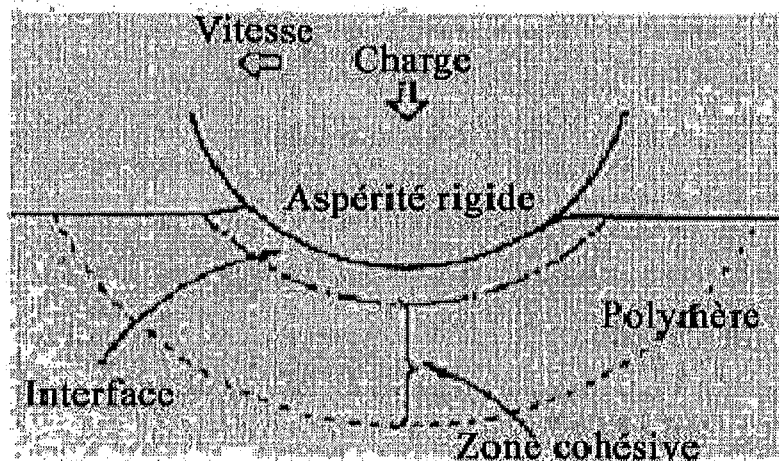


Figure II.3: Principaux modèles d'usure pour les élastomères : usure interfaciale et cohésive [24].

- **Les propriétés thermiques :** l'impact de la **transition vitreuse** peut être important dans le cas d'un tribosystème polymère : la température de contact peut augmenter jusqu'à atteindre cette T_g . L'augmentation de cette température peut être accélérée du fait de la **faible conductivité thermique** des polymères. Une telle transition thermique peut induire des états transitoires dans les mécanismes d'usure, particulièrement à cause des fortes dépendances entre les propriétés thermiques et les propriétés mécaniques (visqueuses). Ces liens peuvent être plus facilement appréciés à l'aide du **principe d'équivalence temps-température**⁵, qui permet d'extrapoler l'impact du temps ou de la température sur les propriétés visqueuses sans avoir à couvrir l'entièreté de l'échelle de température ou de temps concernée durant les tests.
- **La forme de la surface :** la géométrie de la surface (ou topographie) d'un produit peut être modifiée durant son temps de vie. À cause des sollicitations appliquées, la surface d'un produit sera déformée, de manière élastique et/ou plastique, ou plus sévèrement usée (marques parallèles dans le cas d'usure abrasive ; impacts en usure érosive ; piqûres en usure corrosive...). Ainsi, lorsque deux corps sont en contact, *l'aire réelle de contact est en général bien inférieure à l'aire de contact apparente* [28].⁶

⁵ Si nous considérons une fonction visco-élastique f , fonction du temps et de la température, cette fonction aura une certaine valeur f_R à une température de référence T_R . Le principe d'équivalence temps-température nous donne à n'importe quel temps $t(T_R) = t(T)/a_T$,

$$f(t, T_R) = \left(\frac{\rho_R T_R}{\rho T} \right) f \left(\frac{t}{a_T, T} \right)$$

avec ρ - masse volumique [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] T - température [K] a_T - facteur de décalage

⁶ Leonard de Vinci semble avoir très tôt compris cette réalité, mais elle est plus connue comme une des lois d'Amont (1699): "La force de frottement est indépendante de l'aire de la surface". De plus, des essais ont prouvé que l'aire réelle de contact est bien plus dépendante de la charge normal appliquée. Cette seconde loi d'Amont a été renforcée par les travaux, entre autres, de Coulomb (1785) [7].

Le contact se passe en premier lieu au niveau des aspérités des deux surfaces. Chaque aspérité engendre un champ de contrainte et une réponse locale des matériaux sollicités. Les propriétés des matériaux au niveau des aspérités, pendant et après le contact, peuvent être largement différentes des propriétés à coeur (adoucissement du matériau dû à une augmentation locale de la température, modifications chimiques...).

Les aspérités constituent les zones d'établissement du premier contact ; les pores de la surface, eux, sont des endroits privilégiés pour piéger les salissures ou les liquides, qui peuvent réagir avec le matériau. Des phénomènes chimiques comme la corrosion peuvent avoir lieu. À l'inverse, ces pores peuvent agir comme des "réservoirs" à lubrifiant : ici, nous sommes directement dans le domaine de l'ingénierie de surface.

L'influence de la géométrie de surface sur l'usure est très étudiée et intégrée :

- **Au niveau expérimental**, à travers des études de l'impact de la géométrie de contact sur le comportement à la rayure (avec, entre autres, les travaux de Briscoe et al. [29]), l'effet de la rugosité sur le coefficient de frottement [8], sur le taux d'usure [6]...
- **Au niveau modélisation**, où Greenwood et Williamson [30] ont développé un des premiers modèles pour le contact de surfaces réelles qui prennent en compte la nature aléatoire de certains phénomènes d'interface ; Whitehouse et Archard [31] ont approfondi cette analyse, en introduisant deux paramètres (σ et β^*) représentant certaines fonctions de la topographie de surface [32] ; et, de nos jours, la géométrie de contact entre un pneu et une route pavée est modélisée de manière à mieux comprendre ses effets sur le frottement [33].

Pilotant en partie le champ de contrainte, l'aire de contact et le processus de lubrification, la topographie des surfaces en contact a un impact important sur les processus d'usure susceptibles d'apparaître durant le contact. De plus, la géométrie de la surface d'un solide conditionne directement son aspect visuel.

Ainsi, dans le cas d'un revêtement de sol dont les qualités esthétiques sont primordiales, **la topographie de surface apparaît comme une propriété clé, solide**, pour pouvoir valider, ou non, les résultats des tests d'usure normalisés.

Chapitre III: Les produits et l'approche expérimentale

Nous allons maintenant présenter l'état de référence des produits étudiés, et notamment leurs propriétés chimiques (d'après les données du fabricant), mécaniques et topographiques :

- **Les propriétés mécaniques** : la technique de nano-rayure a été utilisée à cause de ses similarités évidentes avec un des principaux défauts observés en usure réelle (test grandeur nature) d'un revêtement de sol : la rayure. L'échelle nanométrique est bien adaptée pour étudier l'influence d'une couche très complaisante de moins de 10 micromètres d'épaisseur. Enfin, même si le test de nano-rayure est un outil essentiellement qualitatif, permettant surtout des caractérisations locales, il nous a aidé à définir l'échelle à laquelle étudier la topographie de nos produits.
- **La caractérisation topographique** : les techniques optiques sont bien adaptées pour étudier des surfaces complaisantes (pas de contact déformant durant la mesure).
 - Profilomètre optique 2D ;
 - Interféromètre 3D en lumière blanche ;
 - Modèle topographique pour simuler l'abrasion pure [34]: variations de certains paramètres topographiques pertinents avec le niveau de troncature des aspérités.

Parmi les particularités des produits étudiés, nous noterons le taux d'additifs (jusqu'à environ 50 % en masse), la rugosité marquée à l'échelle du contact (cette échelle étant le millimètre), une épaisseur de couche de PU non uniforme (plus de 10 % de variation) et un repositionnement durant les mesure (c.à-d. avant et après l'usure) très difficile. **Ces particularités nous ont poussé à avoir une approche statistique des résultats des essais/mesures**. Même si les échantillons étudiés ont, localement, des propriétés et une histoire spécifiques, ils conservent les mêmes comportements et les mêmes tendances à l'échelle macrométrique.

Nous présenterons ensuite l'environnement expérimental choisi pour étudier l'usure des revêtements de sol :

- Un test normé pour évaluer la résistance à l'usure d'un revêtement de sol résilient. Nous verrons combien le **test Frick Taber** peut être agressif ;

- Un test normé pour évaluer la résistance à l'usure des moquettes : le **test Lisson**. Nous verrons que ce test pourrait être optimisé pour mieux reproduire les conditions réelles d'utilisation d'un revêtement de sol ;
- Un test grandeur nature développé durant ces travaux pour enregistrer le comportement des produits en conditions réelles de trafic. Ce test grandeur nature devrait nous aider dans la conception d'un test d'usure accélérée mieux adapté à la réalité.

III.1 ANALYSE DES MATÉRIAUX DE RÉFÉRENCE

Deux revêtements de sol différents ont été étudiés :

- Un revêtement PVC homogène⁷ sans couche protectrice de PU (appelé PVC);
- Le même revêtement PVC avec une couche protectrice de PU (appelé PU+PVC).

Nous sommes en présence de deux matériaux complaisants et visqueux. Cette rhéologie particulière implique que durant les tests que nous avons effectués, nous n'avons jamais observé de réponse à caractère fragile (brutale).

III.1.1 Chimie

III.1.1.1 Revêtement de sol PVC

Le matériau de base pour le produit PVC est une matrice PVC, fournie sous forme de poudre. De part sa structure atactique⁸, le taux de cristallinité de ce polymère thermoplastique est en général plutôt bas (environ 10 % de la masse totale du polymère).

Pour pouvoir mettre en forme ce polymère, et pour donner au produit fini les propriétés mécaniques et esthétiques désirées, plusieurs additifs sont mélangés à la poudre de PVC⁹ :

- **Plastifiant : diethylhexyl phthalate** (ce plastifiant n'est plus utilisé par Tarkett car il a été classifié "substance toxique"). Les plastifiants sont utilisés pour améliorer la processabilité du polymère.
- **Adjuvants :**
 - **Carbonate de calcium ;**
 - **Silicate d'aluminium ;**
 - **Carbonate de calcium-magnesium.**

Les adjuvants sont utilisés pour altérer ou améliorer les propriétés physiques, ainsi que pour réduire les coûts de fabrication [36]. Ce sont généralement des substances relativement inertes. Leurs effets sur les propriétés sont dépendants de leur distribution en taille, et de la force de leurs liaisons avec la matrice polymère.

⁷ La norme [35] définit un revêtement de sol homogène comme étant composé de "... une ou plusieurs couches de même couleur et composition, décorée sur toute son épaisseur." (Point 2.1.15). Dans cette définition, la "couche d'usure" n'est pas considérée comme une couche à part entière.

⁸ Le groupe secondaire, constitué par l'élément chlore, est arrangé de manière aléatoire le long de la chaîne principale du polymère.

⁹ Par soucis de confidentialité, les proportions d'additifs ne seront pas précisées. Les additifs sont simplement classés par ordre décroissant de pourcentage en masse.

■ **Pigment : Dioxyde de titane.**

Les pigments donnent au produit fini la couleur souhaitée. Le dioxyde de titane est le principal pigment utilisé dans la formulation des produits PVC.

Tous ces additifs représentent globalement **52 % de la masse totale du plastique traité.**

III.1.1.2 Revêtement protecteur de PU

Pour prévenir l'usure des surfaces de revêtements de sol, le fabricant applique **une fine couche de polyurethane (PU) sur le produit PVC.** Le revêtement de sol est toujours homogène selon la norme EN 12466:1998 car le revêtement élastomère est une couche déposée pour améliorer la résistance à l'usure du revêtement de sol.

Une petite quantité d'additifs est ajoutée au polymère durant sa fabrication :

■ **Agent matifiant : polyamide.**

Les agents matifiants sont utilisés pour contrôler la brillance du produit fini.

■ **Épaississant : Acrysol ©**

Les épaississants sont utilisés pour augmenter la viscosité du polymère.

■ **Agent réticulant : aziridine polyfonctionnelle (C₂H₃N).**

L'agent réticulant permet l'initiation de liaisons chimiques entre les chaînes moléculaires, conférant au PU sa nature élastomère.

Ces additifs représentent seulement **9.1 % de la masse totale du revêtement protecteur.**

III.1.2 Processus de fabrication du revêtement de sol PVC

Nous présentons brièvement le processus de fabrication des revêtements de sols à base PVC. Ce processus consiste en deux (pour les produits PVC) ou trois (pour les produits PU+PVC) étapes successives :

1. **Agglomération et calibration des granulés** (figure III-1): le polymère PVC, les additifs, et un pigment sont broyés dans un broyeur à couteaux rotatifs. La taille des particules qui sortent du broyeur est calibrée, de manière à obtenir des granulés de PVC d'une couleur spécifique et d'une granulométrie précise.

2. **Calendrage des granulés** (figure III-2): des granulés de mélanges différents (c.à-d. de couleurs différentes) sont pressés entre deux cylindres, et chauffés pour obtenir des feuilles de plastique avec un motif défini par le styliste de la compagnie. La proportion des granulés de chaque couleur est directement liée au motif recherché sur le produit fini.
3. **Dépôt sur le substrat PVC** (figure III-3): un cylindre d'application, qui supporte une couche liquide de PU d'épaisseur maîtrisée (via le jeu entre ce cylindre et un autre cylindre porteur) est mis en contact avec la surface PVC. L'épaisseur de la couche résiduelle de PU déposée sur le substrat dépend principalement de :
 - L'épaisseur de la couche de PU sur le cylindre ;
 - La différence entre la vitesse linéaire du cylindre aux points de contact avec le revêtement de sol et la vitesse de défilement du substrat.

Le revêtement de sol revêtu est alors chauffé dans un four pour réticuler la couche de PU. De part le procédé de dépôt utilisé et les matériaux mis en oeuvre, **l'épaisseur de la couche de PU n'est pas homogène** (voir figure III-4).

L'épaisseur moyenne de référence de la couche de PU, mesurée via micrographie optique transverse, est de **8.3 ^{+/- 3.4} micromètres** (moyenne sur 80 mesures).

- Température de transition vitreuse

Les températures de transition vitreuse des deux plastiques étudiés, mesurées par le fabricant de ces revêtements de sol (TMA, taux: 10.0 °C/min) sont **similaires** :

- Environ 45 ° C pour le produit PVC ;
- Environ 40 ° C pour la couche de PU.

Il faut noter que la Tg de la couche de PU est mesurée sur un film de PU seul ; le processus de fabrication du revêtement de sol induit probablement des transformations physico-chimiques à l'interface PU/PVC, avec des effets possibles sur la Tg de la couche de PU.

Nous pouvons supposer que durant les processus d'usure, la température du revêtement de sol **peut localement dépasser la Tg** (notamment au niveau des aspérités), avec des changements

correspondants dans les propriétés mécaniques (par exemple, une augmentation des effets visqueux dans la réponse globale du matériau).

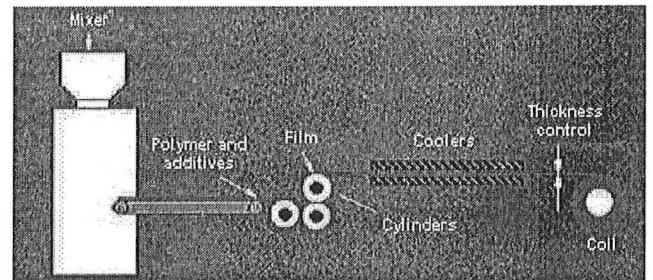
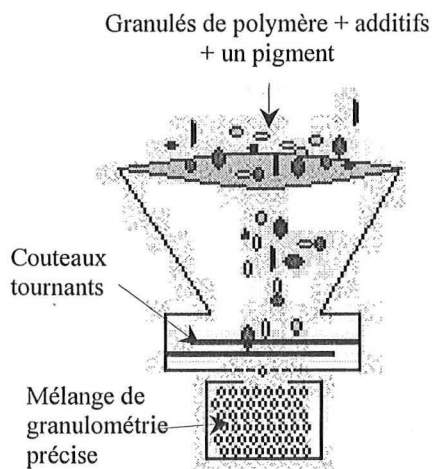


Figure III-2: Processus de calendrage.

Figure III-1: Agglomération et calibration des granulés de plastique.

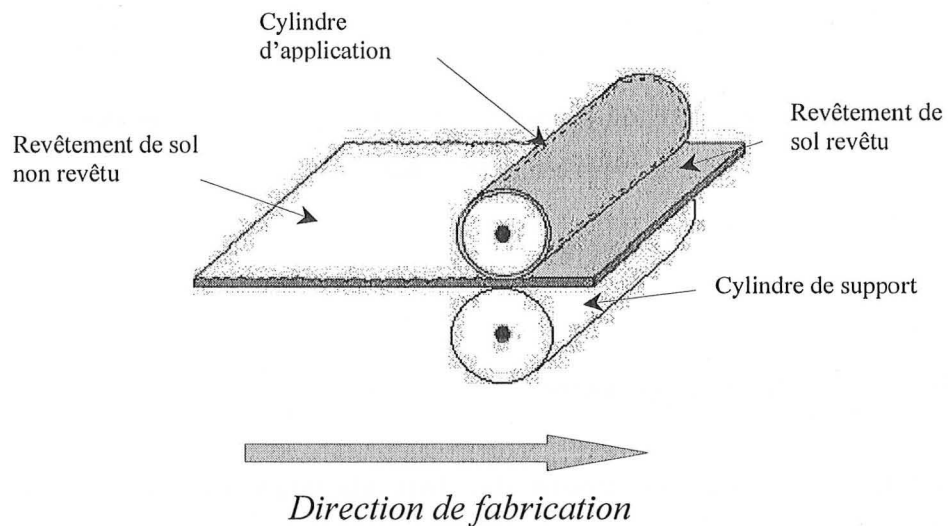


Figure III-3: Processus de dépôt sur le substrat PVC.

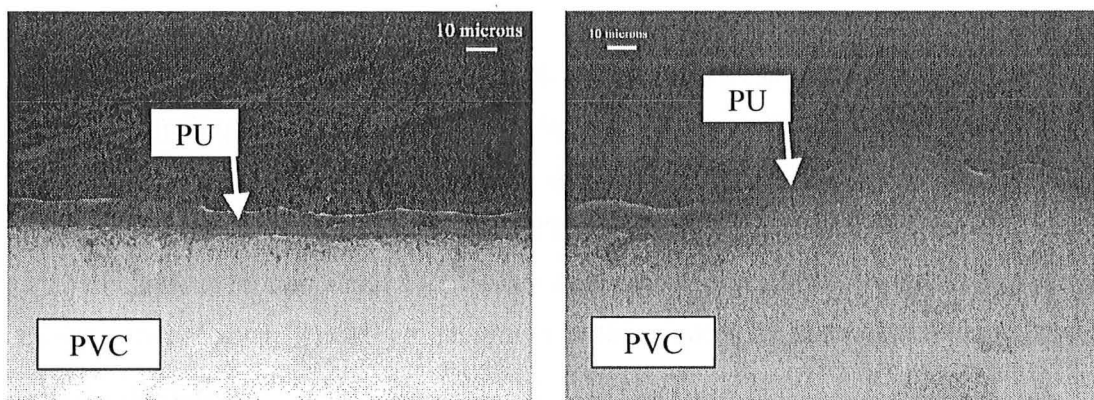


Figure III-4: Micrographie optique de sections transverses de produits PU+PVC.

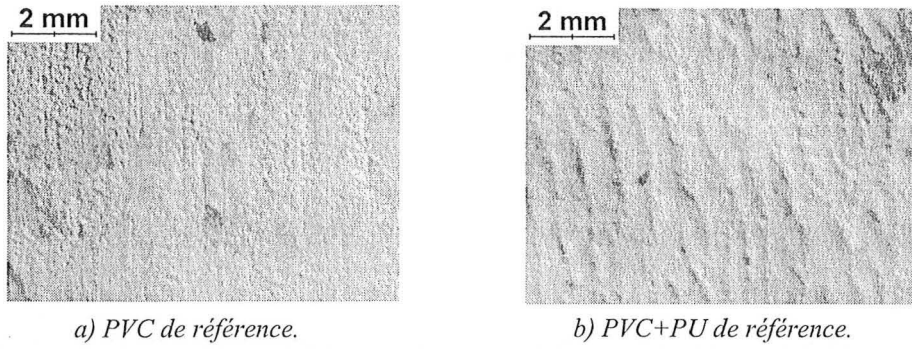


Figure III-5: Micrographie optique des surfaces de référence des deux produits.

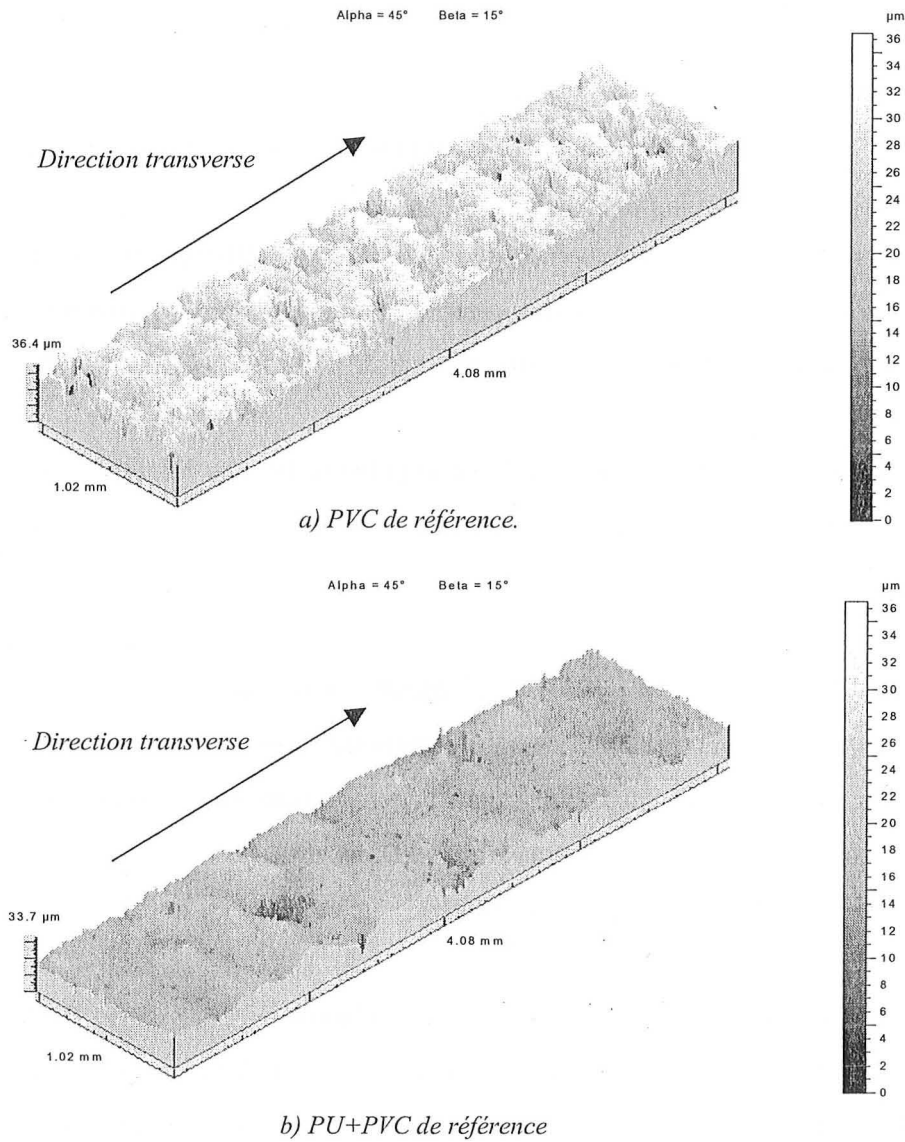


Figure III-6: Mesures topographiques 3D des surfaces de référence. Zoom sur une fenêtre de mesure totale de 1.82 mm by 25 mm. $\lambda_c = 0.8$ mm.

III.1.3 Observation visuelle de la surface

Une observation visuelle de la surface est nécessaire, car :

- Les propriétés esthétiques du revêtement de sol et leurs évolutions avec l'usure sont des points essentiels pour le client ;
- Nous allons étudier les propriétés mécaniques des produits via le test de nano-rayure : même si nous avons décidé d'avoir une approche statistique des propriétés des revêtement de sol, il est nécessaire d'éviter toute singularité non représentative dans la zone rayée.

La surface du PVC est relativement hétérogène. Les observations microscopiques (microscopie optique) montrent la présence :

- **d'adjuvants** comme le talc (carbonate de calcium, figure III-7a) – des particules avec une géométrie anguleuse, de dimension caractéristique d'environ 30-50 micromètres ;
- **d'impuretés du broyeur** (figure III-7b), c.à-d. des résidus issus des mélanges précédents ;
- **de trous**, résultants du processus de fabrication (figure III-7c). La taille caractéristique de ces trous est de quelques centaines de micromètres, en diamètre et en profondeur (figure III-7d).

La couche de PU contient une quantité d'additifs significativement inférieure ; en conséquence, sa surface apparaît plus homogène. Néanmoins, nous pouvons distinguer :

- **des alvéoles circulaires et ellipsoïdales**, d'environ 10 micromètres de diamètre (figure III-8a), qui sont des empreintes du processus de fabrication ;
- **des particules de PU** infondues (figure III-8b).

Evidemment, les **défauts** de la surface PVC sont **présents à l'interface PU/PVC**. Par exemple, sur la figure III-9, nous pouvons supposer qu'un trou à la surface du PVC a été comblé par le dépôt de PU. Ainsi, l'analyse des tests de nano-rayure doit prendre en compte ces hétérogénéités locales.

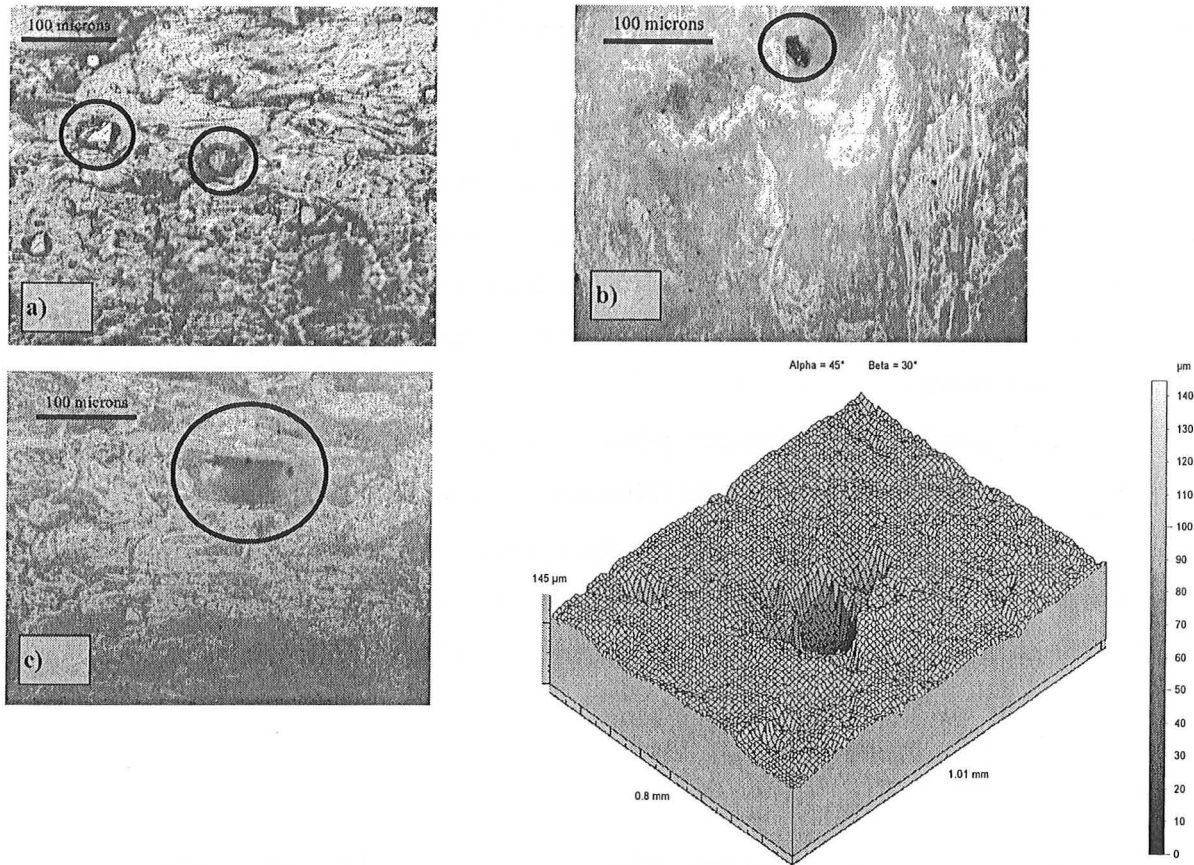


Figure III-7: Fonctions de surface sur l'échantillon PVC de référence.
 a) Talc (adjuvant) – micrographie optique.
 b) Impuretés – micrographie optique.
 c) Trou – micrographie optique.
 d) Trou – topographie 3D. Résolution dans le plan : 3.81 micromètres.

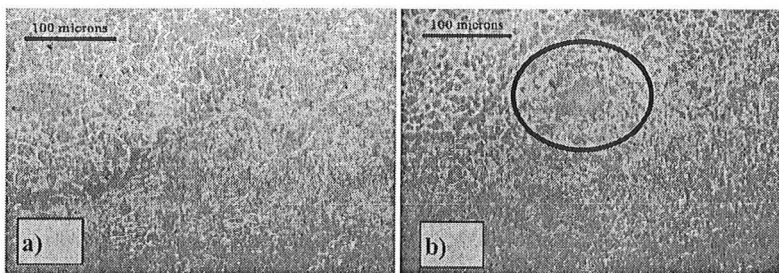


Figure III-8: Fonctions de surface sur l'échantillon PU+PVC de référence.
 a) Alvéoles circulaires et ellipsoïdales - micrographie optique.
 b) Particules de PU infondues - micrographie optique.

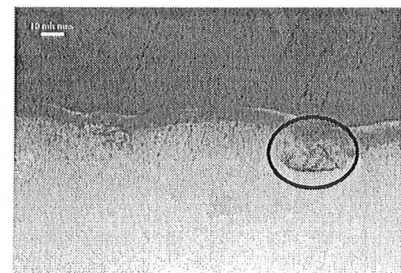


Figure III-9: Micrographie optique d'une section transverse de PU+PVC. Les hétérogénéités à la surface PVC sont clairement visibles à l'interface PU/PVC.

III.1.4 Mécanique : tests de nano-rayure

Le test de rayure est un outil d'investigation parfaitement adapté à l'étude de la tribologie d'un produit. Il donne accès à plusieurs propriétés mécaniques de surface (résistance à la rayure, coefficient de frottement, mode d'endommagement, propriétés d'adhésion dans le cas d'un système couche/substrat...) via l'application de sollicitations dynamiques.

Nous avons utilisé ce test pour accéder à la rhéologie élémentaire des deux produits, et pour mettre en évidence :

- Le domaine visco-élastique prédominant dans la déformation globale que le revêtement de sol va subir sous l'effet de telles sollicitations ;
- L'échelle de travail pour l'obtention des paramètres topographiques.

Comme l'épaisseur de la couche PU est d'environ 10 micromètres, nous avons utilisé un test de **nano-rayure** pour étudier les propriétés de résistance à l'usure du revêtement.

III.1.4.1 Principe

Le test de rayure consiste à rayer une surface avec une pointe dure, par exemple une pointe DLC. Durant le test, la charge normale appliquée par la pointe peut être constante ou croissante (voir figure III.10 [37]). Les charges normale (appliquée) et tangentielle (consécutive au déplacement de l'échantillon sous la pointe) sont alors enregistrées.

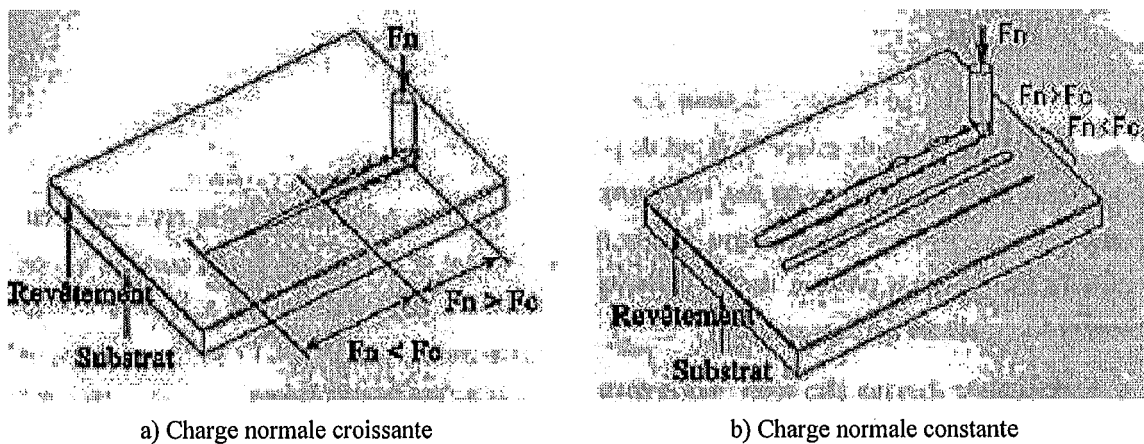


Figure III.10 : Principe du test de rayure.

En fonction des conditions de test (c.à-d. de la géométrie et du matériau constitutif de la pointe, des vitesses de pointe/de chargement, de la charge normale) et des propriétés du

matériau testé (rhéologie, topographie de surface, propriétés thermiques...), **différents modes d'endommagement peuvent s'initier sur l'échantillon testé**. L'annexe A résume les principaux processus d'endommagement observables pour une surface polymère.

La charge normale à laquelle un mode d'endommagement spécifique s'initie est appelée *la charge normale critique F_c* (voir figure III.10) pour cet endommagement. Le test de rayure peut donc aider à discriminer deux revêtements différents en comparant, par exemple, leur charge normale critique de premier endommagement (à conditions expérimentales données).

III.1.4.2 Données recueillies et réglage expérimental

La géométrie d'un caillou (ou de tout corps commun susceptible de rayer un revêtement de sol durant son utilisation) entraîne des échelles de contact de l'ordre du micromètre jusqu'à quelques dizaines de micromètres. Le test de nano-rayure (rayon de pointe de l'ordre de plusieurs micromètres) semble donc pertinent pour caractériser la charge critique d'initiation d'endommagements de surfaces fondamentaux (fissures, délamination de la couche de PU...). À priori, **l'occurrence d'évènements fragiles à charge normale reproductible** (comme une délamination brutale) est **peu susceptible d'être observée** sur les produits étudiés ici – principalement à cause de leur forte composante visqueuse, et de l'épaisseur relativement variable de la couche de PU. Cependant, même si aucune charge critique ne peut être définie sur nos produits, les tests de nano-rayure restent pertinents car ils permettent d'accéder à la recouvrance des matériaux sous contrainte dynamique.

Au moins trois informations peuvent être enregistrées durant un test de nano-rayure :

1. **La force tangentielle F_t** , due à la résistance de la surface au déplacement de la pointe ou, à l'inverse dans le cas d'une pointe statique, due à la résistance de la pointe au déplacement de l'échantillon. Le rapport entre la force tangentielle F_t sur la force normale F_n représente le coefficient de frottement matériau testé/pointe.
2. Si, au préalable, la zone à rayer a été palpée (le long de la future longueur rayée) par la pointe à une charge normale constante et faible de manière à obtenir le profil de la surface avant rayure (ou le **profil prescan**), la **profondeur de pénétration P_d** (profondeur de pénétration sous la surface initiale) en cours de test est accessible. P_d est définie comme la position verticale en cours de rayage de la pointe moins la position verticale correspondante sur le profil prescan.
3. Une fois que la P_d a été enregistrée, un dernier passage sur la zone rayée (**profil postscan**, similaire au profil prescan) donne accès à la **profondeur résiduelle R_d** .

La force tangentielle sera utilisée pour détecter les singularités dans la réponse du matériau, comme l'initiation de fissures à l'arrière de la pointe, par exemple. Dès qu'une telle fissure apparaît, le relâchement brutal d'énergie à l'intérieur du matériau (via la formation des deux lèvres de la fissure) engendre une diminution temporaire des forces de traction à l'arrière de la pointe, et donc une diminution analogue de la résistance au déplacement de la pointe.

Les profondeurs de pénétration et résiduelle vont nous apporter d'importantes informations sur la rhéologie du matériau testé. Les profondeurs résiduelles seront aussi utilisées pour reproduire la géométrie après recouvrance de macro-rayures réelles comme observées sur le test grandeur nature (chapitre 5).

Sauf indication contraire, les essais durant ces travaux ont été réalisés sur **un appareil de nano-rayure fabriqué par CSM**, avec le réglage expérimental suivant :

- Pointe : DLC, angle d'ouverture 90 degrés, rayon de courbure : 20 micromètres
- Lame : High load
- Charge normale de pre/postscan : 3 mN
- Chargement :
 - Etude des modes d'endommagement : charge normale croissante de 0,01 N à 1 N
 - Etude de la reproductibilité de macro-rayures réelles¹⁰: charge normale constante, 1N
- Taux de chargement : 0.495 N/min
- Vitesse de la pointe : 1.007 mm/min
- Longueur de la rayure :
 - Etude des modes d'endommagement : 2 mm
 - Etude de la reproductibilité de macro-rayures réelles : 10 mm

III.1.4.3 Modes d'endommagement

Chaque courbe sur les graphiques suivants représente la moyenne de six rayures à charge normale croissante (trois le long de la direction de fabrication, trois le long de la direction transverse) réalisés selon les conditions expérimentales données dans le paragraphe précédent. Toute anisotropie dans les résultats sera spécifiée.

¹⁰ Comme nous le verrons dans le chapitre 4, ces paramètres semblent correctement reproduire la géométrie d'une rayure réelle "moyenne", après recouvrance, d'après les mesures topographiques effectuées sur les échantillons du test grandeur nature.

Principale conclusion sur les modes d'endommagement :

Pour les deux surfaces étudiées, la seule réponse qui a pu être observée dans le domaine de sollicitation étudié est une déformation visco-élasto-plastique. Aucune rupture, fragile ou ductile, d'aucune nature, n'a été observée.

La figure III-11a représente le coefficient de frottement apparent moyen $\mu = F_T / F_N$ (pointe DLC/surface PVC ou surface PU+PVC), en fonction de la charge normale appliquée. Les profondeurs de pénétration et résiduelles (respectivement, Pd et Rd) sont données à la figure III-11b.

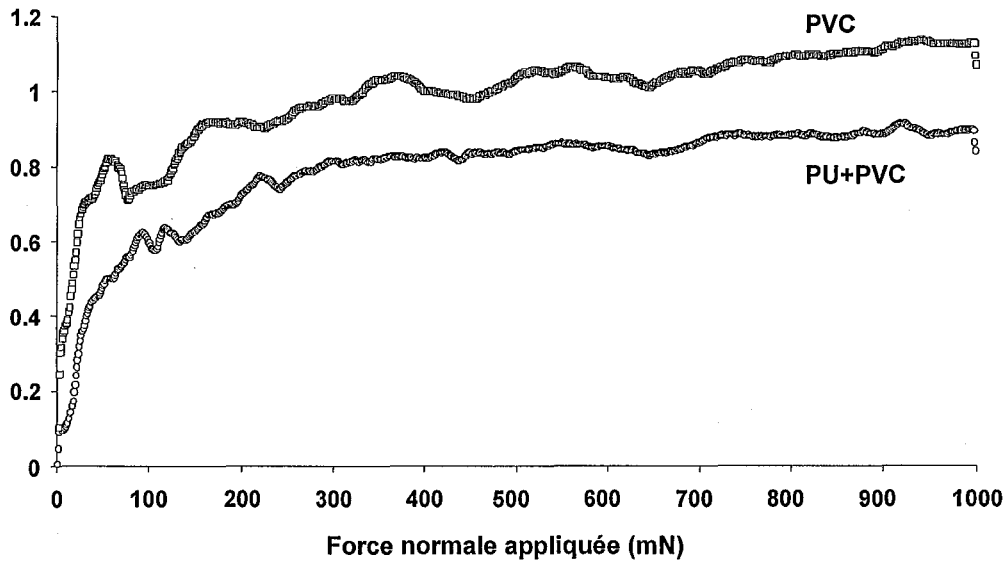
Nous pouvons distinguer deux régimes sur la courbe III-11a :

1. **Un domaine transitoire jusqu'à une charge normale d'environ 250 millinewtons** (profondeurs de pénétration correspondantes : 50 micromètres pour le produit PVC, 63 micromètres pour le produit PU+PVC);
2. Ensuite, un **domaine linéaire, stationnaire** jusqu'à une force normale de 1000 millinewtons.

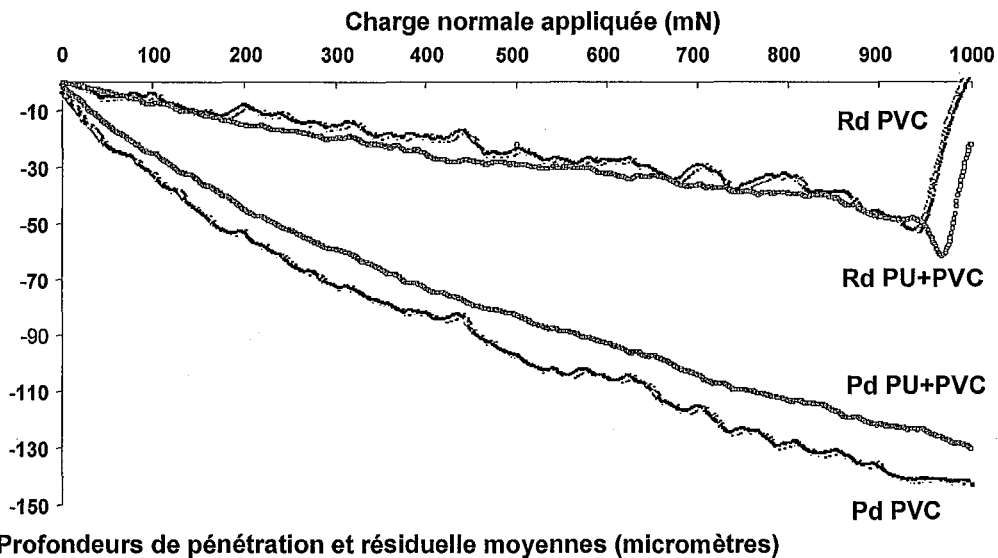
Dans le domaine transitoire, les conditions de contact sont principalement imposées par :

- **La géométrie sphérique de la pointe** jusqu'à une Pd d'environ 6 micromètres (si nous supposons un contact entier autour de la pointe);
- Ensuite, **une combinaison des parties sphériques et coniques de la pointe** (angle du cône : 45 °) lorsque la charge normale augmente. La géométrie de contact est donc ici constamment variable (le rapport partie conique/partie sphérique augmente avec la charge normale), et avec elle les champs de contrainte/déformation à l'intérieur du matériau testé.

Coefficient de frottement apparent moyen



a) Coefficient de frottement apparent moyen des produits de référence en fonction de la charge normale appliquée.



b) Profondeur moyenne de pénétration (Pd) et résiduelle (Rd) sur les produits de référence en fonction de la charge normale appliquée.

Figure III-11 : résultats des tests de nano-rayure sur les produits de référence.

Aux profondeurs de pénétration supérieures (50 à 60 micromètres, soit 9 à 10 fois la dimension de la partie sphérique de la pointe), les conditions de contact sont principalement pilotées par la partie conique de la pointe, dont la géométrie est auto-

similaire : lorsque la profondeur de pénétration augmente, la géométrie des champs de contrainte et de déformation à l'intérieur du matériau testé reste constante. Dans ce domaine, les coefficients de frottement tendent vers des valeurs d'équilibre propres aux conditions expérimentales choisies.

