

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Mécanique

Par

**Zakarya MADAoui**

Thème :

---

### **RESISTANCE AU RAYAGE ET A L'EROSION DES PEINTURES DES VEHICULES DANS DES MILIEUX AGRESSIFS**

---

Soutenue le 11/06/2019, devant le jury composé de :

Madjid	MERIEM BENZIANE	Professeur	Université de Hassiba Benbouali Chlef	Président
Mounir	ALLICHE	MCA	Université de Yahia Fares de Médéa	Examineur
Chahinez	FARES	MCA	Université de Hassiba Benbouali Chlef	Examinatrice
Ibrahim	ZIDANE	MCA	Université de Hassiba Benbouali Chlef	Examineur
Mohammed	MENDAS	MCA	Université de Hassiba Benbouali Chlef	Rapporteur
Hamou	ZAHLOUL	Professeur	Université de Hassiba Benbouali Chlef	Co-Rapporteur

**REMERCIEMENTS**

En premier lieu et avant tout, je remercie Allah le tout puissant qui m'a donné la volonté et le courage pour effectuer ce travail de recherche.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse le Docteur **MENDAS Mohammed**, maître conférence A à l'université de Chlef, pour ses conseils très utiles, ses encouragements et sa disponibilité tout au long des sept 'ans de travail continu sur les axes de cette thèse.

Mes sincères remerciements, vont aussi à mon co-directeur de thèse le Professeur **ZAHLOUL Hamou** de l'université de Chlef, pour son soutien, ses conseils et son aide précieux.

Je désire aussi remercier le Professeur **Stéphane BENAYOUN** du laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'Ecole Centrale de Lyon (France), qui m'a accueilli dans son laboratoire pour un stage et qui m'a fourni les outils nécessaires pour la caractérisation des échantillons.

J'exprime ma profonde gratitude au Professeur **MERIEM BENZIANE Abdelmadjid** de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je tiens également à remercier les Docteurs **ALLICHE Mounir**, **FARES Chahinez** et **ZIDANE Ibrahim** qui m'ont honoré et accepté d'examiner cette thèse.

Mes sincères remerciements vont aussi aux responsables de la formation doctorale (CFD), le Professeur **BETTAHAR Ahmed** et tous les membres de CFD, pour leurs efforts durant la formation doctorale.

Par la même occasion, je présente également mes vifs remerciements aux enseignants chercheurs du département de Génie Mécanique de l'université de Hassiba Benbouali de Chlef, pour leurs conseils et leurs encouragements durant ma formation universitaire.

Un spécial remerciement à l'Ex Doyen, Dr **Benabdellah ABDI** et au Chef de Département de Génie Mécanique, Docteur **Abdessoufi BENHAMOU**, pour toutes les facilités qu'ils m'ont accordées.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à **Khaled ZEROUKATTE** et **Abed BEZINE**, responsables de l'atelier d'usinage et laboratoire de MDF d'hydraulique pour leur confiance et leur soutien inestimable le long de ma réalisation de ce travail.

Un grand merci au Professeur **DJAAFER HENNI Ahmed**, enseignant à la faculté de Génie Civil, pour ses idées riches et son soutien psychique.

Je tiens également à remercier Mr. **Abdellah HANNACHE** et Mr **Abdelkader DAHOU**, techniciens en informatique à l'APC de Chlef pour leur coordination avec la **SNVI/Rouiba**, Alger.

Mes remerciements vont aussi au personnel technique de **GMI/Oeudsly**, **SNVI/Rouiba**, Alger, **Bilal Binaire-TECH** de BabEzzouar/Alger.

Je tiens à remercier aussi tous les gens chacun par son nom qui m'ont aidé à trouver les moyens et les solutions pour réaliser les bancs d'essais : Dr. **Abdelrahmen BENYAMINA**, **Kheireddine DEKKICHE** et **Mourad**.

Mes remerciements vont aussi à ma famille et à mes amis qui, avec cette question récurrente, « Quand est-ce que tu la soutiens cette thèse ? », bien qu'angoissante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final. Merci à Menad Ali, Medouar Sidali, Boumaaza Ibrahim, Meddah fayçel, Meddah Djamel, Adda mohamed, Boutbel Zayd, Harchouche Abed, Taieb kherafa Azzedine, Karim, Hmaidi Sofiane, Ismaili mohamed, Bennabi ali, Haddouche mohamed, Bedrouni ibrahim, Loumi hicham, Boudouani Noureddine, Dekkiche Djamel, Kouadri samet ahmed, Merouen Karim, Siaghi Hamid, Ilyes Zourgui qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Tous mes remerciements à mes collègues Doctorants, et ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de mon travail de recherche.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