Il est intéressant d'observer les fluctuations des profondeurs moyennes de pénétration et résiduelle pour les deux produits : **les courbes du PVC sont plus perturbées**. La topographie de surface des produits PVC nous permet de comprendre une telle différence de réponse entre les deux produits, et plus particulièrement **les trous initiaux** résultants du processus de fabrication, comme nous le voyons sur les mesures topographiques 3D d'une rayure à l'état recouvert (figure III-12), et sur les micrographies III-13a et III-13b. Nous voyons bien l'impact des trous pré-existants (cercle noir) lorsqu'ils sont situés sur le chemin de la rayure (cercle blanc) : ils induisent des singularités sur les prescans, les profondeurs de pénétration et les postscans, et donc sur les profondeurs résiduelles, et, plus généralement, sur les conditions de contact durant le test de rayure.

À nouveau : la seule réponse que nous avons observée sur nos produits est la déformation visco-élasto-plastique. Les fonctions observées à la figure III-12 et III-13 ne sont pas des fissures en chevron, mais sont consécutives à une réponse conformelle du revêtement de sol, et reliées aux défauts initiaux présents à la surface du produit. **Nous n'avons vu aucune fissure durant ces tests.**

La surface PU+PVC, plus homogène, avec une topographie plus douce, **n'engendre pas de telles perturbations** sur les profondeurs de pénétration et résiduelle (figure III-14 et III-15).

Ainsi, nous avons déjà vu que les deux produits ont une **rhéologie sensiblement différente** (les micrographies III-13 et III-15 montrent qu'il y a plus de structures/fonctions dans la rayure des produits PVC que dans celle des produits PU+PVC). De plus, nous pouvons dire que globalement, la topographie initiale est préservée : les profils en fond de rayure semblent similaires aux profils initiaux (bien sûr, les profils initiaux ont été "repassés", adoucis, mais leur microgéométrie est conservée – voir figure III.12 et III.14). Durant la rayure :

- le travail est essentiellement effectué dans le cœur du matériau (sinon la microgéométrie du profil en fond de rayure serait plus affectée) ;
- l'aire réelle de contact ne correspond pas à l'aire apparente.

La microgéométrie est préservée. Si nous souhaitons étudier les différences de topographie entre les deux produits durant les tests d'usure, nous devons prendre en compte cette micro-

géométrie : cette propriété, conservée ici, va conditionner l'aspect esthétique du produit. Elle peut donc avoir un impact majeur sur les différences que nous pourrions mettre en évidence.

Ainsi, durant l'analyse topographique, nous allons nous concentrer sur cette microgéométrie en étudiant la topographie des produits à l'échelle de leur rugosité. La topographie sera analysée via un filtre gaussien standard de cut-off 0,8 mm.

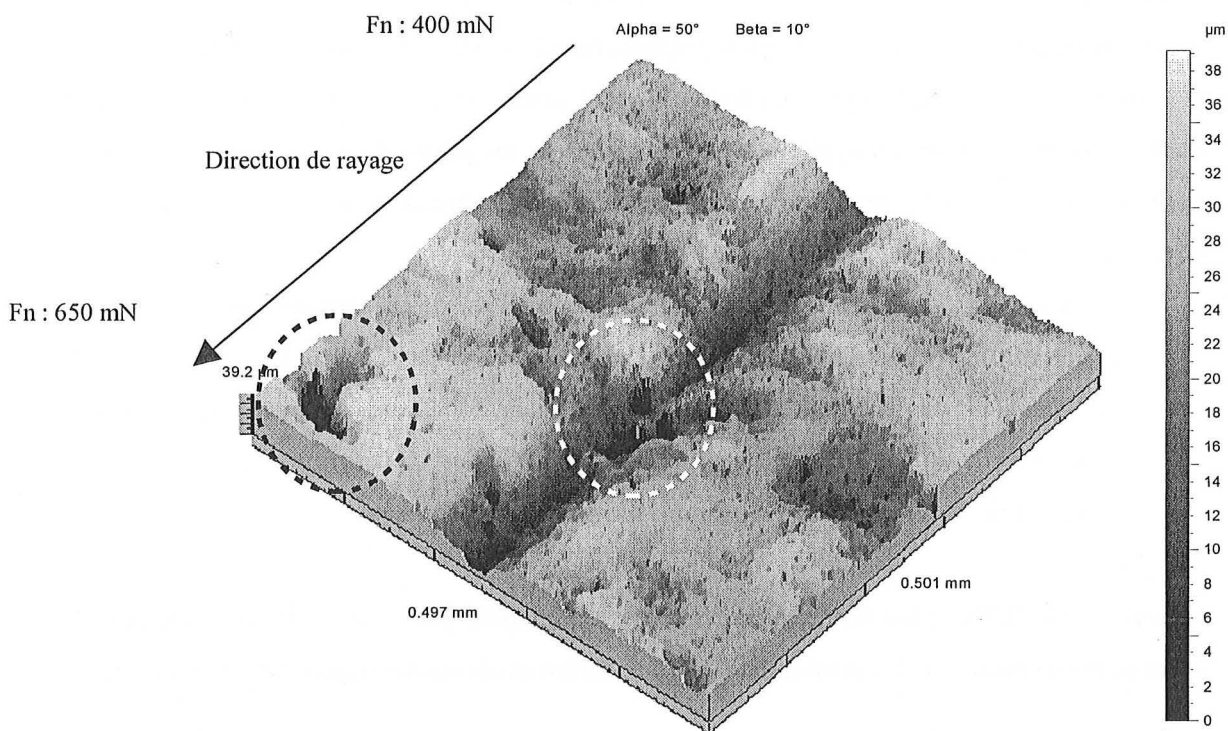


Figure III-12: Mesure topographique 3D d'une nano-rayure après recouvrance (deux jours après l'essai) sur produit PVC de référence.

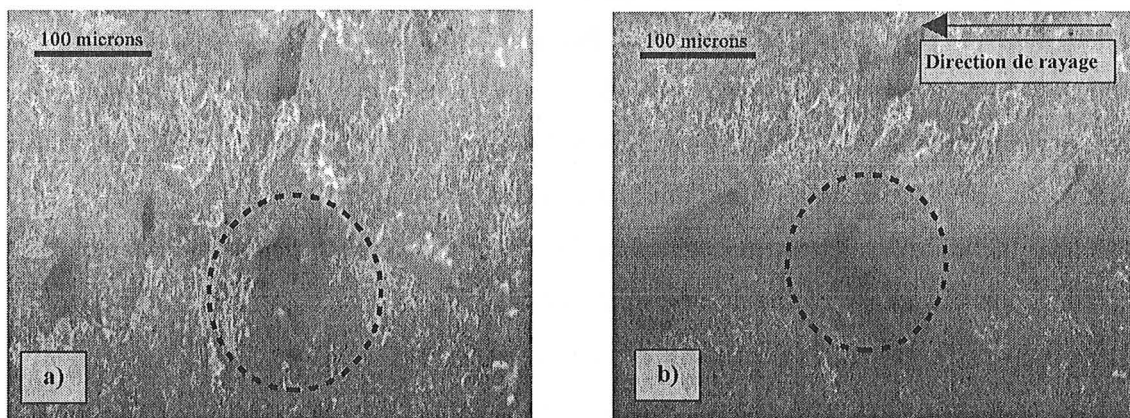


Figure III-13: Micrographie optique d'une surface PVC a) avant nano-rayure, b) après nano-rayure à charge normale croissante (le centre de la micrographie correspond à une charge normale de 600 mN).

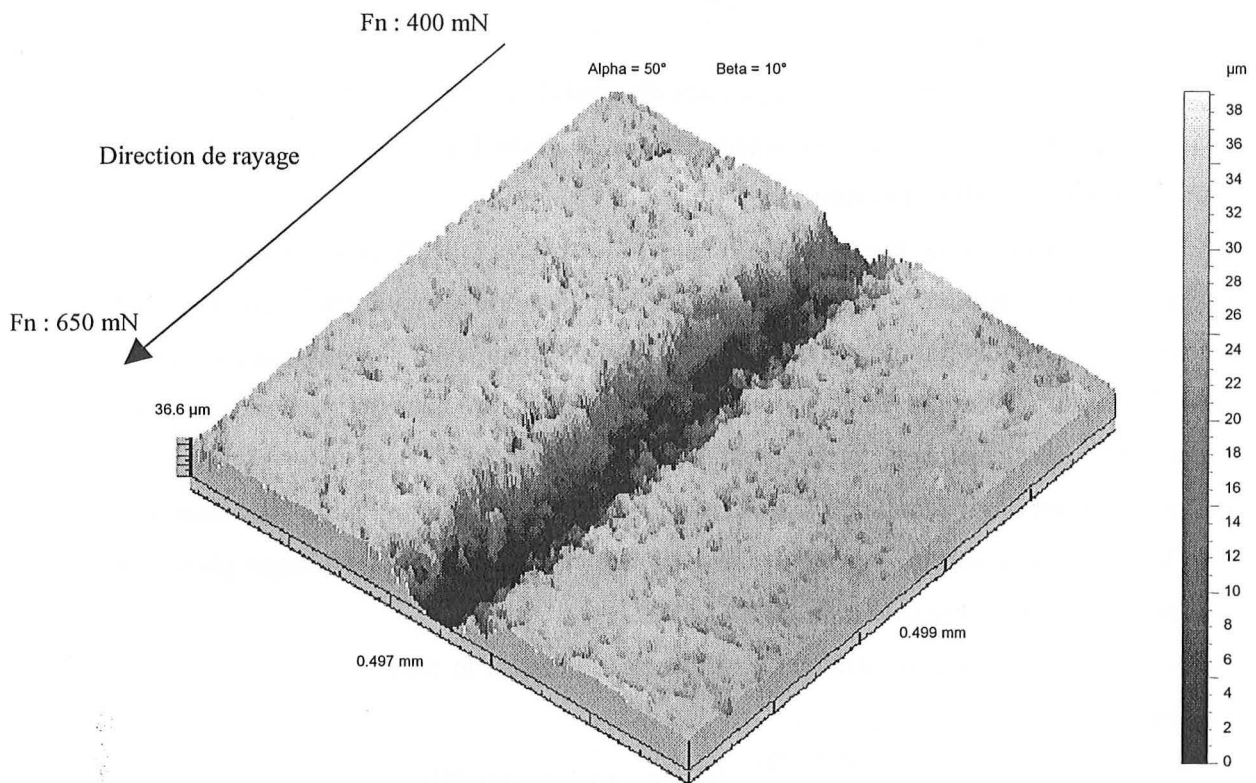


Figure III-14: Mesure topographique 3D d'une nano-ryure après recouvrance (deux jours après l'essai) sur produit PU+PVC de référence.

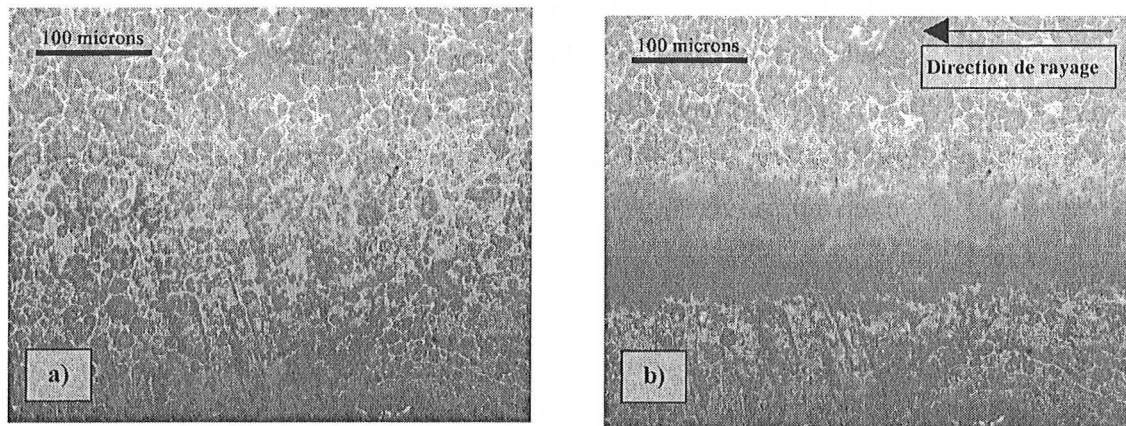


Figure III-15: Micrographie optique de surface PU+PVC a) avant nano-rayure, b) après nano-rayure à charge normale croissante (le centre de la micrographie correspond à une charge normale de 450 mN).

III.1.4.4 Recouvrance visco-élastique

Même si les deux produits ne peuvent pas être discriminés par leurs processus d'endommagement, nous pouvons observer certaines différences dans leur rhéologie via leurs profondeurs de pénétration et résiduelles.

Sur la figure III-11b, nous voyons que, durant le test de rayage, le produit PVC est plus susceptible de se déformer : la profondeur de pénétration moyenne du PVC sous charge est systématiquement plus importante que celle du PU+PVC (sur toute la gamme explorée). Les profondeurs de pénétration étant similaires pour les deux produits (en prenant en compte l'impact des hétérogénéités de surface initiales pour le produit PVC), nous pouvons conclure que, globalement, sur l'échelle de temps considérée (le postscan est effectué immédiatement après la nano-rayure, soit environ 4 minutes plus tard), la réponse visco-élastique globale du PVC est plus importante que celle du PU+PVC.

La figure III-16 montre cette différence. Si nous définissons le taux de recouvrance visco-élastique vertical comme :

$$\varepsilon_{ve} = \frac{Pd - Rd}{Pd} * 100 \quad (\varepsilon_{ve} \text{ toujours positif})$$

Et si nous la traçons en fonction de la charge normale appliquée, nous voyons que :

- Le taux de recouvrance visco-élastique pour le PVC est plutôt insensible à la charge normale (en moyenne entre 72 % et 80 %) ;
- Celle du PU+PVC décroît de 90 % jusqu'à environ 66 % après une charge normale de 225 mN. Bien sûr, la courbe du produit PVC est plus perturbée que celle du produit PU+PVC (d'après la définition de le taux de recouvrance visco-élastique verticale, qui inclut à la fois Pd et Rd).

Le tableau III-1 donne la recouvrance visco-élastique maximale (c.à-d. Rd à la charge normale maximale) pour les deux produits.

Table III-1: Recouvrance visco-élastique verticale pour les deux produits (essais de nano-rayage).

Produit	Pd à 2000 μm = Pdmax [μm]	Rdmax [μm]	Position verticale recouverte à Pdmax = Rdmax - Pdmax [μm]
PVC	-142	-51	91
PU+PVC	-130	-52	78

Nous pouvons voir l'influence de la couche élastomère aux petites profondeurs de pénétration, c.à-d. au début de la courbe du taux de recouvrance visco-élastique moyen en fonction de la charge normale appliquée (voir l'agrandissement figure III-17).

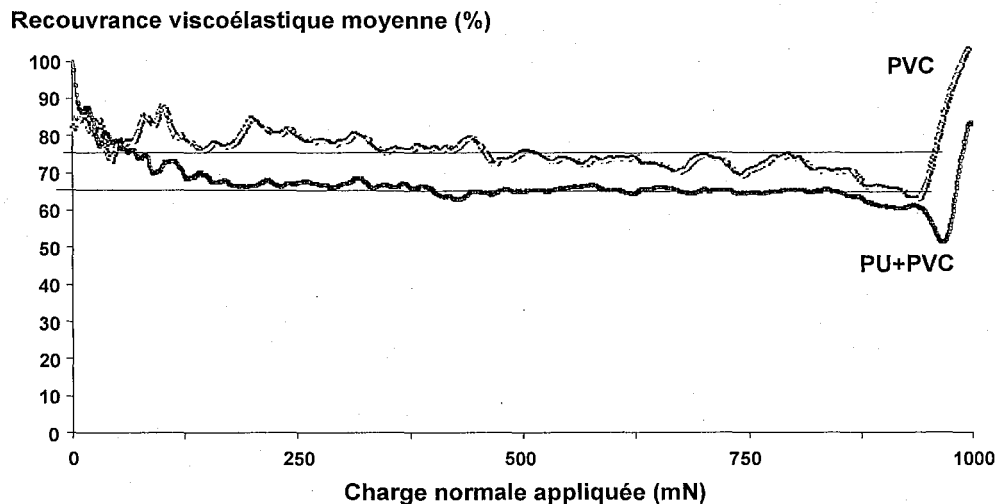


Figure III-16: Recouvrance viscoélastique moyenne (%) pour les deux produits à l'état de référence, en fonction de la charge normale appliquée. Les deux produits ont bien un comportement différent, si nous considérons pour chacun l'existence d'un domaine stationnaire symbolisé ici par les lignes en pointillés.

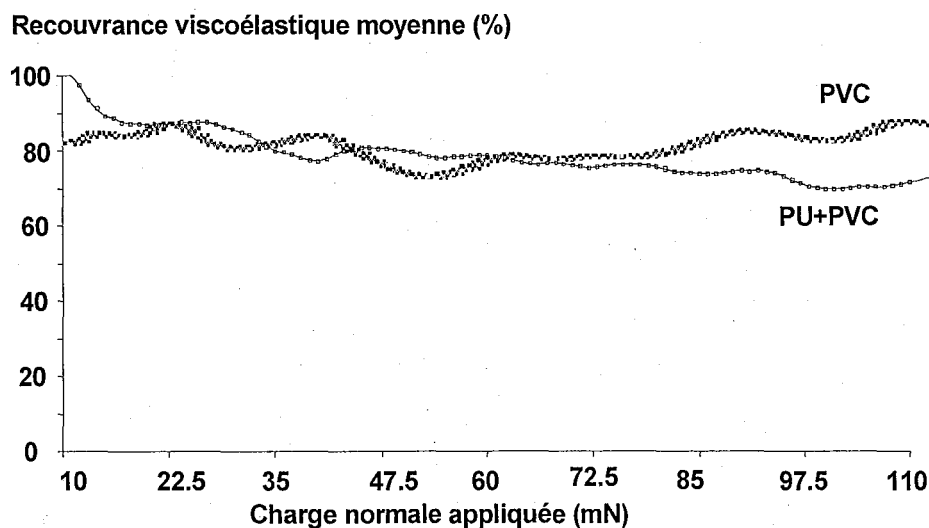


Figure III-17: Recouvrance viscoélastique moyenne (%) pour les deux produits à l'état de référence en fonction de la charge normale appliquée, agrandissement de 0 à 110 mN sur la charge normale appliquée. Le changement dans le comportement relatif des deux produits apparaît pour une charge normale entre 35 et 60 mN, ce qui correspond à une Pd de l'ordre de l'épaisseur de la couche PU.

Jusqu'à une charge normale entre 35 et 60 mN (soit une Pd correspondante sur les produits PU+PVC entre respectivement 7.9 micromètres et 14.5 micromètres), la recouvrance visco-élastique est plus complète pour le produit revêtu de PU. Pour les petites profondeurs de

pénétration (entre une et deux fois l'épaisseur de la couche de PU), l'influence de la couche de PU dans le volume sollicité est donc prédominante ; la réponse du revêtement de sol est pilotée par le PU, ce qui implique une plus grande recouvrance visco-élastique.

III.1.4.5 Observations transverses – niveau de déformation plastique

Les coupes transverses peuvent apporter des information sur le volume linéaire usé (V_w) et le volume plastiquement déformé (V_{ps}) à partir du volume de la dépression centrale de la rayure (V) et du volume des bourrelets latéraux (V^+) [38]. D'après la figure III-18, nous pouvons définir :

$$V_w = |V^{-i}| - |V^{+i}| \quad \text{et} \quad V_{ps} = |V^{-i}| + |V^{+i}|$$

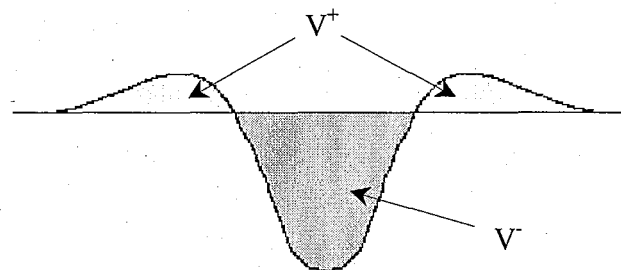


Figure III-18: Section transverse typique d'une rayure. Définition des volume de la dépression centrale (V) et des bourrelets latéraux (V^+) [38].

L'étude des section transverses a été réalisée sur deux nano-rayures par produit (une par direction), avec le réglage expérimental suivant :

- Pointe : DLC, angle d'ouverture 90° , rayon : 20 micromètres ;
- Vitesse de rayage : 1 mm/min ;
- Longueur rayée : 10 mm ;
- Charge normale : constante, 1 N.

Après avoir rayé la surface, nous l'avons laissé cicatriser pendant **20 jours** (le temps de vie moyen des "rayures fines" qui ont cicatrisé sur le test grandeur nature, voir chapitre 4, paragraphe IV.3.1) dans le même environnement que le test grandeur nature ; nous avons ensuite effectué une mesure 3D de sa topographie, puis nous avons placé l'échantillon sur le test grandeur nature (de manière à suivre l'évolution de la géométrie de la rayure sous sollicitations réelles – nous discuterons ce point au chapitre 5).

Note: la validité de ces résultats, basés sur seulement deux rayures, peut sembler limitée – surtout si nous gardons à l'esprit la dimension statistique nécessaire des résultats au vu de la nature des produits étudiés. **Les résultats discutés ici sont donc**

uniquement à considérer comme des tendances : ils ne peuvent que constituer une base préliminaire pour des travaux futurs nécessaires dans ce domaine.

La figure III-19 reproduit la section moyenne transverse d'une rayure, obtenue en moyennant plus de 200 profils transverses extraits sur toute la longueur de la rayure. Le tableau III-2 résume la géométrie des rayures effectuées sur les deux produits.

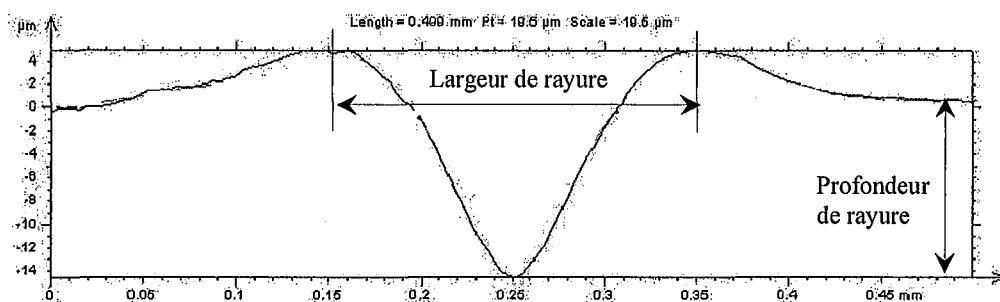


Figure III-19: Section transverse moyenne d'une nano-rayure réalisées à force normale constante (1 N) sur le produit PVC, après 20 jours de cicatrisation. Rayon de la pointe : 20 micromètres.

Table III-2: Dimensions de la section transverse moyenne des nano-rayures réalisées à force normale constante, pointe DLC, 90 ° d'ouverture, 20 micromètres de rayon de courbure, pour les deux produits (moyennes sur 200 profils transverses).

	Nano-rayure	Référence	
		Largeur [µm]	Profondeur [µm]
PVC	1	200	15.3
	2	195	17.5
PU+PVC	1	190	30.0
	2	210	22.2

Tableau III-3: Volume linéaire usé global (V_w) et volume plastiquement déformé global (V_{PS}) calculés à partir de 4 nano-rayures réalisées sur les deux produits, après 20 jours de recouvrance.

		V [µm ² /µm]	V^* [µm ² /µm]	V_w [µm ² /µm]	V_{PS} [µm ² /µm]
PVC	Moyenne	1058	647	411	1705
	Ecart-type	159	124	284	35
PU+PVC	Moyenne	1943	1014	930	2957
	Ecart-type	313	46	359	267

Le tableau III-3 donne les volumes linéaires usés apparents (V_w) et les volumes plastiquement déformés (V_{ps}), d'après les données présentées dans le tableau III-2.

Nous voyons que pour le produit PU+PVC, la compaction sous la pointe (V) est le double de celle mesurée sur le PVC. De plus, le volume globalement endommagé (V_{ps}) est lui aussi une fois plus élevé. Comme le PVC sous la couche PU est le même que pour le produit PVC (en supposant que les modifications rhéologiques sur le substrat PVC lors du dépôt de la couche PU soient mineures), **nous constatons ici une importante différence rhéologique entre les deux produits due à la présence du vernis PU.**

Ainsi, même si, en considérant la profondeur de pénétration durant le test (environ 120 micromètres pour les deux produits), la réponse globale du revêtement de sol devrait être dominée par le PVC, la couche PU joue toujours un rôle important sur la réponse (à ces profondeurs de pénétration, la plastification est supposée avoir principalement lieu dans le PVC ; mais la couche de PU doit accommoder le champ de contrainte local lié à la rugosité de l'antagoniste en contact avec le revêtement de sol).

L'important niveau de recouvrance visco-élastique (et, globalement, l'importante capacité à se déformer des deux produits étudiés) **est ici confirmé.** En supposant que la largeur de la rayure ne va pas recouvrir, nous pouvons grossièrement (à l'aide de simples considérations géométriques) estimer le volume linéaire contraint par la pointe pénétrant la surface du revêtement de sol *durant* le test de nano-rayure. Ce volume linéaire est égal à l'aire du triangle défini par la largeur de la rayure (base du triangle), et par la profondeur de pénétration (hauteur du triangle), soit environ $200 * 120 / 2 = 12\ 000 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}$ (pour les deux produits).

Ce volume linéaire "défini par la pointe" va :

- Contribuer au volume usé V_w ;
- Partiellement contribuer au volume déformé plastiquement W_{ps} ;
- Être partiellement recouvert.

Ces trois phénomènes sont apparemment les seuls susceptibles d'avoir lieu, car aucun endommagement autre que la déformation visco-plastique n'a pu être observé. Ainsi, si nous considérons :

- Que le volume usé V_w est grossièrement $400 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}$ pour le produit PVC, $930 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}$ pour le produit PU+PVC ;
- Que le volume déformé plastiquement V_{ps} est grossièrement $1700 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}$ pour le produit PVC, $3000 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}$ pour le produit PU+PVC ;

Nous pouvons estimer le volume linéaire recouvert, pour le produit PVC, autour de 9 900 $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}$ (soit 82.5 % du volume de la dépression centrale à l'état charge appliquée), et pour le produit PU+PVC, d'environ 8 000 $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}$ (ou 66 % du volume de la dépression centrale à l'état charge appliquée). Ces niveaux de recouvrance sont proches de ceux obtenus sur la base des profondeurs de pénétration et résiduelle (figure III-16).

III.1.4.6 Micrographies transverses

Nous pouvons voir l'important niveau de déformation de la couche de PU (et du substrat PVC) sur les micrographies transverses, révélant la persistance de la couche malgré l'importante profondeur de pénétration Pd en cours de rayage (la profondeur Pd moyenne dans le cas des produits PU+PVC vaut environ vingt fois l'épaisseur de la couche PU - tableau III-4). La couche a accommodé les contraintes appliquées par déformation visco-élasto-plastique, sans rupture/fissure ou délamination de la couche, et ce, malgré l'important niveau de compression en-dessous et en avant de la pointe. L'interface PU/PVC est continue, la couche et le substrat sont toujours conformels.

Table III-4: Profondeur de pénétration moyenne mesurée pendant les nano-rayures à charge normale constante effectuées sur les deux revêtements de sol.

Rayure	Pd moyenne [μm]	Ecart-type [μm]
PVC – rayure 1	129	7
PVC – rayure 2	134	6
PU+PVC – rayure 1	106	4
PU+PVC – rayure 2	121	9

III.1.4.7 Tests de nano-rayure : conclusions

Nous pouvons dire, à partir de ces tests de nano-rayure, que les deux produits :

- **N'ont apparemment pas enclenché de processus d'endommagement autre que la déformation visco-plastique ;**
- **N'ont globalement pas la même réponse à ces sollicitations :** alors que la profondeur de pénétration (et, en conséquence, la profondeur résiduelle) des produits PVC non revêtus est assez perturbée par les hétérogénéités locales de surface, la réponse du PVC revêtu de PU est plus régulière ;

- **Ont montré une visco-élasticité marquée dans le domaine de sollicitation observé.** La recouvrance visco-élastique pour les produits PVC non revêtus semble plus importante qu'avec la présence de PU pour les rayures dont les profondeurs de pénétration sont supérieure au double de l'épaisseur de la couche de PU (respectivement, entre 72 % et 80 %, et 66 %). Lorsque la profondeur de pénétration est de l'ordre de l'épaisseur de la couche de PU, la recouvrance visco-élastique semble plus importante (au moins 80 %) pour le produit revêtu. Cette différence peut s'expliquer par la valeur absolue des profondeurs résiduelles (figure III-11b): elles sont similaires pour les deux produits (à position longitudinale dans la rayure équivalente). La supériorité du niveau de recouvrance pour le PVC non revêtu est donc principalement due à une profondeur de pénétration supérieure durant la rayure. Nous pouvons donc supposer que pour les deux produits, à niveau d'énergie transféré égal (par le travail généré lors du déplacement de la pointe sous la surface), le produit PVC va tendre à dissiper une plus grande part de cette énergie par déformation (dissipation mécanique), alors que d'autres modes de dissipation pourraient être initiés en présence de la couche de PU (dissipation supérieure par des phénomènes visqueux, par exemple).

Les essais de nano-rayure, adaptés pour simuler l'effet d'un caillou piégé dans la semelle d'une chaussure (comme nous le verrons dans le chapitre 5), montrent que les propriétés de recouvrance visco-élastique des revêtements de sol testés ont un impact majeur sur la réponse globale du produit à la rayure (plus de 50 % de la profondeur de pénétration recouverte dans les deux cas, indépendamment de la charge normale appliquée).

Dans le contact réel, les deux revêtements de sol étudiés auront toujours, et de manière prédominante, une réponse visco-élastique marquée, qui sera potentiellement suivie d'une plastification.

En plus de cette étude réhologique préliminaire, le test de nano-rayure nous a donné une information prépondérante sur la topographie des revêtements de sol : durant le processus de rayage (aux échelles de temps, de force et aux géométries considérées), la microgéométrie du revêtement de sol est préservée. **Il est donc crucial d'étudier le contact et, par là, les processus d'usure, à l'échelle de cette microgéométrie persistante.** La caractérisation topographique statistique des deux produits devra donc se faire à l'aide d'un filtre mettant en évidence leur rugosité.

III.1.5 Topographie

Une des principales différences topographiques entre les deux produits étudiés est l'existence, pour le produit PU+PVC, d'une texture résultant probablement du processus de calendrage (voir figure III-5). Une analyse FFT de 5 profils (de 5 mm de longueur) extraits des mesures 3D sur les produits PVC revêtus révèle la présence d'une fonction périodique le long de la direction transverse au calendrage, **d'environ 750 micromètres de longueur d'onde**. Cette valeur est confirmée par la figure III-5b (12 périodes sur une longueur de 9.2 mm donne une longueur d'onde d'env 766 micrometers).¹¹

Nous pouvons faire deux remarques au sujet de cette longueur d'onde. Premièrement, durant les essais de nano-rayure, cette fonction topographique disparaît après le contact avec la pointe, à cause de la complaisance élevée des deux surfaces testées (PVC et PU+PVC) : en cours de contact, cette longueur d'onde est "repassée". Deuxièmement, en fond de rayure, nous constatons toujours la présence d'une rugosité résiduelle (voir figure III-11b).

Ces deux remarques nous amènent à conclure que dans notre cas, l'échelle d'analyse est bien inférieure à cette longueur d'onde de calendrage : nous devons étudier la topographie de nos produits à l'échelle de la rugosité, sans prendre en compte cette longueur d'onde.

Ainsi, nous présentons ici les paramètres *de rugosité*, c.à-d. les paramètres issus des profilométries de surface filtrées par un filtre Gaussien, de longueur d'onde de coupure (cut-off) de 0.8 mm, selon la norme ISO 4287. **Les représentations topographiques 3D sont filtrées de la même manière.**

III.1.5.1 Caractérisation topographique

□ Mesures 2D

Nous avons utilisé un profilomètre sans contact fabriqué par Mahr, le **Rodenstock RM600**.

Le principe physique de cet appareil est basé sur la réflexion d'un laser infrarouge par la surface mesurée (diamètre du spot : 1 micromètre). Le faisceau laser est focalisé sur la surface de manière dynamique, via un signal d'erreur de focalisation (voir figure III.20).

¹¹ Cette longueur d'onde semble directement reliée au processus de dépôt. Ici, le PU liquide, adhérant à la fois au substrat PVC et au cylindre d'application, pourrait être localement étiré jusqu'à former des fils très minces. Ces fils, une fois sectionnés, pourraient engendrer cette longueur d'onde. Parmi les paramètres du processus susceptibles d'influencer ce mécanisme de "filage", nous pouvons mentionner la vitesse de la ligne de dépôt, le diamètre du rouleau d'application de la couche, la viscosité du PU durant le dépôt et l'état de surface du substrat.

Le processus de filtrage (voir figure III.21) utilisé ici consiste à effectuer la **convolution du profil mesuré et du filtre Gaussien**, de cut-off λ_c , choisi en accord avec la norme NF EN ISO 4288:1998 [39].

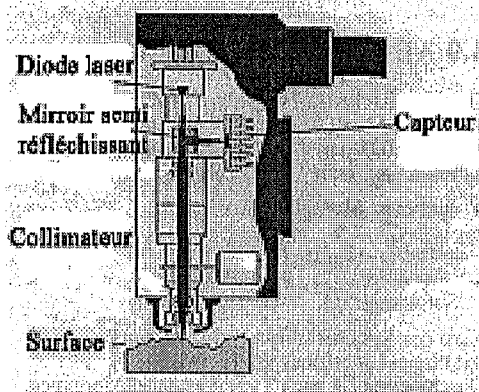


Figure III.20 : Principe de la profilométrie optique par réflexion – capteur optique [40]

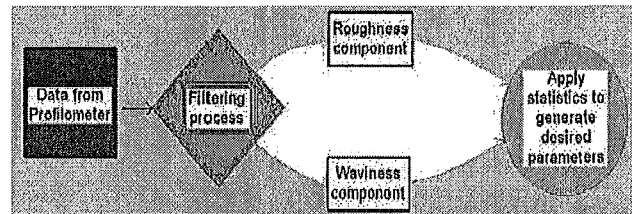


Figure III.21: Traitement des données de profilométrie [41]

Les paramètres de rugosité sont calculés sur une longueur d'évaluation (L) de 4 mm, décomposée en 5 longueurs d'échantillonnage (l) égales à la valeur du cut-off. Certains de ces paramètres sont calculés sur toute la longueur d'évaluation ; les paramètres estimés sur une longueur d'échantillonnage sont moyennés sur toutes les longueurs d'échantillonnage disponibles dans la longueur d'évaluation.

Sauf contre-indication, le réglage expérimental pour les mesures 2D sera le suivant :

- Résolution longitudinale : 10 micromètres
- Résolution verticale : 0.15 micromètres (échelle verticale : 600 micromètres)
- Vitesse de balayage : 30 mm/mn
- Cut-off λ_c : 0.8 mm

Les autres paramètres expérimentaux seront spécifiés si nécessaire.

Les paramètres de rugosité choisis pour caractériser la topographie de nos produits sont :

- Amplitude [μm] : Ra, Rq, Rtm, Rvm, Rpm ;
- Symétrie [sans dimension] : Ek, Sk ;
- Espacement [μm] : Sm ;
- La courbe d'Abbott-Firestone.

Les définitions complètes de ces paramètres sont en annexe B.

□ Mesures 3D

En parallèle à cette analyse 2D de la topographie des revêtements de sol, des mesures 3D ont été effectuées pour accéder aux fonctions topographiques spécifiques apparaissant en cours d'usure des produits, comme les rayures, les trous, d'autres singularités, sur lesquelles la troisième dimension apporte des informations intéressantes.

Pour les mesures 3D, nous avons utilisé un interféromètre en lumière blanche **Wyko NT 3300, de la compagnie Veeco**. Un des principaux avantages de cet équipement est qu'il permet de conserver une bonne précision sur toute l'échelle verticale de mesure (un intérêt primordial ici, car certaines amplitudes topographiques verticales peuvent atteindre plusieurs centaines de micromètres). Ce système de mesure se base sur un faisceau de lumière blanche, émis par un filament tungstène, dirigé vers un objectif interférométrique, ensuite séparé en deux faisceaux cohérents ; un de ces faisceaux est dirigé vers l'échantillon, l'autre vers un miroir de référence. En cours de mesure, la lumière réfléchiée par le miroir est recombinaée avec la lumière réfléchiée par l'échantillon, produisant des franges d'interférence sur le signal résultant. Les franges pour lesquelles le contraste est le plus élevé apparaissent lorsque la surface est dans le plan de focalisation.

En mode VSI (Vertical Scanning Interferometry), l'objectif interférométrique se déplace verticalement pour mesurer les intensités lumineuses recombinaées à différentes hauteurs. Par l'intermédiaire d'une caméra CCD, les franges sont enregistrées pour chaque position verticale de l'objectif (résolution verticale de mesure : 40 nm). Pour un point de la surface, la position de focalisation est déterminée lorsque le contraste des franges en ce point est maximal. La position verticale correspondant à ce pic sur le signal d'interférence est ensuite extraite pour chacun des points de la surface, et ainsi les hauteurs relatives des points composant la surface peuvent être déterminées. Cette technologie permet d'avoir, après traitement mathématique, une résolution verticale **constante pour toutes les mesures effectuées durant ces travaux**, et inférieure à 2 nanomètres. Les paramètres de mesure choisis pour cette étude sont :

- Le mode de mesure VSI ;
- La vitesse verticale de balayage x1 ;
- La résolution dans le plan (axe x- y-) : 3.81 micromètres (objectif x5, lentille FOV x0.5) ;
- La résolution verticale : moins de 2 nanomètres;
- Une distance de balayage de 225 micromètres, incluant un prescan de 25 micromètres ;
- Le filtre PSI High Mag ;

- Un seuil signal/bruit de 0.5 % ;
- Lorsque l'option "stitching"¹² a dû être utilisée, un recouvrement de 20 %.

III.1.5.2 Topographie des revêtements de sol étudiés : état de référence

Le tableau III.5 donne les valeurs moyennes des paramètres topographiques 2D pour les échantillons de référence (voir annexe B pour la description de ces paramètres). Chaque valeur est obtenue sur 8 profils de rugosité, 4 dans la direction du processus de fabrication (PD), 4 dans la direction transverse (TD). Toute anisotropie sera mentionnée.

Sauf contre-indication, l'erreur sur les valeurs moyennes correspond à un écart-type.

Tableau III-5: Paramètres de rugosité de référence pour les deux produits ($\lambda_c = 0.8$ mm).

Paramètre	PVC	PU+PVC
<i>Amplitude</i>		
Ra [μm]	3.1 ± 0.5	1.8 ± 0.3
Rq [μm]	4.0 ± 0.7	2.4 ± 0.4
Rtm [μm]	19.5 ± 3.2	13.2 ± 2.9
Rpm [μm]	7.2 ± 0.8	5.4 ± 1.2
Rvm [μm]	12.3 ± 2.6	8.2 ± 2.1
<i>Symétrie</i>		
Ek	5.6 ± 1.4	5.0 ± 1.2
Sk	-1.0 ± 0.4	-0.7 ± 0.3
<i>Etallement</i>		
Sm* [μm]	100.0 ± 10	PD: 65.0 ± 6
		TD: 80.0 ± 9

* PD: Direction du processus de fabrication

* TD: Direction transverse

Nous voyons que **les deux surfaces sont plutôt rugueuses** (un R_a de 3.0 micromètres est une valeur commune pour une surface acier fraisée [42]). Il s'agit là d'une conséquence directe du processus de fabrication.

Une telle topographie peut jouer un rôle important dans la résistance à l'usure du revêtement de sol : Lancaster, par exemple, rapporte une forte dépendance du taux d'usure

¹² L'option "stitching" est utilisée pour effectuer des mesures de taille supérieure à celle du champ de vision défini par l'objectif interférométrique.

avec le paramètre R_a (dans le cas d'un produit polyamide 6-6, lorsque le R_a varie de 0.1 à 1 micromètre, le taux d'usure augmente de 10^{-6} à $10^{-4} \text{ mm}^3 / N.m$ [43]).

Les produits étudiés ont chacun une topographie qui leur est propre. L'amplitude des hauteurs et la distance pic-à-pic moyenne S_m sont significativement plus importants pour le PVC sans couche protectrice. Ce constat est confirmé par les mesures 3D (voir figure III-6). La texture de surface du produit PVC, à l'échelle de longueur considérée, semble être assez homogène dans les directions du plan (direction processus et transverse). Pour la couche PU, une anisotropie apparaît sur le paramètre S_m : les pics le long de la direction du processus sont significativement plus proches les uns des autres que les pics le long de la direction transverse.

III.1.5.3 Mesures 2D : sensibilité de paramètres topographiques pertinents à une troncature mathématique abrasive

Comme précisé dans le paragraphe II.1.2, un des principaux processus d'endommagements susceptible de se produire durant l'usure des revêtements de sol est l'usure abrasive. Idéalement, l'usure abrasive consiste en une troncature progressive des aspérités en contact, comme montré sur la figure III.22.

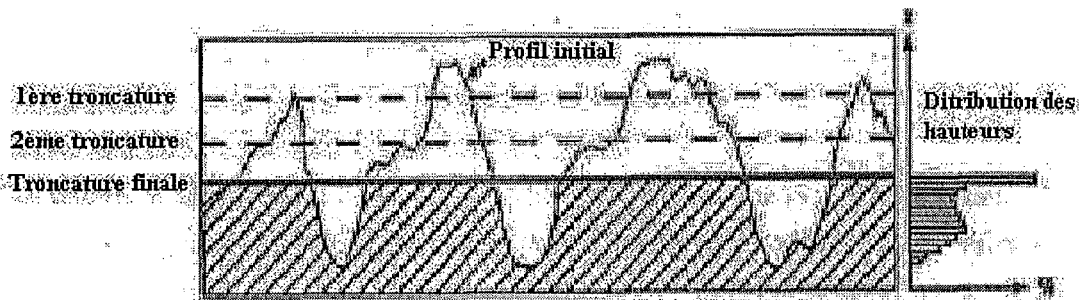


Figure III.22: Troncatures progressives dans le cas d'une usure abrasive idéale [34].

Nous décrivons ici comment certains paramètres topographiques particuliers sont affectés par une telle abrasion idéale des aspérités, et surtout, la façon dont le Kurtosis et la Skewness, la courbe d'Abbott-Firestone et les paramètres d'amplitude vont évoluer lorsque le niveau d'abrasion augmente.

Méthodologie

Cette approche, basée sur des paramètres topographiques mixtes, est divisée en deux étapes :

1. **Troncations mathématiques successives des aspérités sur le profil de référence** (c.à-d. sur le profil mesuré sur un produit non usé) et **définition de l'évolution de paramètres topographiques pertinents avec la hauteur tronquée** (comparable à un usinage mathématique, ce processus est le même que celui utilisé pour construire la courbe d'Abbott-Firestone). Ces évolutions constituent des comportements de référence pour l'abrasion des revêtements de sol (un comportement par produit).
2. **Calcul des mêmes paramètres sur les profils usés**. Si les paramètres usés suivent le comportement théorique observé durant l'usinage mathématique, l'usure abrasive est alors le processus d'usure dominant.

Le coeur de cette approche topographique est donc la définition du comportement de référence. Ainsi, de manière à définir précisément les effets de l'abrasion sur la topographie, il est nécessaire de suivre les variations de paramètres topographiques complémentaires, et notamment [34] :

- La symétrie du profil/la balance des hauteurs, à l'aide des deux paramètres E_k et S_k ;
- La courbe d'Abbott-Firestone, représentant la géométrie globale du profil, qui nous permettra de définir **un critère essentiel d'applicabilité de cette approche** ;
- Certains paramètres d'amplitude : R_a , R_q , R_{tm} , R_{vm} , and R_{pm} .

- Courbe (E_k , S_k)

Plusieurs études [34] [44] [45] ont prouvé que la symétrie et la finesse de la fonction de distribution d'amplitudes (respectivement, les paramètres S_k et E_k) permettent de mettre en évidence le processus d'endommagement d'une surface soumise à une abrasion pure.

Ainsi, comme les simulations mathématiques (via troncations progressives des aspérités) sur des profils hémisphériques et sinusoïdaux l'ont montré, **la courbe $E_k = f(S_k)$ suivra, dans le cas d'une abrasion pure, une portion ascendante d'une parabole** (voir figure III.23).

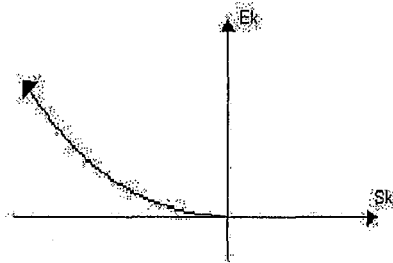


Figure III.23: Evolution des paramètres E_k et S_k dans le cas de l'abrasion pure.

Ce comportement (vérifié expérimentalement pendant la période de rûdage d'un cylindre de moteur à combustion [34]) a été expliqué en étudiant l'abrasion théorique d'un profil triangulaire (Thierry Duchêne [34]).

Dans ce cas, le paramètre R_q tend vers zéro lorsque l'usinage mathématique augmente. De plus, si nous regardons les définitions de S_k et E_k :

$$S_k = \frac{1}{R_q^3} \frac{\sum_1^N (h_i)^3}{N} \quad \text{et} \quad E_k = \frac{1}{R_q^4} \frac{\sum_1^N (h_i)^4}{N}$$

et si nous traçons l'évolution de R_q^3 , R_q^4 , $\left| \sum_1^N (h_i)^3 \right|$ et $\sum_1^N (h_i)^4$ (figure III.24) avec le niveau de troncature ΔR_t , nous voyons que R_q^3 et R_q^4 décroissent plus vite que les sommes correspondantes (respectivement, celles à la puissance trois et quatre des hauteurs).

Ainsi, $|S_k|$ et E_k tendent vers l'infini lorsque le niveau de troncature augmente.

De plus, la troncature mathématique au niveau des aspérités résiduelles engendre une augmentation constante de l'asymétrie du profil (les aspérités sont tronquées alors que les vallées demeurent inchangées). Les vallées (c.à.d. les hauteurs négatives par rapport à la ligne moyenne du profil) deviennent prédominantes, **ce qui explique que S_k décroît avec le niveau de troncature.**

Si le processus d'endommagement n'est pas l'abrasion progressive, la courbe E_k - S_k ne suit pas la portion ascendante de la parabole dans le quadrant supérieur gauche ; par exemple, dans le cas de rayures profondes, la courbe E_k - S_k retourne vers l'origine du repère (voir figure III.25).

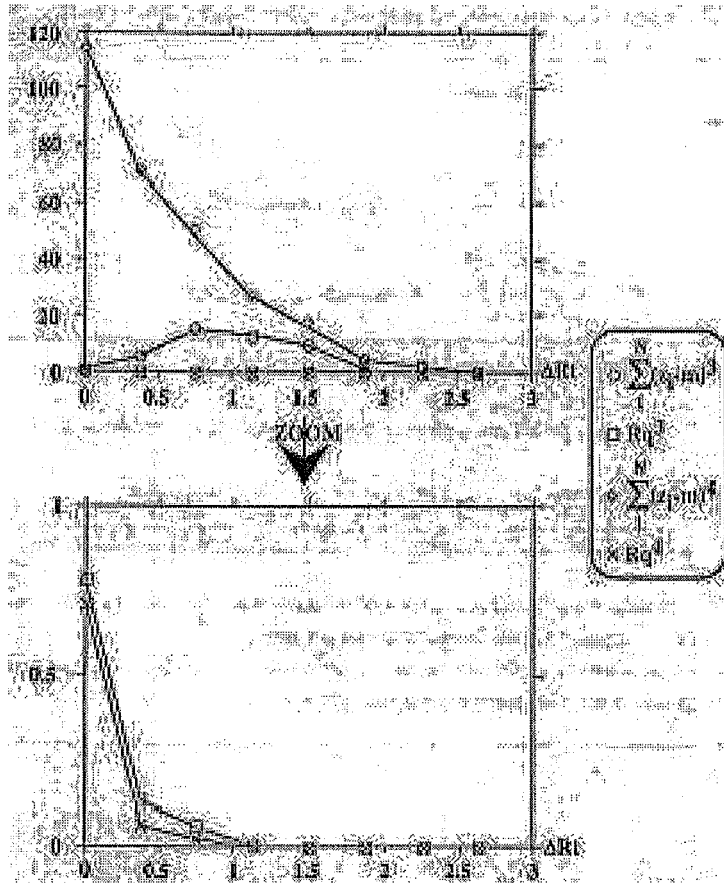


Figure III.24: Evolution de R_q^3 , R_q^4 , $\sum_1^N (h_i)^3$ et $\sum_1^N (h_i)^4$ avec le niveau de troncature [34].

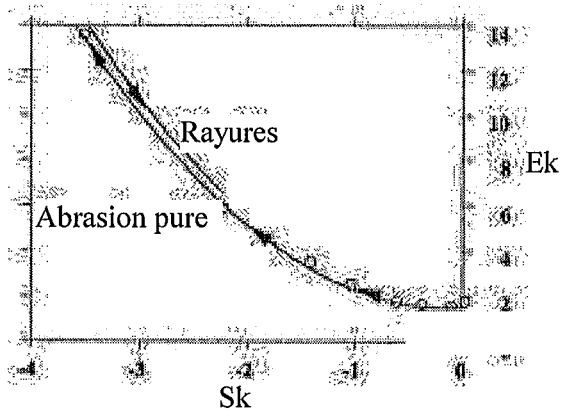


Figure III.25: Evolution du couple (E_k, S_k) dans le cas de rayures profondes [34].

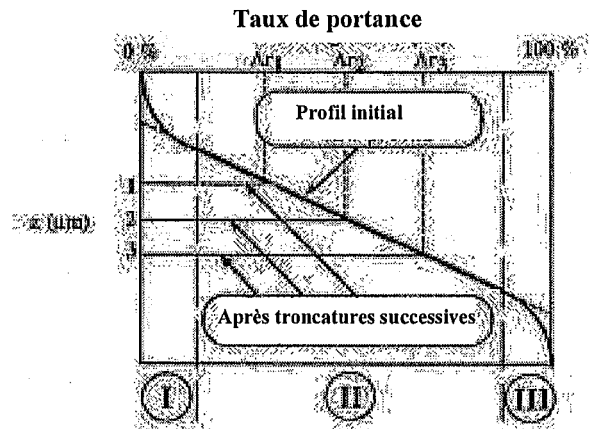


Figure III.26: Evolution des courbes de taux de portance avec le niveau d'abrasion pure [34].

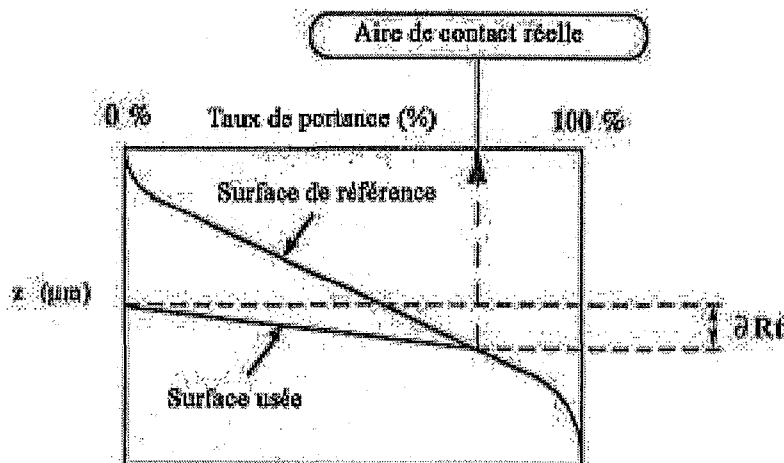
□ Courbe d'Abbott-Firestone

Durant l'usinage mathématique, les hauteurs supérieures au niveau de troncature sont abrasées de telles sortes que leur nouvelle valeur est égale à la hauteur tronquée. Il y a alors apparition de plateaux sur le profil. En conséquence, un segment horizontal apparaît sur la courbe d'Abbott-Firestone à la hauteur de troncature (voir figure III.26).

La partie basse de la courbe d'Abbott-Firestone (c.à-d. à des taux de portance proches de 100 %) reste inchangée : elle représente la géométrie des vallées, qui ne sont pas affectées par la troncature progressive. Si la superposition de la partie basse de la courbe de portance entre l'état usé et celui de référence n'est pas parfaite, on peut conclure sur l'occurrence de processus d'endommagements différents de l'abrasion pure, comme par exemple des rayures profondes.

Ainsi, la persistance des vallées, ou la superposition de la partie basse de la courbe d'Abbott-Firestone entre l'état d'abrasion théorique et l'état d'usure réelle est un critère essentiel pour pouvoir apprécier le niveau d'usure avec cette méthode.

Si l'abrasion pure n'est pas le seul processus d'usure, le plateau n'apparaît pas sur la courbe d'Abbott-Firestone. La partie linéaire de cette courbe est inclinée, et sa pente correspond alors à la rugosité résiduelle ∂R_t au niveau des aspérités des plateaux (figure III.27).



Comme les revêtements de sol résilients sont basés sur des matériaux fortement visqueux, ils sont susceptibles d'atteindre un haut niveau de déformation, et donc susceptibles d'absorber une

quantité relativement importante d'énergie avant d'initier des modes d'endommagement plus sévères (comme l'abrasion). **Nous pouvons donc nous attendre à obtenir des courbes d'Abbott-Firestone sur lesquelles les plateaux, consécutifs à l'abrasion, sont imparfaits.**

□ Paramètres d'amplitude

Les aspérités étant tronquées, les paramètres d'amplitude vont décroître en conséquence. Cet effet est plus facile à suivre si l'on regarde des paramètres moyens (comme la hauteur de profil moyenne $R_m = R_{pm} + R_{vm}$) plutôt que des paramètres absolus (c.à-d. $R_t = R_p + R_v$). En effet, ces paramètres absolus sont reliés à des fonctions locales du profil (hauteur du plus haut pic, par exemple), et leurs évolutions ne représentent pas toujours celles de la rugosité globale du profil. De plus, après chaque troncature, la ligne centrale du profil de rugosité est redéfinie, modifiant par là la hauteur d'aspérité moyenne R_{pm} ou la profondeur de vallée moyenne R_{vm} sans sens physique évident. Par opposition, leur somme R_m garde le sens d'une hauteur de profil résiduelle moyenne.

Ainsi, si l'abrasion apparaît comme le processus d'usure principal à travers cette approche topographique, ΔR_m (variations de la hauteur moyenne du profil de rugosité entre l'état de référence ou non-usé, et l'état usé) **peut être utilisé comme un paramètre pertinent pour évaluer le niveau d'abrasion.**

□ Conclusions sur l'approche "troncature mathématique de type abrasif"

Un processus d'usure parfaitement abrasif peut être mis en évidence par cette méthode si la topographie des profils usés suit ce comportement idéal :

- **La courbe $E_k = f(S_k)$ suit la portion ascendante d'une parabole dans le quadrant supérieur gauche ;**
- **Le domaine linéaire de la courbe d'Abbott-Firestone devient horizontal, la partie basse de la courbe (taux de portance élevés) reste inchangée (critère d'applicabilité);**
- **Les paramètres d'amplitude décroissent.**

Dans ces conditions, le niveau d'abrasion peut être estimé grâce aux évolutions, entre les états de référence et usés, du paramètre R_m .

Toute déviation par rapport à ce comportement idéal peut être liée à un processus d'usure différent de l'abrasion pure, ou à une combinaison de plusieurs processus.

Note: une telle approche est bien adaptée pour les matériaux élastiques parfaitement plastiques. Pour les matériaux visqueux, des limitations apparaissent.

III.1.5.4 L'approche Ek-Sk : définition des états de référence

Considérons maintenant l'incidence d'une troncature mathématique (c.à-d. une abrasion progressive idéale), avec un pas de deux micromètres, appliqué à nos deux produits. Les résultats présentés ici sont des moyennes basées sur l'étude de huit profils par produit.

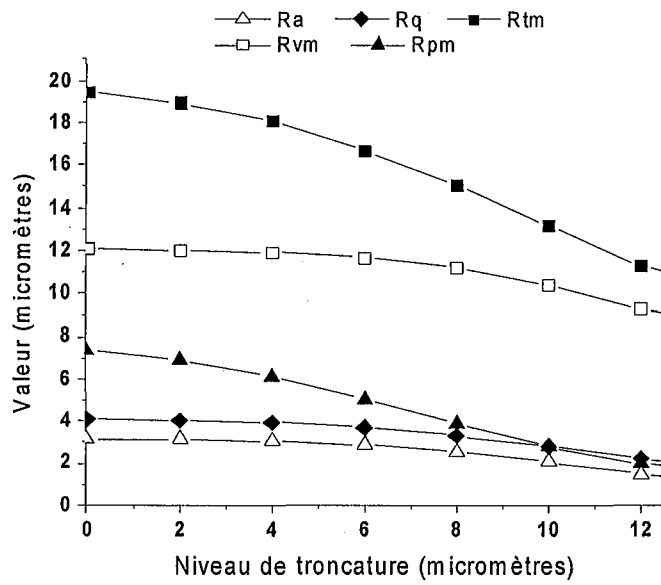
□ Paramètres d'amplitude

Nous pouvons voir à la figure III-28 la décroissance attendue des paramètres d'amplitude avec le niveau d'abrasion pure (le niveau de troncation est défini comme la hauteur de profil tronquée à partir du plus haut pic du profil – c.à-d. qu'une troncature de 2 micromètres correspond à la transformation en plateaux des hauteurs comprises entre le pic le plus haut et deux micromètres sous ce pic)¹³.

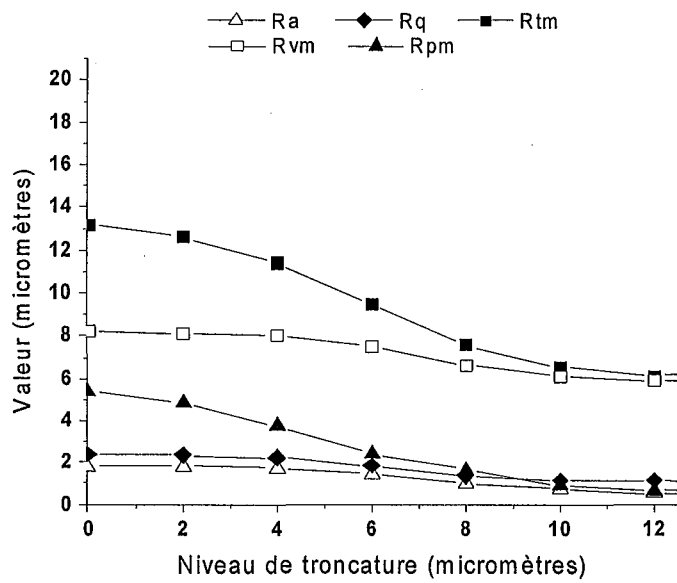
Ce processus d'endommagement étant localisé sur les aspérités, la profondeur moyenne des vallées R_{vm} reste pratiquement constante jusqu'à un certain niveau d'abrasion (environ 4 micromètres pour les deux produits). Il est à noter que la décroissance de ce paramètre durant l'usinage mathématique est en partie la conséquence de la redéfinition, à chaque troncature, de la ligne moyenne du profil, couplée à la décroissance du poids des vallées dans le profil entier (ceci est confirmé par la croissance de la porosité apparente du profil – les valeurs de S_k décroissent – en cours de troncature). La géométrie des vallées reste inchangée.

Dans cette optique, **la distance pic à vallée moyenne R_{tm}** , diminuant progressivement avec le niveau d'abrasion, est **un bon indicateur du niveau global d'abrasion des aspérités** car elle est insensible au repositionnement de la ligne moyenne du profil.

¹³ Nous pouvons visuellement apprécier sur ces deux graphiques les différences initiales importantes entre nos deux produits.



a) Produit PVC

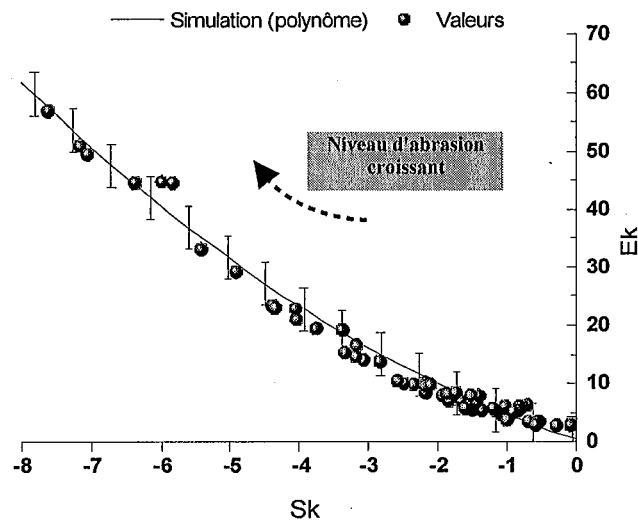


b) Produit PU+PVC

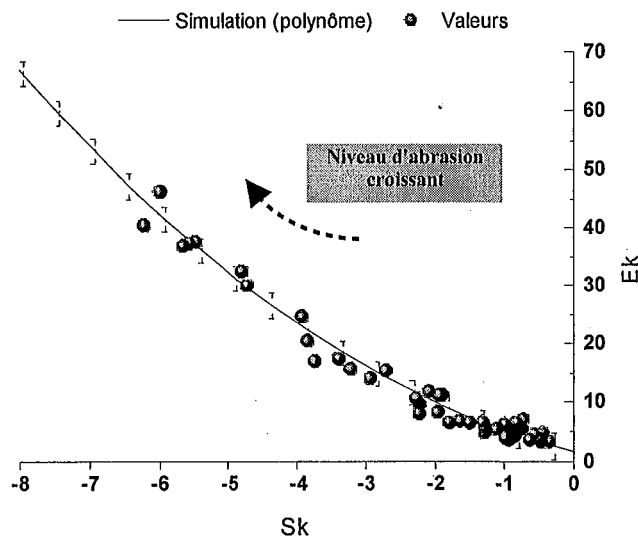
Figure III-28: Evolution théorique des paramètres d'amplitude dans le cas de l'abrasion pure (c.à-d. obtenue par troncature mathématique), en fonction du niveau d'abrasion.

□ Courbes Ek-Sk

Sur la figure III-29, la relation parabolique théorique entre les paramètres Sk et Ek est confirmée. Nous avons tracé chaque couple de données (Ek,Sk) obtenu sur les huit profils étudiés, consécutifs aux différents niveaux d'abrasion, de manière à mieux apprécier cette relation de second ordre.



a) Produits PVC.



b) Produits PU+PVC.

Figure III-29: Evolution théorique des paramètres de symétrie dans le cas d'une abrasion pure progressive (usinage mathématique).

Les paraboles sont calculées d'après tous les couples, indépendamment du niveau de troncature ; leurs équations sont données dans le tableau III-6.

Table III-6: Approximation polynômiale de second ordre de la relation Ek-Sk.

Produits	Polynôme de second ordre	R	Ecart type
PVC	$E_k = 0.4 - 3.7 * S_k + 0.5 * S_k^2$	0.99	3.7
PU+PVC	$E_k = 1.6 - 2.8 * S_k + 0.7 * S_k^2$	1.00	2.2

□ Courbes d'Abbott-Firestone

Pour les deux produits étudiés, la courbe d'Abbott-Firestone de référence est obtenue en moyennant les courbes de portance de huit profils (voir figure III-30).

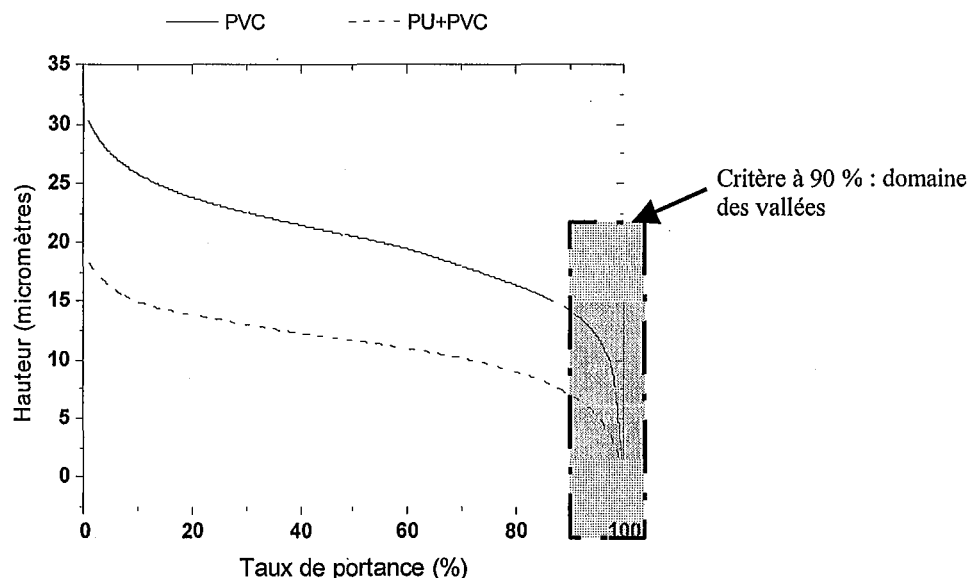


Figure III-30: Courbes d'Abbott-Firestone de référence pour les deux produits.

La troncature progressive des aspérités engendre l'apparition d'un segment horizontal dans la partie haute de la courbe de portance (c.à-d aux taux de portance bas). Dans le cas d'une abrasion pure, la partie basse de la courbe (directement reliée à la géométrie des vallées, non affectées par cette abrasion locale) restera constante ; un exemple est donné à la figure III-31 (trois courbes de portance de produits PVC à des niveaux d'abrasion simulés croissants).

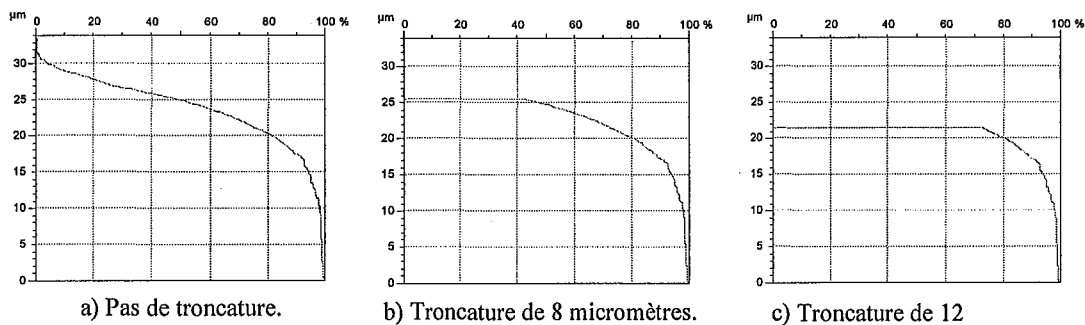


Figure III-31: Impact de troncatures mathématiques successives sur la courbe de portance (produit PVC).

Sur la figure III-30, nous avons représenté le domaine des vallées pour les deux produits, correspondant à un critère d'applicabilité à 90 % (du taux de portance) défini pour ces produits. Ceci nous donne des profondeurs de vallées proches de :

- 14 micromètres pour le produit PVC ;
- 7 micromètres pour le produit PU+PVC.

La vérification de ce critère est essentielle pour pouvoir déterminer le niveau d'abrasion via cette approche.

III.2 TESTS D'USURE – PRINCIPES DE BASE

Des équipements spéciaux ont été conçus pour simuler l'usure des revêtements dès 1932 (avec la machine Stuttgart développée par Egner [1]). De nos jours, il existe plusieurs tests disponibles pour étudier l'usure de revêtements de sol résilients PVC [3][4][46][47].

Après une rapide présentation du test Frick Taber, nous présenterons le test Lisson. À l'origine conçu pour l'industrie des moquettes, ce test semble être très prometteur pour les revêtements de sol résilients : il reproduit très bien l'action de marche, grâce à l'utilisation de “pieds” marchant sur la surface testée.

Nous présenterons ensuite le test grandeur nature, mis en place pour accéder aux performances des produits en condition de trafic réel. Ce test grandeur nature, qui a duré une année, a été lancé en parallèle avec les autres tests d'usure accélérée ; à cause de sa durée, il n'a pas pu les précéder. Ce test nous donnera le comportement général du revêtement de sol, et orientera en conséquence l'approche générale suivie pour étudier les processus d'usure des revêtements de sol. En effet, les tests en laboratoire ne reproduisent pas les dégradations esthétiques telles qu'observées en conditions réelles d'utilisation ; le test grandeur nature, lui, le fera.

III.2.1 Le test Frick Taber

Ce test est utilisé pour étudier les revêtements de sol plastiques, textiles, et les produits revêtus. **Très important dans l'industrie du revêtement de sol**, ce test est un des deux tests utilisés pour déterminer le groupe d'usure du produit.

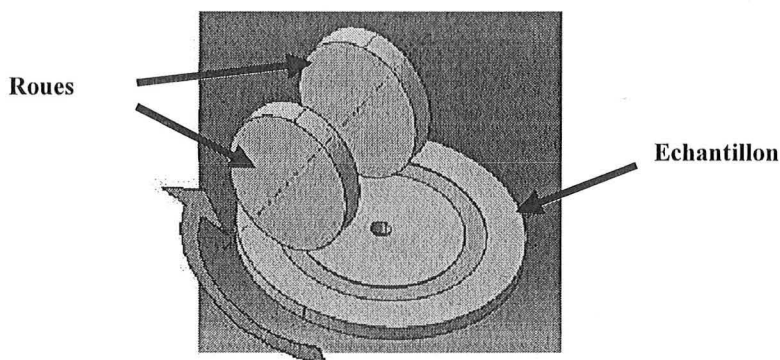


Figure III-32: Schéma du test Frick Taber.

L'échantillon est accroché sur un porte-échantillon rotatif (vitesse de rotation constante, environ 60 tours/minute). Dans notre cas, un troisième corps – des grains de corindon, de diamètre compris entre 45 et 75 micromètres - recouvre la surface (d'après la norme, le troisième corps doit "être déposé uniformément sur la surface de l'échantillon"). Une paire de roue, recouvertes de cuir, entrent en contact avec la surface. Lorsque l'échantillon tourne, les second et troisième corps (les roues et les grains de corindon) abrasent la surface (voir figure III-32).

Concernant la procédure de test, nous pouvons noter que :

- Le tribosystème est **continuellement alimenté en troisième corps** ;
- Les débris d'usure, potentiellement agglomérés avec les troisième corps, sont continuellement recyclés.

Ainsi, le tribosystème est un système fermé [6], avec la particularité de renouveler certaines surfaces en contact (troisièmes corps).

- **Le système étant fermé, après un certain nombre de cycles, les températures de contact peuvent être supérieures à leur valeur en situation réelle (le tribosystème réel semelle/revêtement de sol/caillou est ouvert).**
- **La force normale** : les roues, fabriquées en matériau donné (plastique dur dans notre cas), de géométrie imposée, appliquent sur la surface testée une force normale égale à 10 N.

Yang et Wu [48] ont montré, sur un appareil Frick Taber amélioré, l'influence importante de la force normale sur le taux d'usure durant le test de polymères vitreux (dépendance linéaire croissante).

- **La mesure du niveau d'abrasion est basée sur l'évaluation de la perte de poids par tour.** Les échantillons sont pesés avant le test, et le test est lancé jusqu'à 5000 tours si possible (c.à-d. s'il n'y a aucune perforation jusque là). Tous les 1000 cycles, l'échantillon est retiré de la machine, nettoyé (avec une brosse) et pesé.

Le **volume perdu par abrasion** est calculé en fonction de la **masse volumique¹⁴** du matériau testé et de la perte de masse durant le test.

Ce test suppose donc que la masse volumique du matériau reste constante durant le test. Dans le cas de polymères mous, cette hypothèse peut entraîner des erreurs dans le calcul du volume perdu. De plus, il n'est fait aucune différence entre l'abrasion d'un revêtement protecteur et l'abrasion du substrat dans les

¹⁴La masse volumique du matériau testé est calculée à partir de la masse initiale et de la géométrie du produit mesurées respectivement à 0.1 mg près, et à 0.1 mm sur la largeur/longueur, 0.01 mm sur son épaisseur.

mesure de perte de masse. Enfin, le volume abrasé doit être suffisamment important pour pouvoir être mesuré.

- La roue est recouverte de cuir, bien que dans le cas du trafic réel les semelles sont majoritairement (pour 80 % d'entre elles) fabriquées en élastomère.

III.2.2 Le test Lisson [49]

Ce test semble être bien adapté pour simuler les conditions réelles de trafic : il reproduit au mieux l'action de marche par le biais de pieds artificiels (recouverts de semelles en élastomère) entraînés en translation linéaire contre le revêtement de sol. Les niveaux d'usure induits par ce test devraient donc être proches de la réalité.

Le principe du test Lisson est simple (figure III-33) : 4 pieds sont montés sur une roue (le tétrapode), et recouverts de semelles élastomères amovibles. L'échantillon testé est monté sur le porte-échantillon, et précontraint à l'aide d'un poids mort à 200 N (+/- 10 N). Une fois qu'un des pieds est en contact avec l'échantillon, le centre du tétrapode se déplace à vitesse linéaire constante (0.28 m/s) de manière à reproduire l'action de marche.

Ici encore, la force normale n'est pas vraiment maîtrisée : le contrôle de cette force est défini par la distance entre le centre de la roue et la surface nominale de l'échantillon.

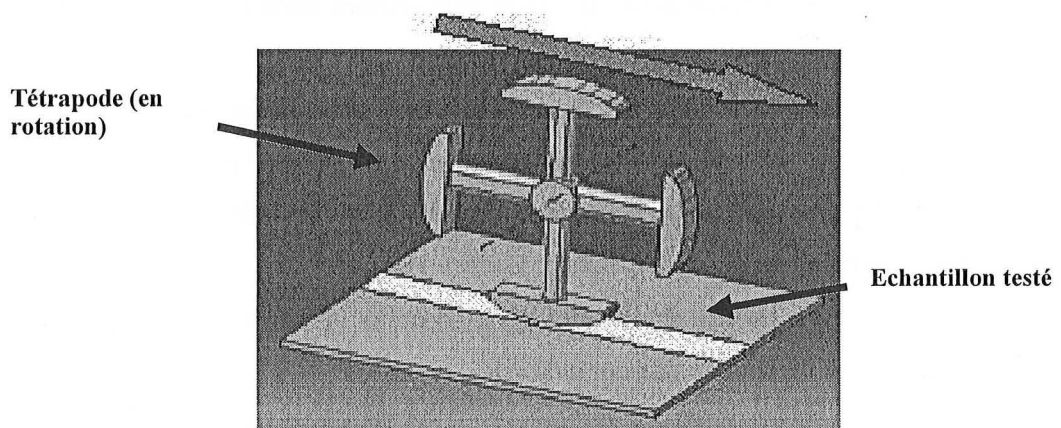


Figure III-33: Schéma du test Lisson.

L'augmentation du nombre de cycles de tétrapode permet de simuler différents niveaux d'usure. En cours de test, les débris d'usure sont périodiquement éliminés (par pulvérisation d'air).

Ce test a été initialement développé pour les moquettes ; les résultats normés pour ce test consistent donc principalement en des évaluations subjectives de différentes caractéristiques propres aux moquettes (quantité de défibrillation, de bouloches...). Pour l'étude des revêtements de sol résilients, nous proposons d'évaluer le niveau d'usure grâce à :

- L'impact sur l'esthétique via l'observation visuelle des échantillons usés ;
- L'impact sur l'épaisseur moyenne de la couche de PU ;
- Les changements topographiques induits sur les produits (mesures 2D/3D), en fonction du nombre de cycles.

La même analyse sera faite sur les résultats du test Frick Taber et du test grandeur nature.

III.2.3 Le test grandeur nature

Les objectifs de ce test grandeur nature, effectif durant une année, sont :

- Observer les conditions réelles de trafic : les niveaux réels de sollicitations/déformations, les conditions de contact, etc... ;
- Enregistrer les variations des propriétés du revêtement de sol en fonction du trafic, au moins durant les premiers mois ;
- Comparer les propriétés d'anti-usure des produits avec celles obtenues via les tests normalisés d'usure accélérée¹⁴.

Le test grandeur nature est placé dans l'entrée principale d'un laboratoire (une équipe de 15 à 20 personnes travaille dans ces locaux), déposé sur le sol pré-existant (en carreaux céramiques), près d'un radiateur (voir figure III-34).

L'enregistrement du nombre de passages sur le test grandeur nature est effectué par un compteur accroché sur un mur (lettre C sur la figure III-34).

Les personnes (employés ou visiteurs) peuvent venir soit par l'extérieur (leurs semelles couvertes d'eau en cas de pluie ou de neige, avec des troisièmes corps de différente nature -- poussières, salissures...), soit par l'atelier (graisse, copeaux métalliques, substances chimiques tels que lubrifiants...).

¹⁴ Une trivialité : un test grandeur nature (s'il est proprement exécuté) est certainement le meilleur outil pour appréhender les performances en conditions réelles d'un produit [50].

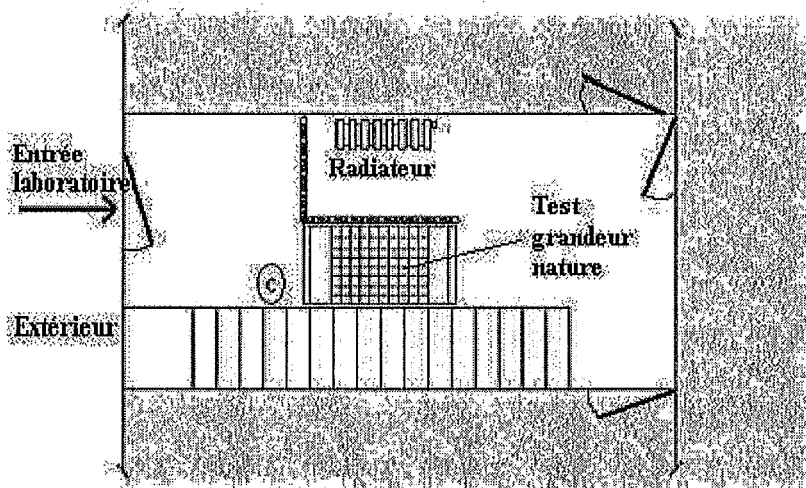


Figure III-34: Environnement du test grandeur nature.

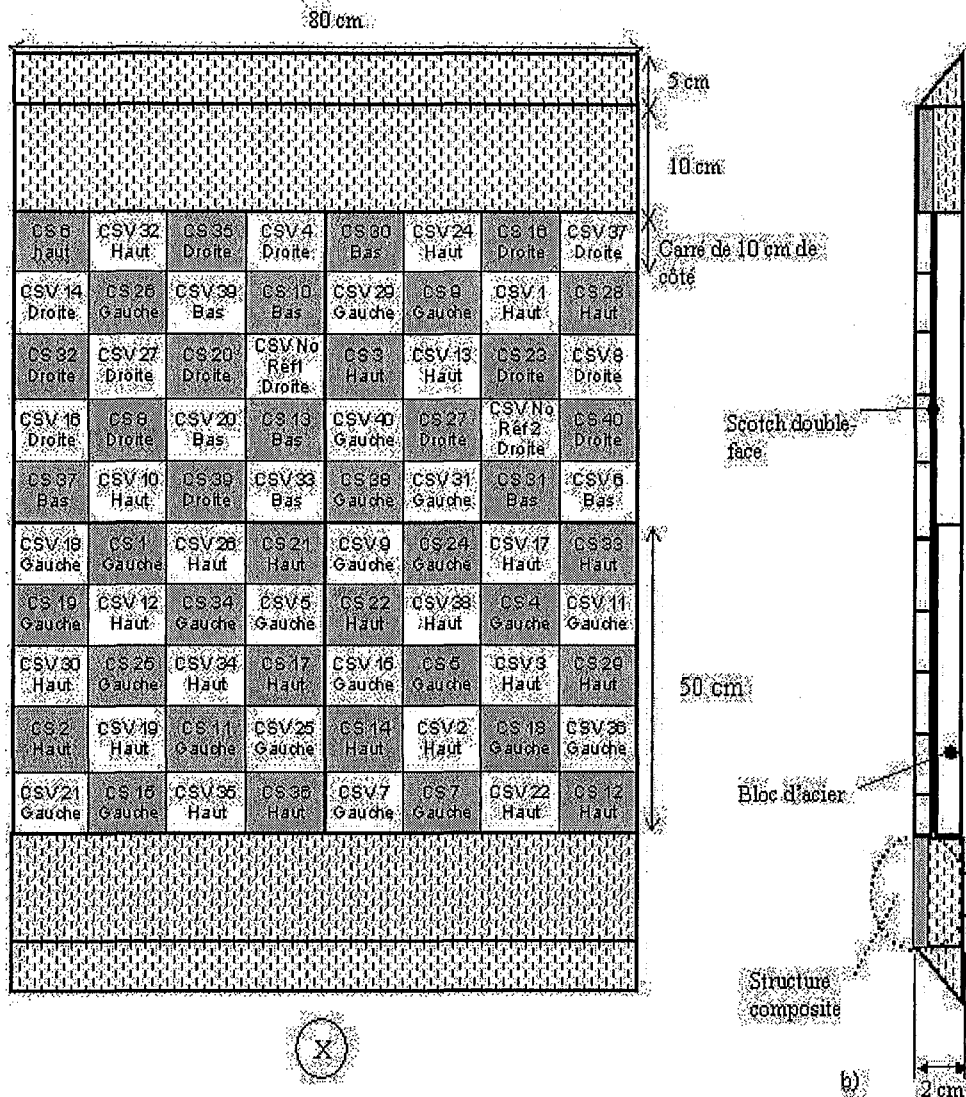
Dans cette entrée, le trafic est directif : parallèle aux murs et à l'escalier. Ainsi, pour assurer des conditions d'usure homogènes sur les deux produits, **ces derniers ont été distribués de manière homogène sur la surface du test grandeur nature** : des échantillons carrés (100x100 mm), distribués en damier, comme montré sur la figure III-35.

Chaque échantillon de revêtement de sol est collé (avec un film thermo-collant de copolyamide) sur une petite plaque d'acier de 2 mm d'épais. Cette structure composite est ensuite scotchée (double-face) sur un bloc d'acier plus massif (20 structures composites par bloc d'acier). La figure III-35a montre les 4 blocs d'acier (délimités par des lignes épaisses), chacun d'eux supportant 20 structures composites (10 PVC, 10 PU+PVC).

Le bloc d'acier est nécessaire pour assurer une certaine **rigidité** et une **planéité maximale** sous le revêtement de sol ; le scotch double-face, solide, permet le démontage de la structure composite, et assure une adhésion forte entre la structure composite et le bloc d'acier.

L'utilisation de structures composites permet un échantillonnage facile et localisé (des instruments de coupe de faible énergie, comme une scie-ruban, sont suffisant pour mettre en forme l'échantillon – on vient donc limiter les artefacts de mesures potentiels liés à la préparation des échantillons).

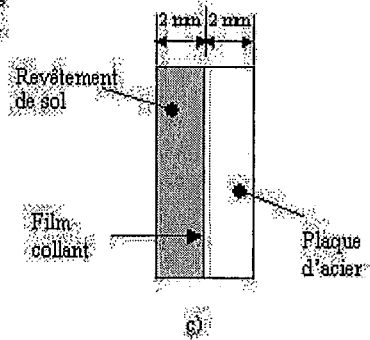
La totalité du test grandeur nature repose sur le sol, sans autre bridage : son poids est suffisamment important pour éviter tout type de déplacement en cours d'utilisation.



a) Chaque échantillon a été référencé, et son orientation par rapport à la direction du processus de fabrication a été conservée (Gauche, Haut...). Par exemple, "CS 36 Haut" est un échantillon de PVC, la direction de calendrage est verticale, dans la direction du regard d'une personne debout à l'endroit X et regardant vers le test grandeur nature.

Figure III-35: Test grandeur nature:

- a) Répartition des échantillons sur le test grandeur nature. Échantillons gris: PVC, blancs: RU+PVC.
 b) Vue de côté du test.
 c) Focalisation sur un échantillon, vue de côté.



À cause de l'épaisseur des blocs d'acier, une marche de vingt millimètres de haut a été créée sur les bords du test grandeur nature, dans le sens de la marche. Pour des raisons de sécurité, et pour à nouveau assurer la planéité globale des revêtements de sol testé, nous avons ajouté une "zone morte" (zone remplie par des segments verticaux sur la figure III-35a), constituée

d'un plan incliné et d'un plan horizontal, ce dernier étant également recouvert d'un revêtement de sol. Ainsi, si l'on marche près des bords du test grandeur nature, le pied repose :

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1. À l'horizontale | Pas de distortion dans le champ de
 contrainte/déformation |
| 2. Sur le même type de matériau sur | |

toute sa surface portance.

De manière à évaluer les impacts de l'environnement (c.à-d. indépendamment de tout contact) sur nos produits, nous avons placé deux échantillons de référence près du test grandeur nature. Soumis aux mêmes conditions environnementales que le test grandeur nature, ces deux échantillons de référence (un PVC, un PU+PVC) devraient nous donner une idée de l'évolution des propriétés dues à l'humidité, à la température et aux niveaux UV durant le test. **Ces échantillons sont utilisés pour s'assurer que l'usure évaluée n'est pas due au vieillissement naturel du produit.**

Le nettoyage a été effectué en suivant les recommandations du fabricant des revêtements de sol : chaque soir d'une journée de travail le test grandeur nature a été nettoyé avec de l'Indur Brillant Plus © (fabriqué par Henkel Ecolab), spécialement conçu pour "les revêtements de sol résistant à l'eau comme le PVC, le lino ou le carrelage, avec ou sans protection".

Le fabricant du produit de nettoyage affirme qu'après application, un léger film protecteur reste, renforçant ainsi l'éventuelle couche protectrice initiale (comme dans le cas du PU+PVC ici). Nous n'avons pas d'autre information sur ce film.

III.2.4 Tests d'usure étudiés : conclusions

Ces travaux concernent notamment l'impact de l'usure sur l'esthétique du revêtement de sol ; **nous avons donc décidé de conserver l'analyse visuelle comme outil d'évaluation des échantillons soumis à chacun de ces trois tests** (test grandeur nature, Frick Taber et Lisson).

Les observations visuelles seront confrontées aux micrographies, ainsi qu'à l'évolution des paramètres topographiques, de manière à montrer la qualité de la simulation des conditions de trafic réelles au cours de ces tests.