# إهداء

قبل كل شيء الحمد لله والشكر لله عز وجل على توفيقه وتيسيره

أهدي هذا النجاح لروح والدي الطاهرة رحمة الله

أهدي هذا العمل لوالدتي الكريمة عرفانا بما قدمت لي منذ  
ولدت إلى يوم الناس هذا

لإخوتي وأخواتي الأعزاء جميعا على دعمهم ومرافقتي لإنهاء هذا العمل

إلى كل أصدقائي على تشجيعهم ودعمهم المستمر

إلى كل معلم وكل أستاذ علمني حرفا

إلى كل عامل بسيط وكل إداري في كل المؤسسات التي درست بها

ملخص

في هذا العمل، أجريت دراسة تجريبية للخدش المجهري والحت لطلاء السيارات المستخدمة في بيئة صحراوية قاحلة بالجزائر. تم استخدام أربع عينات بفترات استخدامها: 3, 5, 8 و 10 سنوات في هذه البيئة القاحلة دون استعمال أي نوع من التسارع في شيخوخة العينات. في البداية، تم تحليل أسطح العينات عن طريق الفحص المجهري البصري وقياسات الصلادة. تم إجراء تجارب الخدش والحت للدهانات المدروسة على جهازين تم تصميمهما وتحققهما في مختبر الريولوجيا والميكانيكا. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه تشكل على سطح الدهانات خطوط رفيعة تتغير في العدد والحجم مع مدة الاستخدام. تغيرت صلادة العينات أيضاً مع مدة الاستخدام وتم الحصول على صلادة جيدة في الطلاء بمدة 5 سنوات من الاستخدام. تم تحليل الخدوش التي تحصلنا عليها بالماسح الإلكتروني المجهري. مكنت القوى العمودية والأفقية المقاسة أثناء عملية الخدش من تحديد تطور معامل الاحتكاك وتحديد الأحمال الحرجة لتكون الضرر. تم تحليل فقدان الكتلة، معدل التآكل والندبات الناتجة عن اختبار الحت وفقاً لزوايا الصدمة ومدة الاستخدام. لوحظت عدة أنواع من الأضرار أظهرت أن أفضل مقاومة للخدوش والحت للدهانات عند مدة 5 سنوات من الاستخدام. هذه النتائج هي نتيجة تحسن إلتصاق الدهانات في ركيبتها وتحسن الصلادة. أظهرت جميع العينات التي تم اختبارها أن أكبر معدل فقدان وحت للطلاء لوحظ عند زاوية تأثير 30 درجة.

**الكلمات الرئيسية:** طلاء السيارات، بيئة قاحلة، تجربة الخدش، تجربة الحت، السلوك الميكانيكي

**Summarize**

In this work, an experimental study of the microscratching and erosion behavior of automotive paints used in arid Saharan environment of Algeria was carried out. Four samples with 3, 5, 8 and 10 years of use in this arid environment were used without any accelerate aging. Initially, the samples surfaces were analyzed by optical microscopy and microhardness measurements were made. The scratch and erosion experiments of the studied paints are carried out on two machines designed and realized in the laboratory of Rheology and Mechanics (LRM). The obtained results showed that the painted surfaces are degraded by abrasions which change in number and size with the duration of use. The microhardness of the samples also changes with the duration of use and a good microhardness are obtained for the paint of 5 years of use. The made scratches were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM). The normal and tangential forces measured during scratch tests allowed to determine the evolution of the friction coefficient and the determination of the damage critical loads. Mass loss, erosion rates and scars caused by erosion test are analyzed according to the impact angles and to the duration of use. Several damage forms have been observed which have shown that good scratch and erosion resistances of paints are obtained for a period of 5 years of use. These results are due to an improvement in the adhesion of the paints to its substrate and to the microhardness. All tested samples showed the most significant mass loss and erosion rate at an impact angle of 30 °.

**Keywords:** Automotive paints, arid environments, scratch test, erosion test, mechanical compartment

**Résumé**

Dans ce travail, une étude expérimentale du comportement au microrayage et à l'érosion des peintures automobiles utilisées dans un milieu saharien aride en Algérie a été réalisée. Quatre échantillons de durées d'utilisation 3, 5, 8 et 10 années dans ce milieu sont utilisés sans aucun vieillissement accéléré. Initialement, les surfaces des échantillons sont analysées par microscopie optique et des mesures de microdureté sont réalisées. Les expérimentations de rayage et de l'érosion des peintures étudiées sont effectuées sur deux bancs d'essai conçus et réalisés au laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM). Les résultats obtenus ont montré que les surfaces des peintures sont occasionnées par des abrasions qui changent en nombre et en taille avec la durée d'utilisation. La microdureté des échantillons change aussi avec la durée d'utilisation et une bonne microdureté est obtenue dans la peinture de 5 années d'utilisation. Les rayures réalisées ont été analysées par Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Les forces normale et tangentielle mesurées en rayage ont permis de déterminer l'évolution du coefficient de frottement et la détermination des charges critiques d'endommagement. Les pertes de masse, le taux d'érosion et les cicatrices causées par érosion sont analysées en fonction des angles d'impact et de la durée d'utilisation. Plusieurs types d'endommagement observés ont montré qu'une bonne aptitude des peintures au rayage et à l'érosion est obtenue pour une durée de 5 années d'utilisation. Ces résultats sont dus à une amélioration de l'adhérence des peintures au substrat et de la microdureté. Tous les échantillons testés présentent une perte de masse et un taux d'érosion les plus importants pour un angle d'impact de 30°.