Cette approche subjective peut être critiquée du point de vue de sa reproductibilité ; néanmoins, elle conserve tout son intérêt si l'on considère que :

1. **La même personne** a effectuée toutes les évaluations durant ce travail ;
2. L'échantillonnage considéré est **suffisamment important** (plus de cinq échantillons par produit et par type de surface – usée/non usée, Lisson, Frick Taber...) pour permettre de définir d'un état de surface moyen, significatif et reproductible ;
3. L'esthétique des produits est fortement conditionnée par la nature du test. Nous verrons que nous passons d'un aspect brillant à un aspect terne, très sale à propre, etc... De telles différences sont facilement appréciables par l'oeil humain.

Chapitre IV: Analyse des résultats sur l'usure des revêtements de sol

Nous discuterons d'abord les résultats (en termes de dégradation de surface) des tests Frick Taber et Lisson pour voir, qualitativement, la pertinence de ces tests.

Nous regarderons ensuite les résultats obtenus du test grandeur nature, de manière à définir les principaux impacts de l'usure en conditions réelles sur l'esthétique et la topographie des revêtements de sol. Ce comportement de référence nous permettra de déterminer les différences entre les deux produits, si existantes, qu'un test d'usure accélérée approprié devrait reproduire.

Dans chaque cas, les mesures topographiques ont été faites selon 2 ou 3 dimensions, et elles ont été couplées aux observations visuelles (œil nu et microscopie). Ces inspections visuelles ont pour but de :

- Mettre en évidence les nouveaux défauts, consécutifs au trafic, apparaissant durant le test grandeur nature (évaluation de l'impact sur l'aspect esthétique des produits), et suivre l'évolution, si possible, des défauts pré-existants ;
- Apprécier l'épaisseur de la couche de PU résiduelle, un indicateur complémentaire du niveau d'usure.

IV.1 LES RÉSULTATS DU TEST FRICK TABER

Trois niveaux ont été étudiés (voir chapitre 3) : 250, 1000 et 5000 cycles, un échantillon par produit pour chaque nombre de cycles. Nous allons voir que ce test est bien plus agressif que la réalité et, plus particulièrement, qu'il n'initie pas les processus d'endommagement adéquats. La principale conséquence d'une telle différence entre le test Frick Taber et un triobystème réel est que le classement des produits obtenu à l'aide de ce test n'est pas conforme au classement issu des conditions réelles de sollicitations (c.à-d. au retour client).

IV.1.1 Perte de masse et de volume

Le test Frick Taber induit sur l'échantillon une piste d'usure en forme de couronne (voir figure IV-1), visible à l'oeil nu, dès les premières étapes du test (250 cycles). Cette couronne usée est une zone terne, devenant de plus en plus matte lorsque le nombre de cycles augmente.

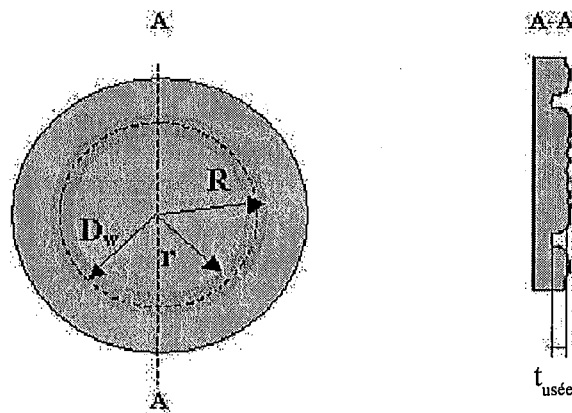


Figure IV-1: Géométrie de la zone usée après le test Frick Taber.

Le tableau IV-1 présente la géométrie moyenne de la couronne pour les trois nombres de cycles, et le volume usé correspondant, calculé à l'aide du théorème de Guldin (nous supposons donc que la section transverse de la couronne, rectangulaire, est constante) :

$$V = 2\pi * D_w * S$$

avec D_w la position radiale du centre de la section transverse, égale à $(R + r)/2$. La section transverse S est définie par la largeur de la couronne multipliée par son épaisseur :

$$S = (R - r) * t_{usée}$$

Nous avons là une approximation du volume utilisé de premier ordre, à corrélérer avec les résultats normalisés du test (les mesures de la perte de masse et de volume correspondant), de manière à évaluer grossièrement la pertinence de ce test.

Les résultats standards (perte de masse/volume) sont reportés dans le tableau IV-2 (mesurés sur un échantillon par nombre de cycle).

Tableau IV-1: Evolution de la géométrie moyenne de la zone usée induite par le test Frick Taber, en fonction du nombre de cycles, pour les deux produits.

	R-r [mm]	t _{usée} [mm]	S [mm ²]	Dw [mm]	Volume usé [mm ³]
250 cycles	42-33 = 9	< 0.005	< 0.045	37.0	< 10
1000 cycles	42-31 = 11	0.010	0.110	36.5	25
5000 cycles	44-30 = 14	0.050	0.700	37.0	160

Table IV-2: Evolution de la perte de volume, basée sur la perte de masse (résultat normalisé), en fonction du nombre de cycles de Frick Taber, pour les deux produits.

	Densité	Perte de masse [mg]	Perte de volume [mm ³]
PVC			
250 cycles	1.390	8	5.5
1000 cycles	1.390	30.9	22
5000 cycles	1.390	164.6	120
PU+PVC			
250 cycles	1.079	11.5	10.75
1000 cycles	1.304	33.4	26
5000 cycles	1.400	147.2	105

Les techniques utilisées pour mesurer la géométrie (un réglet pour les distances r et R, la profilométrie pour t_{usée}) et l'hypothèse d'une géométrie de section transverse constante ont donné des géométries de couronne identiques pour les deux produits (à nombre de cycles équivalents).

Nous pouvons tirer trois conclusions de ces résultats :

- L'utilisation de la densité du produit pour calculer la perte de volume est en bon accord avec la caractérisation géométrique de l'usure du produit (ordres de grandeurs

cohérents). Nous concluons que **le processus d'endommagement principal dans ce test est l'abrasion**, car les principales modifications dans la géométrie de la surface sont associées à une perte de masse.

- La discrimination des produits ne peut être faite qu'aux faibles nombres de cycles (avant 1000 cycles). Après (au mieux) 1000 cycles, on ne peut plus déterminer le produit qui a la meilleure tenue à l'usure. Nous pouvons facilement comprendre cet état de fait en regardant l'épaisseur de la couronne usée : le niveau d'usure après 1000 cycles est tel que **la totalité de la couche de PU a été abrasée** (nous discuterons ce niveau d'abrasion plus tard). Le produit initialement PU+PVC devient un "simple" produit PVC ; évidemment, dans ces conditions, il n'est plus nécessaire de continuer à tester l'influence de la couche de PU sur la résistance du produit à l'usure.
- Durant les premières étapes du test (250 cycles), la perte de masse du produit PU+PVC est deux fois celle du PVC. Ainsi, le taux d'abrasion (mm^3/cycle) de la couche de PU est supérieur à celui du PVC. **Les produits PU+PVC ont donc une tenue à l'usure Frick Taber moins bonne que celle des produits PVC.** Pour des nombres de cycles supérieurs, le taux d'abrasion est constant avec le nombre cycles, équivalent pour les deux produits, et proche de $0.02 \text{ mm}^3/\text{cycle}$.

Durant le test Frick Taber, l'échantillon, principalement, est abrasé.

La conséquence directe de cette agressivité est que, en se basant sur les résultats normalisés (perte de masse/volume), **le test Frick Taber n'est pas capable de classer les produits.** Au pire, le classement obtenu est l'opposé du classement à reproduire.

IV.1.2 Inspection visuelle et mesures topographiques 3D après les tests d'usure Frick Taber

IV.1.2.1 Usure Frick Taber des produits PVC

Aucun des défauts de surface observés sur le test grandeur nature n'a pu être observé après le test Frick Taber, même après 5000 cycles. Deux explications possibles à cet état de fait :

1. Le test Frick Taber ne reproduit pas les défauts de surface réels ;
2. Le test Frick Taber reproduit (au moins partiellement) les défauts réels, mais ces défauts ne sont pas visibles après ce test car la poussière/salissure, agissant comme un révélateur de défaut, n'est pas un élément du test. **Cependant, les macroscratches ne sont assurément pas reproduits.**

Comme nous l'avons précisé plus haut, la dégradation esthétique correspond à une surface qui devient plus mate. Nous pouvons voir cet effet sur la figure IV-2, où après 5000 cycles la

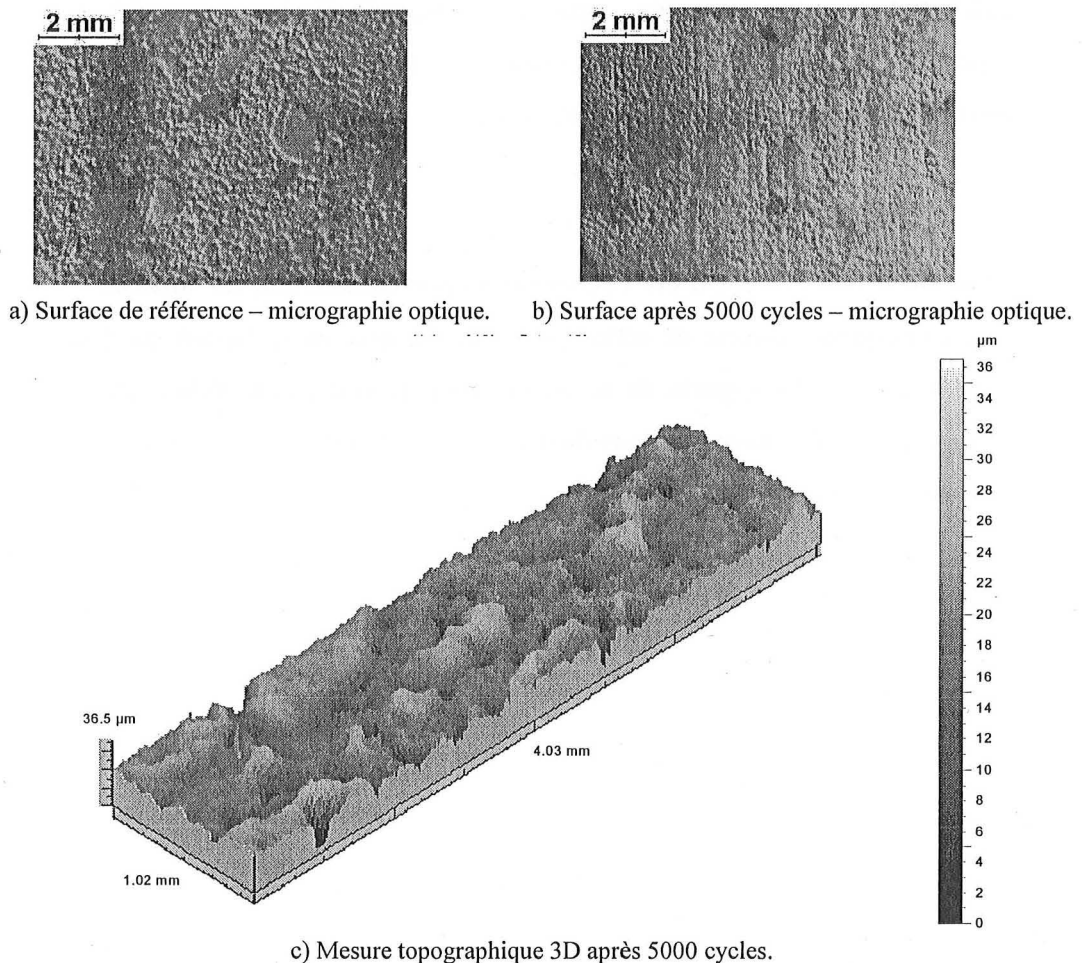


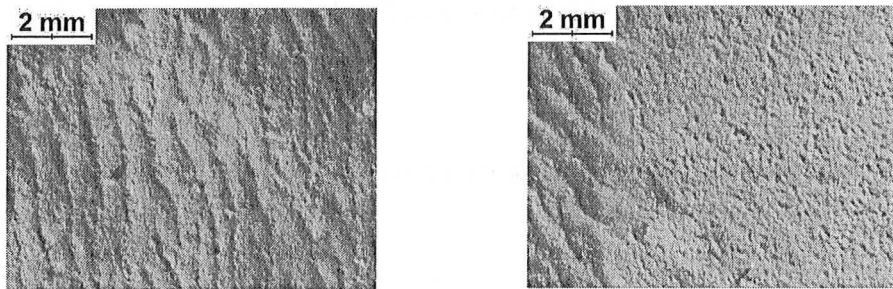
Figure IV-2: Evolution de l'aspect de surface du PVC après 5000 cycles de test Frick Taber. $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$.

surface PVC semble être composée d'aspérités proéminantes (à comparer avec la figure III-6). La surface semble être *entièrement transformée*.

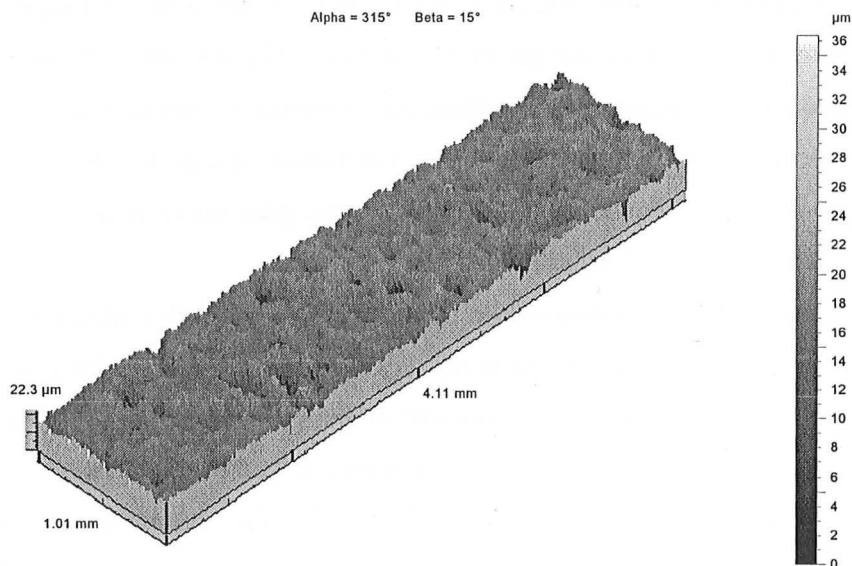
IV.1.2.2 Usure Frick Taber des produits PU+PVC

À nouveau, **aucun** des défauts de surface observés sur le test grandeur nature n'a été retrouvé sur les échantillons PU+PVC soumis au test Frick-Taber.

L'impact de ce test sur l'esthétique du produit PU+PVC est plus important, principalement à cause de la période de calendrage initialement présente sur les produits de référence (voir paragraphe III.1.5). En particulier, nous voyons qu'après 5000 cycles, lorsque la couche de PU a été entièrement abrasée, cette période a disparue et l'aspect du produit est plus proche de celui du PVC (figure IV-3a, b and c).



a) Surface de référence – micrographie optique. b) Surface après 5000 cycles – micrographies optiques.



c) Mesures topographiques 3D après 5000 cycles de Frick Taber.

Figure IV-3: Evolution de l'aspect de surface du PU+PVC, après 250 et 5000 cycle de Frick Taber. $\lambda_c = 0.8$ mm.

Cette nouvelle géométrie, avec des fonctions topographiques plus nombreuses et plus proches, explique l'aspect de surface plus terne, qui sera confirmé par les paramètres de rugosité.

Ainsi, les observations visuelles confirment les différences entre l'usure réelle et l'usure simulée par le test Frick Taber.

IV.1.3 Evolution de l'épaisseur de la couche de PU

Après 250 cycles de Frick Taber, la couche de PU est toujours présente dans la couronne d'usure, mais simplement sous forme de traces. La mesure de l'épaisseur de la couche de PU résiduelle n'a donc pas vraiment de sens. Après 1000 cycles, la couche de PU a entièrement disparue (d'après le tableau IV-1, l'épaisseur usée est d'environ 10 micromètres, c.à-d. plus que l'épaisseur moyenne de la couche). Après 5000 cycles, le niveau d'abrasion (perte d'épaisseur de 50 micromètres) est définitivement bien supérieur à l'épaisseur de la couche de PU.

IV.1.4 Evolution des paramètres de rugosité

IV.1.4.1 Produits PVC

Les paramètres de rugosité sont présentés dans le tableau IV-3 (moyenne sur huit profils).

La perte de brillance peut s'expliquer par la décroissance du paramètre d'espacement S_m à paramètres de symétrie constants : les fonctions topographiques tendent à se rapprocher, en conservant globalement le même facteur de forme. Les variations dans la topographie, et avec elles les sources de diffraction de la lumière, sont donc plus nombreuses, entraînant une décroissance de la brillance de l'échantillon.

En termes de paramètres topographiques, les périodes 250-1000 cycles apparaissent comme une période de rûdage pour l'usure durant le test Frick Taber : les principales évolutions des paramètres retenus ont lieu durant cette première étape. Les paramètres de symétrie, eux, n'évoluent pas trop jusqu'à 5000 cycles. La seule manière de corréler les valeurs stationnaires pour les paramètres topographiques et le taux d'abrasion linéaire observé dans le paragraphe IV.1.1 est d'admettre que le test Frick Taber **génère une géométrie auto-similaire sur la surface testée après un certain nombre de cycles, directement reliée au test lui-même. La géométrie de la surface devient donc spécifique au test.**

Tableau IV-3: Evolution des paramètres de rugosité durant le test Frick Taber ($\lambda_c = 0.8$ mm). Produits PVC.

Paramètre	PVC Etat de référence	PVC 250 cycles	PVC 1000 cycles	PVC 5000 cycles
<i>Amplitude</i>				
Ra [μm]	3.1 ± 0.5	2.3 ± 0.5	1.9 ± 0.3	1.8 ± 0.2
Rq [μm]	4.0 ± 0.7	2.9 ± 0.6	2.5 ± 0.4	2.3 ± 0.3
Rtm [μm]	19.5 ± 3.2	14.4 ± 3.1	12.4 ± 2.0	11.4 ± 1.5
Rpm [μm]	7.2 ± 0.8	6.1 ± 1.2	5.2 ± 0.6	4.9 ± 0.5
Rvm [μm]	12.3 ± 2.6	8.3 ± 2.0	7.2 ± 1.4	6.6 ± 1.2
<i>Symétrie/ADF</i>				
Ek	5.6 ± 1.4	4.2 ± 1.4	4.8 ± 1.4	4.5 ± 1.0
Sk	-1.0 ± 0.4	-0.6 ± 0.3	-0.7 ± 0.3	-0.6 ± 0.3
<i>Etalement</i>				
Sm [μm]	100.0 ± 10	85.0 ± 16	83.0 ± 15	71.0 ± 9

IV.1.4.2 Produits PU+PVC

Les paramètres de rugosité sont présentés dans le tableau IV-4 (moyenne sur huit profils). Un des principaux effets sur les produits PU+PVC est **l'élimination de l'anisotropie initiale de calendrage**. De plus, les paramètres d'amplitude restent constants entre 250 et 5000 cycles (proches des valeurs atteintes par le PVC), et la symétrie de la surface semble évoluer et se rapprocher de celle du PVC après 5000 cycles. Ce comportement confirme les conclusions précédentes :

1. La couche de PU étant entièrement consommée, pour les deux produit, la surface testée est une surface PVC ;
2. La surface des produits testée devient spécifique au test plutôt que dépendante du produit.

Tableau IV-4: Evolution des paramètres de rugosité durant le test Frick Taber ($\lambda_c = 0.8$ mm). Produits PU+PVC.

Paramètre	PU+PVC Etat de référence	PU+PVC 250 cycles	PU+PVC 1000 cycles	PU+PVC 5000 cycles
<i>Amplitude</i>				
Ra [μm]	1.8 ± 0.3	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.1
Rq [μm]	2.4 ± 0.4	1.9 ± 0.2	2.0 ± 0.2	1.8 ± 0.1
Rtm [μm]	13.2 ± 2.9	9.7 ± 0.8	10.2 ± 1.7	9.4 ± 1.4
Rpm [μm]	5.4 ± 1.2	4.5 ± 0.4	4.7 ± 0.7	4.3 ± 0.9
Rvm [μm]	8.2 ± 2.1	5.3 ± 0.7	5.5 ± 1.2	5.1 ± 0.6
<i>Symétrie/ADF</i>				
Ek	5.0 ± 1.2	3.8 ± 0.8	4.6 ± 2.5	5.3 ± 2.4
Sk	-0.7 ± 0.3	-0.3 ± 0.3	-0.5 ± 0.4	-0.5 ± 0.4
<i>Etalement</i>				
Sm ^{*/**} [μm]	PD: 65.0 ± 6	64.0 ± 17	61.0 ± 8	58.0 ± 5
	TD: 80.0 ± 9			

* PD: direction du processus de fabrication (calandrage). TD: direction transverse.

** En conséquence de l'agressivité du test, l'anisotropie initiale des produits PU+PVC a disparue.

IV.1.5 Les résultats du test Frick Taber via l'approche Ek-Sk

Comme les observations visuelles et l'étude topographique l'ont montré, ce test génère un important niveau d'abrasion. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'utiliser l'approche Ek-Sk ici pour mettre en évidence l'abrasion. Néanmoins, l'application de cette méthode au test Frick Taber reste intéressante, car nous allons pouvoir mettre en évidence certaines de ses limitations.

□ Paramètres d'amplitude

La figure IV-4 montre que les paramètres d'amplitude décroissent dans les deux cas.

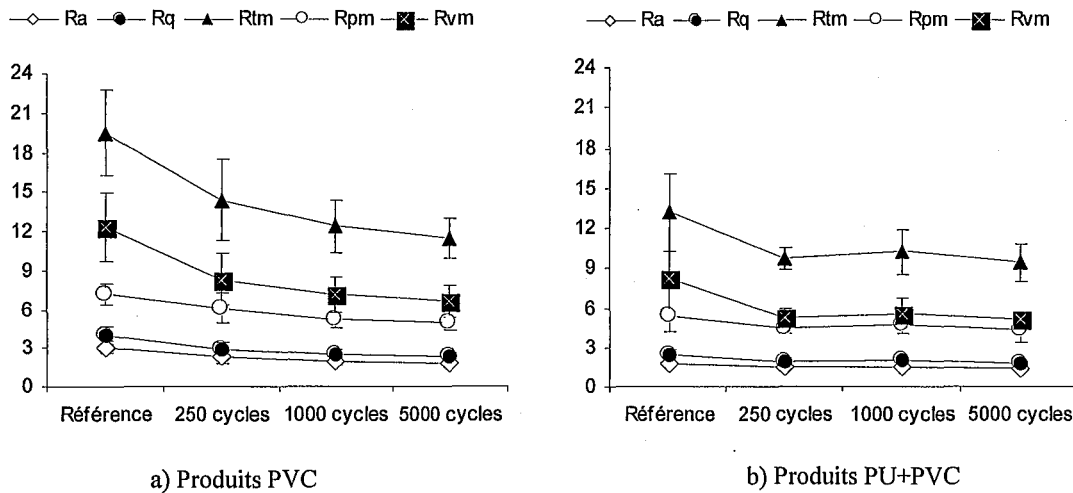


Figure IV-4: Représentation graphique de l'évolution des paramètres de rugosité durant le test Frick Taber (en micromètres).

Nous voyons que les deux produits tendent à avoir la même topographie de surface. Nous retrouvons ici le fait que le test génère un état de surface qui lui est spécifique, avec une topographie bien définie. Nous pouvons voir que les importantes différences initiales entre la topographie des deux produits ont un impact sur le test, car la hauteur moyenne de rugosité du PVC décroît pendant les 5000 cycles de test (de 19.5 micromètres jusqu'à 11.4 micrometers – avec la majeure partie des transformations effectuée après 1000 cycles), alors que celle du PU+PVC atteint une valeur stable après 250 cycles (environ 9.7 micromètres).

Ce comportement confirme l'existence d'une topographie spécifique au test, atteinte plus tôt par les produits PU+PVC. Nous pouvons supposer que si nous augmentons le nombre de cycles de Frick Taber sur les échantillons PVC, leur topographie évoluera jusqu'à atteindre celle mesurée sur les produits PU+PVC.

□ Courbes Ek-Sk

L'approche Ek-Sk est bien adaptée pour l'étude d'une abrasion pure progressive. Ici, à cause de l'agressivité du test, l'évolution des couples (E_k , S_k) avec l'augmentation du nombre de cycles est en **désaccord total** avec un tel processus d'endommagement idéal (figure IV-5).

Plutôt que de suivre le modèle théorique, correspondant à une abrasion douce des aspérités de surface, les couples (E_k , S_k) tendent à se rapprocher de l'origine : l'asymétrie et la finesse du profil décroissent. En prenant en compte la décroissance des paramètres d'amplitude, nous retrouvons à nouveau la notion de transformation de la géométrie globale de la surface, des pics aux vallées : l'abrasion au cours du test Frick Taber n'est pas localisée au niveau des aspérités de la surface, même durant les premières étapes du test (250 cycles), mais est effective sur l'entièreté de la hauteur de profil.

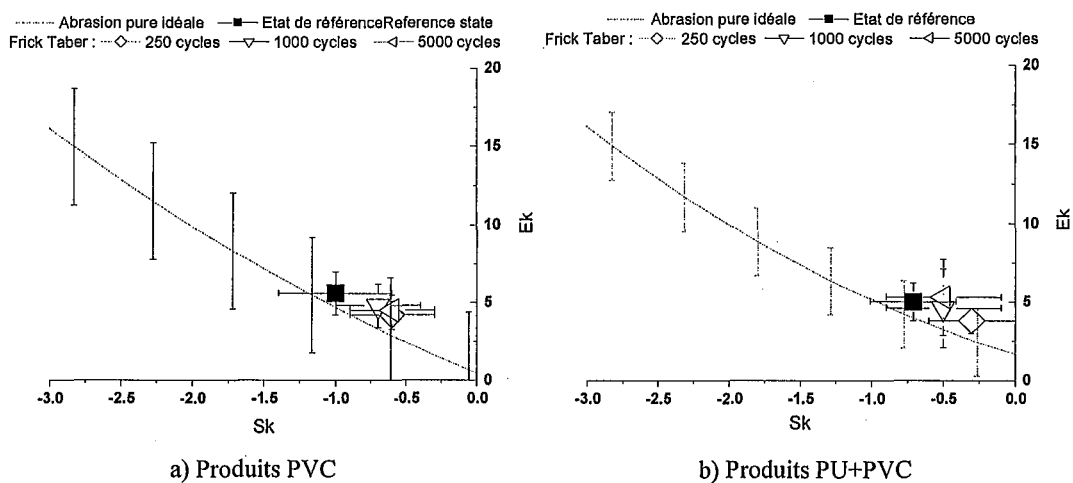


Figure IV-5 : Représentation graphique de l'évolution des paramètres de symétrie durant le test Frick Taber.

□ Courbes d'Abbott-Firestone

Comme le test Frick Taber impose sa géométrie sur les surfaces testées dès 250 cycles, le critère à 90 % n'est clairement pas satisfait. Les profils sont modifiés des aspérités aux vallées, comme le montrent les courbes d'Abbott-Firestone (figure IV-6). L'impact des différences initiales entre les deux produits, mis en évidence par l'évolution des paramètres d'amplitude, est visible sur ces courbes : après 250 cycles, le test Frick Taber continue de transformer significativement la topographie de la surface PVC, jusqu'à environ 1000 cycles. La surface PVC devient ensuite plus proche de son état d'équilibre, imposé par le Frick Taber.

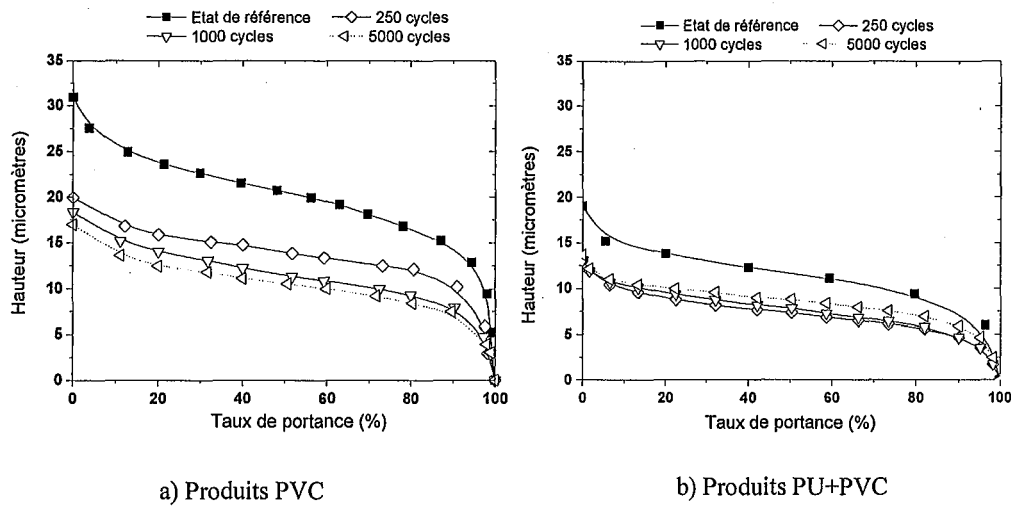


Figure IV-6: Evolution des courbes de taux de portance durant le test Frick Taber.

IV.1.6 Le test Frick Taber : conclusions sur le processus d'usure globale

La macro-abrasion de la surface des échantillons (des aspérités jusqu'aux vallées) est le principal processus d'endommagement durant le test Frick Taber, dès 250 cycles.

Les deux conséquences principales de cette macro-abrasion sont :

- Le test Frick Taber est pratiquement insensible à la surface testée, et rend équivalentes les résistances à l'usure des deux produits étudiés (dans la limite des observations effectuées).
- Ce processus n'est pas en adéquation avec les observations en conditions réelles d'utilisation.

Cette macro-abrasion est si importante (voir figure IV-7) que l'approche Ek-Sk **n'est pas capable** de la mettre en évidence : transformant entièrement la topographie de la surface testée, son impact sur la distribution des hauteurs de profil empêche de satisfaire le critère à 90 %. L'approche Ek-Sk a donc besoin de développements ultérieurs pour être applicable lorsqu'une telle abrasion, très sévère, est en jeu ; et surtout si l'on souhaite pouvoir évaluer le

niveau d'abrasion. Néanmoins, dans notre cas, d'autres outils comme la profilométrie standard peuvent être utilisés pour déterminer ce niveau d'abrasion ; l'approche Ek-Sk actuelle peut alors donner des informations secondaires sur le processus d'abrasion.

Mais lorsque le niveau d'abrasion est plutôt faible – voire inaccessible par une méthode directe, à cause d'une topographie initiale marquée, par exemple ; et si les conditions de test sont telles que la surface testée n'est pas trop polluée par les troisième corps, l'approche Ek-Sk apparaît comme un outil puissant pour déterminer le niveau d'abrasion, comme nous allons le voir lors du test Lisson.

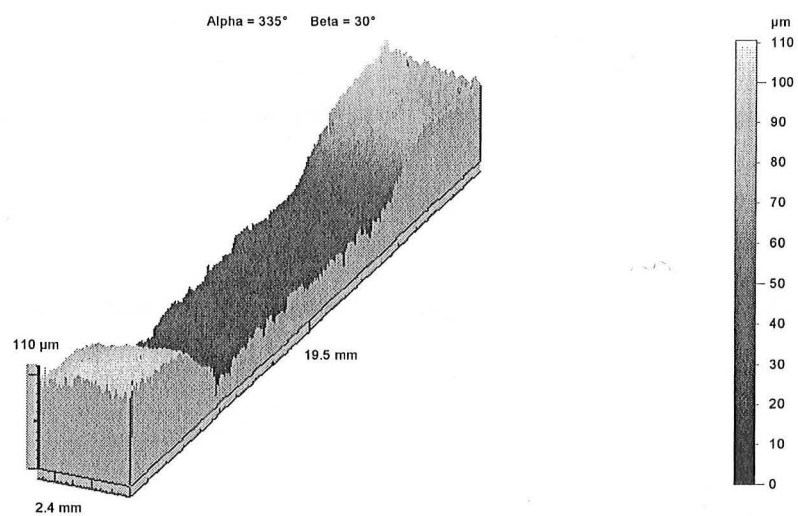


Figure IV-7: Mesure topographique 3D d'un échantillon PVC soumis à 5000 cycles de Frick Taber. Nous pouvons voir le fort impact du test, qui abrase jusqu'à 50 micromètres de la surface de l'échantillon, le long d'une couronne large de 10 mm.

IV.2 RÉSULTATS DU TEST D'USURE LISSON STANDARD

Cinq états ont été étudiés : 200, 400, 600, 800, 2000 cycles (au moins un échantillon dans chaque cas). Même si ce test a été initialement conçu pour des revêtements de sol moquette, il reste néanmoins très pertinent comme outil pour caractériser l'usure de revêtements de sol résilients – en particulier de par la nature et le niveau des sollicitations appliquées. Cependant, certaines adaptations semblent nécessaire.

IV.2.1 Observations visuelles et mesures topographiques 3D

IV.2.1.1 Usure Lisson des produits PVC

Les résultats après 2000 cycles de Lisson sont présentés sur les figures IV-8 (micrographies) et IV-9 (topographie 3D).

Contrairement au test Frick Taber, le test Lisson **tend à augmenter la brillance de la surface** (cet effet est encore plus fort pour les produits PU+PVC). Cet accroissement peut être relié à la formation de plateaux locaux, larges, réfléchissant la lumière de manière cohérente. La figure IV-8 montre ces nouveaux plateaux à la surface du PVC. Deux processus indépendants pourraient expliquer une telle évolution :

1. Une abrasion pure, progressive, des aspérités, ainsi transformées en plateaux ;
2. Une déformation visco-élasto-plastique déplaçant la matière des aspérités vers les vallées environnantes.

Nous verrons au prochain chapitre que dans sa forme standard, pour les produits PVC, le test Lisson génère principalement une abrasion pure et progressive des aspérités. Ainsi, ce test apparaît comme un test abrasif mieux adapté pour simuler l'usure des revêtements de sol, contrairement au test Frick Taber qui génère une abrasion bien plus sévère.

La figure IV-9 montre que le test Lisson donne à la surface une certaine orientation topographique : en simulant l'action de la marche, ce test est nécessairement directionnel.

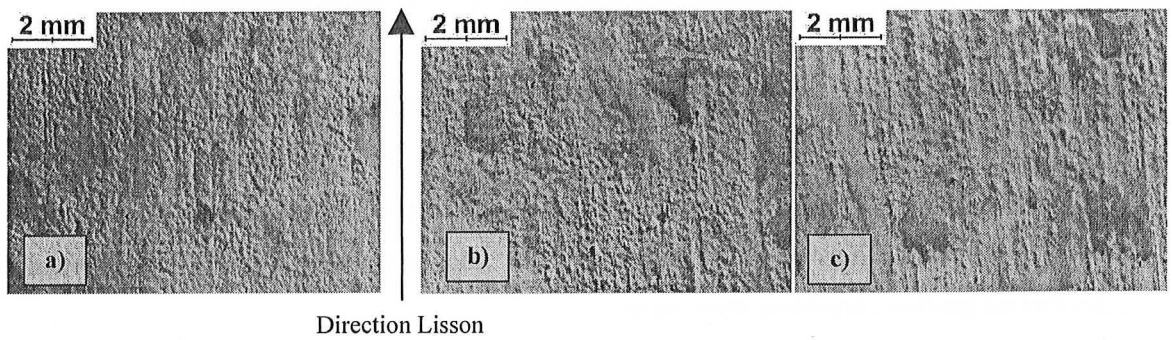


Figure IV-8: Micrographies optiques des produits PVC.
 a) Référence b) Après 200 cycles de Lisson c) Après 2000 cycles de Lisson

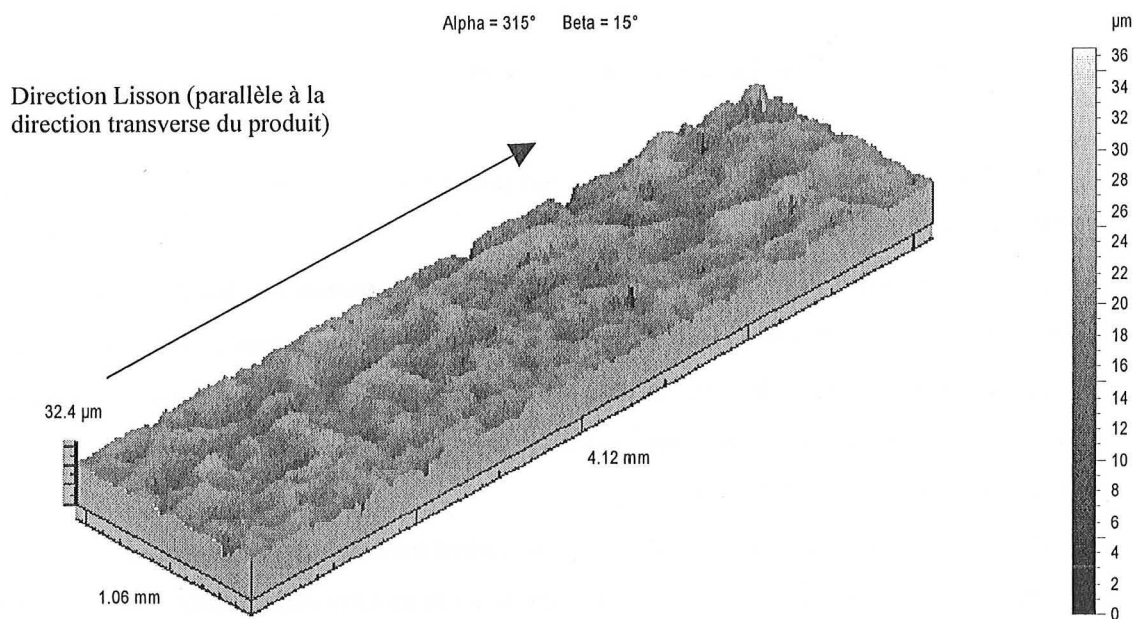


Figure IV-9: Mesure topographique 3D d'un échantillon PVC soumis à 2000 cycles de test Lisson. $\lambda_c = 0.8$ mm.

IV.2.1.2 Usure Lisson des produits PU+PVC

Les produits PU+PVC sont plus brillants après le test Lisson. À nouveau, la réalité n'est pas correctement simulée, car aucun des défauts apparaissant sur le test grandeur nature ne semble avoir été reproduit par ce test. Les plateaux mentionnés pour les produits PVC semblent apparaître également sur les produits PU+PVC (voir figure IV-11, aplatissement local des aspérités entourées).

Ainsi, visuellement, les deux produits semblent avoir le même comportement.

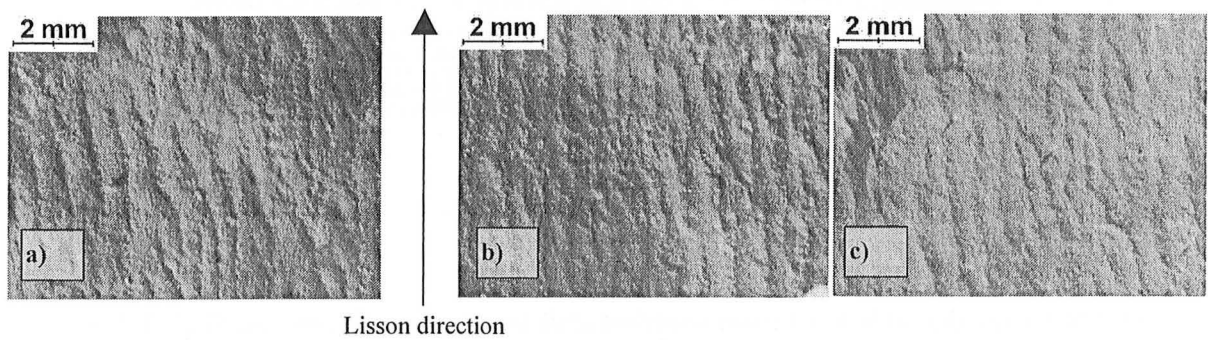


Figure IV-10: Micrographies optiques des produits PU+PVC.
a) Référence b) Après 200 cycles de Lissan c) Après 2000 cycles de Lissan.

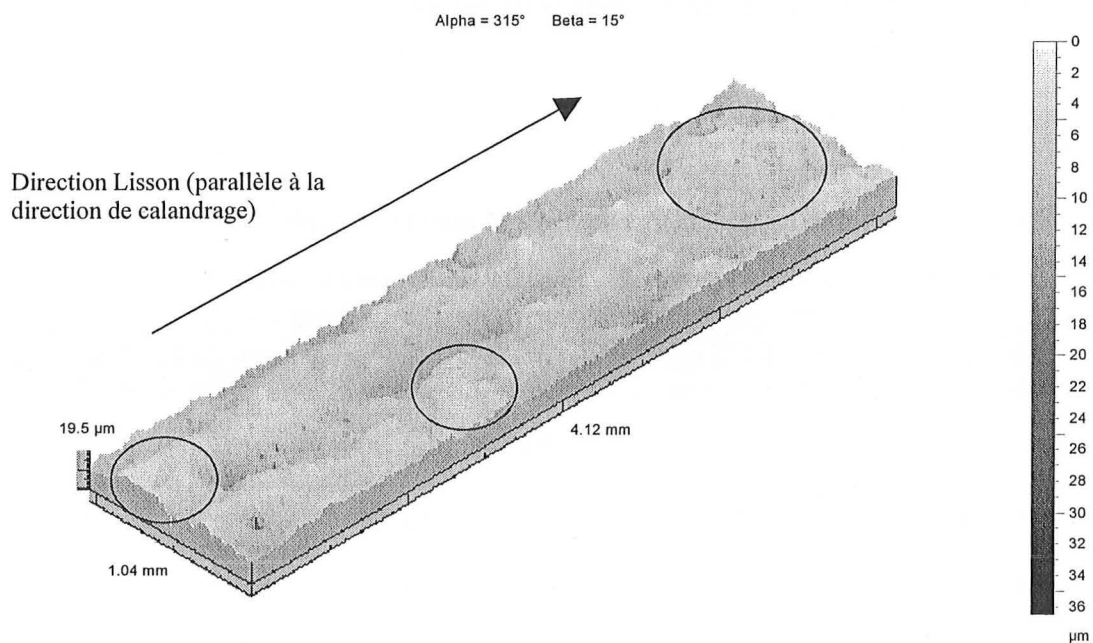


Figure IV-7: Mesure topographique 3D d'un échantillon PU+PVC soumis à 2000 cycles de test Lissan. $\lambda_c = 0.8$ mm.

IV.2.2 Evolution de l'épaisseur de la couche PU

L'épaisseur de la couche PU, évaluée sur les micrographies optiques transverses, évolue dès les premiers cycles du test Lissan (perte d'environ 0.7 micromètre après 200 cycles, avec un écart-type égal à celui de l'état de référence). Par la suite, cette épaisseur ne va plus trop varier, même après un nombre de cycles 10 fois supérieur (tableau IV-5).

Tableau IV-5: Evolution de l'épaisseur de la couche de PU durant le test Lisson.

<i>Etat de surface</i>	<i>Epaisseur de la couche de PU (moyenne +/- un écart-type) [micromètre]</i>
Référence	8.4 ^{+/-3.4}
Lisson 200	7.7 ^{+/-3.2}
Lisson 2000	7.5 ^{+/-3.4}

L'évolution de l'épaisseur de la couche de PU est proche de celle observée en réalité ; les niveaux d'usure durant le test Lisson semblent réalistes (comparés à ceux du Frick Taber).

IV.2.3 Evolution des paramètres de rugosité

IV.2.3.1 Produits PVC

Le tableau IV-6 présente les paramètres de rugosité pour les produits PVC.

Tableau IV-6: Evolution des paramètres de rugosité durant le test Lisson ($\lambda_c=0.8$ mm). Produits PVC.

Paramètre	PVC Etat de référence	PVC 200 cycles Lisson	PVC 400 cycles Lisson	PVC 600 cycles Lisson	PVC 800 cycles Lisson	PVC 2000 cycles Lisson
<i>Amplitude</i>						
Ra [μm]	3.1 ^{+/-0.5}	2.4 ^{+/-0.3}	2.3 ^{+/-0.3}	2.2 ^{+/-0.2}	2.2 ^{+/-0.2}	2.0 ^{+/-0.3}
Rq [μm]	4.0 ^{+/-0.7}	3.2 ^{+/-0.4}	3.1 ^{+/-0.4}	3.0 ^{+/-0.3}	2.9 ^{+/-0.3}	2.8 ^{+/-0.5}
Rtm [μm]	19.5 ^{+/-3.2}	15.9 ^{+/-2.0}	16.3 ^{+/-2.4}	15.7 ^{+/-1.7}	14.9 ^{+/-1.3}	14.5 ^{+/-2.6}
Rpm [μm]	7.2 ^{+/-0.8}	6.0 ^{+/-0.8}	6.0 ^{+/-0.9}	5.8 ^{+/-0.8}	5.5 ^{+/-0.1}	4.7 ^{+/-1.0}
Rvm [μm]	12.3 ^{+/-2.6}	9.8 ^{+/-1.6}	10.1 ^{+/-2.1}	9.9 ^{+/-1.0}	9.3 ^{+/-1.1}	9.7 ^{+/-2.1}
<i>Symétrie/ADF</i>						
Ek	5.6 ^{+/-1.4}	6.7 ^{+/-2.6}	6.8 ^{+/-2.3}	8.1 ^{+/-3.1}	7.2 ^{+/-1.2}	9.9 ^{+/-5.1}
Sk	-1.0 ^{+/-0.4}	-1.3 ^{+/-0.5}	-1.1 ^{+/-0.5}	-1.3 ^{+/-0.5}	-1.3 ^{+/-0.1}	-1.8 ^{+/-0.7}
<i>Etalement</i>						
Sm [μm]	100.0 ^{+/-10}	99.0 ^{+/-8.0}	95.0 ^{+/-15.0}	92.0 ^{+/-12.0}	92.0 ^{+/-9.0}	94.0 ^{+/-10.0}

L'existence d'une **période de rôdage** est confirmée par l'évolution des paramètres de rugosité avec le nombre de cycles. Les principales modifications sur les paramètres d'amplitude ont lieu durant les 200 premiers cycles ; ensuite, la géométrie de la surface PVC continue à évoluer, mais de manière moins marquée (sauf pour le paramètre R_{vm} , qui lui reste constant). Il s'agit là d'une conséquence directe du processus d'abrasion progressive initié par le test Lisson, qui engendre une décroissance du paramètre Sk et une augmentation du paramètre Ek . Le paramètre d'étalement Sm décroît légèrement (- 6 % après 2000 cycles) ; comme les valeurs moyennes et extrêmes de Sm ont toutes diminuées, et que l'écart-type sur ces valeurs est resté constant, nous pouvons dire que ce comportement est significatif (translation relativement homogène de l'ensemble du domaine vers des valeurs plus petites).

IV.2.3.2 Produits PU+PVC

À nouveau, nous voyons que le principal impact sur les paramètres d'amplitude apparaît durant les 200 premiers cycles (tableau IV-7). La perte d'amplitude continue jusqu'à 2000 cycles, mais cette légère décroissance est secondaire comparée à l'évolution des paramètres de symétrie : comme pour les produits PVC, l'asymétrie et l'aplatissement du profil augmentent (Sk de plus en plus négatif, Ek croissant). Ce comportement est compatible avec l'hypothèse de formation de plateaux (voir paragraphe IV.2.4), et, par là, les échantillons usés devraient être plus brillants qu'à l'état de référence – ce que nous constatons visuellement.

L'anisotropie sur les paramètres d'étalement est conservée durant le test Lisson, et même accentuée : à l'échelle de la rugosité (c.à-d. à l'échelle du contact), la distance moyenne pic-à-pic Sm augmente dans les deux directions du plan, et particulièrement dans la direction transverse au produit (perpendiculaire à la direction Lisson). Cet effet (croissance dans les deux directions malgré que le test soit principalement unidirectionnel) est probablement relié à la rhéologie des produits testés, mous et complaisants.

Tableau IV-7 : Evolution des paramètres de rugosité durant le test Lisson ($\lambda_c=0.8$ mm). Produits PU+PVC.

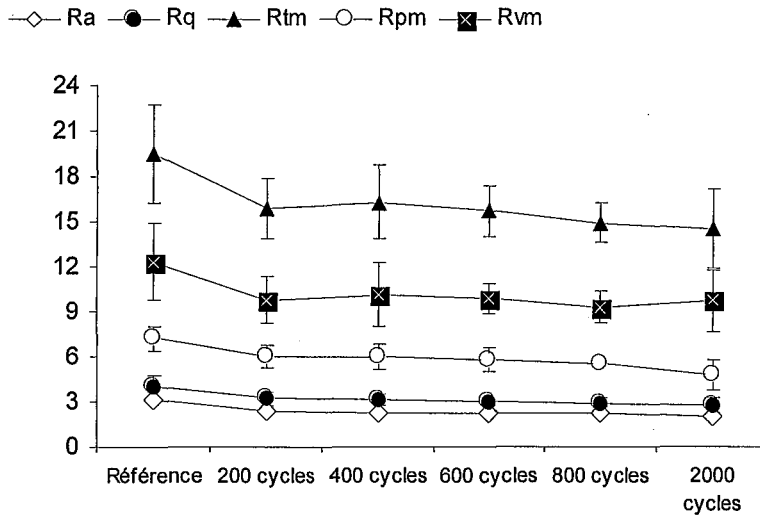
Paramètre	PU+PVC Etat de référence	PU+PVC 200 cycles Lisson	PU+PVC 400 cycles Lisson	PU+PVC 600 cycles Lisson	PU+PVC 800 cycles Lisson	PU+PVC 2000 cycles Lisson	
<i>Amplitude</i>							
Ra [μm]	1.8 ± 0.3	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.1	1.4 ± 0.3	
Rq [μm]	2.4 ± 0.4	1.9 ± 0.2	1.8 ± 0.3	1.8 ± 0.2	1.7 ± 0.2	1.8 ± 0.3	
Rtm [μm]	13.2 ± 2.9	9.8 ± 1.3	9.7 ± 1.3	9.3 ± 1.2	9.0 ± 0.8	9.4 ± 1.6	
Rpm [μm]	5.4 ± 1.2	4.1 ± 0.7	3.9 ± 0.6	3.7 ± 0.5	3.6 ± 0.4	3.5 ± 1.0	
Rvm [μm]	8.2 ± 2.1	5.7 ± 0.7	5.8 ± 0.9	5.6 ± 0.9	5.4 ± 0.8	5.9 ± 0.9	
<i>Symétrie/ADF</i>							
Ek	5.0 ± 1.2	4.7 ± 1.8	4.8 ± 0.9	5.2 ± 1.6	5.3 ± 1.5	6.2 ± 2.5	
Sk	-0.7 ± 0.3	-0.6 ± 0.3	-0.7 ± 0.3	-0.7 ± 0.3	-0.8 ± 0.4	-1.0 ± 0.4	
<i>Etalement</i>							
Sm [μm]	PD ^{*)} :	65.0 ± 6.0	69.0 ± 5.0	68.0 ± 7.0	69.0 ± 8.0	73.0 ± 7.0	73.0 ± 5.0
	TD ^{*)} :	80.0 ± 9.0	86.0 ± 6.0	88.0 ± 11.0	87.0 ± 8.0	93.0 ± 6.0	105.0 ± 17.0
*)PD: direction de clandrage, TD: direction transverse							

IV.2.4 Résultats du test Lisson étudiés via l'approche Ek-Sk

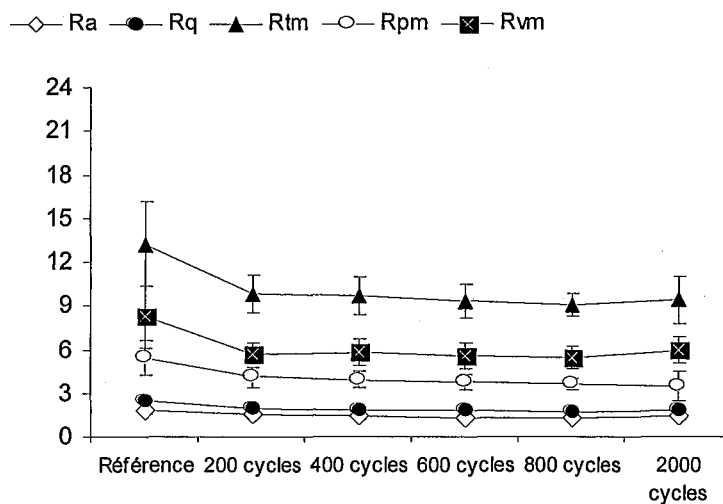
L'approche Ek-Sk montre que le test Lisson génère une abrasion pure progressive de nos produits (au moins après 200 cycles). Nous analyserons donc plus en détails les résultats issus de cette démarche.

□ Paramètres d'amplitude

La figure IV-11 suivante montre que les hauteurs des profils de rugosité décroissent avec le niveau d'usure, de manière analogue (qualitativement) à ce qui est obtenu lors de l'emboutissage de tôles d'acier [34,51].



a) Produits PVC



b) Produits PU+PVC

Figure IV-11 : Evolution des paramètres de rugosité durant le test Lisson [micromètres]

Ce comportement, plus marqué pour les produits PVC (sauf pour le paramètre Rvm, pratiquement constant), est particulièrement visible durant la première étape du test (200 cycles). D'un point de vue qualitatif, nous sommes ici en accord avec l'évolution théorique des paramètres d'amplitude (figure III-28), c.à-d. une décroissance de Rtm, Rpm, Ra et Rq à

paramètre Rvm pratiquement constant. Après 200 cycles, les variations absolues sont identiques pour les deux produits (voir tableau IV-6 et IV-7) :

$$\Delta Rtm_{0 \rightarrow 200}^{PVC} = 3.6 \text{ micromètres}, \quad \Delta Rtm_{0 \rightarrow 200}^{PU+PVC} = 3.4 \text{ micromètres}$$

Cependant, après 2000 cycles, Rtm décroît moins pour le produit PU+PVC :

$$\Delta Rtm_{0 \rightarrow 2000}^{PVC} = 5.0 \text{ micromètres}, \quad \Delta Rtm_{0 \rightarrow 2000}^{PU+PVC} = 3.8 \text{ micromètres}$$

Néanmoins :

- La saturation de Rvm (malgré la légère croissance à 2000 cycles) entre 200 et 2000 cycles pour le produit PU+PVC n'est pas conforme aux résultats obtenus pour l'acier mentionné précédemment ;

Note: nous ne devons pas oublier que l'approche Ek-Sk est très bien adaptée pour l'acier – matériau élastique parfaitement plastique. Les polymères sur lesquels nous avons appliqué cette méthode ont **une forte dimension visqueuse**, ce qui rend cette approche assez délicate à transposer.

- De plus, le paramètre d'asymétrie Rvm/Rpm n'augmente pas durant l'usure comme la simulation mathématique de l'abrasion le prévoit (voir tableau IV-8 suivant, dans lequel nous avons indiqué la valeur théorique des paramètres d'amplitude pour des niveaux de paramètre Rtm correspondant à ceux mesurés après 200 et 2000 cycles de Lisson).

Tableau IV-8: Comparaison des valeurs de rugosité théoriques et mesurées, pour des niveaux d'abrasion équivalents (c.à-d. à Rtm égaux) pour les deux produits.

			Rtm	Ra	Rq	Rpm	Rvm	Rvm/Rpm
P V C	200	Modèle [μm] (troncature 7 μm)	15.90	2.60	3.50	4.40	11.40	2.60
		Test [μm]	15.90	2.40	3.20	6.00	9.80	1.60
		Rapport modèle/test[]	1.00	1.08	1.09	0.73	1.16	1.63
	2000	Modèle [μm] (troncature 8.5 μm)	14.50	2.40	3.20	3.60	11.00	3.00
		Test [μm]	14.50	2.00	2.80	4.70	9.70	2.10
		Rapport modèle/test[]	1.00	1.20	1.14	0.77	1.13	1.43
P U + P V C	200	Modèle [μm] (troncature 6.5 μm)	9.80	1.30	1.80	2.30	7.20	3.10
		Test [μm]	9.80	1.50	1.90	4.10	5.70	1.40
		Rapport modèle/test[]	1.00	0.87	0.95	0.56	1.26	2.21
	2000	Modèle [μm] (troncature 6.7 μm)	9.40	1.30	1.80	2.20	7.20	3.30
		Test [μm]	9.40	1.40	1.80	3.50	5.90	1.70
		Rapport modèle/test[]	1.00	0.93	1.00	0.63	1.22	1.94

Nous voyons dans ce tableau que le modèle d'abrasion pure et la simulation Lisson sont en accord pour le produit PVC : les paramètres d'amplitude sont proches, surtout si nous prenons en compte leur écart-type. Néanmoins, le test Lisson ne génère pas des vallées aussi profondes que prévues (environ 15 % moins profondes). Cette différence traduit une abrasion moins sévère durant le test Lisson que durant l'usinage mathématique, qui sera nécessairement visible sur les paramètres Sk et Ek . Nous pouvons expliquer cet écart en prenant en compte le fait que sur nos produits complaisants, l'abrasion douce s'accompagne nécessairement d'une certaine quantité de **déformation visco-élasto-plastique**. Le modèle mathématique reproduit simplement la partie abrasive pure de l'usure. En conséquence, à niveau de R_{tm} résiduel équivalent, les aspérités ne sont pas totalement transformées en plateaux parfaits durant le test Lisson ; leurs amplitudes sont moins affectées par le processus d'abrasion, ce que nous confirmons en comparons les évolutions théoriques, et celles induites par le Lisson, du paramètre R_{pm} . Nous pouvons néanmoins conclure que **le modèle d'abrasion progressive représente bien le test Lisson**.

En ce qui concerne le produit PU+PVC :

- Pour R_a et R_q , le rapport entre la simulation mathématique et les résultats Lisson est proche de 1. En prenant en compte la dispersion, la correspondance semble satisfaisante ;
- Le déséquilibre entre R_{pm} et R_{vm} est plus important (les vallées sont pratiquement 25 % plus profondes que lors de la troncature mathématique). Les aspérités après 200 et 2000 cycles sont significativement plus hautes qu'escompté d'après le modèle. Ceci pourrait être une conséquence directe des importantes propriétés de recouvrance de la couche PU (comme montré lors des essais de nano-rayure, voir figure III-16), impliquant une troncature moins importante au niveau des aspérités. En conséquence, la profondeur des vallées est moins affectée que durant la simulation mathématique.

□ Courbe d'Abbott-Firestone

La figure IV-12 montre l'incidence du test Lisson sur les courbes de portance.

Pour les produits PVC, la **superposition des taux de portance** entre 90 % et 100 % est acceptable de 200 à 2000 cycles. **Les vallées sont préservées**. Nous observons bien la formation des plateaux (les portions linéaires des courbes de portance de référence deviennent de plus en plus horizontales – une fraction croissante des surfaces de référence se retrouve à la même altitude), avec toujours la présence d'une **rugosité résiduelle** au niveau de ces plateaux

(épaule sur les courbes aux taux de portance faibles, combinée à une pente non-nulle dans le domaine linéaire de la courbe).

Pour les produits PU+PVC, cette procédure devient **limitée** après 200 cycles:

- La portion linéaire de la courbe de portance ne devient pas horizontale lorsque le nombre de cycles augmente (la pente de cette portion décroît après 200 cycles, puis reste constante);
- Les courbes de 200 à 2000 cycles ont la même forme, et peuvent être obtenue par une simple translation verticale de l'une vers l'autre (grossièrement, une translation de seulement 0.4 μm entre la courbe après 200 cycles et celle après 2000 cycles) ;
- Le critère à 90 % n'est pas vraiment satisfait : le domaine de superposition semble seulement s'étaler de 95 % à 100 %, ce qui correspond à une profondeur résiduelle moyenne de vallée d'environ 2.5 μm (à comparer avec la profondeur initiale moyenne de vallée à 90 % égale à 7.0 μm). Ainsi, il semble que la rugosité globale est maintenant définie par la rugosité résiduelle au niveau des plateaux.

Globalement, la courbe de portance est transformée durant les 200 premiers cycles, pour ensuite rester pratiquement constante jusqu'à 2000 cycles. La rhéologie du matériau devrait à nouveau être la clé pour expliquer ce comportement. En plus du faible niveau d'abrasion qu'on pourrait observer durant le test Lisson, la surface PU+PVC devrait répondre aux forces appliquées par une déformation visco-élasto-plastique, induisant une redistribution des hauteurs. Cet effet ne semble pas être appréciable sur le produit PVC.

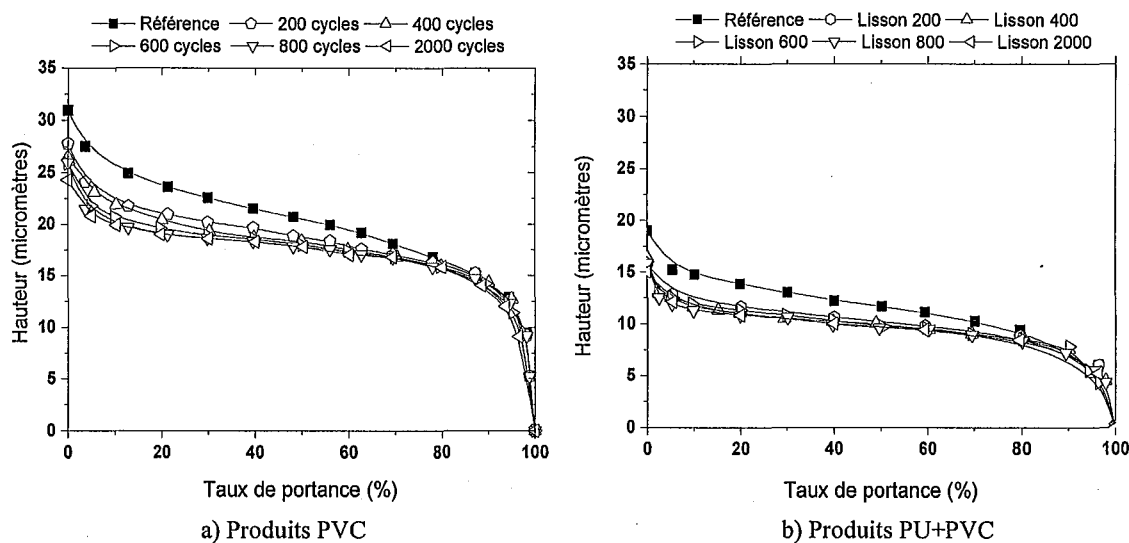


Figure IV-12 : Evolution des courbes de portance durant le test Lisson.

□ Courbes Ek-Sk

Nous avons représenté sur la figure IV-13 les couples (Ek,Sk) pour une étude statistique détaillée de la progression de l'usure, pour les deux produits. Les figures IV-13a et IV-13b montrent tous les couples (pour les états de référence, 200 et 2000 cycles) obtenus d'après les huit profils étudiés par état d'usure. Nous voyons sur ces graphiques que pour chaque état d'usure, les données sont dispersées en un nuage de points, dont le centre de gravité s'éloigne de l'origine lorsque le nombre de cycles augmente (à part pour les données PU+PVC après 200 cycles de Lisson, qui elles restent dans l'intervalle défini par les points de référence). De plus, tous les couples sont alignés avec le motif de dispersion défini par la simulation de l'abrasion pure via l'approche Ek-Sk. Les déviations de ce comportement global ne sont perceptibles que pour les couples (Ek, Sk) de forte amplitude ; ceci peut s'expliquer en admettant que les huit profils considérés, pour chaque état, correspondent **localement à un niveau d'abrasion différent**.

Cette hypothèse sera confirmée lorsque nous incluerons un troisième corps/agent salissant dans la procédure Lisson, qui révélera les différents changements esthétiques sur l'échantillon le long de la trace d'usure (c.à-d. dans le sens de la marche). Cet effet est clairement symptomatique de conditions de contact différentes, et certainement de niveau d'usure différents, à l'intérieur de la zone de contact revêtement de sol/tetrapode Lisson.

Sur les figures IV-13c et IV-13d (représentant les valeurs moyennes) le processus d'abrasion pure durant le test Lisson est **clairement confirmé** pour le produit PVC. Lorsque le nombre de cycles Lisson augmente, les couples (Ek, Sk) suivent la parabole théorique d'abrasion pure. Ce comportement est **moins évident** pour le produit PU+PVC : aux faibles nombres de cycles, les paramètres de symétrie semblent rester dans le domaine de référence (voire même se rapprocher de l'origine après 200 cycles, voir tableau IV-7), pour ensuite, après 2000 cycles, tendre globalement vers le comportement attendu (décroissance de Sk, croissance de Ek), avec une légère déviation pour les valeurs de Ek les plus importantes. Il est donc fort probable que même si, globalement, le produit PU+PVC est abrasé durant le test Lisson, la meilleure capacité de recouvrance visco-élasto-plastique de ce produit induira, par exemple, la coalescence de certaines aspérités voisines, changeant par là la topographie du produit.

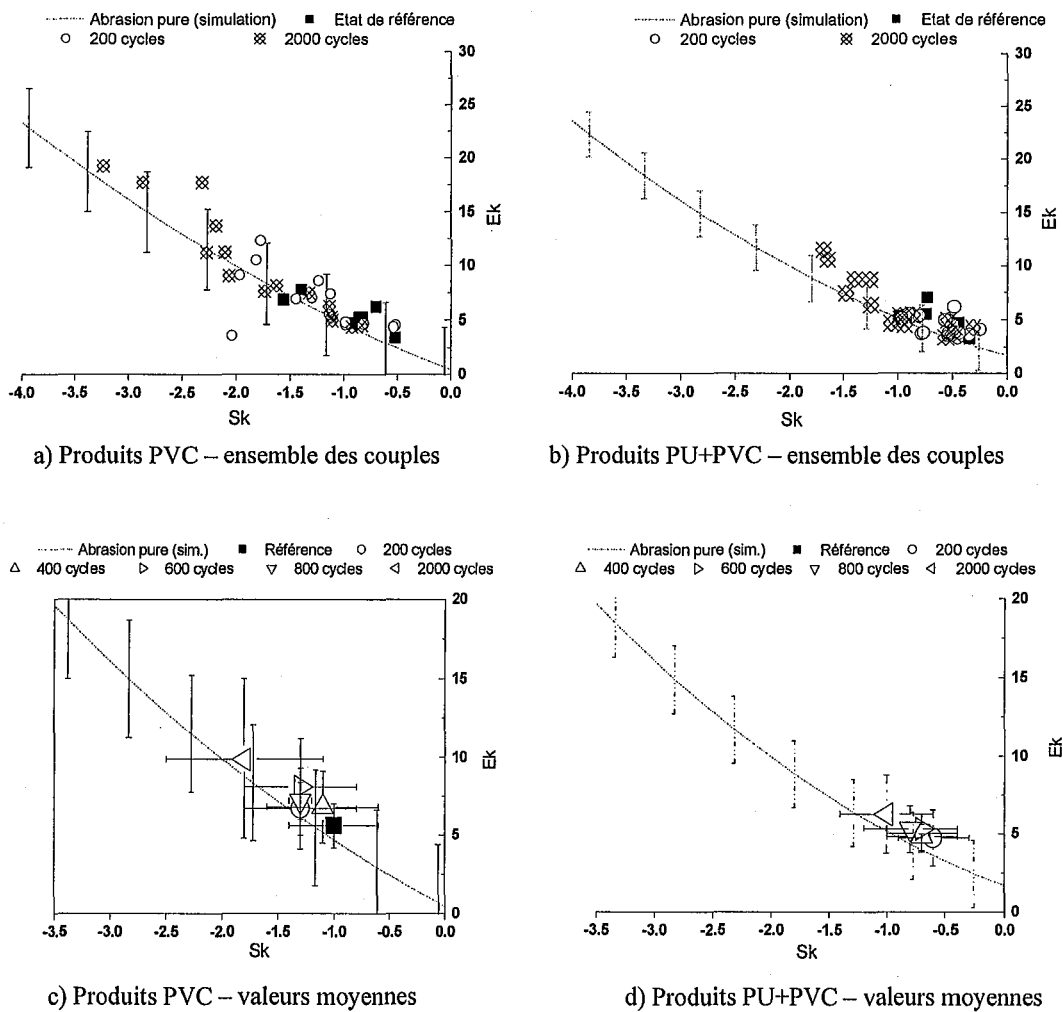


Figure IV-13 : Evolution des paramètres de symétrie durant le test Lisson.

IV.2.5 Le test Lisson : conclusions sur le processus d'usure globale

Globalement, durant le test Lisson et jusqu'à 2000 cycles, les deux produits sont abrasés – avec un niveau d'abrasion (en termes de perte globale de hauteur) faible comparé à la forte accommodation visco-élastique des sollicitations appliquées, et la recouvrance associée : le schéma global d'une abrasion progressive telle que simulée durant l'usinage mathématique est observée dans les deux cas.

Nous pouvons donc utiliser le paramètre $\Delta Rtm(2000/00)$ comme outil d'évaluation du niveau d'abrasion :

$$\Delta Rtm_{0 \rightarrow 2000}^{PVC} = 5.0 \text{ micromètres}, \quad \Delta Rtm_{0 \rightarrow 2000}^{PU+PVC} = 3.8 \text{ micromètres}$$

Ainsi, le test Lisson, en abrasant progressivement la surface testée, **permet de discriminer** les deux produits par leur résistance à l'usure.

Dans ce cas, le produit PU+PVC semble **mieux** supporter ce test car :

- ❑ Le niveau d'abrasion est pratiquement 25 % plus bas que pour le produit non revêtu ;
- ❑ La couche de PU engendre une réponse complexe du revêtement de sol, une combinaison de déformation visco-élasto-plastique et d'abrasion. La rhéologie du PU empêche l'initiation de l'abrasion comme processus d'endommagement unique.

Nous reproduisons pratiquement le constat effectué par les clients.

Mais le trafic réel n'est pas toujours pas correctement simulé :

- ❑ L'esthétique des produits usés est en désaccord total avec les résultats obtenus en conditions réelles d'utilisation ;
- ❑ Même si l'approche Ek-Sk permet de discriminer les deux produits d'après leur résistance à l'usure, la topographie des produits usés n'est pas la même que celle issue des conditions réelles d'utilisation.
- ❑ Les défauts majeurs (rayures) ne sont pas abordés.

IV.3 RÉSULTATS DU TEST GRANDEUR NATURE

Trois états du test grandeur nature ont été étudiés : après 3 mois, 9 mois et 12 mois de trafic.

Le nombre de passages (sur l'ensemble du test grandeur nature) correspondant est :

- 3 mois : 8 534 passages;
- 9 mois : 24 035 passages;
- 12 mois : 32 059 passages.

IV.3.1 Inspection visuelle et mesures topographiques 3D

IV.3.1.1 Produits PVC

Six défauts de surface ont été observés sur les échantillons PVC. Nous les présentons du moins visible au plus visible :

1. Trous ;
2. Piqûres ;
3. Lézardes [52];
4. Transferts permanents ;
5. Rayures fines ;
6. Rayures macroscopiques.

□ Trous

Même si certains trous sont consécutifs au processus de calandrage (voir paragraphe III.1.3), la plupart d'entre eux apparaissent suite au trafic réel. Après trois mois de test grandeur nature, au moins 31 trous ont été créés à la surface du PVC, amenant une densité de trous après 8534 passages égale à :

$$D_{\text{trou}}^{8534} = 7.75 * 10^{-3} \text{ trous / cm}^2$$

La densité de trous pour la surface de référence (surface non usée, issue de la ligne de fabrication) est :

$$D_{\text{trou}}^0 < 1 * 10^{-3} \text{ trous / cm}^2$$

La taille typique des trous consécutifs à l'usure est du même ordre de grandeur que celle des trous initiaux (quelques centaines de micromètres de diamètre et de profondeur).

L'usure réelle tend donc à enlever localement de petits volumes de matière, comme, probablement, un petit additif, ou une particule de polymère infondue durant le processus de fabrication (voir figure IV-14).

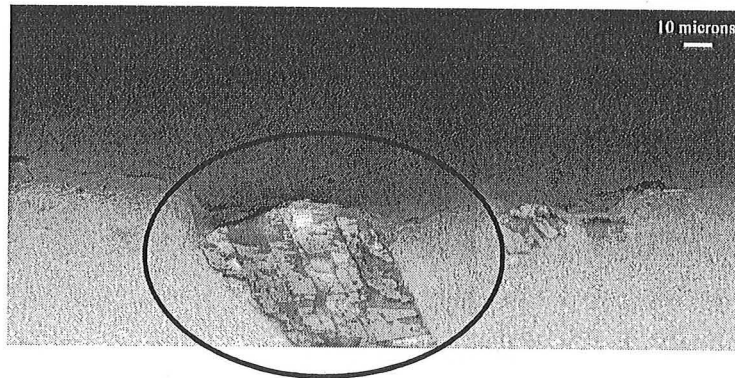


Figure IV-14: Micrographie optique d'une coupe transverse de produit PVC. La particule d'infondu de polymère est bien visible.

□ Piqûres

Les piqûres, existantes sur les échantillons de référence (mais difficile à observer), sont mises en évidence par le trafic car la salissure est piégée par ces défauts. Très nombreuses et facilement visibles sur les surfaces usées, les piqûres ont une taille typique de l'ordre de la dizaine de micromètres (figure IV-15). Il est impossible de dire si les piqûres apparaissent en cours de trafic.

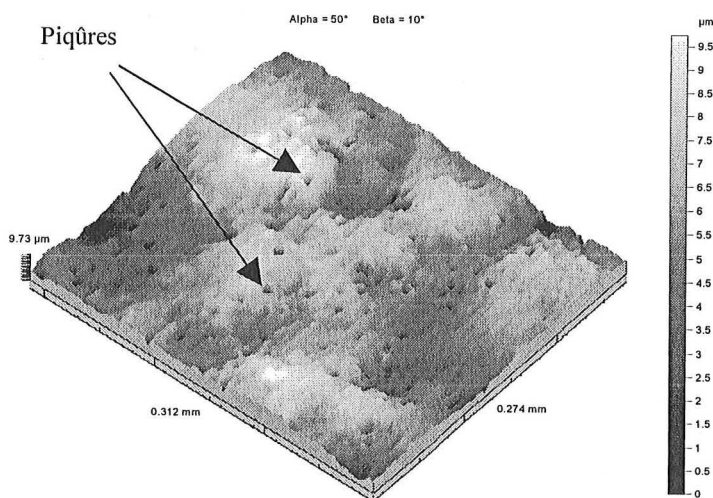


Figure IV-15: Mesures 3D des piqûres sur le produit PVC.

□ Lézardes

La norme ISO 8785:1998 [52] définit les lézardes comme “des fentes étroites à bords vifs et irréguliers, de faible profondeur”. Ces défauts sont présents sur les échantillons de références, où comme les piqûres, ils sont difficiles à observer. Probablement consécutifs au processus de calandrage, ils semblent jouer un rôle important sur la topographie initiale marquée du PVC. La lézarde est une fonction topographique linéaire, orientée dans la direction de calandrage, avec une longueur de l'ordre du millimètre (voir figure IV-16) et une largeur d'environ cent micromètres. Les lézardes, très nombreuses (dénombrement impossible) sur les échantillons usés, deviennent visibles à cause de la salissure piégée à l'intérieur d'elles. En ce sens, les lézardes ont un rôle prédominant dans la dégradation globale de l'aspect du revêtement de sol, et elles apparaissent ainsi comme un point clé pour l'évolution de l'esthétique du produit. À nouveau, il est impossible de dire si les lézardes apparaissent en cours de trafic.

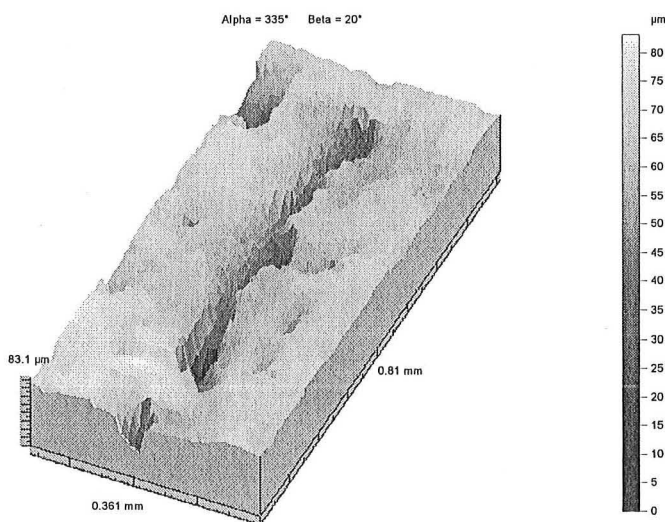


Figure IV-16 : Mesure 3D d'une lézarde sur produit PVC.

□ Transferts permanents

Des transferts permanents locaux ont eu lieu durant les trois premiers mois : des troisièmes corps provenant des semelles ont adhéré sur la surface PVC. 4 transferts en trois mois conduisent à une densité de transferts permanents de :

$$D_{\text{Transfert permanent}}^{8534} = 1 * 10^{-3} \text{ transferts permanents / cm}^2$$

Nous prenons seulement en compte les transferts qui n'ont pas pu être enlevés par la procédure de nettoyage traditionnelle. Néanmoins, ces transferts ont disparu grâce à un nettoyage plus intensif. Apparaissant immédiatement comme des structures grises/brunes à cause de la

salissure qu'ils capturent, les transferts changent localement la topographie et sont visibles sans difficulté. Les transferts ont différentes formes et tailles, mais globalement, leur taille caractéristique n'excède pas quelques millimètres.

□ Rayures

Deux types de rayures ont été définies :

- Les rayures fines, qui peuvent partiellement disparaître après plusieurs jours ;
- Les rayures plus visibles, ou rayures macroscopiques, qui au mieux tendent à devenir des rayures fines via le même processus de recouvrance que celui des rayures fines. Certaines d'entre elles n'évoluent pas de manière perceptible. **De telles rayures sont les pires fonctions pour l'esthétique du revêtement de sol.**

Dans ces deux familles de rayures, les longueurs de rayures sont très dispersées, de même que leur géométrie transverse. Nous présenterons d'abord chacune de ces familles, puis nous discuterons ensuite leur aspect géométrique de manière à bien définir la transition rayure fine / rayure critique.

Rayures fines

Les rayures fines (voir figure IV-17) sont les fonctions les plus nombreuses (parmi les fonctions dénombrables) apparaissant durant l'usure. En trois mois, 156 rayures fines sont apparues sur le test grandeur nature ; 20 d'entre elles ont entièrement disparu (par un

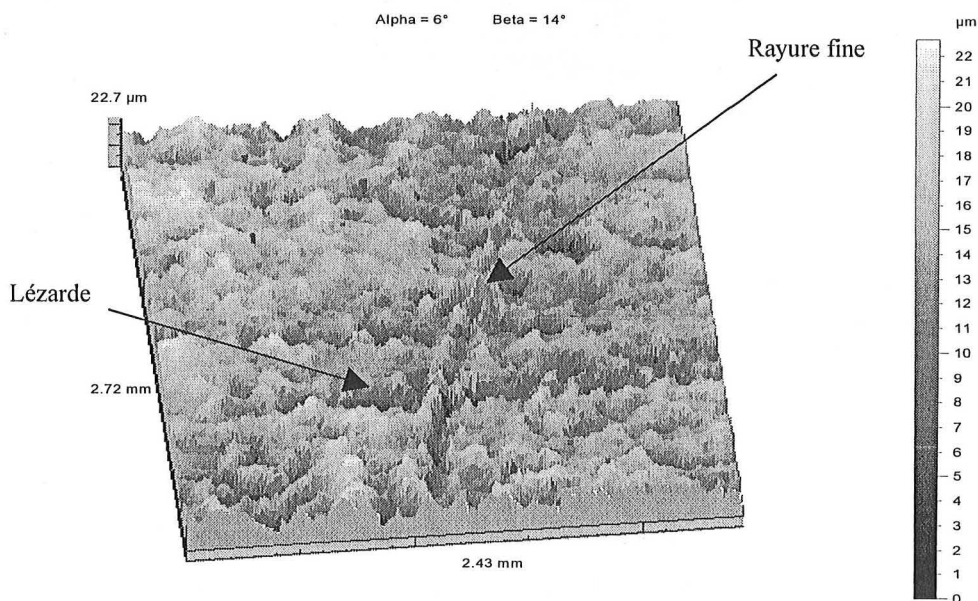


Figure IV-17 : Mesure 3D d'une rayure fine sur un revêtement de sol PVC. Cette rayure croise une lézarde.

processus de recouvrance, ou alors elles ont été noyées dans la salissure environnante). Le temps de vie moyen, pour les rayures qui ont entièrement cicatrisé, **était d'environ 18 jours**. À nouveau, pour ce type de défaut, nous pouvons estimer une densité minimale :

$$D_{\text{Rayures fines}}^{8534} = 3.4 * 10^{-2} \text{ rayures fines / cm}^2$$

Rayures macroscopiques

Les rayures macroscopiques (figure IV-18) sont moins nombreuses que les rayures fines, mais, évidemment, **elles sont très visibles** (principalement à cause de la quantité important de salissure qu'elles continennent) **et surtout, permanentes**. 49 rayures ont été créées en 3 mois, 8 d'entre elles ont cicatrisé partiellement (jusqu'à la catégorie "rayures fines") ; aucune d'entre elles n'a disparu. Ainsi :

$$D_{\text{Rayures macroscopiques}}^{8534} = 1 * 10^{-2} \text{ rayures macroscopiques / cm}^2$$

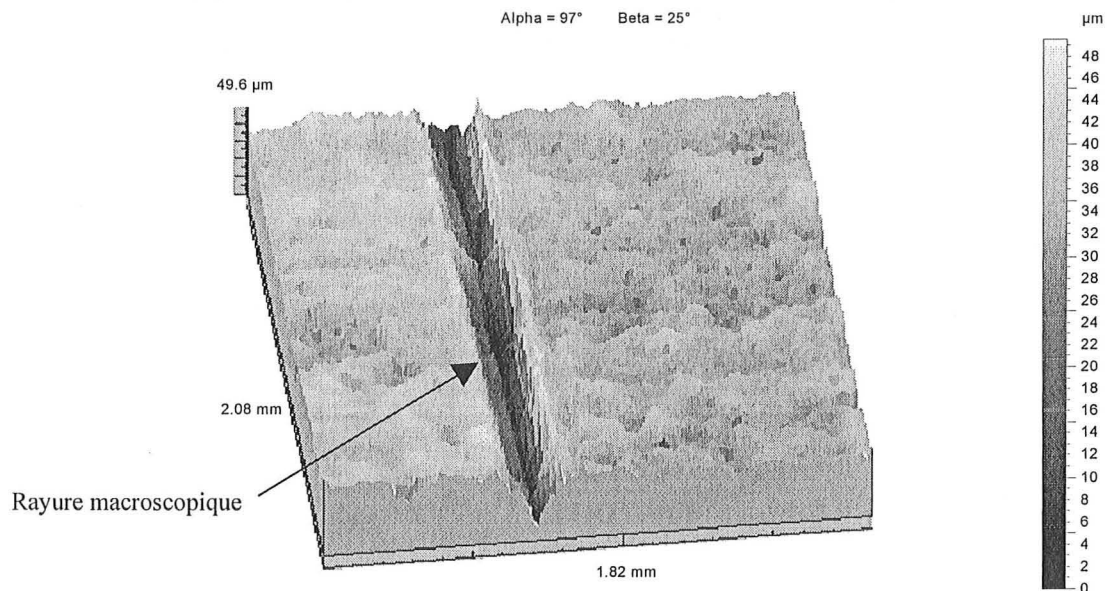


Figure IV-18 : Mesure 3D d'une rayure macroscopique sur un produit PVC.

Géométrie des rayures

Pour les deux familles (fine et macroscopique), les longueurs des rayures sont variées (de 5 millimètres jusqu'à 70 millimètres). De plus, leur géométrie transverse n'est pas constante : la même rayure peut avoir un segment "fin", suivi d'un segment macroscopique.

Cette géométrie variable est bien sûr une conséquence directe du processus générant la rayure : probablement causée par un troisième corps piégé dans la semelle (comme un caillou, par exemple), la rayure résulte de conditions de contact entre le revêtement de sol et la

semelle variables durant l'action de marche. Tout changement dans les conditions de contact implique des changements dans la réponse du revêtement de sol, et dans notre cas, une géométrie transverse de rayure variable le long de la rayure.

De manière à définir une géométrie de transition typique entre les rayures fines et les rayures macroscopiques, 10 profils transverses (pour chaque famille) extraits des mesures topographiques de rayures réelles ont été étudiés. La profondeur et la largeur de la rayure ont été mesurées pour déterminer les dimensions typiques de chaque catégorie (voir tableau IV-9). Ces dimensions ont été comparées aux paramètres topographiques correspondants mesurés sur les surfaces non usées, c.à-d. la largeur de la rayure comparée avec la distance moyenne pic-à-pic S_m et la profondeur de rayure avec la distance pic-à-vallée moyenne (R_{tm}).

Tableau IV-9: Dimensions transverses typiques de rayures réelles mesurées sur le test grandeur nature (extractions de mesures 3D, résolution dans le plan : 3.81 μm), pour le produit PVC. Le produit PU+PVC a donné des résultats similaires.

Rayure	Largeur [micromètres]	Largeur / S_m	Profondeur [micromètres]	Profondeur / R_{tm}
Fine 1	46.2	0.46	2.5	0.13
Fine 2	53.6	0.54	2.6	0.13
Fine 3	60.0	0.60	3.5	0.18
Fine 4	47.2	0.47	5.1	0.26
Fine 5	51.2	0.51	5.1	0.26
Macroscopique 1	112.4	1.12	7.9	0.41
Macroscopique 2	146.4	1.46	8.3	0.43
Macroscopique 3	91.8	0.92	11.9	0.61
Macroscopique 4	101.8	1.02	16.9	0.87
Macroscopique 5	172.7	1.73	39.4	2.02

Nous voyons qu'à cause de la large dispersion sur la géométrie transverse de la rayure, il est plus commode de définir un critère de transition de rayure fine à rayure macroscopique plutôt qu'une géométrie moyenne typique pour chacune de ces deux familles.

En première approximation, nous proposons qu'une rayure soit qualifiée de "fine" si sa largeur est inférieure à 80 % du paramètre S_m de référence **ET** sa profondeur inférieure à 40 % du paramètre R_{tm} de référence. Si l'une de ces dimensions ne respecte pas cette condition, la rayure est susceptible d'être vue comme "macroscopique".

Remarque : cette géométrie fait référence aux rayures réelles, contenant une certaine quantité de salissure. À l'état propre, ces pourcentages devraient être supérieurs.