**Mots clés:** peintures automobile, environnements aride, essai de rayage, essai d'érosion, comportement mécanique

---

---

# Sommaire

---

---



Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures et des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale .....	02

## **CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES PEINTURES DES VEHICULES**

1.1 Introduction .....	06
1.2 Présentation du revêtement de la carrosserie automobile.....	06
1.3 Concept de base de la peinture des véhicules.....	08
1.3.1 Les liants polymères.....	09
1.3.2 Solvants.....	09
1.3.3 Plastifiants.....	10
1.3.4 Charges.....	10
1.3.5 Pigments.....	11
1.3.6 Additifs.....	11
1.4 Nécessité de caractérisation des vernis.....	12
1.4.1 Caractérisations physico-chimique .....	12
1.4.2 Caractérisation mécanique.....	12
1.5 Phénomènes de dégradation des vernis de peinture.....	12
1.5.1 Dégradations d'origine chimique.....	13
1.5.2 Dégradations d'origine mécanique .....	13
1.6 L'effet environnemental sur les peintures automobiles.....	13
1.7 Processus de dégradation de la couche de peinture.....	14
1.7.1 Effet des radiations UVs.....	14
1.7.2 Effet de l'eau.....	15
1.7.3 Effet de la température.....	15
1.7.4 Autres variables d'exposition.....	16
1.8 Conclusion.....	17

## **CHAPITRE 2 : RESISTANCE AU RAYAGE DES PEINTURES DE VEHICULE.**

2.1 Introduction.....	19
2.2 Comportement des matériaux à la rayure.....	20

2.2.1 Morphologie et mécanique du rayage des matériaux massifs.....	20
2.2.1.1 Morphologie d'une rayure.....	20
2.2.1.2 Géométrie des indenteurs utilisés.....	21
2.2.1.3 Mécanique du rayage des matériaux massifs.....	22
2.2.2 Endommagement déterminé par observation microscopique.....	23
2.2.2.1 Mode d'endommagement fragile.....	23
2.2.2.2 Mode d'endommagement ductile.....	25
2.2.3 Comportement au rayage des matériaux massifs à base polymère.....	26
2.2.3.1 Comportement élastique.....	26
2.2.3.2 Comportement plastique.....	26
2.2.3.3 Comportement élastoplastique.....	27
2.2.3.4 Comportement visco-élastoplastique.....	27
2.2.3.5 Comportement fragile.....	28
2.2.4 Déformation et importance de la vitesse de déformation.....	29
2.2.4.1 Déformation en rayage.....	29
2.2.4.2 Importance de la vitesse de déformation.....	30
2.3 Coefficient de frottement.....	31
2.4 Dureté à la rayure.....	33
2.5 Principe d'essai de rayage.....	35
2.6 Facteurs affectant les résultats du test de rayage.....	37
2.7 Types des tests de rayage.....	38
2.7.1 Test de rayage avec une seule pointe.....	38
2.7.2 Essai de dureté de Mohs.....	38
2.7.3 Test de dureté au crayon.....	39
2.7.4 Test par aiguille.....	39
2.8 Quelques machines de rayage développées.....	39
2.8.1 Machine de rayage de Briscoe et al.....	39
2.8.2 Machine de rayage de Gauthier et Schirrer.....	40
2.8.3 Machine de rayage de Wang et al.....	40
2.8.4 Scléromètre à pendule à passe unique.....	40
2.8.5 Test de nanorayage.....	41
2.8.6 Machine de rayage par Jardret et al.....	41
2.9 Installations de rayage commerciales.....	41
2.10 Présentation du dispositif expérimental réalisé.....	41
2.10.1 Schéma du banc d'essai.....	41

2.10.2	Système de pilotage.....	43
2.10.3	Système d'acquisition des données.....	44
2.11	Protocoles de l'essai de rayage.....	44
2.11.1	Rayage avec une charge croissante.....	44
2.11.2	Rayage avec une charge constante.....	44
2.11.3	Rayage avec une charge croissante pas à pas.....	44
2.12	Procédure expérimentale.....	44
2.13	Résultats expérimentaux et discussion.....	45
2.13.1	Analyse préliminaire des surfaces des peintures.....	45
2.13.2	Microdureté des peintures.....	47
2.13.3	Force Tangentielle.....	48
2.13.3.1	Rayage avec la pointe conique.....	48
2.13.3.2	Rayage avec la plaquette en carbure métallique.....	49
2.13.3.3	Comparaison de la force tangentielle pour les deux pointes.....	50
2.13.4	Charges Critiques.....	50
2.13.4.1	Rayage avec la pointe conique.....	50
2.13.4.2	Rayage avec la plaquette en carbure métallique.....	51
2.13.4.3	Comparaison des charges critiques pour les deux pointes.....	52
2.13.5	Observations par MEB.....	53
2.13.5.1	Rayage avec la pointe conique.....	53
2.13.5.2	Rayage avec la plaquette en carbure métallique.....	57
2.13.6	Coefficient de frottement.....	60
2.13.6.1	Rayage avec la pointe conique.....	60
2.13.6.2	Rayage avec la plaquette en carbure métallique.....	61
2.13.6.3	Comparaison des coefficients de frottement pour les deux pointes.....	62
2.14	Conclusion.....	63