IV.3.1.2 Produits PU+PVC

Cinq défauts de surface ont été observés sur les échantillons PU+PVC. Nous les présentons du moins visible au plus visible :

1. Fentes [52] ;
2. Piqûres ;
3. Transferts permanents ;
4. Rayures fines ;
5. Rayures macroscopiques .

□ Fentes

Une fente est définie comme une “dépression linéaire avec fond en forme de pointe” [52]. Non observables sur les produits de référence, près de 200 fentes sont apparues dès les trois premiers mois du test grandeur nature, soit :

$$D_{Fentes}^{8534} = 5 * 10^{-2} \text{ fentes / cm}^2$$

La longueur caractéristique de la fente est le millimètre (figure IV-19).

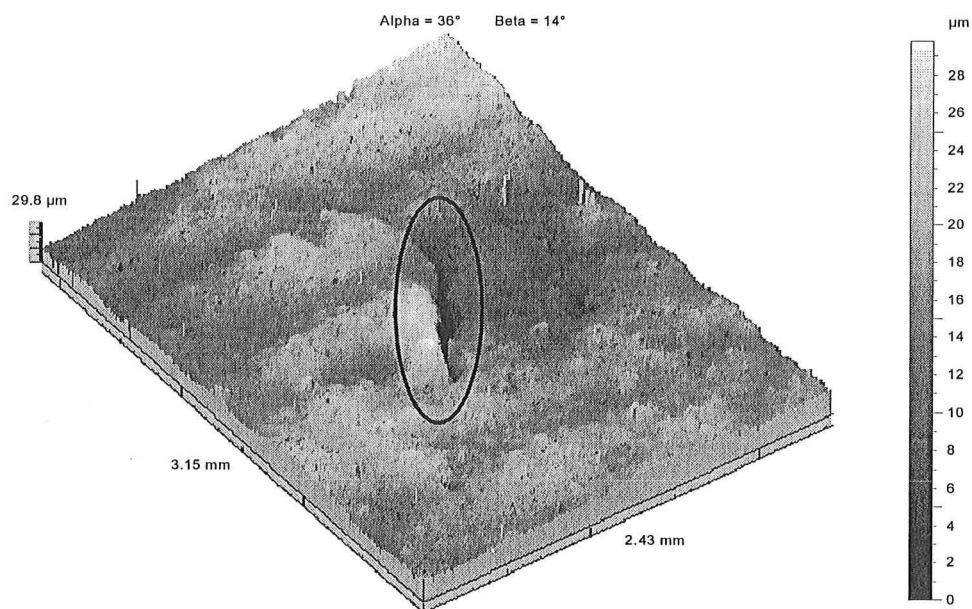


Figure IV-19 ; Mesure 3D d'une fente sur un produit PU+PVC. Résolution dans le plan : 3.81 micromètres.

□ Piqûres

Les piqûres sont présentes sur les produits PU+PVC, avec les mêmes caractéristiques que celles des surfaces PVC (très nombreuses, très visibles sur les surfaces usées, une dimension typique d'environ dix micromètres). Ces défauts résultent probablement du processus de calendrage.

□ Transferts permanents

22 transferts permanents sont apparus en trois mois, soit une densité de défauts de :

$$D_{\text{Transferts permanents}}^{8534} = 5.5 * 10^{-3} \text{ transferts permanents / cm}^2$$

Ils ont le même aspect et la même géométrie caractéristique que les transferts à la surface des produits PVC.

□ Rayures

En gardant la même classification de rayures (fine/macroscopique) :

- 221 rayures fines sont apparues, 16 ont cicatrisées (temps de vie moyen : **19 jours**) :

$$D_{\text{Rayures fines}}^{8534} = 5.1 * 10^{-2} \text{ rayures fines / cm}^2$$

- 80 rayures macroscopiques sont apparues, 8 ont recouvert jusqu'à la catégorie "fine" :

$$D_{\text{Rayures macroscopiques}}^{8534} = 1.8 * 10^{-2} \text{ rayures macroscopiques / cm}^2$$

IV.1.1.3 Défauts de surface sur le test grandeur nature : conclusions

Il est intéressant de noter que les observations visuelles du test grandeur nature ont été arrêtées après trois mois, **car il était alors totalement impossible de mettre en évidence, sur les produits PVC, l'apparition de nouvelles fonctions consécutives à l'usure** : une importante quantité de salissure était piégée dans les défauts à la surface de ces échantillons, et ce malgré leur nettoyage quotidien. L'aspect terne, dès trois mois, est resté pratiquement inchangé jusqu'à 12 mois de test grandeur nature.

En revanche, les échantillons PU+PVC ont pratiquement conservé leur brillance initiale, et ce jusqu'à 12 mois.

Cette perte de brillance des produits PVC est un des facteurs premiers qui ont amené l'observateur à conclure que les produits PU+PVC ont un meilleur comportement en conditions réelles d'utilisation, sur l'échelle de temps et le niveau de trafic considérés (respectivement trois mois et 8534 passage).

Le tableau IV-10 synthétise les résultats précédents. L'observateur a ajouté ses commentaires sur l'impact de chaque défaut sur l'esthétique du produit, en suivant l'échelle de classification suivante :

- **Faible**, pour un défaut de surface acceptable – l'observateur doit être très proche de la surface (à genoux sur le sol) pour le voir ;
- **Moyen**, pour un défaut de surface qui peut facilement être enlevé par le client (comme les transferts permanents, par exemple), ou un défaut dont l'impact est faible sur l'esthétique du produit, et visible lorsque l'observateur est debout ;
- **Fort**, pour un défaut permanent impactant fortement sur l'esthétique du produit (fortement visible en position debout).

Nous voyons que, lorsque le dénombrement a été possible, **les deux produits ont des densités de défauts après trois mois du même ordre de grandeur.**

Tableau IV-10: Densité des défauts de surface pour les deux produits après trois mois de test grandeur nature [défaut/cm²].

Défaut	PVC	PU+PVC	Impact sur l'esthétique
<i>Trous</i>	$7.75 \cdot 10^{-3}$	XXXXXXXXXX	Faible
<i>Piqûres</i>	Indénombrable	Indénombrable	Faible
<i>Fentes</i>	XXXXXXXXXX	$5.0 \cdot 10^{-2}$	Faible
<i>Transferts permanents</i>	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^{-3}$	Moyen
<i>Lézardes</i>	Indénombrable	XXXXXXXXXX	Moyen
<i>Rayures fines</i>	$3.4 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^{-2}$	Moyen
<i>Rayures macroscopiques</i>	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	Fort

Néanmoins, l'évolution des deux produits est très différente, comme nous le voyons sur les figures IV-20a et IV-20b: la comparaison visuelle des deux surfaces avant et après trois mois de sollicitations montre que la surface PVC devient très sombre, sale, même si le produit est nettoyé quotidiennement. La surface PU+PVC, elle, est plus proche de son état de référence.

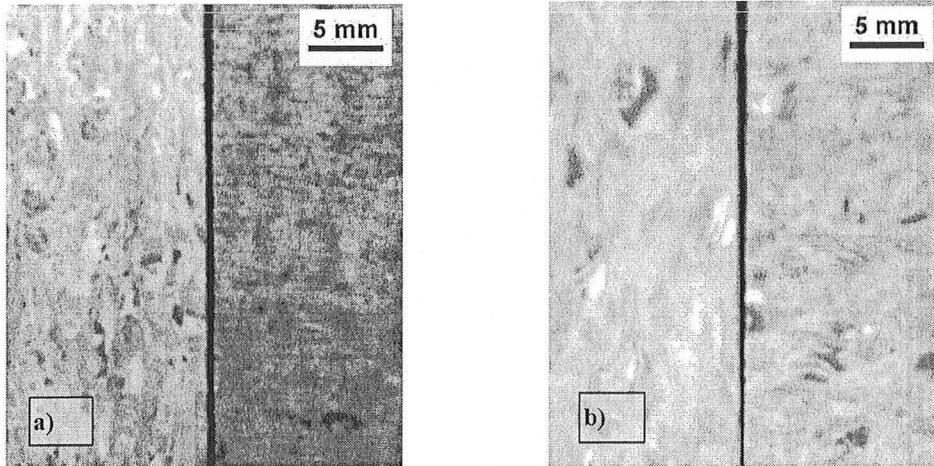


Figure IV-20: Micrographies optiques des surfaces de référence (partie gauche des micrographies) et après 3 mois de test grandeur nature (partie droite des micrographies).
a) Revêtements de sol PVC.
b) Revêtements de sol PU+PVC.

Cette différence d'esthétique est probablement liée à l'état de surface initial du produit PVC, c.à-d. une rugosité plus marquée, avec de nombreuses lézardes. De telles imperfections de surface constituent **des endroits idéaux pour piéger les salissures** de la surface des semelles ; et ces imperfections rendent la surface du PVC difficile à nettoyer. De plus, leur densité est **largement plus importante** que celle des défauts moyens/majeurs.

Ces observations visuelles nous amènent à conclure que pour un test d'usure adéquat :

1. **Des poussières/agents salissants** doivent être inclus dans le tribosystème de manière à révéler les imperfections de surface, comme c'est le cas en conditions réelles d'utilisation.
2. Les rayures, **et particulièrement les rayures macroscopiques**, en tant que fonctions d'usure les plus pénalisantes pour l'esthétique du revêtement de sol, doivent être générées durant le test.

IV.3.2 Evolution de l'épaisseur de la couche de PU

L'épaisseur de la couche de PU, évaluée via les micrographies transverses (figure IV-20), a légèrement évolué durant le test grandeur nature. Le tableau IV-11 donne l'épaisseur moyenne de la couche de PU (moyenne sur 80 mesures) en fonction du temps.

Tableau IV-11: Evolution de la couche de PU avec le temps.

<i>Etat de surface</i>	<i>Epaisseur de la couche de PU (moyenne +/- un écart-type) [micromètres]</i>
Référence	8.4 ^{+/-3.4}
3 mois	7.0 ^{+/-2.5}
9 mois	7.4 ^{+/-2.9}
12 mois	6.6 ^{+/-2.9}

La principale variation de l'épaisseur de la couche de PU est observée durant les trois premiers mois, comme pour l'aspect esthétique des produits. **Après cette période de rôdage, l'épaisseur moyenne de la couche de PU stagne aux alentours de 7.0 ^{+/-2.5} micromètres.** Si nous comparons maintenant cette épaisseur résiduelle de PU avec celle après 2000 cycles de Lisson (7.0 micromètres), nous voyons que **le test Lisson reproduit des niveau d'usure réalistes.**

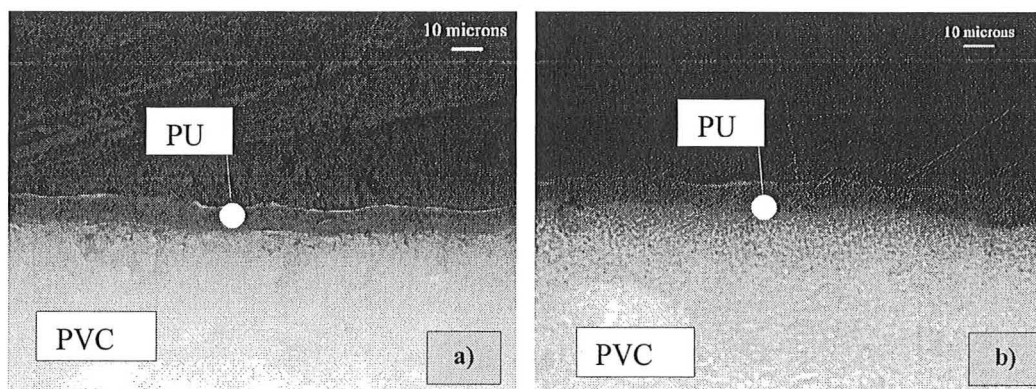


Figure IV-20: Micrographies optiques de sections transverses des produits PU+PVC.

a) Etat de référence.

b) Après trois mois de test grandeur nature.

IV.3.3 Evolution des paramètres de rugosité

IV.3.3.1 Produits PVC

Les paramètres de rugosité sont présentés dans le tableau IV-12. Ici aussi, nous voyons que pour tous les paramètres retenus (amplitude, symétrie et étalement), les principales évolutions ont lieu durant les trois premiers mois. L'état "d'équilibre" atteint après cette période de rodage est un état moins complexe, c.à-d. :

- Les paramètres d'amplitude sont plus faibles : les hauteurs de profil ont, en moyenne, une amplitude inférieure ;
- Les paramètres de symétrie tendent à être caractéristiques d'une distribution de hauteurs gaussienne, c.à-d. une répartition symétrique, équilibrée, autour d'une hauteur moyenne prépondérante ;
- Les paramètres d'étalement sont plus faibles.

Les fonctions topographiques ont des amplitudes plus faibles, sont mieux équilibrées autour de la ligne moyenne du profil et sont plus resserrées. Les profils deviennent plus compacts, plus homogènes.

Ce comportement est bien différent de celui après 2000 cycles de Lisson (voir tableau IV-6), lorsque l'abrasion domine ; les aspérités proéminantes, en étant abrasées, induisent une asymétrie sur les profils (appréciable via les paramètres E_k et S_k), et même si les hauteurs de pic moyennes sont similaires après 2000 cycles de Lisson (4.7 micromètres) et 12 mois de test grandeur nature (5.0 micromètres), les profondeurs de vallées sont pratiquement deux fois plus élevées après 2000 cycles (9.7 micromètres contre 5.5 micromètres). Plusieurs explications sont possibles :

- Le test Lisson n'est pas suffisamment agressif (mais l'épaisseur résiduelle de la couche de PU après 2000 cycles reste cohérente avec les observations en test grandeur nature) ;
- Différents mécanismes peuvent être activés durant le test Lisson et le test grandeur nature – le défaut de troisième corps dans le test Lisson, remplissant les vallées, pourrait être un point clé ici.

Tableau IV-12 : Evolution des paramètres de rugosité durant le test grandeur nature ($\lambda_c=0.8$ mm). Produits PVC.

Paramètre	PVC Etat de référence	PVC 3 mois	PVC 9 mois	PVC 12 mois
<i>Amplitude</i>				
Ra [μm]	3.1 ± 0.5	1.7 ± 0.3	1.6 ± 0.2	1.7 ± 0.2
Rq [μm]	4.0 ± 0.7	2.2 ± 0.3	2.1 ± 0.3	2.2 ± 0.3
Rtm [μm]	19.5 ± 3.2	10.7 ± 1.9	9.6 ± 1.1	10.6 ± 1.4
Rpm [μm]	7.2 ± 0.8	5.1 ± 1.0	4.2 ± 0.6	5.0 ± 0.9
Rvm [μm]	12.3 ± 2.6	5.7 ± 1.2	5.4 ± 0.7	5.5 ± 0.9
<i>Symétrie/ADF</i>				
Ek	5.6 ± 1.4	3.9 ± 0.8	3.3 ± 0.5	3.8 ± 0.9
Sk	-1.0 ± 0.4	-0.3 ± 0.3	-0.4 ± 0.2	-0.2 ± 0.3
<i>Etalement</i>				
Sm* [μm]	100.0 ± 10	92.0 ± 12	93.0 ± 13	88.0 ± 14

IV.3.3.2 Produits PU+PVC

Les paramètres de rugosité sont présentés dans le tableau IV-13. À nouveau, l'évolution principale est observée durant les trois premiers mois, avec la même tendance que pour les produits PVC : une complexité de surface inférieure due à des paramètres d'amplitude et de symétrie plus faibles.

Tableau IV-13: Evolution des paramètres de rugosité durant le test grandeur nature ($\lambda_c=0.8$ mm). Produits PU+PVC.

Paramètre	PU+PVC Etat de référence	PU+PVC 3 mois	PU+PVC 9 mois	PU+PVC 12 mois
<i>Amplitude</i>				
Ra [μm]	1.8 ± 0.3	1.2 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1
Rq [μm]	2.4 ± 0.4	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.5 ± 0.2
Rtm [μm]	13.2 ± 2.9	7.7 ± 1.0	7.2 ± 0.8	7.5 ± 1.2
Rpm [μm]	5.4 ± 1.2	3.6 ± 0.6	3.1 ± 0.5	3.3 ± 0.7
Rvm [μm]	8.2 ± 2.1	4.1 ± 0.6	4.2 ± 0.6	4.3 ± 0.7
<i>Symétrie/ADF</i>				
Ek	5.0 ± 1.2	3.5 ± 0.6	4.2 ± 1.0	4.8 ± 1.6
Sk	-0.7 ± 0.3	-0.2 ± 0.3	-0.5 ± 0.3	-0.5 ± 0.3
<i>Étalement</i>				
Sm* [μm]	PD: 65.0 ± 6	PD: 64.0 ± 6	PD: 66.0 ± 8	PD: 70.0 ± 7
	TD: 80.0 ± 9	TD: 73.0 ± 10	TD: 77.0 ± 3	TD: 91.0 ± 8

* PD: direction du process (calandrage). TD: direction transverse.

Deux conclusions :

1. Pour les paramètres de symétrie et d'étalement (dans la direction transverse uniquement), on observe toujours quelques fluctuations significatives entre trois et douze mois (translation des valeurs moyennes et extrêmes pour chaque paramètre). **Ceci pourrait être une conséquence de la nature élastomérique de la couche**, c.à-d. une plus grande tendance à absorber l'énergie mécanique durant le contact avec les semelles par déformation visco-élasto-plastique. Alors qu'après les trois mois de rôdage la géométrie de la surface PVC est stable (bloquée), la surface PU+PVC peut continuer à répondre aux sollicitations par de petits changements géométriques.
2. Pour les deux produits, l'état trois mois est, en considérant les valeurs absolues, **significativement différent de l'état de référence**. De plus, les variations relatives entre

l'état de référence et celui à trois mois ont, pour les deux produits, **pratiquement la même amplitude** (voir tableau IV-14). Ainsi, en termes de changements topographiques, l'impact du trafic réel est pratiquement le même pour les deux produits après trois mois.

Tableau IV-14: Variation relative des paramètres topographiques sélectionnés entre les états de référence et trois mois, pour les deux produits [%].

Paramètre	Ra	Rq	Rtm	Rpm	Rvm	Ek	Sk	Sm*
PVC	- 45	- 45	- 45	- 29	- 54	- 30	+ 70	- 8
PU+PVC	- 33	- 38	- 42	- 33	- 50	- 30	+ 71	PD: - 8 TD: - 2

* PD: direction du process (calandrage). TD: direction transverse .

En comparant les résultats après 2000 cycles de Lisson (tableau IV.7) et après 12 mois de test grandeur nature (tableau IV.13), nous retrouvons les mêmes différences que celles observées pour les produits PVC. Après 2000 cycles de test Lisson :

- les paramètres d'amplitude sont supérieurs (sauf pour Rpm, plutôt constant), et en particulier les vallées sont plus profondes ;
- en conséquence, les profils sont plus asymétriques qu'après 12 mois de tests grandeur nature.

Nous confirmons ici que l'introduction d'un troisième corps dans la procédure de test Lisson pourrait avoir un fort intérêt dans notre démarche de reproduction des sollicitations réelles.

IV.3.4 Les résultats du test grandeur nature étudiés via l'approche Ek-Sk

L'approche Ek-Sk confirme clairement :

- L'existence de **périodes de rôdage et d'équilibre** ;
- La complexité intrinsèque du tribosystème étudié, car le processus principal d'endommagement ne peut être réduit à un simple mode, c.à-d. l'abrasion ou la déformation visco-élasto-plastiques seules.

Les défaut majeurs (rayures) ont été évités dans cette étude, car ils auraient empêché la mise en application de cette approche (en changeant la géométrie résiduelle des vallées). Ainsi, nous étudions ici l'usure globale des revêtements de sol, et non l'usure locale.

□ Paramètres d'amplitude

Les figures IV-21 donnent l'évolution des paramètres d'amplitude, basée sur les tableaux IV-12 et IV-13. Nous apprécions graphiquement la décroissance des paramètres d'amplitude et les périodes de rôdage/d'équilibre durant le processus d'usure réelle, avec la transition à trois mois.

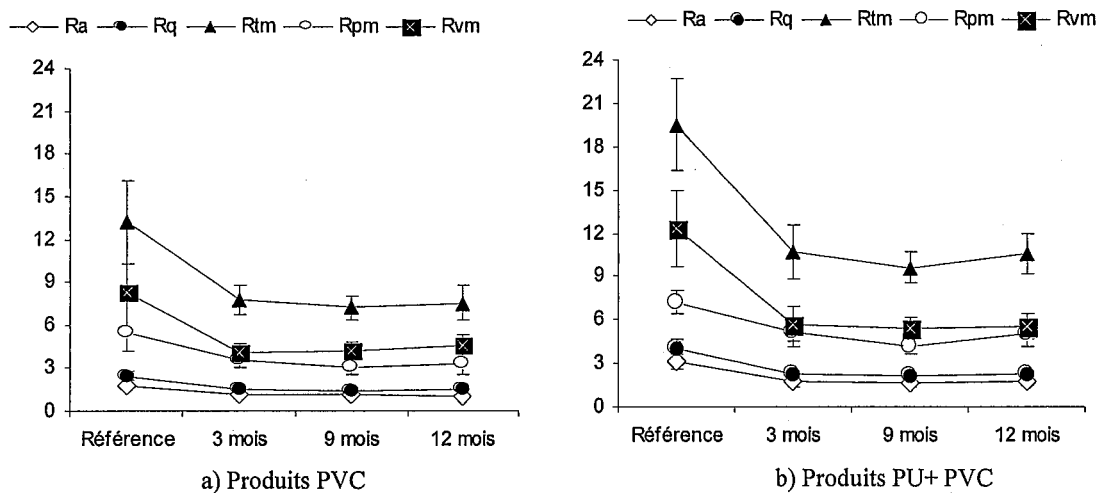


Figure IV-21 : Evolution des paramètres de rugosité durant le test grandeur nature

□ Courbes Ek-Sk

Les figures IV-22 montrent, pour les deux produits, l'évolution de la symétrie du profil avec l'usure. À nouveau, **le comportement des deux produits est similaire** : les profils deviennent plus symétriques (S_k tend vers zéro), avec la majorité des changements durant les trois premiers mois de trafic réel.

De plus, nous ne suivons pas le comportement théorique attendu dans l'abrasion pure : au lieu d'être localisé au niveau des aspérités du profil, **le processus d'endommagement semble effectif sur toute la hauteur de profil**, affectant par là à la fois les aspérités et les vallées, ce qui explique l'évolution observée des paramètres de symétrie. La nouvelle distribution des hauteurs est différente de la distribution initiale, sans lien direct entre ces deux distributions. Ce comportement est confirmé par les courbes d'Abbott-Firestone.

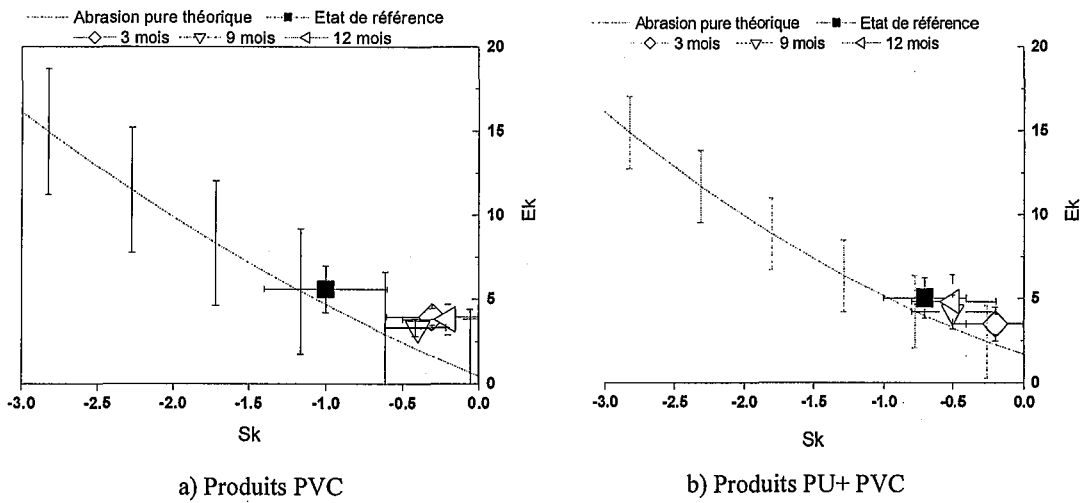


Figure IV-22 : Evolution des paramètres de symétrie durant le test grandeur nature

□ Courbes d'Abbott-Firestone

Le critère à 90 % n'est pas satisfait : nous voyons clairement sur les figures IV-23 que les hauteurs de profil sont entièrement transformées par les sollicitations appliquées en conditions réelles, et à nouveau, la majeure partie des modifications se passe durant les trois premiers mois. Jusqu'à douze mois, les distributions des hauteurs de profil oscillent autour de l'état d'équilibre atteint après trois mois.

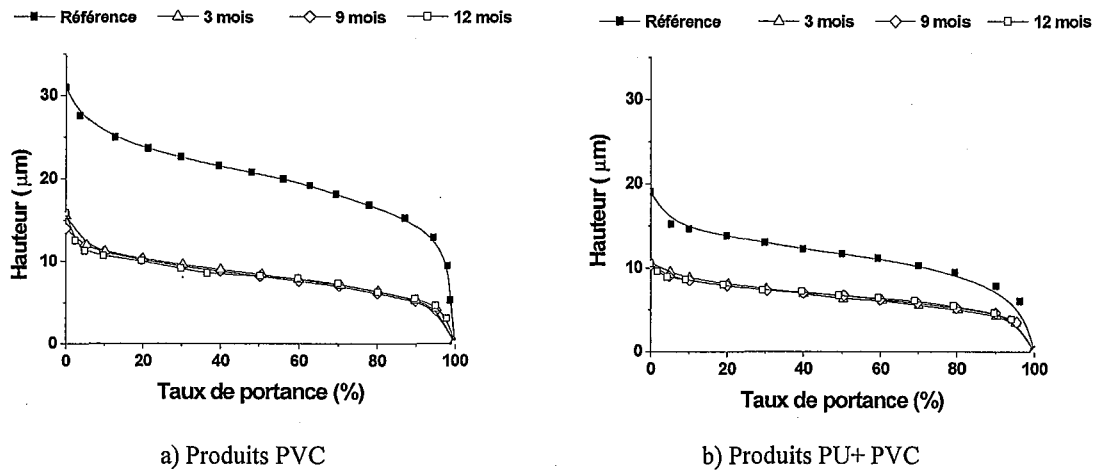


Figure IV-23 : Evolution des courbes de portance durant le test grandeur nature.

IV.3.5 Test grandeur nature : conclusions

Globalement, les deux produits ont la même évolution lorsqu'il sont soumis au test grandeur nature :

- Existence d'une **période de rôdage**, au maximum égale à trois mois, suivie par un état d'équilibre durant au minimum neuf mois ;
- Apparition/mise en évidence **des mêmes défauts de surface** – avec des particularités pour chaque produit (PVC : trous et lézardes, PU+PVC : fentes), les plus pénalisantes pour l'esthétique du produit étant **les lézardes pour le PVC, et les transferts permanents et les rayures (fines/macro) pour les deux revêtements de sol étudiés** ;
- Ce défauts sont visibles grâce à la **salissure** qu'ils piègent, plutôt qu'à cause du changement de géométrie de surface qu'ils induisent ;
- Pendant la période de rôdage, la topographie des deux produits devient **moins complexe** (paramètres d'amplitude inférieurs, meilleur équilibre des hauteurs de profil) qu'à l'état de référence, et ce, **dans les mêmes proportions** pour les deux produits.

Malgré ces similarités, après la période de rôdage, le produit PVC semble **bien plus dégradé** à cause des poussières/salissures contenues dans les imperfections à sa surface, et principalement dans les lézardes (probablement initiées par le processus de calandrage).

En ce qui concerne les variations d'épaisseur de la couche de PU, une petite décroissance (1,5 micromètres) a été observée après la période de rôdage. Cette variation peut s'expliquer par :

- Une compression/déformation de la surface, par exemple les vallées sont remplies par les aspérités à cause d'une redistribution de la matière (repassage), avec une évolution de la topographie en conséquence ;
- Une abrasion de la surface.

Ainsi, nous voyons que les changements de la topographie de surface et de l'esthétique sont plus pénalisants pour les produits PVC. Nous reproduisons ici la réalité telle qu'elle est appréciée par la clientèle.

Cette analyse nous amène à distinguer deux types de dégradation de surface :

- **Une dégradation locale**, avec l'apparition de défauts de surface d'impact moyen ou fort sur l'esthétique, comme les rayures fine et macroscopiques, et les transferts permanents ;
- **Une dégradation globale**, avec la simplification de la géométrie de surface par déformation/abrasion de surface, combinée à une perte globale de brillance due à la salissure piégée dans chaque défaut.

L'approche Ek-Sk confirme que durant les trois premiers mois, les produits ont subi la majorité des modifications qu'il connaîtront au bout de douze mois.

De plus, cette approche nous donne des informations sur l'état final des deux produits : d'après les outils topographiques sélectionnés, nous pouvons conclure que durant la période d'équilibre, les deux produits ont des topographies de plus en plus proches (les courbes d'Abbott-Firestone deviennent très similaires). **Ceci confirme la nécessité des observations visuelles** (outil subjectif) pour être capable de discriminer les évolutions esthétiques des deux produits, et ainsi reproduire les constats du client.

D'après cette approche, **le processus d'endommagement global sur le test grandeur nature ne semble pas être l'abrasion pure**. En effet, nous devons garder à l'esprit que les poussières/salissures sont un facteur important dans notre tribosystème. Nous pouvons supposer que les salissures, piégées dans les vallées (nous parlons ici d'usure globale, hors défauts), peut impacter sur la mesure de la géométrie de la surface, et particulièrement sur la distribution des hauteurs de profil.

Ainsi, le processus d'usure globale effectif sur les produits étudiés peut être soit l'abrasion, soit une déformation visco-élasto-plastique, et probablement une combinaison des deux, surtout au regard de la rhéologie particulière de ces produits. L'approche Ek-Sk ne permet pas de conclure sur la prédominance d'un de ces deux processus.

Dans tous les cas, les modifications topographiques en conditions réelles d'utilisation peuvent être partiellement liées aux poussières/salissures piégées à l'intérieur des vallées et des défauts de surface.

Sur la base de ces considérations, nous proposons qu'un test d'usure normalisé adéquat doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Utilisation d'un agent salissant (poussières) de manière à pouvoir discriminer les deux produits d'après leurs qualités esthétiques ;
- Simplification de la géométrie des surfaces testées, avec en conséquence une légère diminution de l'épaisseur de la couche de PU ;
- Génération de rayures, et particulièrement de rayures macroscopiques (les transferts peuvent disparaître avec une procédure de nettoyage adaptée). La géométrie d'une rayure macroscopique a été définie par sa profondeur et sa largeur résiduelle, proposée comme étant **au minimum égale à 40 % du R_{tm} de référence et 80 % du S_m de référence.**

IV.3.6 Le test Lisson par rapport au test grandeur nature

En ce qui concerne l'esthétique du produit, le test Lisson dans sa forme standard **ne reproduit pas mieux la réalité que le test Frick Taber** : les nouveaux défauts de surface, si existants, ne sont pas visibles, et la surface devient plus brillante – conséquence directe de l'apparition de plateaux au niveau des aspérités.

Néanmoins, ce test engendre des niveaux d'usure réalistes si nous regardons l'épaisseur de la couche de PU résiduelle. L'action de marche, telle que simulée ici, est relativement pertinente car elle permet la distinction entre les deux produits après 2000 cycles si nous comparons les valeurs des paramètres de rugosité des deux produits.

D'après ces observations, nous pouvons conclure que :

1. Le test Lisson met en évidence deux comportements différents sur les produits étudiés.
2. Pour les deux produits, la décroissance dans les paramètres de rugosité semble traduire une simplification de la géométrie de la surface.
3. Le niveau des sollicitations appliquées semble réaliste.
4. Enfin, la cinématique du test est pertinente, ainsi que le tribosystème global (incluant un deuxième corps en SBR, plus proches de l'elastomère des semelles actuelles que le cuir du Frick Taber).

Pour toutes ces raisons, le test Lisson semble un outil prometteur pour la caractérisation de la résistance à l'usure de revêtements de sol. Néanmoins, ce test a besoin de quelques améliorations pour :

- Reproduire la réalité en terme de dégradation esthétique du produit ;
- Générer/révéler des défauts de surface de type rayures.

L'utilisation d'un troisième corps/agent salissant, à définir, devrait nous aider dans notre démarche de reproduction des processus d'usure observés sur le test grandeur nature.

IV.4 L'USURE DES REVÊTEMENTS DE SOL : CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'usure des revêtements de sol consécutive au trafic réel peut être divisée en deux parties :

- **Une usure locale** : apparition de défauts de surface à impact moyen et fort sur l'esthétique du produit
- **Une usure globale** : simplification de la géométrie de surface par abrasion/déformation, baisse de la brillance à cause de la salissure piégée dans les défauts.

- **Le test Frick Taber doit être éliminé à cause de son agressivité excessive.** Le niveau d'abrasion est bien trop important, car il provoque la disparition de la couche protectrice dès les premiers cents cycles et engendre par là une classification erronée des produits. De plus, les second et troisième corps de ce tribosystème ne sont pas en accord avec la réalité. En conséquence, ce test n'est pas capable de révéler les différences dans le comportement tribologique de chacun de ces produits.
- **Le test Lisson, plus doux et plus réaliste** de part sa cinématique et la similitude entre les matériaux en contact dans ce test et en réalité, permet la discrimination des deux produits étudiés. Principalement orienté vers l'abrasion, il engendre des pertes d'épaisseur de couche en accord avec celles observées en conditions réelles d'utilisation. **Mais des améliorations sont encore nécessaires.**

Nous proposons d'améliorer le tribosystème Lisson en introduisant un agent salissant. Ce troisième corps devrait mettre en évidence les défauts faibles/moyens (comme observés sur le test grandeur nature), avec à la fois des conséquences sur l'usure locale (révélation des défauts) et l'usure globale (dégradation des propriétés esthétiques).

Nous pouvons supposer que cet agent salissant ne va pas reproduire les rayures. En effet, l'agent salissant **est une première étape** dans le processus d'optimisation du test Lisson, visant à révéler l'existence des défauts faibles/moyens. De plus, l'inclusion d'un troisième corps plus dur est une opération délicate, comme le test Frick Taber nous l'a montré : l'abrasion résultante n'a pas de sens lorsqu'on la compare à la réalité. Pour reproduire les rayures réelles, nous proposons, en première approche, d'utiliser le test de nano-rayure.

Chapitre V: Le test Lisson – optimisation du tribosystème et de la procédure de test

Deux troisième corps différents ont été ajoutés dans le tribosystème Lisson de manière à apprécier l'impact d'un agent salissant dans les résultats du test d'usure.

À nouveau, nous présentons les résultats en termes de changements dans l'aspect visuel et dans les paramètres topographiques. Seulement deux nombres de cycles ont été étudiés : 400 et 600 cycles. Nous verrons que les deux parties de l'usure (globale et locale) semblent (au moins partiellement) **correctement simulés** ; néanmoins, **les rayures sont toujours absentes** après 600 cycles de Lisson.

De manière à améliorer cette nouvelle procédure, nous allons brièvement comparer les rayures réelles (c.à-d. résultant du trafic en conditions réelles d'utilisation) et les rayures réalisées via le test de nano-rayure. Cette étude “de premier ordre” a pour but de donner certains points clé pour un travail futur portant sur une meilleure compréhension, et par là une meilleure reproduction, des processus d'usure des revêtements de sol polymères.

V.1 UN TRIBOSYSTÈME AMÉLIORÉ POUR LE TEST LISSON

Les deux troisième corps étudiés sont des agents salissants utilisés dans un test conçu pour les revêtements de sol moquette. Le tableau V-1 donne leur composition telle que définie par la norme ISO 11378-2:2001 [59]).

Tableau V-1: Composition des agents salissants introduits dans la procédure Lisson.

AGENT SALISSANT A		AGENT SALISSANT B	
Elément	%	Elément	%
Silice de quartz	88.30	Poussière de tourbe	38.85
Kaolin	9.35	Ciment de Portland	17.45
Oxide ferreux jaune	0.20	Kaolin	17.70
Oxide ferreux noir	0.60	Quartz	17.70
Huile de pétrole	1.55	Huile minérale Nujol Q14	6.20
		Pigment jaune	1.50
		Oxide de fer	0.60

Le troisième corps est déposé à la surface du revêtement de sol à l'aide d'un tamis, de manière à assurer un niveau de troisième corps homogène sur toute la surface testée. Tous les 200 cycles, les résidus sont enlevés de la surface, et de nouvelles particules d'agent salissant sont déposées via le tamis.

Ainsi, le troisième corps n'est pas constamment renouvelé. Cette période de 200 cycles doit être **gardée à l'esprit** comme un paramètre de test à ajuster si nécessaire.

Dans les deux cas (agent salissant A et B), la direction du Lisson fût parallèle à la direction de calendrage.

V.1.1 Observations visuelles et mesures topographiques 3D

V.1.1.1 Produits PVC

Les observations visuelles sont très prometteuses (voir figure V-1). Les changements esthétiques observés après trois mois de test grandeur nature ont été correctement reproduits (lorsque c'était possible – voir plus loin). Dans les deux cas (agent salissant A et B):

- Nous avons observé après 400 cycles de **nombreuses piqûres et lézardes** ;
 La présence de ces défauts révèle clairement l'importance du troisième corps, impactant fortement sur l'esthétique des revêtements de sol, et inévitable dans un test visant à reproduire l'aspect visuel du revêtement de sol suite à un trafic réel.
- **Les trous ne semblent pas apparaître durant le test.** Mais si nous regardons la densité de trou dans le cas du trafic réel ($D_{trou}^{8534} = 7.75 * 10^{-3} \text{ trous/cm}^2$), et si nous la multiplions par l'aire testée durant le test Lisson (environ 90 cm²), nous devrions observer au plus un seul trou ;
- **Les transferts permanents ne sont pas reproduits.** Les transferts permanents ne résultent pas des poussières. Ainsi, ce mécanisme ne peut être simulé dans notre cas.
- **Les rayures sont manquantes.** À nouveau, ils ne peuvent être reproduits ici à cause de la nature et de la géométrie des corps en contact.

L'esthétique des revêtements de sol PVC soumis à l'agent B est plus proche de celle attendue (figures V-1b et V-1c : nous voyons des dépressions sombres remplies de salissures, avec la même géométrie typique, sur les surfaces issues du test grandeur nature et après 600 cycles de Lisson-B). Les piqûres et les lézardes semblent plus nombreuses avec cet agent salissant. Ceci peut être expliqué par la présence de **poussière de tourbe** dans la formulation B, couplée à **une nature plus grasse**, ce qui conduit à la formation de petits agrégats susceptibles d'être piégés dans les défauts de surface ou les vallées.

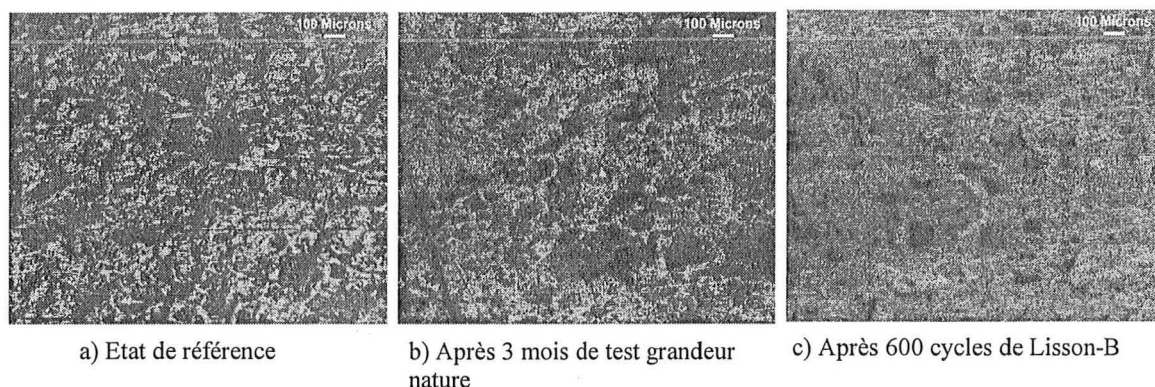


Figure V-1: Micrographies optiques de produits PVC

engendrant des modifications en conséquence sur l'esthétique du revêtement de sol. Néanmoins, nous confirmons que 600 cycles de Lisson-B ne reproduisent pas exactement la topographie obtenue après 3 mois de test grandeur nature : nous espérons une décroissance de la complexité de la surface, **ce qui ne semble pas être le cas ici.**

Il serait intéressant de tester l'impact de la directionnalité du test Lisson, en effectuant 600 cycles de Lisson-B **le long de la direction transverse de l'échantillon** (c.à-d. perpendiculaire à la direction présentée sur la figure V-4). En effet, nous avons vu que le contact répété avec la semelle affecte la distance pic-à-pic moyenne S_m en la dilatant dans les deux directions. Cet effet peut être susceptible d'expliquer (partiellement) la décroissance de la complexité de la surface observée durant le test Lisson classique. À l'inverse, comme les échantillons sont disposés aléatoirement sur le test grandeur nature, la marche globale n'est pas directionnelle si l'on considère tous les échantillons, et les périodes de calendrage et de rugosité (S_m) sont affectées différemment entre les échantillons.

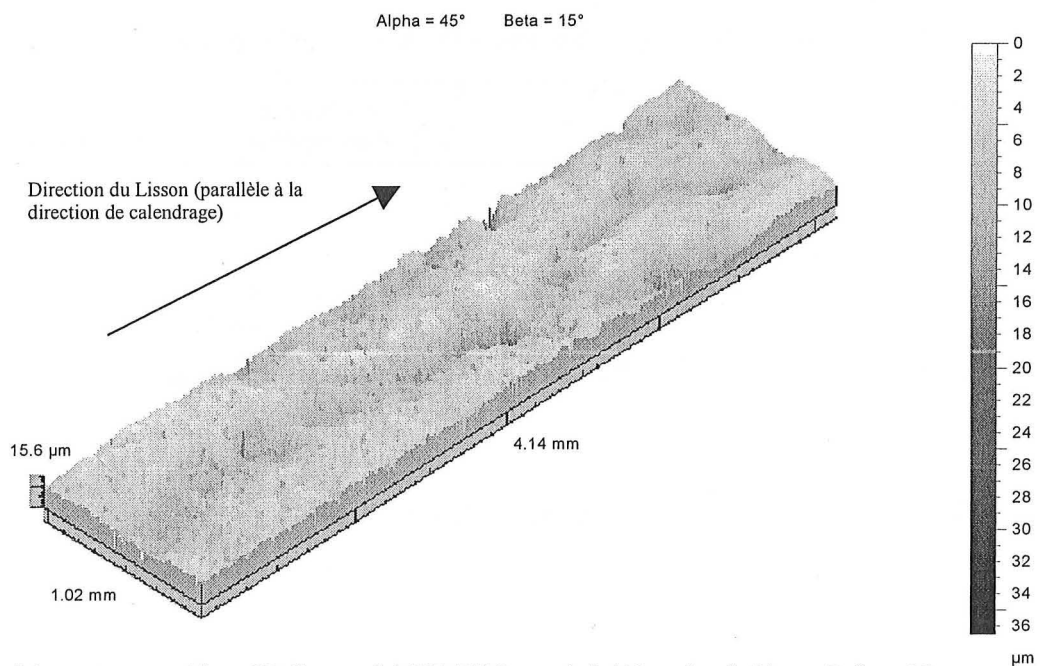


Figure V-4 : Mesure topographique 3D d'un produit PU+PVC soumis à 600 cycles de Lisson-B. $\lambda_c = 0.8$ mm.