### **CHAPITRE 3 : RESISTANCE A L'EROSION DES PEINTURES DE VEHICULE**

3.1	Introduction.....	66
3.2	Définition du phénomène d'érosion.....	67
3.3	Comportement des matériaux à l'érosion.....	67
3.4	Mécanisme d'érosion des peintures des véhicules.....	69
3.5	Paramètres influençant sur le comportement des matériaux à l'érosion.....	71
3.5.1	Vitesses des particules.....	71
3.5.2	Taille des particules.....	71

3.5.3	Forme des particules.....	72
3.5.4	Angle d'impact de l'angle d'incidence.....	72
3.5.5	Propriétés de matériau des particules et de l'échantillon.....	73
3.5.5.1	Dureté des particules.....	73
3.5.5.2	Dureté de surface.....	73
3.5.5.3	Température.....	73
3.6	Installations d'érosion commerciales et de laboratoire.....	73
3.6.1	Appareils souffleurs de sable.....	73
3.7	Composants utilisés dans la machine de sablage.....	75
3.7.1	Pistolet de sablage.....	76
3.7.2	Matériaux abrasifs.....	76
3.7.3	Boîtiers de sablage abrasif.....	76
3.7.4	Dispositifs antipollution de l'air (équipement de réduction).....	76
3.7.5	Compresseur d'air.....	76
3.8	Banc d'essai d'érosion réalisé.....	76
3.9	Principe de fonctionnement.....	78
3.10	Sable utilisé.....	78
3.11	Conditions opératoires.....	79
3.12	Résultats et discussion.....	79
3.12.1	Perte de masse.....	79
3.12.1.1	Effet de la durée d'utilisation de la peinture.....	79
3.12.1.2	Effet de l'angle d'impact.....	80
3.12.2	Taux d'érosion.....	82
3.12. 2. 1	Effet de la durée d'utilisation de la peinture.....	82
3.12. 2. 2	Effet de l'angle d'impact.....	82
3.12. 3	Observations optiques des endommagements.....	83
a-	Erosion avec un angle d'impact de 30°.....	85
b-	Erosion avec un angle d'impact de 60°.....	86
c-	Erosion avec un angle d'impact de 90°.....	87
3.13	Conclusion.....	88
<b>4.</b>	<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>91</b>
<b>5.</b>	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>94</b>
<b>6.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>106</b>

**Liste des figures**

Figure 1-1 Coupe longitudinale montrant les différentes couches d'un revêtement de peinture d'une carrosserie automobile.....	07
Figure 1-2 Différents types d'endommagements mécaniques survenant sur les revêtements automobiles .....	13
Figure 2-1 Morphologie résiduelle d'une rayure et définition des différents paramètres morphologiques .....	20
Figure 2-2 Géométrie du contact pour les deux pointes : a) pointe conique, b) plaquette en carbure métallique.....	21
Figure 2-2 Représentation qualitative de l'influence de l'angle du cône sur le type d'endommagement produit dans le polycarbonate .....	21
Figure 2-3 Schématisation des différents endommagements générés sur un polymère par rayage en fonction de l'angle au sommet $2\theta$ d'un cône dur.....	23
Figure 2-4 Mode d'endommagement fragile dans l'essai de rayage: (a) grand écaillage, (b) écaillage devant l'indenteur, (c) recouvrance d'écaillage derrière l'indenteur, (d) fissure par traction.....	24
Figure 2-5 Modes d'endommagement ductile dans le rayage [28] : (a) écaillage, (b) flambement, (c) fissuration par compression, (d) fissuration par traction.....	26
Figure 2-6 Représentation de la déformation élastique de la surface pendant le rayage.....	26
Figure 2-7 Représentation de la déformation plastique de la surface pendant le rayage.....	27
Figure 2-8 Recouvrance élastique, vue de profil. Schéma valable en indentation et en rayure .....	27
Figure 2-9 Représentation de la déformation visco-élastoplastique de la surface pendant le rayage .....	28
Figure 2-10 Distribution des contraintes localisées autour du contact lors d'un test de rayage .....	28
Figure 2-11 Schéma des forces impliquées dans le frottement par glissement .....	32
Figure 2-12 Représentation schématique du contact entre les aspérités dans les surfaces .....	32
Figure 2-13 Schéma représentant les forces normale et tangentielle, ainsi que les aires de contact projetées normale et tangentielle dans le cas d'une rayure réalisée avec un indenteur conique .....	34
Figure 2-14 Vue rapprochée d'un indenteur et un échantillon.....	35
Figure 2-15 Diagramme des différents paramètres enregistrés lors du nanorayage.....	36
Figure 2-16 Chemin de rayage indiquant la présence des fissures.....	36
Figure 2-17 Schéma général du banc d'essai de microrayage .....	43

Figure 2-18 Banc d'essai de rayage réalisé et pointes utilisées, (a) vue générale du banc, (b) Pointe Conique et (c) Plaquette en carbure métallique.....	43
Figure 2-19 Morphologie des surfaces des échantillons étudiés en fonction des années d'utilisation.....	46
Figure 2-20 Microdureté Hv en fonction des charges d'essai et des années d'utilisation des peintures étudiées .....	48
Figure 2-21 Force tangentielle, Ft, en fonction de la force normale, Fn, utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	49
Figure 2-22 Force tangentielle, Ft, en fonction de la force normale, Fn, utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn .....	49
Figure 2-23 Force tangentielle, Ft, en fonction de la force normale, Fn, utilisant les deux pointes et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	50
Figure 2-24 Charges critiques : Lc1, Lc2 et Lc3 en fonction des années d'utilisation, utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	51
Figure 2-25 Charges critiques Lc1, Lc2 et Lc3 en fonction des années d'utilisation, utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn .....	52
Figure 2-26 Comparaison des charges critiques Lc1, Lc2 et Lc3, pour les deux pointes (conique et plaquette en carbure métallique) et une vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	53
Figure 2-27 Images MEB du premier stade d'apparition des fissures (Lc1), utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	54
Figure 2-28 Images MEB du deuxième stade d'endommagement (Lc2), utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	56
Figure 2-29 Images MEB du troisième stade d'endommagement (Lc3), utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	57
Figure 2-30 Images MEB du premier stade d'apparition des fissures (Lc1), utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	58
Figure 2-31 Images MEB du deuxième stade d'endommagement (Lc2), utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	58
Figure 2-32 Images MEB du troisième stade d'endommagement (Lc3), en utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage 8 mm/mn.....	59

Figure 2-33 Coefficient de frottement global ( $F_t/F_n$ ) en fonction de la force normale, $F_n$ , utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	60
Figure 2-34 Coefficient de frottement global ( $F_t/F_n$ ) en fonction de la force normale, $F_n$ , utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn .....	61
Figure 2-35 Coefficient de frottement global ( $F_t/F_n$ ) en fonction de la force normale, $F_n$ , utilisant les deux pointes et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.....	62
Figure 3-1 Séquence d'un impact de particule unique .....	68
Figure 3-2 Comportements typiques des matériaux vis-à-vis de l'érosion .....	69
Figure 3-3 Mécanisme d'enlèvement de matière lors de l'érosion de polyuréthane.....	70
Figure 3-4 Forme interne d'une buse : (a) avant utilisation, (b) après de 10 heures d'usage.....	74
Figure 3-5 Schéma de banc d'essai réalisé .....	77
Figure 3-6 Banc d'essai d'érosion réalisé au LRM.....	77
Figure 3-7 Micrographies des particules de sable utilisés dans les essais d'érosion (500 $\mu\text{m}$ ).....	78
Figure 3-8 Perte de masse de la peinture en fonction des années d'utilisation et d'angle d'impact.....	80
Figure 3-9 Perte de masse en fonction de l'angle d'impact des échantillons testés. ....	81
Figure 3-10 Variation du taux d'érosion en fonction des années d'utilisation et d'angle d'impact.....	82
Figure 3-11 Variation du taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact des échantillons testés.....	83
Figure 3-12 Images optiques des cicatrices obtenues après érosion avec angle d'impact de 30°, 60° et 90°, t = 60 sec et Pr = 0.150 bar.....	84
Figure 3-13 Zones d'enlèvement de la peinture après érosion, t = 60 sec et Pr = 0.150 bar.....	85
Figure 3-14 Quelques endommagements observés par microscopie optique, angle d'impact 30°, t = 60 sec et Pr = 0.150 bar.....	85
Figure 3-15 Quelques endommagements observés par microscopie optique, angle d'impact 60°, t = 60 sec et Pr = 0.150 bar. ....	86
Figure 3-16 Quelques endommagements observés par microscopie optique, angle d'impact 90°, t = 60 sec et Pr = 0.150 bar. ....	87

**Liste des tableaux**

Tableau 2-1 Valeurs de déformation relative en fonction de la géométrie d'indenteur. ....	30
Tableau 2-2 Facteur influençant sur les résultats du test de rayage .....	37
Tableau 2-3 Duretés Mohs.....	38
Tableau 2-4 Identification des composants de la machine de rayage.....	42
Tableau 3-1 Quelques simulateurs du processus d'érosion utilisés dans les laboratoires.....	75
Tableau 3-2 Composition chimique du sable utilisé.....	79
Tableau 3-3 Composition minéralogique du sable utilisé.....	79



## Abréviations

UVs.	Intensité ultra-violet
DOI	Distinction d'Image (Distinctness-of-Image)
COV	Composé organique volatil
RMN	Résonance magnétique nucléaire
HALS	Hindered amine light stabilizer
DSC	Calorimétrie à balayage différentiel
UVA	Absorbeur de lumière ultraviolette
PMMA	Poly (méthacrylate de méthyle)
AFM	Microscope à force atomique
MEB	Microscope électronique à balayage
LTDS	Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Système
PMC	Matrice polymère composite
LRM	Laboratoire de Rhéologie et Mécanique