Comme pour le produit PVC, l'agent salissant B semble être plus efficace pour reproduire l'évolution esthétique réelle observée sur le test grandeur nature. Mais à l'inverse des produits PVC pour lesquels le test grandeur nature semble être correctement simulé (au moins pour les piqûres et les lézardes), 600 cycles de Lisson-B ne sont toujours pas suffisants pour reproduire 3 mois de test grandeur nature sur les produits PU+PVC (voir figure V-3) :

- La directionnalité du test Lisson est bien visible, induisant une anisotropie marquée qui, elle, n'est bien sûr pas visible sur les échantillons soumis au test grandeur nature ;
- Les défauts sont moins nombreux qu'attendu d'après le test grandeur nature.

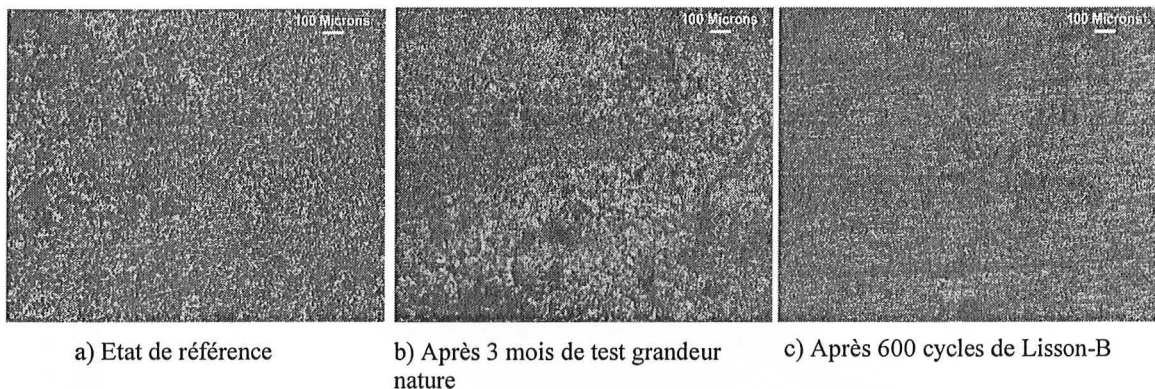


Figure V-3: Micrographies optiques de produits PU+PVC

Cette différence de comportement entre les deux produits est très intéressante :

1. Comme observé sur le test grandeur nature, les produits PU+PVC **supportent mieux** les sollicitations appliquées durant la marche car il sont moins affectés par le test Lisson-B (600 cycles). L'impact sur l'esthétique du produit est moins important, et le test Lisson-B semble donc **capable de discriminer les deux produits**, au moins sur une base subjective.
2. Les 3 mois de test grandeur nature semblent correctement reproduits pour les produits PVC (d'après les défauts apparus), mais pas pour les produits PU+PVC. Ceci nous amène à penser que :
 - a) Premièrement, 600 cycles de Lisson-B ne sont pas suffisant pour reproduire 3 mois de test grandeur nature (ou environ 8500 passages) ;
 - b) Deuxièmement, la période de rûdage pourrait être inférieure à 3 mois/8500 passages pour le produit PVC, ce qui prouve à nouveau les meilleurs propriétés de résistance à l'usure du produit PU+PVC (600 cycles de Lisson-B sont suffisants pour que le produit PVC atteigne son état d'équilibre, correctement reproduit ici – mis à part pour les rayures – alors que le produit PU+PVC est toujours dans sa phase de rûdage).

Les mesures topographiques 3D (figure V-4) montrent que comme pour le produit PVC, la topographie du PU+PVC semble modifiée par le troisième corps piégé dans les défauts,

engendrant des modifications en conséquence sur l'esthétique du revêtement de sol. Néanmoins, nous confirmons que 600 cycles de Lisson-B ne reproduisent pas exactement la topographie obtenue après 3 mois de test grandeur nature : nous espérons une décroissance de la complexité de la surface, **ce qui ne semble pas être le cas ici.**

Il serait intéressant de tester l'impact de la directionnalité du test Lisson, en effectuant 600 cycles de Lisson-B **le long de la direction transverse de l'échantillon** (c.à-d. perpendiculaire à la direction présentée sur la figure V-4). En effet, nous avons vu que le contact répété avec la semelle affecte la distance pic-à-pic moyenne S_m en la dilatant dans les deux directions. Cet effet peut être susceptible d'expliquer (partiellement) la décroissance de la complexité de la surface observée durant le test Lisson classique. À l'inverse, comme les échantillons sont disposés aléatoirement sur le test grandeur nature, la marche globale n'est pas directionnelle si l'on considère tous les échantillons, et les périodes de calendrage et de rugosité (S_m) sont affectées différemment entre les échantillons.

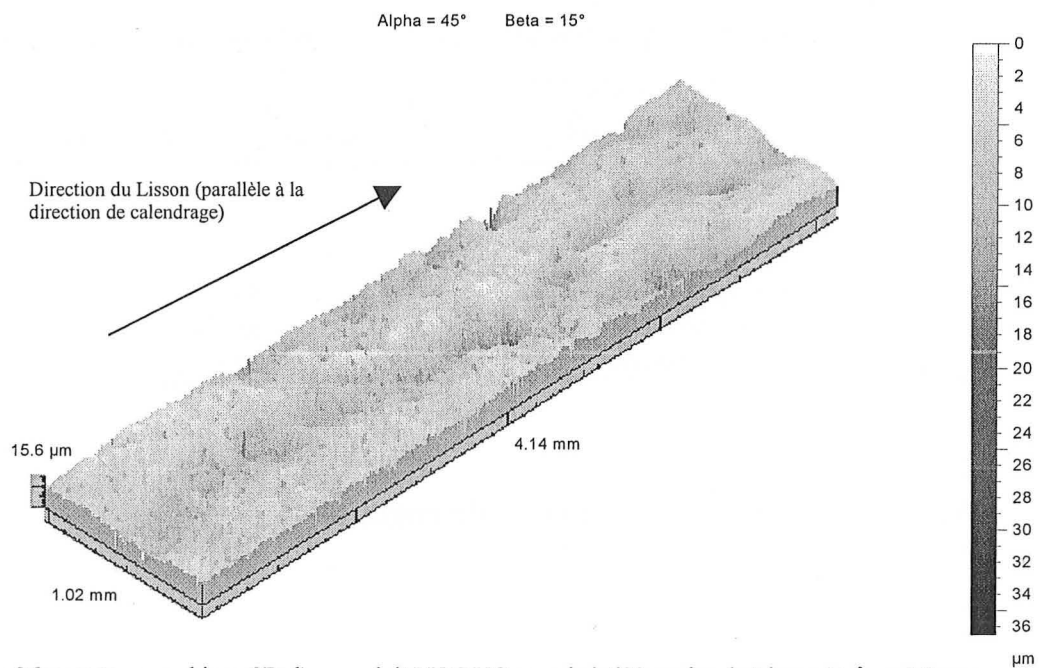


Figure V-4 : Mesure topographique 3D d'un produit PU+PVC soumis à 600 cycles de Lisson-B. $\lambda_c = 0.8$ mm.

V.1.2 Evolution de l'épaisseur de la couche de PU

L'épaisseur de la couche de PU résiduelle (tableau V-2) confirme que l'impact des deux nouvelles procédures Lisson sur la couche PU est le même, c.à-d. qu'il n'y a pas d'abrasion significative des aspérités, ou de compaction de la couche, sauf après 600 cycles de Lisson-B (environ un micromètre perdu, avec un écart-type inférieur). Comme pour la procédure Lisson classique, l'épaisseur résiduelle de la couche est réaliste si on la compare à trois mois de test grandeur nature.

Ainsi, l'introduction d'un troisième corps dans la procédure Lisson ne semble pas changer fondamentalement le(s) processus d'usure impliqué(s) dans ce test.

Tableau V-2 : Evolution de l'épaisseur de la couche de PU durant le test Lisson enrichi par un agent salissant.

<i>Etat de surface</i>	<i>Epaisseur de la couche de PU (micromètres +/- un écart-type)</i>
Référence	8.4 ^{+/-3.4}
3 mois	7.0 ^{+/-2.5}
Lisson-A, 400 cycles	8.4 ^{+/-1.6}
Lisson-A, 600 cycles	8.8 ^{+/-2.3}
Lisson-B, 400 cycles	9.0 ^{+/-1.7}
Lisson-B, 600 cycles	7.3 ^{+/-2.3}

V.1.3 Evolution des paramètres de rugosité

V.1.3.1 Produits PVC

Les paramètres de rugosité sont présentés dans le tableau V-3. Ici nous voyons que :

- Peu importe le troisième corps retenu et le nombre de cycles considérés (parmi ceux étudiés), les paramètres de topographie sélectionnés sont très proches de ceux résultants de trois mois de test grandeur nature.
- Ainsi, la nature du troisième corps employé ne semble pas impacter sur les paramètres de topographie sélectionnés (si nous restons bien sûr dans cette catégorie d'agent salissant).

- L'addition d'un troisième corps dans la procédure Lisson impacte fortement sur les paramètres topographiques sélectionnés, et particulièrement sur les paramètres de symétrie (si nous considérons, par exemple, 400 cycles de Lisson : sans un troisième corps, $Sk = -1.1^{+/-0.5}$ et $Ek = 6.8^{+/-2.3}$, avec un troisième corps A, $Sk = -0.5^{+/-0.2}$ et $Ek = 3.8^{+/-0.7}$). Un tel comportement peut être expliqué si nous considérons à nouveau que le troisième corps est piégé dans les vallées/trous/défauts et, en conséquence, sera vu comme une fonction de la surface durant les mesures topographiques. Ainsi, même si la semelle Lisson abrase les aspérités, le paramètre de skewness ne diminue pas car le profil est rempli de poussières/salissures ; de même, la finesse du profil ne va pas augmenter, comme ce serait le cas si les aspérités étaient transformées en plateaux (sans changement dans les vallées).

Tableau V-3 : Evolution des paramètres de rugosité durant le test Lisson enrichi d'un agent salissant ($\lambda_c=0.8$ mm). Produits PVC.

Paramètre	PVC Etat de référence	PVC 3 mois	PVC 400 cycles A	PVC 600 cycles A	PVC 400 cycles B	PVC 800 cycles B
Amplitude						
Ra [μm]	3.1 \pm 0.5	1.7 \pm 0.3	1.9 \pm 0.4	1.7 \pm 0.4	1.9 \pm 0.4	1.8 \pm 0.3
Rq [μm]	4.0 \pm 0.7	2.2 \pm 0.3	2.5 \pm 0.5	2.2 \pm 0.5	2.5 \pm 0.5	2.3 \pm 0.4
Rtm [μm]	19.5 \pm 3.2	10.7 \pm 1.9	12.0 \pm 2.4	10.9 \pm 2.4	12.3 \pm 2.0	11.1 \pm 1.7
Rpm [μm]	7.2 \pm 0.8	5.1 \pm 1.0	5.2 \pm 1.0	4.5 \pm 0.8	5.3 \pm 0.9	4.9 \pm 0.7
Rvm [μm]	12.3 \pm 2.6	5.7 \pm 1.2	6.8 \pm 1.5	6.4 \pm 1.7	6.7 \pm 1.6	6.2 \pm 1.1
Symétrie/ADF						
Ek	5.6 \pm 1.4	3.9 \pm 0.8	3.8 \pm 0.7	3.9 \pm 0.7	4.1 \pm 0.9	3.9 \pm 0.6
Sk	-1.0 \pm 0.4	-0.3 \pm 0.3	-0.5 \pm 0.2	-0.5 \pm 0.3	-0.5 \pm 0.2	-0.4 \pm 0.2
Etalement						
Sm [μm]	100.0 \pm 10	92.0 \pm 12	81.0 \pm 10.0	80.0 \pm 11.0	82.0 \pm 8.0	86.0 \pm 10.0

Ainsi, l'utilisation d'un troisième corps durant le test Lisson (et particulièrement l'agent salissant B, si nous considérons les changements dans l'esthétique du revêtement de sol) semble être très efficace pour reproduire 3 mois de trafic sur le produit PVC.

V.1.3.2 Produits PU+PVC

Les paramètres de rugosité sont présentés dans le tableau V-4.

Tableau V-4 : Evolution des paramètres de rugosité durant le test Lisson enrichi avec un agent salissant ($\lambda_c=0.8$ mm). Produits PU+PVC.

Paramètre	PU+PVC Etat de référence	PU+PVC 3 mois	PU+PVC 400 cycles A	PU+PVC 600 cycles A	PU+PVC 400 cycles B	PU+PVC 800 cycles B
Amplitude						
Ra [μm]	1.8 ± 0.3	1.2 ± 0.2	1.1 ± 0.2	0.9 ± 0.2	1.0 ± 0.3	0.9 ± 0.2
Rq [μm]	2.4 ± 0.4	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.5	1.1 ± 0.3	1.3 ± 0.3	1.2 ± 0.2
Rtm [μm]	13.2 ± 2.9	7.7 ± 1.0	5.9 ± 1.0	5.2 ± 1.0	5.9 ± 1.3	5.1 ± 0.7
Rpm [μm]	5.4 ± 1.2	3.6 ± 0.6	2.4 ± 0.8	2.9 ± 0.6	2.7 ± 0.4	2.4 ± 0.4
Rvm [μm]	8.2 ± 2.1	4.1 ± 0.6	3.4 ± 0.8	2.3 ± 0.4	3.2 ± 1.0	2.8 ± 0.4
Symétrie/ADF						
Ek	5.0 ± 1.2	3.5 ± 0.6	4.1 ± 1.5	3.7 ± 0.9	3.3 ± 0.6	3.4 ± 0.4
Sk	-0.7 ± 0.3	-0.2 ± 0.3	-0.5 ± 0.4	-0.3 ± 0.3	-0.2 ± 0.3	-0.3 ± 0.4
Etalement						
Sm* [μm]	PD: 65.0 ± 6	PD: 64.0 ± 6	139.0 ± 20.0	124.0 ± 18.0	126.0 ± 12.0	117.0 ± 9.0
	TD: 80.0 ± 9	TD: 73.0 ± 10	168.0 ± 22.0	159.0 ± 18.0	176.0 ± 16.0	153.0 ± 11.0

* PD: direction de calendrage. TD: direction transverse.
La direction du test Lisson est parallèle à la direction de calendrage.

Les conclusions sont pratiquement les mêmes que pour les produits PVC :

- La topographie de surface à trois mois semble être mieux reproduite lorsqu'un troisième corps est ajouté à la procédure Lisson. Néanmoins, les paramètres d'espacement augmentent fortement après 400 cycles de Lisson avec un troisième corps (multipliés par plus de deux dans les deux directions) ; ils tendent ensuite à décroître lorsque le nombre de cycles augmente. Nous confirmons ici la différence de comportement entre les deux produits ; et nous n'expliquons toujours pas clairement une telle augmentation. Des test complémentaires, comme ceux visant à étudier la directionnalité du Lisson (paragraphe V.1.1.2) devrait nous aider sur ce point.
- La nature du troisième corps employé ne semble pas influencer les paramètres topographiques sélectionnés.
- Les paramètres de symétrie sont modifiés en accord avec l'hypothèse d'un troisième corps piégé dans les vallées/défauts de surface, couplée à une éventuelle abrasion des aspérités.

Même si la majorité des paramètres topographiques sélectionnés évolue comme attendu après trois mois de trafic, nous avons vu que l'esthétique de la surface PU+PVC n'était pas suffisamment proche de la réalité (cette différence peut être en partie attribuée au paramètre S_m , définissant une période moyenne du profil, impactant donc partiellement sur l'esthétique du revêtement de sol).

Ainsi, nous ne pouvons pas valider complètement le test Lisson avec un troisième corps pour les deux produits. Néanmoins, le test Lisson-A/B reproduit bien mieux la réalité que le test Lisson classique (ou, évidemment, que le test Frick Taber). L'approche Ek-Sk confirme la pertinence de cette nouvelle procédure.

V.1.4 La nouvelle procédure Lisson étudiée via l'approche Ek-Sk

L'approche Ek-Sk montre le fort impact que le troisième corps peut avoir sur les résultats Lisson, même s'il ne s'agit que d'un agent salissant. Dans la procédure classique, cette approche met en évidence la nature abrasive des processus d'endommagement pour les deux revêtements de sol ; ici, **l'abrasion ne semble plus être présente.**

Nous pouvons raisonnablement supposer que cette conclusion est fautive : en effet, si l'agent salissant est piégé dans les vallées, leur géométrie (mesurée par profilométrie) est modifiée en

conséquence (en particulier, nous pouvons observer une décroissance de la profondeur de profil moyenne, avec une augmentation en conséquence de S_k et une chute de E_k). Ainsi, même si les aspérités sont progressivement abrasées (comme observé avec la procédure classique), l'approche E_k - S_k ne permet pas de conclure sur la présence d'un processus d'abrasion car le critère à 90 % n'est pas vérifié.

V.1.4.1 Paramètres d'amplitude

La figure V-5 montre que, pour les deux agents salissants, et particulièrement pour le produit PVC, les paramètres d'amplitude **décroissent** après 400 cycles, pour rester **pratiquement constants** jusqu'à 600 cycles. Nous confirmons ici les observations visuelles : l'état 3 mois semble être mieux reproduit pour le produit PVC que pour le produit PU+PVC.

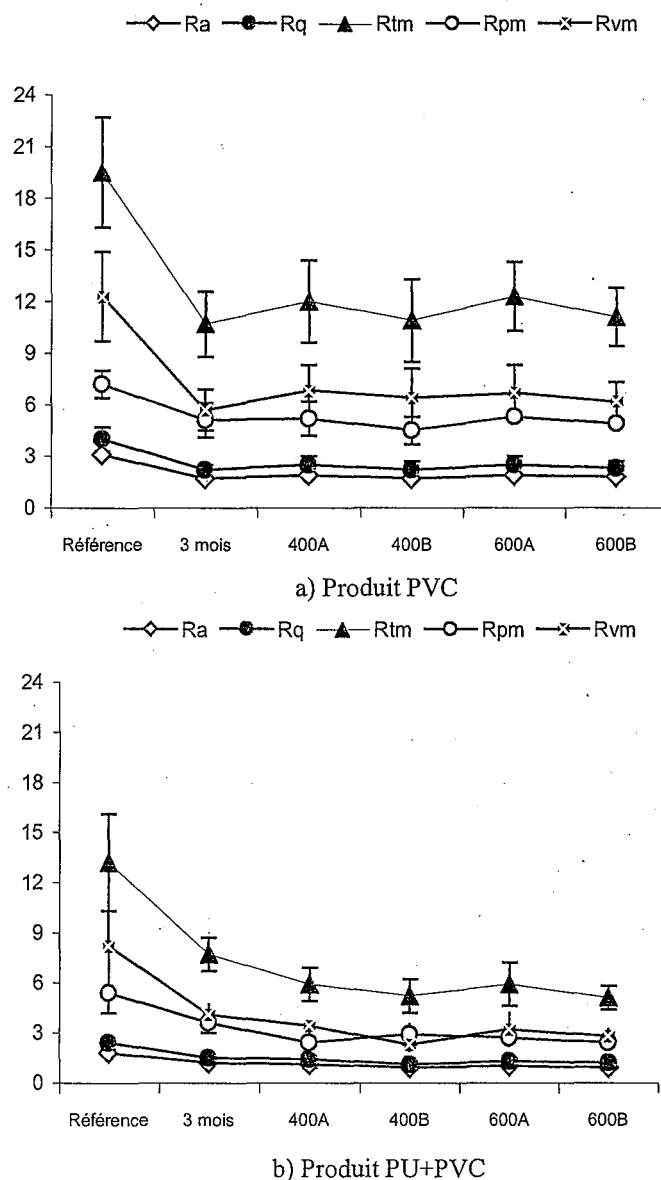


Figure V-5: Evolution des paramètres de rugosité durant le test Lisson enrichi par un agent salissant [micromètres].

V.1.4.2 Courbes Ek-Sk

Pour les deux produits et les deux agents salissants, le polynôme théorique n'est pas suivi : la symétrie du profil n'évolue pas conformément à l'accroissement mis en évidence dans le cas de l'abrasion progressive (figure V-6).

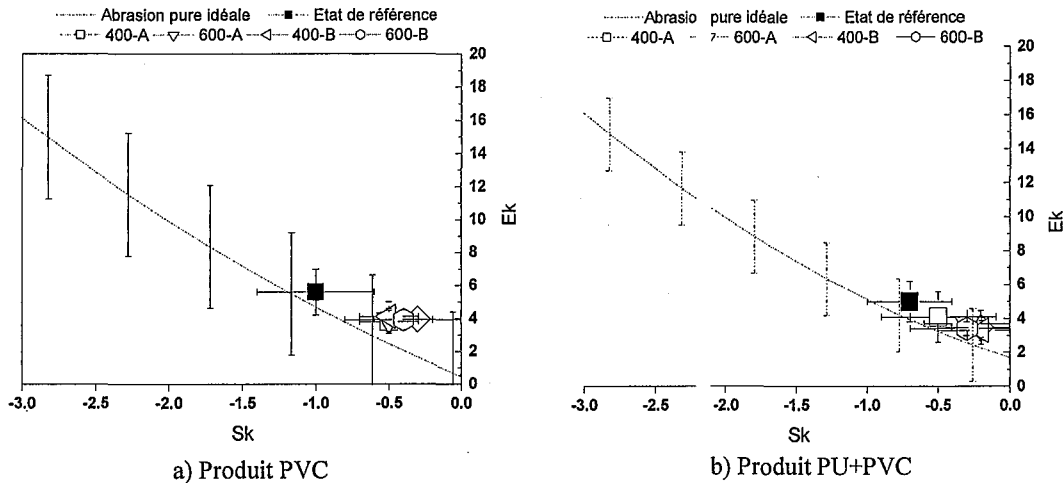


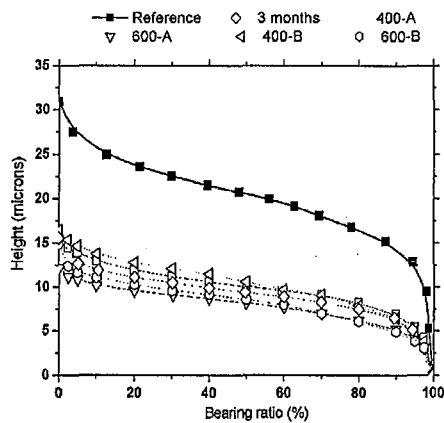
Figure V-6: Evolution des paramètres de symétrie durant le test Lisson enrichi par un agent salissant.

Cet effet est probablement dû à la salissure piégée dans les vallées, ce qui est confirmé par les courbes d'Abbott-Firestone (critère à 90 % non suivi). De plus, nous voyons que, pour les deux produits, la symétrie et la finesse du profil après 3 mois sont **correctement reproduites** avec les deux agents salissants.

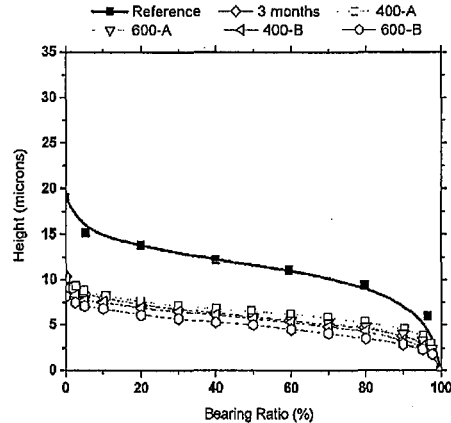
V.1.4.3 Courbes d'Abbott-Firestone

Les courbes d'Abbott-Firestone (figure V-7) confirment ces conclusions:

1. L'approche Ek-Sk n'est pas adéquate pour conclure sur un processus abrasif lors de la nouvelle procédure Lisson (critère à 90 % non vérifié) ;
2. La distribution des hauteurs après 3 mois de test grandeur nature est correctement reproduite si un troisième corps est inclus dans la procédure Lisson (les paramètres de symétrie et les courbes d'Abbott-Firestone sont cohérents).



a) Produits PVC



b) Produits PU+PVC

Figure V-7: Evolution des courbes de portance durant le test Lisson enrichi d'un agent salissant.

V.1.5 Conclusions sur le test Lisson enrichi d'un troisième corps

Lorsque le test Lisson est enrichi avec un des deux agents salissants recommandés pour les revêtements de sol textile :

- L'esthétique du revêtement de sol résilient évolue en accord avec les observations in-situ (mis à part pour les transferts permanents et les rayures) ;
- Les paramètres de rugosité sélectionnés sont en accord avec la réalité ;
- Les niveaux d'usure (sur la base des mesures d'épaisseur de couche résiduelle) sont cohérents.

De plus, les deux produits étudiés peuvent être distingués par **appréciation subjective** de l'évolution de leur aspect visuel : le produit PU+PVC est bien moins marqué après 600 cycles de Lisson-A/B que le produit PVC.

Entre les deux agents salissants, celui contenant de la poussière de tourbe (agent salissant B) semble mieux reproduire 3 mois de trafic réel.

Cependant, ce test Lisson modifié doit encore être amélioré sur deux points :

- Si la réalité de 3 mois de trafic est correctement reproduite pour le revêtement de sol PVC après 600 cycles de Lisson-B, ça n'est pas le cas pour le produit PU+PVC (globalement, ce dernier est moins usé – meilleure esthétique – par le test Lisson-B). Cette observation nous amène à conclure que :
 - a) Les deux produits testés se comportent différemment, comme formulé par les retours client (ce qui confirme la pertinence du test Lisson) ;
 - b) La période de rûdage doit être plus longue pour le produit PU+PVC que pour le produit PVC, probablement à cause de la nature élastomère du premier, c.à-d. sa plus forte capacité à supporter les contraintes appliquées par visco-élasticité avant d'initier des modes de réponse irréversibles. Le nombre de cycles de Lisson-B nécessaire pour reproduire 3 mois de trafic doit être supérieur à 600 ;
- La part d'usure globale dans le trafic réel est correctement simulée par le test Lisson-B. En ce qui concerne la part locale de l'usure (les rayures, principalement), ce test est encore inefficace : les rayures ne sont pas du tout reproduites.

Nous présentons maintenant une **étude préliminaire** visant à aider à déterminer une procédure adéquate pour reproduire les rayures observées sur le test grandeur nature (au moins du point de vue de l'aspect esthétique des produits et de la géométrie de la rayure).

En ce qui concerne la meilleure cohérence entre le test grandeur nature et le Lisson-B pour le produit PU+PVC, des travaux complémentaires devraient être réalisés. Nous proposons d'explorer trois voies :

- Augmenter le **nombre de cycles** de Lisson-B ;
- Regarder l'influence de **la procédure de nettoyage/de la période de renouvellement du troisième corps** (200 cycles) comme discuté dans le paragraphe V.1.
- Essayer **un autre agent salissant**, avec une granulométrie plus importante, par exemple. Les vallées pourraient être plus rapidement remplies, avec des effets majeurs sur l'aspect esthétique et les paramètres topographiques.

V.2 ETUDE DES RAYURES

Les rayures (et plus particulièrement les rayures macroscopiques) sont les fonctions les plus pénalisantes pour l'aspect esthétique des revêtements de sol. Elles constituent des pièges à salissure importants ; et même si les produits sont nettoyés avec précautions, les rayures sont toujours visibles sur le revêtement de sol car ce sont des fonctions très directionnelles, avec des amplitudes d'au moins la moitié du paramètre Rtm du produit (chapitre 4).

Nous avons été capables de reproduire des rayures macroscopiques réelles sur la base de leur géométrie et de l'évolution de l'aspect esthétique du revêtement de sol, par des essais de nano-rayures réalisés dans les conditions expérimentales¹⁵ données au chapitre 3. Nous proposons d'introduire une telle procédure de rayure dans le protocole expérimental du test Lisson-B, en tant qu'**étape préliminaire**. La génération de rayures, suivie par l'action de marche des semelles Lisson combinée à l'agent salissant B, devrait donner des résultats intéressants, fidèles à la réalité de trois mois de test grandeur nature.

Evidemment, à cause de la large distribution de sollicitations appliquées sur un revêtement de sol durant son temps de vie, le seul intérêt d'introduire de telle "nano"-rayures dans un test d'usure serait de reproduire des "**fonctions minimales**" plutôt que des fonctions moyennes. En effet, comme nous l'avons présenté dans le chapitre 4, la géométrie des rayures réelles n'est pas constante entre les rayures ; la section transverse d'une rayure peut même évoluer le long de la rayure, rendant caduque la définition d'une géométrie "moyenne" de rayure.

Le travail présenté ici vise donc à caractériser une telle "rayure critique". Il s'agit là d'une application directe de la règle empirique proposée dans le chapitre 4, à savoir qu'une rayure peut être qualifiée de fine si sa largeur est inférieure à 80 % du paramètre Sm ET sa profondeur inférieure à 40 % de Rtm (ces paramètres étant pris à l'état non usé).

V.2.1 Représentation 3D

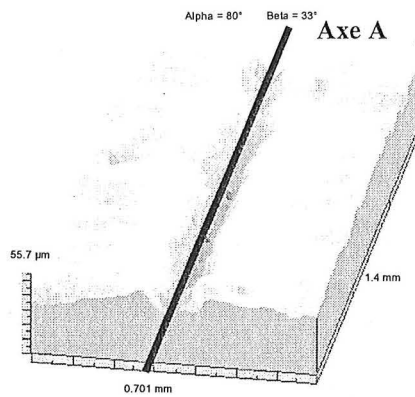
Après la période de recouvrance visco-élasto-plastique (c.à-d. 20 jours après le test de nano-rayure), nous pouvons observer, pour les deux produits, une **rayure régulière** (mis à part certaines variations locales de géométrie, probablement due aux hétérogénéités locales du

¹⁵ Pour mémoire : 2 nano-rayures par produit ont été effectuées, à charge normal constante, dans les conditions suivantes :

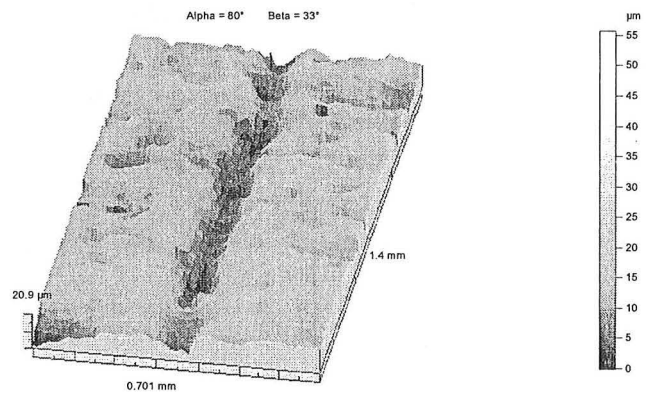
Pointe : DLC, angle d'ouverture 90°, rayon : 20 µm | Vitesse de rayage : 1 mm/min | Longueur rayée : 10 mm | Force normale : 1 N.

revêtement de sol, voir paragraphe III.1.3). L'aspect géométrique, et plus particulièrement la constance de la largeur de la rayure pendant les 9 mois de test grandeur nature, peuvent être appréciées sur la figure V-8.

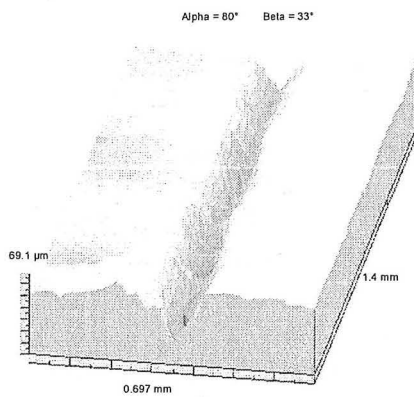
Comme présenté dans le chapitre 5, les dimensions typiques des nano-rayures, après 9 mois de test grandeur nature, sont 200 micromètres de largeur et entre 10 et 30 micromètres de profondeur. Nous sommes ici dans l'ordre de grandeur des géométries transverses des rayures observées sur le test grandeur nature (voir tableau IV-9).



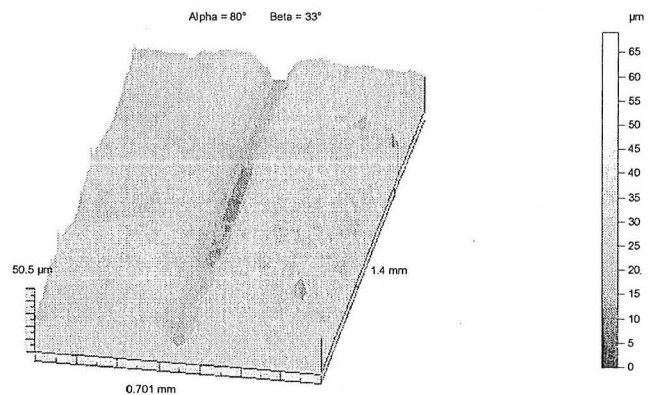
a) PVC, Nano-rayure 1 – 20 jours de vie



b) PVC, Nano-rayure 1 – 9 mois de vie



c) PU+PVC, Nano-rayure 1 – 20 jours de vie



d) PU+PVC, Nano-rayure 1 – 9 mois de vie

Figure V-8: Mesures 3D des nano-rayures effectuées sur les deux produits. Pour chaque rayure, les vues de « référence » (a/ et c/) et après 9 mois de test grandeur nature correspondent au même endroit sur la rayure.

V.2.2 Observations transverses – niveau de déformation plastique

Nous complétons l'étude présentée au chapitre 3 (tableau III-3) avec des données mesurées sur les nano-rayures après 9 mois de test grandeur nature. Dans le tableau V-5, nous avons calculé le volume linéaire usé (V_w) et le volume plastiquement déformé (V_{PS}) après 9 mois de test grandeur nature (c.à-d. après le processus de recouvrance visco-élastique, après avoir été rempli par la salissure, et après (pour le PVC) / éventuellement pendant (pour le PU+PVC) la période de rôdage du processus d'usure globale).

Tableau V-5 : Volume usé linéaire (V_w) et volume plastiquement déformé (V_{PS}) calculés à partir des 4 nano-rayures réalisées sur les deux produits, après 9 mois de test grandeur nature.

Rayure		V^- [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}$]	V^+ [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}$]	V_w [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}$]	V_{PS} [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}$]
P V C	Moyenne	659	349	310	1315
	Ecart-type	62	136	74	238
P U + P V C	Moyenne	722	332	390	1053
	Ecart-type	312	322	10	634

L'évolution de V^+ et V^- durant le test grandeur nature (tableau V-6) est intéressante :

- En ce qui concerne les variations relatives de V^+ avec le trafic, il apparaît que les deux produits sont sujets à **une usure par abrasion/compression** des bourrelets latéraux (décroissance de V^+ d'au moins 40 %).
- Pour l'évolution de V^- , qui pourrait être reliée à une recouvrance visco-élastique du fond des rayures, les choses sont moins claires. Cependant, le niveau de V^- "recouvert" atteignant jusqu'à 71 % (sur le produit PU+PVC), nous confirmons ici que la salissure peut jouer un rôle important en remplissant la rayure, donnant l'impression d'une recouvrance en fond de rayure. Cet effet de la salissure dans la rayure peut être apprécié sur la figure V-9a, présentant la valeur absolue de V^- en fonction du temps de test grandeur nature, pour les deux produits: Nous voyons là qu'en dépit de l'importante dispersion dans les géométries des dépressions initiales, entre les deux produits, créées durant les tests de nano-rayures, les dépressions finales (c.à-d. après 9 mois de test grandeur nature) sont relativement équivalentes (toujours entre les deux produits). Ce

constat pourrait indiquer l'existence d'une géométrie "d'équilibre", directement liée à la nature de la salissure et au processus de nettoyage (et par là, à l'environnement global du revêtement de sol) : des géométries de dépressions différentes sont remplies de salissure jusqu'à atteindre cet état d'équilibre, le même pour toutes les rayures.

- Pour les deux produits, l'évolution de V^+ avec le temps (figure V-9b) ne montre aucune homogénéisation de cet aspect de la géométrie des rayures. Cette conclusion est cohérente avec l'hypothèse d'usure par abrasion/déformation (mis à part pour la rayure 2 sur le produit PU+PVC) : comme les nano-rayures étaient assez proches les unes des autres sur le test grandeur nature, leur niveau d'usure devrait être relativement proche, ce qui se traduit par une quantité équivalente de perte de volume des bourrelets latéraux (sur la figure VI-9b, les pentes sont les mêmes, mis à part pour la seconde nano-rayure PU+PVC).

Tableau V-6 : Evolution relative des volume linéaires usés (V_w) et déformés plastiquement (V_{PS}), calculés d'après les 4 nano-rayures réalisées sur les deux produits.

Rayure	$V^*/V^*_{20 \text{ jours}}$ [%]	$V^*/V^*_{9 \text{ mois}}$ [%]	$V^{+ 9 \text{ mois}}/V^{+ 20 \text{ jours}}$ [%]	$V^{+ 9 \text{ mois}}/V^{+ 20 \text{ jours}}$ [%]
PVC – rayure 1	48	41	- 55	- 47
PVC – rayure 2	78	63	- 39	- 26
PU+PVC – rayure 1	45	59	- 43	- 56
PU+PVC – rayure 2	61	21	- 90	- 71

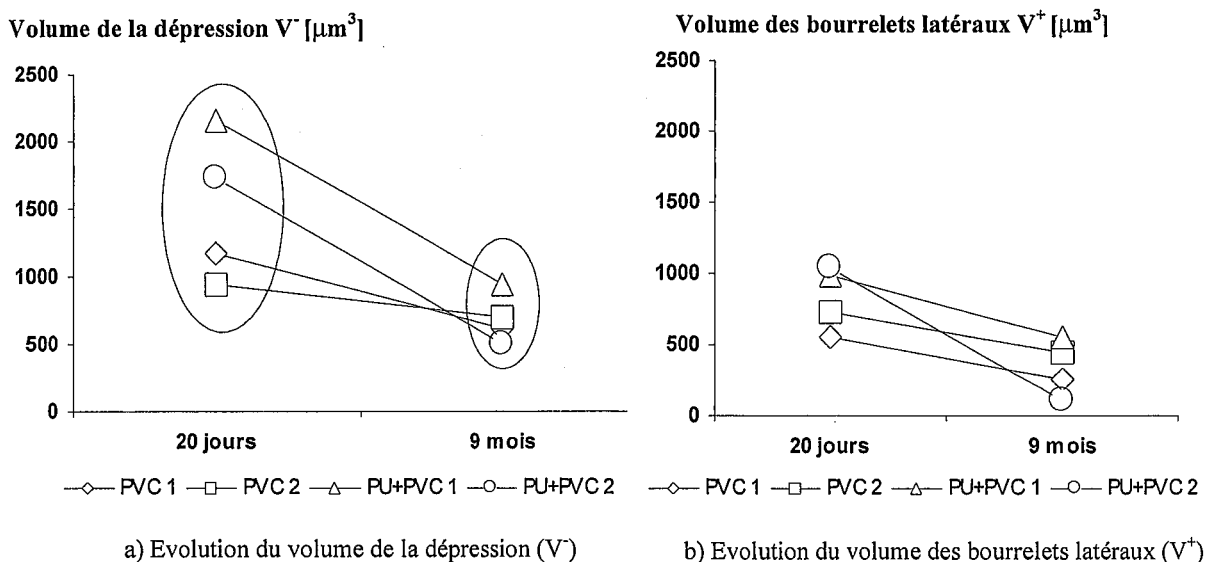


Figure V-9: Evolution des volumes caractéristiques des "nano"-rayures réalisées sur les deux produits avec le temps de test grandeur nature.

Il semble évident qu'une telle étude devrait être regardée avec prudence, car la redéfinition de la ligne moyenne des profils étudiés est directement affectée par ces deux processus, à savoir l'abrasion des bourrelets latéraux et le remplissage des fonds de rayure. De plus, nous ne pouvons pas être sûrs que le fond de rayure ne va pas recouvrir d'une certaine quantité durant les neuf mois de test grandeur nature (par un processus thermiquement/mécaniquement activé), ou être lui-même usé par les troisièmes corps qu'il aurait piégé.

Ainsi, il est nécessaire :

- **D'étudier l'impact du temps sur la géométrie des rayures**, en rayant dans les mêmes conditions un échantillon à placer dans l'environnement du test grandeur nature sans avoir à subir les sollicitations de ce test. Ceci nous donnera des informations sur le processus de recouvrance naturel, dans l'environnement étudié, et sur l'échelle de temps considérée.
- **De suivre plus finement (de manière quotidienne, par exemple) l'évolution de la géométrie des rayures soumises au test grandeur nature. En rapprochant les résultats de cette étude à ceux obtenus sur le processus de recouvrance naturelle discuté précédemment, et ceux issus des deux procédures Lisson (avec et sans troisième corps) appliqués sur ces rayures ainsi simulées, des connexions intéressantes devraient apparaître pour mieux comprendre l'évolution de la géométrie de la rayure due à la réhologie du produit, à la salissure piégée dans nos semelles, et aux sollicitations appliquées sur le revêtement de sol durant l'action de marche.**

Enfin, il convient de mener ces expérimentations selon une approche statistique plus vaste que celle présentée ici : au vu des différentes singularités des produits étudiés, deux nano-rayures sont insuffisantes pour avoir des résultats suffisamment fiables sur lesquels appuyer un modèle comportemental de la géométrie des rayures.

V.3 Optimisation du test Lisson : conclusions

Sur la base de cette étude préliminaire du comportement à la rayure des revêtements de sol étudiés, et sachant la pertinence du test Lisson démontrée dans le chapitre précédent, nous proposons de suivre la procédure suivante pour reproduire le(s) processus d'usure observé(s) sur le test grandeur nature :

1. **Réalisation de plusieurs “nano”-rayures dans les conditions expérimentales proposées au chapitre 3.** Le nombre de rayures est à définir en fonction des informations recherchées. Pour l'étude de l'évolution esthétique, quelques rayures (4), par direction (direction de calendrage et transverse), devraient être suffisantes.
2. **Soumission du revêtement de sol au test Lisson-B (test Lisson classique enrichi d'un agent salissant B).** Il reste encore à déterminer le nombre de cycle, en prenant en compte les limitations mises en évidence sur les produits PU+PVC (600 cycles semblent insuffisant).

Pour l'exploitation des résultats, nous proposons de suivre :

1. **La classification des défauts** définie au chapitre 4 (faible/moyen/fort) ; ceci permettra d'évaluer la résistance à l'usure sur une **base subjective, cohérente avec le retour client.**
2. **La mesure des paramètres topographiques sélectionnés pour ce travail.** Permettant d'avoir une bonne description de la topographie de surface, ces paramètres sont capables de discriminer les deux produits, et d'aider à mieux comprendre les processus impliqués dans l'usure des revêtements de sol.

CONCLUSION

Grâce à une approche centrée autour d'un test grandeur nature, nous avons pu voir l'importance de l'outil subjectif (observations visuelles) pour la discrimination des deux produits d'après leur résistance à l'usure en conditions réelles d'utilisation. Cet outil est indispensable si l'on souhaite reproduire les constats de la clientèle.

Nous proposons de séparer les processus d'usure des revêtements de sol en deux parties distinctes :

1. Un processus local, avec l'apparition de défauts de surface moyen ou majeur pour l'esthétique du produit, le défaut le plus pénalisant étant la rayure macroscopique. Ces défauts agissent comme des pièges à salissure, induisant par là une diminution de la brillance locale.
2. Un processus global, avec simplification de la micro-géométrie de surface par déformation et/ou abrasion. À cette échelle, la perte de brillance due aux défauts locaux engendre une dégradation de l'aspect esthétique du revêtement de sol.

Les variations de l'épaisseur de la couche protectrice due à ce processus double sont faibles : moins de 20 % après 3 mois de test grandeur nature (durée approximative de la période de rodage du revêtement de sol), moins de 25 % après une pleine année. Ce constat nous a permis de montrer les décalages entre les sollicitations du test Frick Taber et les sollicitations réelles que l'on souhaite simuler. Comme ce test génère principalement l'abrasion du revêtement de sol, il n'est pas capable de reproduire la déformation visco-élasto-plastique constatée durant l'usure réelle, déformation qui joue un rôle primordial dans le comportement général du produit.

L'importance de l'agent salissant a été mise en évidence, même pour le test Lisson, proposé comme une alternative très prometteuse pour la simulation de l'usure des revêtements de sol grâce à sa dynamique engendrant des niveaux de sollicitation réalistes. Néanmoins, l'approche Ek-Sk, malgré ses propres limitations (restreinte à un processus d'usure abrasive idéale), couplée à l'analyse de quelques paramètres topographiques pertinents, a clairement montré les améliorations nécessaires à ce test pour mieux reproduire la réalité.

L'introduction d'un agent salissant (négligé jusqu'à maintenant dans les tests d'usure dédiés aux revêtements de sol résilients) dans la procédure Lisson a prouvé son efficacité en ce sens, particulièrement pour le revêtement PVC. Cependant, la cohérence entre les observations après trois mois de test grandeur nature et la procédure Lisson avec agent salissant, satisfaisante pour les produits PVC, doit encore être travaillée pour le revêtement de sol PU+PVC.

Cette procédure améliorée est toujours incapable de reproduire la fonction de surface la plus pénalisante observée en conditions réelles d'utilisation : la rayure. Un réglage expérimental a été proposé pour reproduire une géométrie de rayure réelle minimale ; mais le processus de rayure sur les revêtements de sol étudiés doit lui aussi être exploré plus en profondeur.

Les résultats proposés jettent ainsi quelques bases sur lesquelles développer un travail complémentaire, encore nécessaire, sur l'étude des processus d'usure des revêtements de sol.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F.C. Harper, "The abrasion resistance of flooring materials – A review of methods testing", *Wear*, 4 (1961) 461-478
- [2] AFNOR, "Revêtements de sol résilients – Classification", NF EN 685, Paris: AFNOR, 1996, 5 p.
- [3] AFNOR, "Revêtements de sol résilients – Détermination de la résistance à l'usure – Partie 1: Essai de Stuttgart", NF EN 660-1, Paris: AFNOR, 1999, 8 p.
- [4] AFNOR, "Revêtements de sol résilients – Détermination de la résistance à l'usure – Partie 2: Essai de Frick-Taber", NF EN 660-2, Paris: AFNOR, 1999, 9 p.
- [5] I. M. Hutchings "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials", Butterworth-Heinemann, 1992
- [6] J. Blouet, « Frottement. Usure », *Techniques de l'ingénieur* 2 (1986), A 3139, 1-9
- [7] F.P. Bowden, D. Tabor, "The friction and lubrication of solids", Clarendon press-Oxford, 2001. ISBN: 0-19-850777-1
- [8] S. Sundararajan, B. Bhushan, "Static Friction and surface roughness studies of surface micromachined electrostatic micromotors using an atomic force/friction force microscope", *J. Vac. Sci. Technol.*, A 19(4) (Jul/Aug 2001), 1777-1785
- [9] J. I. McCool, "Comparison of models for the contact of rough surfaces", *Wear*, 107 (1986), 37-60
- [10] B. J. Briscoe, "Isolated contact stress deformations of polymers; the basis for interpreting polymer tribology", *Tribology International*, 31 (1-3) (1998), 121-126
- [11] G. Petitet, « Contribution à la compréhension des mécanismes élémentaires d'usure douce des élastomères chargés réticulés », Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 2003
- [12] A. Schallamach, "How does rubber slide?", *Wear*, 17 (1971), 301-302
- [13] A. K. Bhowmick, S. Basu et S. K. De, "scanning electron microscopy studies of abraded rubber surfaces", *Journal of Materials Science*, 16 (1981), 1654-1660
- [14] A. K. Bhowmick, "Ridge formation during the abrasion of elastomers", *Rubber Chemistry and Technology*, 55 (1982), 1055-1062
- [15] T. Iway, Y. Uchiyama, "Variations of rubber friction in the course of pattern abrasions – relationships between ridge deformations and frictional force", 2000
- [16] Y.S. Kim, H.S. Byun, S. Kim, A.N. Gent, "Abrasion of selected rubber compounds with a DIN abrader", *Korea Polymer Journal*, 7 (2) (1999), 116-123

- [17] R. Ramakrishnan, J.A. Donovan, "The effect of abrading surfaces on the wear of rubber tread compounds", *Rubber Chemistry and Technology*, 68 (1995), 609-622
- [18] Y. Uchiyama, "Wear of rubber through roll formation", *International Polymer Science and Technology*, 12 (6) 1985, 51-62
- [19] M.M. Reznikovskii, G.I. Brodskii, "Abrasion of rubber", Maclaren Palmerton, 1967
- [20] F.P. Bowden, D. Tabor, "Mechanical wear", *Burwell. Amer. Soc. Metals*, (janv. 1950), 117-20
- [21] R.C. Bowers, W.A. Zisman, "Engineering design for plastics" (E. Baer, Ed.), U.S. Naval Research Laboratory, SPE Polymer Science & Engineering Series, Reinhold, New York, 1964
- [22] A. Ekberg, "Contact Mechanics and Wear – Notes", Department of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, 1997
- [23] J.F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces", *Journal of Applied Physics*, 24 (1953), 981-988
- [24] B. Briscoe, "Wear of polymers: an essay on fundamental aspects", *Tribology International*, 14 (1981), 231-243
- [25] I.V. Kragel'skii, E.F. Nepomnyashchii, « Fatigue wear under elastic contact conditions », *Wear*, 8 (1965), 303-319
- [26] M.M. Reznikovskii, G.I. Brodskii, « Abrasion of rubber », Maclaren Palmerton, 1967
- [27] A.G. Thomas, « Factors influencing the strength of rubbers », *Rubber Chemistry and Technology*, 48 (1975), 902-912
- [28] J. Blouet, « Usure », *Techniques de l'Ingénieur*, B 585, 1-37
- [29] B.J. Briscoe, E. Pelillo, S. K. Sinha, « Scratch hardness and deformation maps for polycarbonate and polyethylene », *Polymer engineering and science*, vol. 36 no. 24 (1996), 2996-3005
- [30] J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson, "Contact of nominally flat surfaces", *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 295 (1966), 300-319
- [31] D.J. Whitehouse, J.F. Archard, *Proc. R. Soc., A* 316 (1970), 97-121
- [32] R.A. Onions, J.F. Archard, "The contact of surfaces having a random structure", *J.Phys. D: Appl. Phys.*, 6 (1973), 290-304
- [33] M.T. Do, H. Zahouani, "Frottement pneumatique/chaussée: influence de la microtexture des surfaces de chaussée". In M. BRENDLE ; A. CHATEAUMINOIS ; C. GAUTHIER (Eds), *Tribologie des Matériaux Organiques*. Journées Françaises de Tribologie, 02/05/2001-04/05/2001, Obernai, France. (Actes des Journées internationales francophones de la Société Tribologique de France, 7). Paris: SIRPE, 2002 - ISBN: 2-906643-25-4.

- [34] T. Duchêne, « Optimisation des conditions d'emboutissage par simulation en étirage plan: Etude critique du frottement et des paramètres rugosimétriques fonctionnels comme signatures de la sévérité du contact », thèse de doctorat INPL, 1997
- [35] AFNOR, "Resilient floor coverings – Vocabulary", NF EN 12466:1998, Paris: AFNOR, 1998
- [36] J.W. Summer, E.B. Rabinovitch, B.F. Goodrick Company, "Polyvinyl chloride (PVC)", In: "Engineered materials handbook - Engineering plastics", ASM International, 2 (1988), p 209. ISBN: 0-87170-279-7 (v. 1) / 0-87170-280-0 (v. 2)
- [37] Richard Consiglio, "Tenue mécanique de couches très minces sur substrats fragiles : développement d'un dispositif spécifique de micro-ryure et modélisation élastique par éléments frontières du contact glissant sphère/plan », thèse de doctorat INPL, 1997
- [38] A. Darbeïda, "Caractérisation mécanique de surfaces revêtues. Relation microstructure/tenue mécanique de revêtements de chrome et d'acier inoxydable austénitique", thèse de doctorat INPL, 1995
- [39] AFNOR, « Etat de surface : Méthode du profil », NF EN ISO 4288, Paris : AFNOR, 1998, 8 p.
- [40] Rodenstock, "Profilmessplatz RM600 2D – Bedienungsanleitung", version 2.0, 1990
- [41] S. Audisio, M. Caillet, A. Galerie, H. Mazille, "Revêtements et traitements de surface – Fonctionnalités, durabilité, procédés", Presses polytechniques et universitaires, 1998, ISBN 2-88074-405-9
- [42] ASTM, "Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)", B46.1-1995, Philadelphia: ASTM
- [43] J.K. Lancaster, "Abrasive wear of polymers", Wear, 14 (1969), 223-229
- [44] W.P. Dong, N.L. Luo, P.J. Sullivan, K.J. Stout, (1994), "Visualisation techniques and a primary parameter set for characterizing three-dimensional surface topography", Three dimensional surface topography; measurement, interpretation and application – A survey and bibliography, Part III, Editor: K.J. Stout, Penton Press, 1994
- [45] Fayolle C., "Analyse statistique de la topographie des surfaces", Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 1983
- [46] AFNOR, "Revêtements de sol résilients et stratifiés – Essai de la chaise à roulettes. ", NF EN 425:2002, Paris : AFNOR, 2002
- [47] AFNOR, "Détermination de la résistance à la rayure", NF T51-113, Paris: AFNOR, 1976

- [48] A. C. M. Yang, T. W. Wu, "Wear and friction in glassy polymers: microscratch on blends of polystyrene and Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)", *Journal of polymer science part B*, 35 (9) (1997), p 1295-1309
- [49] AFNOR, "Revêtements de sol textiles – Essais utilisant la machine Lisson", NF EN 1963, Paris: AFNOR, 1998, 13 p.
- [50] I. J. Grunfest, "Abrasion Resistance", report for General Electric Company p.16
- [51] J. von Stebut, "Modification of a Surface Profile's Height Parameters During Strip Drawing", *Wear*, 109 (1986), 145 – 155
- [52] AFNOR, "Surface imperfections. Terms, definitions and parameters", NF EN ISO 8785:1999, Paris: AFNOR, 2002
- [53] C. Gauthier, R. Schirrer, "The viscoelastic viscoplastic behaviour of a scratch on a polymeric surface", in "2nd world tribology congress WTC2001", Vienna Austria, september 2001
- [54] C. Gauthier, R. Schirrer, "Time and temperature dependence of the scratch properties of poly(methylmethacrylate) surfaces ", *Journal of materials science*, 35 (2000), 2121-2130
- [55] S. Lafaye, C. Gauthier, R. Schirrer, "Frottement de surfaces de matériaux viscoélastiques viscoplastiques", in « XVème congrès français de mécanique », Nancy France, 3-7 sep. 2001
- [56] Precision Devices Inc., "Surface metrology guide – home" [on-line], in: <http://www.predev.com/smg/index.html> (on 01.03.04)
- [57] T.R. Thomas, "Rough surfaces", Longman Group Limited, 1982
- [58] E.J. Abbott, F.A. Firestone, "Specifying surface quality", *Mech. Eng.*, 55 (1933), 569
- [59] ISO 11378-2: 2001 "Textile floor coverings – Laboratory soiling tests – Part 2: Drum test", Genève: ISO

ANNEXE A - Rayure des polymères : modes d'endommagement

De par leur rhéologie singulière, les polymères ont un comportement particulier durant le test de rayure. Globalement, nous pouvons dire que si la même force normale est appliquée à la même pointe [53] :

- La réponse d'un matériau métallique sera l'empreinte plastique, à cause de sa faible valeur de limite élastique au vu de son module élastique ;
- Celle d'un matériau céramique sera la fissuration avec une petite déformation plastique (faible résilience comparée à la limite élastique) ;
- La réponse d'un matériau polymère sera élastique, visco-élastique ou visco-plastique, et bien souvent visco-élasto-plastique.

Ces différences conduisent donc à l'initiation de modes d'endommagements propres à chacune de ces familles de matériaux.

Briscoe a résumé schématiquement les caractéristiques de chaque régime de déformation qu'il a observé en rayant un poly(carbonate) (PC)¹⁶ [10]:

1. En fonction des conditions de test, et **particulièrement du demi-angle du cône** (figure A-1), différents modes de déformation peuvent être initiés : à force normale constante, plus le cône sera aigu (plus le demi-angle du cône sera faible), plus l'angle d'attaque sera important, et plus important sera le niveau de déformation. Ainsi, **lorsque le demi-angle du cône décroît, des modes d'endommagement plus consommateurs d'énergie sont initiés** (figure A-2) : du régime purement élastique au "repassage" des aspérités, puis l'usinage ductile (avec apparition de fissures et, plus tard, de copeaux), jusqu'à l'usinage fragile.
2. L'influence de la charge normale appliquée a également été étudiée, ce qui a conduit à l'élaboration de *cartes de déformation* (figure A-3). Ces cartes, donnant une description plus complète des réponses possibles du PC lorsqu'il est soumis à un test de rayure, met en évidence la complexité intrinsèque à la prévision des modes d'endommagement susceptibles d'apparaître lors de ce test.

¹⁶ Cette description est essentiellement qualitative : des polymères différents peuvent initier d'autres réponses (simples ou composées), mais le comportement est grossièrement similaire.

Il convient de noter que la réponse d'un polymère est fortement dépendante de sa déformation dans la zone de contact, car :

- La réponse élastique/plastique est très souvent dépendante du taux de déformation (nature visqueuse des polymères) ;
- Pour certains polymères, en fonction du niveau de déformation imposé, la réponse peut être ductile ou fragile.

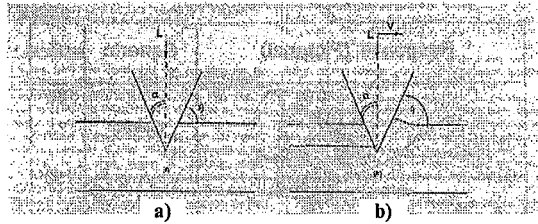


Figure A-1:
a) Vue d'une indentation par un cône rigide, de demi-angle α , d'un solide mou sous une charge L .
b) Comme a) mais maintenant la pointe glisse à une vitesse V [10].

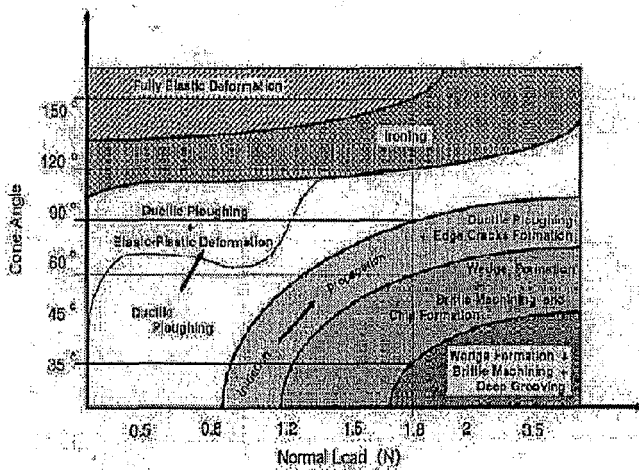


Figure A-3: Carte de déformation pour une résine polycarbonate. Les résultats sont issus de rayures effectuées à température ambiante, avec une vitesse de rayage de 0.0026 mm/s [10].

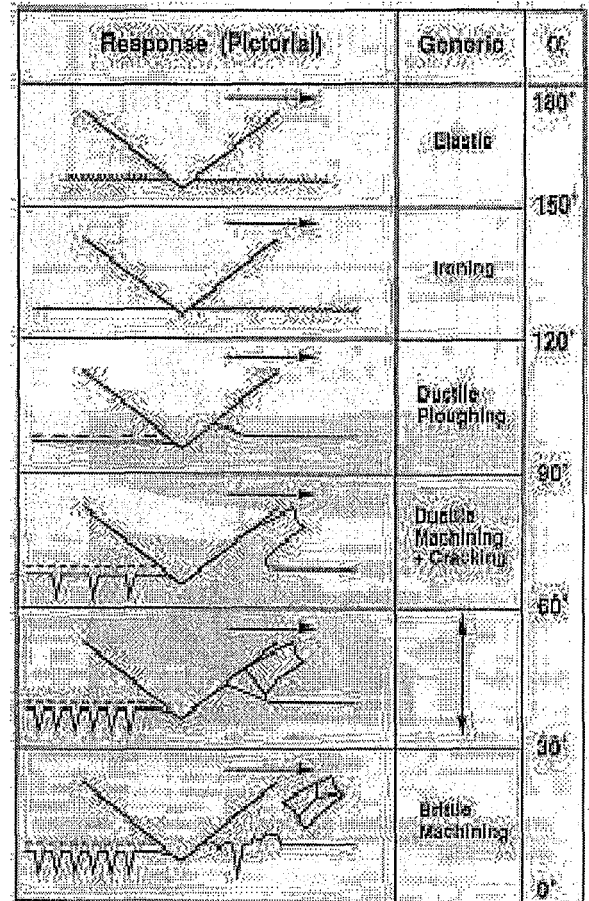


Figure A-2: Influence de l'angle de cône α sur les processus d'endommagement lors de la rayure d'un polymère [10].

La viscosité des polymères affecte la surface de contact en cours de rayure. Globalement, la réponse d'un polymère sera située quelque part entre une réponse parfaitement élastique (l'aire de contact projetée sur un plan horizontal – perpendiculaire à l'axe de la pointe – est un disque plein) et une réponse parfaitement plastique (l'aire de contact projetée est un demi-cercle), comme montré sur la figure A-4.

Gauthier et al. [53][54][55] étudient actuellement la dépendance temps/température des propriétés à la rayure de certaines surfaces polymères. À l'aide d'un appareil de rayure couplé à une caméra vidéo, l'aire réelle de contact en cours de rayure peut être évaluée pour les matériaux transparents. L'état transitoire entre les réponses parfaitement élastiques/plastiques peut être apprécié en estimant l'aire de contact réelle comme montré sur la figure A-4 : ici, la nature visqueuse de la réponse est liée à un angle de retour ω (compris entre 0 pour une réponse parfaitement plastique et $\pi/2$ pour une réponse parfaitement élastique). Dans ce cas, l'aire de contact réelle est la somme de l'aire frontale (demi-disque de rayon a_f) et l'aire dorsale (a_r , partie du demi-disque arrière). En guise d'exemple, il a été montré [52] que dans le cas du poly(diéthylène glycol bis allyl carbonate), lorsque la température à laquelle le test de rayure est effectué augmente, ω passe d'une valeur approximativement constante (environ 0,9 radian) à des valeurs supérieures proches de $\pi/2$ une fois que la température T_g du matériau a été dépassée : **la réponse du matériau devient plus élastique, plus souple, comme attendu d'après le sens physique de la température de transition vitreuse.**

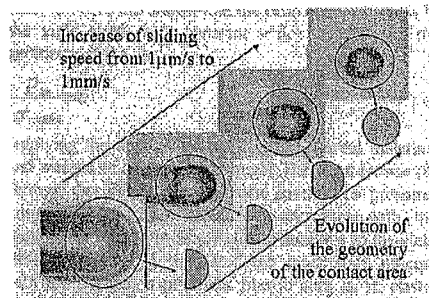


Figure A-4: Transition d'une empreinte viscoplastique à une empreinte viscoélastique, photographie in situ (rayure à charge normale 0.5 N, température 100 °C) [53].

ANNEXE B - Mesures topographiques 2D : traitement des données

Nous focalisons ici sur les paramètres utilisés dans cette étude.

Pour chaque paramètre, la longueur de calcul (c.à-d. la longueur d'évaluation ou la longueur d'échantillonnage) sera chaque fois spécifiée. Nous considérons que la longueur d'évaluation correspond à M points mesurés, alors que la longueur d'échantillonnage correspond à N points mesurés, avec $M = 5 * N$.

Une description relativement complète d'un profil requiert, au moins :

- Un paramètre d'amplitude, apportant des informations sur les hauteurs de profil ;
- Un paramètre de symétrie, donnant des informations sur la distribution des hauteurs autour de la ligne moyenne ;
- Un paramètre d'espacement horizontal, pour accéder à l'étalement du profil.

Ainsi, plus de quarante paramètres peuvent être définis pour étudier la topographie d'une surface.

□ Ligne moyenne

Avant d'être traduit en termes de paramètres statistique, un profil de rugosité doit être équilibré autour de sa ligne moyenne, définie de sorte que l'aire positive $A1$ est égale à l'aire négative $A2$ (voir figure B.1).

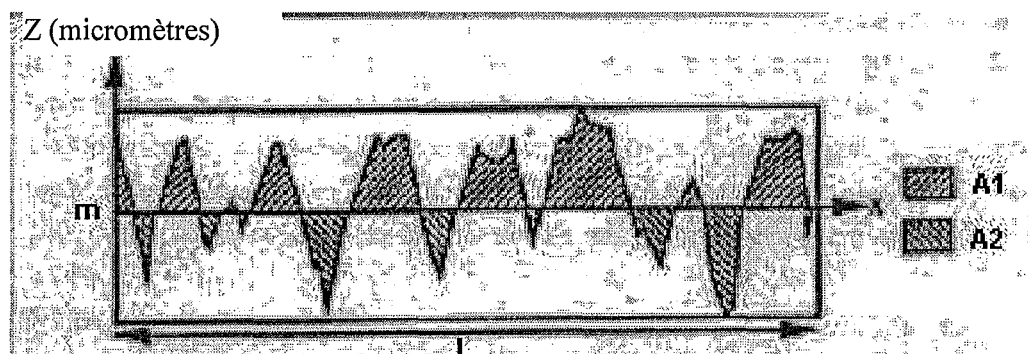


Figure B.1: Ligne moyenne - définition [34]

Si l'on considère que l'échantillonnage est régulier le long de l'axe de mesure (axe x), la ligne moyenne est définie sur la base d'une hauteur de profil moyenne m , calculée comme la moyenne des hauteurs de profil :

$$m = \frac{1}{M} \sum_1^M z_i$$

Chaque hauteur de profil est alors redéfinie en lui soustrayant cette hauteur moyenne :

$$h_i = z_i - m$$

□ **Ra, déviation arithmétique moyenne du profil de rugosité (paramètre d'amplitude, [micromètre])**

Ra est la moyenne arithmétique des valeurs absolues $h(x)$ au sein d'une longueur d'échantillonnage :

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_1^N |h_i| = \frac{A_1 + A_2}{l}$$

Même si ce paramètre est très utilisé dans l'industrie, il ne fournit pas suffisamment d'information pour obtenir une représentation correcte d'un profil. Par exemple, les trois profils sur la figure B.2 ont la même valeur de Ra, mais ils restent très différents.

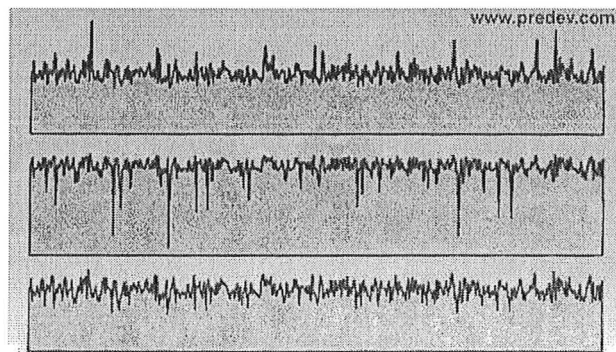


Figure B.2: Trois profils donnant la même valeur de Ra [56].

□ **Rq, écart quadratique moyen du profil de rugosité (paramètre d'amplitude, [micromètre])**

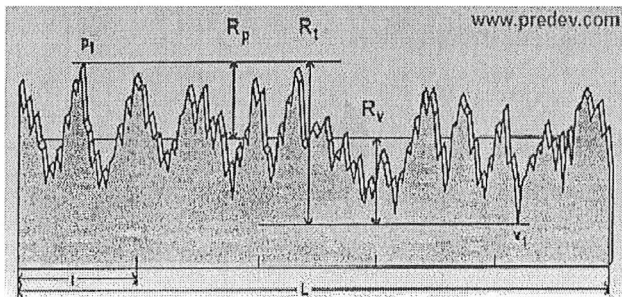
Rq est la racine carrée de la moyenne arithmétique du carré des hauteurs $h(x)$ au sein d'une longueur d'échantillonnage¹⁷:

¹⁷ Pour mémoire, si les hauteurs de rugosité sont distribuées selon une loi gaussienne, 68 % d'entre elles seront comprises dans l'intervalle $[-\sigma = -Rq ; +\sigma = +Rq]$, et Ra est proportionnel à Rq : $Ra = 0.8 * Rq$ [57].

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N h_i^2} = \sigma$$

- **R_p – hauteur maximale de profil, R_v – profondeur maximale de vallée, et R_t – hauteur totale de profil (paramètres d'amplitude, [micromètre])**

La hauteur de pic de rugosité R_p est la hauteur de la plus haute aspérité sur la longueur d'évaluation (P₁ sur la figure B.3). R_v est la profondeur de la vallée la plus profonde (V₁). La hauteur de rugosité totale, R_t, est la somme de ces deux paramètres au sein de la longueur d'évaluation, ou encore la dénivellée de la plus haute aspérité à la vallée la plus profonde du profil de rugosité.



$$R_v = |\min h(x)| \quad 0 \leq x \leq L$$

$$R_p = |\max h(x)| \quad 0 \leq x \leq L$$

$$R_t = R_p + R_v$$

Figure B.3: Définition des paramètres R_p, R_v et R_t [56].

R_p est un paramètre de rugosité important lorsque l'on s'intéresse à des phénomènes de contact, car le contact est d'abord établi sur les aspérités les plus hautes.

- **R_{pm} – hauteur moyenne des aspérités de rugosité, R_{vm} – profondeur moyenne des vallées de rugosité, et R_{tm} – hauteur totale moyenne (paramètres d'amplitude, [micromètre])**

R_p, R_v et R_t sont des valeurs extrêmes. Pour obtenir des informations plus pertinentes sur les hauteurs des aspérités du profil, ou sur les profondeurs des vallées, le long d'une longueur d'évaluation, R_{pm}, R_{vm} et leur somme R_{tm} sont introduits (moyennes sur les longueurs d'échantillonnage). Par exemple, si nous désignons la hauteur maximale de la i-ième longueur d'échantillonnage par R_{pi}, nous avons :

$$R_{pm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{pi}$$

Avec n le nombre de longueurs d'échantillonnage contenues dans une longueur d'évaluation.

Par là,

$$R_{vm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{vi}$$

Où R_{vi} est la profondeur de la vallée la plus profonde le long de la i -ième longueur d'échantillonnage, et

$$R_{tm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ti} = R_{pm} + R_{vm}$$

Avec R_{ti} étant la somme de R_{vi} et R_{pi} :

$$R_{ti} = R_{pi} + R_{vi}$$

Comme il s'agit là de valeurs moyennes, R_{pm} , R_{vm} et R_{tm} sont moins sensibles aux singularités locales du profil de rugosité que R_p , R_v et R_t . C'est en sens que ces paramètres sont plus représentatif du profil le long de la longueur d'évaluation.

□ Fonction de distribution d'amplitude (ADF)

La courbe ADF correspond à la densité de probabilité des hauteurs $h(x)$ au sein de la longueur d'évaluation ; elle donne la probabilité que le profil de rugosité de la surface ait une certaine hauteur h à une position x donnée (voir figure B.4).

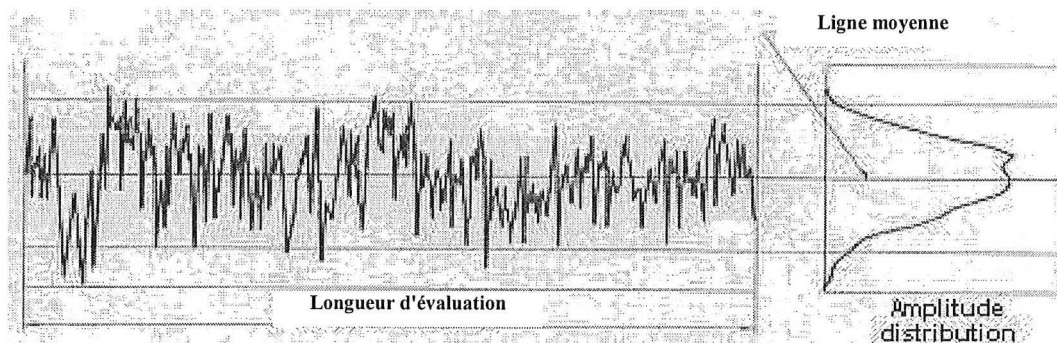


Figure B.4: Fonction de distribution d'amplitude [39].

□ Asymétrie S_k (paramètre de symétrie/ADF, [sans dimension])

Le paramètre d'asymétrie donne des informations sur la symétrie de la fonction de distribution d'amplitude ADF du profil (S_k est le troisième moment de l'ADF, R_q étant le deuxième moment). Il est défini comme le rapport de la moyenne des hauteurs $h(x)$ au cube et du cube de R_q , le long d'une longueur d'échantillonnage :

$$S_k = \frac{1}{R_q^3} \frac{\sum (h_i)^3}{N}$$

Comme le montre l'image B.5, en fonction de la symétrie de l'ADF, S_k peut être [57]:

- Egal à zéro si l'ADF est symétrique par rapport à la ligne moyenne du profil ;
- Supérieur à zéro si le profil est caractérisé par une prédominance des aspérités ;
- Négatif si la surface est poreuse.

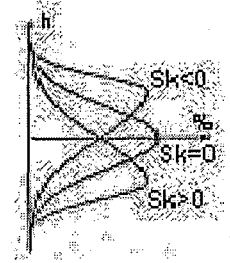


Figure B.5: Le paramètre S_k est directement lié à la forme de l'ADF [34].

Il convient de remarquer que S_k est fortement influencé par des aspérités ou des vallées singulière, à cause des hauteurs mises au cube.

□ **Kurtosis E_k (paramètre de symétrie/ADF, [sans dimension])**

Le kurtosis est directement lié à la finesse de l'ADF. Il est défini comme le quatrième moment de l'ADF, rapport de la moyenne des hauteurs $h(x)$ à la puissance 4 sur la puissance 4 de R_q le long d'une longueur d'échantillonnage :

$$E_k = \frac{1}{R_q^4} \frac{\sum (h_i)^4}{N}$$

À nouveau, en fonction de la forme de l'ADF, le kurtosis E_k sera (figure B.6) :

- Egal à trois si l'ADF est une distribution gaussienne ;
- Supérieur à trois si l'ADF est moins étalée qu'une gaussienne ;
- Inférieur à trois si l'ADF est plus étalée qu'une gaussienne.

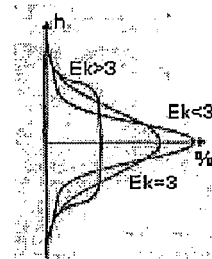


Figure B.6: Le paramètre E_k est relié à la la forme de l'ADF [34].

□ **Étalement S_m (paramètre d'étalement, [micromètre])**

S_m est la distance moyenne entre les aspérités, une aspérité étant définie par rapport à la ligne moyenne (une aspérité doit passer par-dessus la ligne moyenne et revenir ensuite en-dessous – figure B.7).

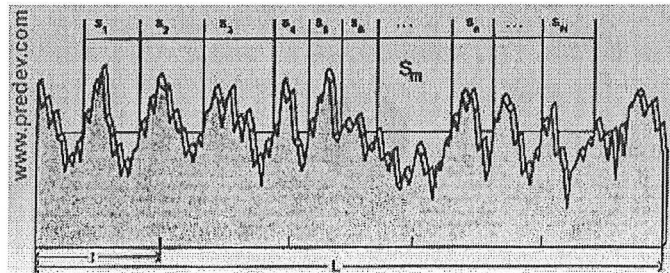


Figure B.7: Définition du paramètre S_m [56]

□ Courbe d'Abbott-Firestone (ou courbe de portance) [58]

La courbe de portance, mathématiquement, est l'intégrale de la fonction de distribution d'amplitude. C'est la distribution du *cumul* des probabilités.

L'intégrale est effectuée de la plus haute aspérité vers la plus basse vallée, de sorte que chaque point de la courbe de portance porte le sens de **la portion linéaire d'un profil situé sous une certaine hauteur**, ou le *taux de portance* A_r (exprimé en pour cent) à cette hauteur (comparé à la courbe ADF qui donne la fraction de profil à cette hauteur). Ainsi, le taux de portance au-dessus de la plus haute aspérité ou au-dessous de la plus profonde vallée est, respectivement, 0 % et 100 %.

Si nous regardons la courbe de portance d'un profil standard, nous pouvons définir trois domaines (voir figure B.8):

- **Domaine I** : domaine non-linéaire, correspondant aux plus hautes aspérités, là où le premier contact apparaît. Cette portion supérieure de la surface sera usée durant la période de rûdage.
- **Domaine II**: domaine linéaire, où R_t est proportionnel au taux de portance. Il s'agit là du coeur du profil, c.à-d. la partie qui va supporter les efforts, et influencer la vie et la performances du produit après la période initiale de rûdage.
- **Domain III**: domaine non-linéaire, partie la plus basse du profil qui permet, par exemple, la rétention de lubrifiant.

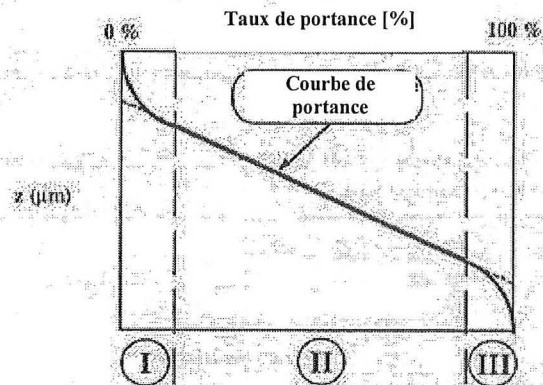
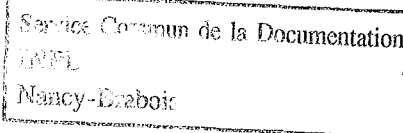


Figure B.8: Les trois domaines d'une courbe de portance typique [34].



AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

000

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Christian GAUTHIER, Maître de Conférences, Institut Charles Sadron, Strasbourg

Monsieur Yves BERTHIER, Directeur de Recherche, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur BUCHHEIT Olivier

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

"Etude et caractérisation de l'usure de revêtements de sol à base PVC : caractérisation des défauts consécutifs aux conditions réelles d'utilisation et aux simulations en laboratoire"

en vue de l'obtention du titre de :

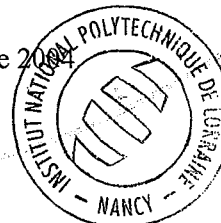
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Science et ingénierie des matériaux »

Fait à Vandoeuvre, le 21 octobre 2004

Le Président de l'I.N.P.L.,

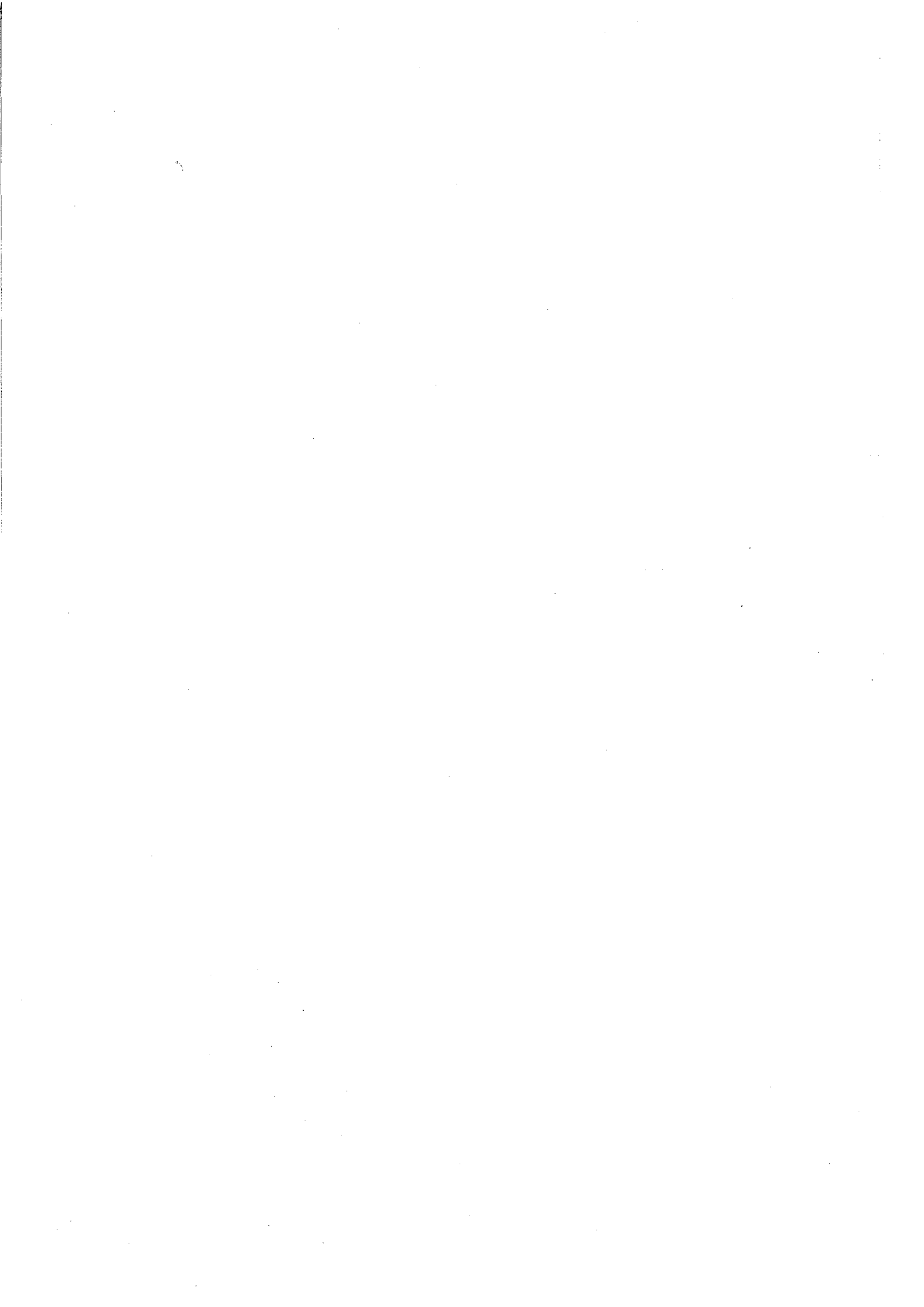
L. SCHUFFENECKER



Pour le Président
Le Vice-Président,

J.-L. COUJARD

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANCEUVRE CEDEX



Résumé

Actuellement, il existe un important décalage dans l'industrie du revêtement de sol entre les tests normés de résistance à l'usure et la réalité que ces tests sont censés reproduire ; notamment en terme de niveau de sollicitations. Ainsi, le tribosystème reproduit en laboratoire ne permet pas de conclure sur les performances relatives de différents revêtements de sol à l'usure. Le classement obtenu par ces tests peut même s'avérer l'inverse de celui obtenu *in-situ*.

L'objectif principal de ce travail est de mieux comprendre la tribologie du revêtement de sol en conditions réelles d'utilisation, pour pouvoir aider le processus de normalisation à mieux simuler les sollicitations réelles, et ainsi reproduire les comportements observés.

Nous proposons d'étudier les évolutions esthétiques et topographiques de deux revêtements de sol résilient à base PVC, avec ou sans couche protectrice élastomère, durant un test grandeur nature, de manière à reproduire le plus fidèlement possible les conditions réelles d'utilisation. Nos acquis durant ce test nous permettent alors d'évaluer la pertinence d'un des tests actuels de résistance à l'usure (le test Frick Taber), et de montrer son incapacité à simuler la réalité. Une alternative est trouvée dans le test Lisson, déjà éprouvé dans l'industrie du revêtement textile. Néanmoins, il est nécessaire de réaliser certains ajustements sur ce test si l'on souhaite l'appliquer au revêtement résilient.

Grâce à une approche topographique de l'abrasion pure, l'approche Ek-Sk, nous mettons en évidence une partie des processus d'endommagement élémentaires consécutifs aux trois tests étudiés (test grandeur nature / Frick Taber / Lisson). En complément, nous présentons une analyse de premier ordre du comportement mécanique des revêtements étudiés effectuée à travers des essais de nanorayure. Cette analyse a pour but de trouver une méthode objective permettant de reproduire la fonction la plus pénalisante apparaissant en conditions réelles d'utilisation : la rayure macroscopique.

La combinaison de ces outils nous permet de proposer une procédure du test Lisson améliorée incluant, principalement, l'introduction d'un agent salissant dans le tribosystème et d'une étape préliminaire permettant l'évaluation du comportement à la rayure du revêtement de sol.

Mots clé : Normalisation, polymère, élastomère, résistance à l'usure, revêtement de sol, topographie, Kurtosis, Skewness, abrasion.

Abstract

Presently, when the resilient floor covering industry wants to test the wear resistance of its products following existing standards, an important discrepancy appears between the real constraints the flooring will have to endure and the standardized ones. As a consequence, the flooring tribosystem as reproduced in laboratory can lead to erroneous conclusions, inverse of what is observed *in-situ*, concerning the relative wear resistance of the tested floorings.

The main objective of this work is to achieve a better understanding of the tribology of floor covering in real use, in order to promote the standardisation process to better simulate real constraints for reproducing the observed behaviour.

We propose to study the aesthetic and topographical evolutions of two PVC-based resilient floor coverings in a field test, with and without an elastomeric protective coating, aiming to reproduce at best the real conditions of use. Based on the knowledge we gained from this field test, we are able to evaluate the pertinence of one of the main current wear resistance test (the Frick Taber test), and to show its inadequacy for simulating reality. An alternative is found in the Lisson test, already approved for the textile flooring industry. But some adjustments are necessary for its application to resilient floor coverings.

Thanks to a topographical approach of pure abrasion, the Ek vs. Sk approach, we are able to highlight some of the basic damage processes occurring during the three studied tests (Field Test / Frick Taber / Lisson). In addition, a first-order analysis of the tested flooring mechanical behaviour, via nanoscratch experiments, aims to find an objective method to reproduce the most penalizing feature appearing during real service conditions: the macroscopic scratch.

The combination of these tools allows us to propose an improved test procedure for the Lisson test including, mainly, the introduction of both a soiling agent in the tribosystem and a preliminary step aiming to evaluate the flooring scratch behaviour.

Key words: Standardisation, polymer, elastomer, wear resistance, floor coverings, topography, Kurtosis, Skewness, abrasion.