## Nomenclatures

$\alpha$	Demi-angle de l'indenteur	(°)
$\acute{\alpha}$	Demi-angle de la rayure	(°)
$\varepsilon$	Déformation en rayage	/
$\psi$	Angle entre la hauteur du tétraèdre et une face	(°)
$\theta$	Demi-angle interne équivalent à une pointe de forme conique	(°)
$2\theta$	L'angle au sommet d'un cône	(°)
$\beta$	Angle d'attaque de l'indenteur	(°)
$v$	Vitesse de glissement de l'indenteur	(mm/min)
$\mu$	Coefficient de frottement	/
$\mu_{\text{local}}$	Coefficient de frottement local (adhésif)	/
$\mu_{\text{app}}$	Coefficient de frottement apparent	/
$\sigma_{\text{yield}}$	contrainte élastique du substrat	(Gpa)
$e$	Épaisseur de la couche de revêtement	( $\mu\text{m}$ )
$\nu$	Coefficient de poisson de revêtement	/
$\mu_{\text{crit}}$	Coefficient de frottement à la charge critique	/
$\gamma_{\text{s-interf}}$	Énergie de surface nécessaire pour créer une unité de nouvelle surface	(Joul)
$\delta W_D$	Travail dissipatif par unité de distance de rayage	(Joul/m)

$\delta W_E$	Travail élastique par unité de distance de rayage	(Joul/m)
$\delta W_{DF}$	Travail dû au vrai frottement local	(Joul)
$\delta W_{DP}$	Travail de déformation plastique	(Joul)
$\sigma_y$	Limite élastique du substrat	(Mpa)
$2a$	Largeur du contact	( $\mu\text{m}$ )
$A$	Aire de contact projetée dans le plan vertical	( $\mu\text{m}^2$ )
$hb$	Hauteur de bourrelet latéral	( $\mu\text{m}$ )
$P$	Profondeur résiduelle de rayure, depuis la surface initiale	( $\mu\text{m}$ )
$H_{bf}$	Hauteur de bourrelet frontal	( $\mu\text{m}$ )
$B_i$	Bourrelets latéraux	/
$A_N$	Aire normale projetée	( $\mu\text{m}^2$ )
$A_T$	Aire tangentielle projetée	( $\mu\text{m}^2$ )
$h$	Profondeur de l'enfoncement de la pointe	( $\mu\text{m}$ )
$R$	Rayon de la sphère	( $\mu\text{m}$ )
$F_t$	Force tangentielle	(N)
$F_n$	Charge normale	(N)
$F_{adh}$	Force d'adhérence	(N)
$F_{def}$	Force de déformation	(N)
$S_t$	l'aire de la section transversale	( $\mu\text{m}^2$ )
$H_I$	Dureté d'indentation	(Kgf/mm <sup>2</sup> )
$H_R$	Dureté à la rayure	(Gpa)
$H_S$	Dureté à la rayure de Briscoe et all	(Gpa)
$q$	Facteur correctif	/
$L_{crit}$	Charge critique	(N)
$d_{crit}$	Largeur de la rayure à la charge critique	( $\mu\text{m}$ )
$t$	Épaisseur de revêtement	( $\mu\text{m}$ )
$E_c$	Module de Young de revêtement	(Gpa)
$W$	Travail mécanique de l'adhésion	(Joul)
$\Delta A_{interf}$	Surface créée à l'interface	( $\mu\text{m}^2$ )
$d$	Distance de rayage	( $\mu\text{m}$ )
$L_{c1}$	Charge critique 1	(N)
$L_{c2}$	Charge critique 2	(N)
$L_{c3}$	Charge critique 3	(N)

ER	Taux d'érosion (Erosion Rate)	(mg/g)
$d_c$	Diamètre critique	( $\mu\text{m}$ )
$\Delta m$	Perte de masse	(mg)
$M_p$	Masse des particules projetées	(mg)

---

---

# **Introduction générale**

---

---

### Introduction générale

La peinture automobile est devenue un facteur important dans la décision d'achat d'un véhicule. Pour les constructeurs, la recherche de nouvelles peintures et des effets de carrosserie occupent une place centrale.

La plupart des peintures automobiles sont, de par de leur structure caténaire, considérés comme sensibles à leur environnement et sujets au vieillissement. La dégradation d'une peinture est le changement, généralement non désiré, de ses propriétés physiques et mécaniques, causé par des facteurs environnementaux plus ou moins agressifs : érosion par particule en sables abrasifs, radiation solaire, effet des radiations ultraviolets (UVs), température, environnement chimique, contraintes mécaniques, attaque biologique, pluie acide...etc. L'effet des Ultraviolets et le gradient de la température sur la résistance au rayage et à l'érosion des peintures des véhicules constituent un intérêt à la fois scientifique et industriel. Les études menées traitent l'influence des facteurs environnementaux par des essais artificiels accélérés dans des périodes qui ne dépassent pas généralement une année, ce qui peut détériorer la microstructure des peintures, et les résultats ne donnent pas une bonne corrélation avec le comportement réel durant l'exploitation de la peinture.

La dégradation par abrasion est un domaine de la tribologie: l'usure abrasive ou abrasion est généralement définie comme l'usure provoquée par le déplacement de matériau de surface en raison du glissement de particules dures le long de la surface. En 1824, Friedrich Mohs a présenté son échelle de résistance à l'abrasion en fonction de la dureté relative de dix minéraux. Dans son essai, il frotte deux matériaux l'un sur l'autre, le matériau le plus dure est celui qui résiste au frottement et qui montre un faible endommagement et une perte du matériau. Le rayage peut être considéré comme un mécanisme d'abrasion. Actuellement, plusieurs moyens expérimentaux ont été développés qui permettent de mesurer les charges normales, tangentielles, la profondeur de pénétration de l'indenteur, la longueur de la rayure, et de visualiser les rayures. Ces mesures contribuent à l'étude du comportement tribologique des surfaces massives et revêtues. L'érosion par particules solides est un autre domaine d'intérêt en tribologie. Il est défini comme la perte progressive de matière d'une surface en raison d'une interaction mécanique entre cette surface et les particules solides entraînées par un écoulement d'air.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement au rayage et à l'érosion des peintures automobiles utilisées dans un milieu agressif dans le Sahara algérien. Ce milieu

est caractérisé par une grande intensité des UVs, une température élevée toute l'année et un gradient de température important entre le jour et la nuit. Pour ce but, des essais expérimentaux de microrayage et d'érosion par des particules solides sont effectués dans deux bancs d'essai conçus et réalisés dans notre laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef. Plusieurs échantillons de peinture ont été obtenus à partir des véhicules exploités durant les périodes de 3, 5, 8 et 10 années dans ce milieu aride.

En plus de l'introduction générale, la thèse est composée de trois chapitres répartis comme suit :

Le chapitre 1 est dédié à des généralités sur la composition des revêtements peintures recouvrant les carrosseries automobiles, ainsi que les divers moyens de caractérisation physico-chimique et mécanique des peintures des véhicules. Les différents types de dégradation de couches de peinture sont analysés et l'effet du milieu aride sur ces peintures est présenté.

Le chapitre 2, constitué de trois parties, est consacré à l'étude de la résistance au rayage des peintures automobiles. La première partie concerne une bibliographie sur l'essai de rayage, le comportement des matériaux au rayage, le coefficient de frottement, la microdureté, le principe de rayage, les variables influant sur les résultats de rayage et une classification des tests de rayage. Dans la deuxième partie, la description de la machine de rayage réalisée au Laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM) de l'Université de Chlef, la procédure expérimentale du microrayage, les conditions opératoires et le protocole d'expérimentation sont présentés. La troisième partie comprend l'analyse préliminaire des surfaces, la microdureté des échantillons testés, les résultats expérimentaux obtenus du microrayage avec des interprétations et une conclusion.

Dans le chapitre 3, aussi constitué de trois parties, l'étude de la résistance à l'érosion des peintures automobiles est investiguée. Dans la première partie, une recherche bibliographique sur l'érosion des peintures automobiles est présentée. Dans la deuxième partie, la machine d'érosion réalisée au laboratoire (LRM), le principe de fonctionnement, le sable utilisé, les conditions opératoires et protocole d'expérimentation sont exposés. La troisième partie comprend les résultats obtenus, les interprétations et une conclusion récapitulative.

Enfin, la thèse se termine par une conclusion générale sur l'influence des environnements arides sur le comportement au rayage et à l'érosion des peintures automobiles et enfin des perspectives pour la poursuite de ce travail.

---

**Chapitre I**  
**Généralités sur les peintures des**  
**véhicules**

---



### **1.1 Introduction**

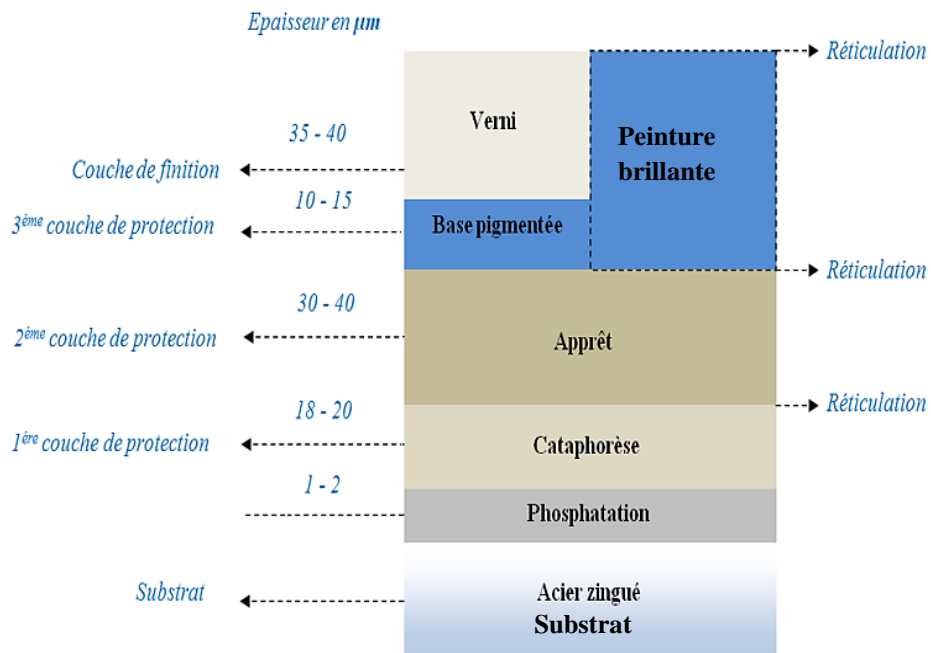
L'apparence visuelle des matériaux occupe une place particulière dans de nombreux secteurs artistiques et / ou industriels, où elle est devenue un critère d'évaluation dans le processus de prise de décision d'achat de biens de consommation et de services. Presque tous les objets synthétiques destinés à un service extérieur sont peints. La fonction de la peinture est multiple. Principalement, la peinture a une fonction décorative dans le but d'améliorer ou de modifier l'apparence de l'objet, de changer sa couleur ou son niveau de brillance ou d'attirer l'attention sur une zone particulière de l'objet. Cependant, il est tout aussi important de peindre les objets pour les protéger de l'environnement ou pour prolonger leur durée de vie. Les revêtements sont depuis longtemps reconnus comme des prescriptions protectrices pour des articles aussi divers que les avions, les automobiles, les ponts, les maisons et les machines. En effet, lors de l'achat d'une voiture, le consommateur poursuivra la première approche d'une sélection d'aspects visuels (couleur, éclat, réflexion, ...), en termes de caractéristiques techniques et de confort, qui détermineront le choix. En conséquence, les constructeurs automobiles se concentrent de plus en plus sur le développement de la peinture automobile.

### **1.2 Présentation du revêtement de la carrosserie automobile**

Les exigences mécaniques, chimiques, et optiques requises pour une peinture automobile dans des périodes d'utilisation longues sont strictes. L'une des plus importantes est de maintenir l'état de surface des peintures soumis aux contraintes environnementales (UV, eau, oxydation, températures extrêmes, chocs,...) : il s'agit ici de protection. L'esthétique d'une voiture joue un rôle prépondérant dans la décision d'achat. Ainsi, et parce qu'elle doit être personnalisée, cette fonction d'apparence s'impose ; elle devient le premier critère de choix du consommateur. La peinture doit être attrayante et avoir un effet durable. À partir des années 80, les peintures acryliques ont été remplacées par des peintures à base de polyuréthane offrant une meilleure résistance chimique et mécanique. La nature chimique de la résine utilisée peut être thermoplastique ou thermodurcissable.

Outre la fonction de barrière chimique et les qualités esthétiques, les constructeurs automobiles sont obligés de produire de grandes quantités, ce qui implique une stricte unification préalable des matières premières utilisées. En effet, les caractéristiques d'écoulement de peinture doivent être adaptées d'une part à une cadence de production élevée ainsi qu'à la complexité géométrique des pièces inaccessibles et donc difficiles à

recouvrir. Cela nécessite l'utilisation de matériaux dotés des technologies appropriées pour répondre aux contraintes imposées par des conditions d'exploitation. La peinture de carrosserie d'automobile se compose de plusieurs couches différentes qui sont développées en nombre et en nature au cours des dernières années afin de mieux répondre aux spécifications de l'industrie. La figure 1-1 illustre les couches successives d'un revêtement de peinture multifonctionnel de carrosserie automobile [1]. Chacune d'elles offre une fonction bien spécifique. L'épaisseur totale du revêtement multicouche est comprise entre 100 et 140  $\mu\text{m}$ .



**Figure 1-1** Coupe longitudinale montrant les différentes couches d'un revêtement de peinture d'une carrosserie automobile [1].

Une couche de phosphatation vient recouvrir le substrat. Le procédé au phosphate permet ensuite d'obtenir une couche protectrice mince d'environ 1  $\mu\text{m}$ , constituée de phosphate minéral [2].

Cette couche cristallisée est fixée par pulvérisation ou trempage ; elle améliore la rugosité de la surface de la carrosserie pour s'adapter à un système de deux couches (cataphorèse / apprêt). La cataphorèse fait référence au revêtement du polymère organique (résines époxydes ou uréthane) déposé lors du procédé d'électrolyse. Ces résines cationiques sont chimiquement inertes et confèrent au film une résistance à la corrosion. Ils sont mélangés avec des pigments (colorants), des obturations métalliques et des solvants organiques. Le colorant dans cette couche est très faible: il représente 6% du contenu. La couleur obtenue varie du blanc au noir passant par des nuances de gris. Pour réaliser le

processus de cataphorèse, on immerge la carrosserie d'automobile dans un bain en appliquant une différence de charge entre la carrosserie, agissant comme une cathode, et des électrodes en solution, servant d'anodes. Cette couche est homogène et mince, d'environ 20  $\mu\text{m}$ , principalement utilisée pour protéger la carrosserie contre la corrosion. Après ce processus, une étape de rinçage et de polymérisation est obligatoire. Une troisième couche, de 30  $\mu\text{m}$  d'épaisseur environ, nommée l'apprêt, est ensuite appliquée, elle augmente l'élasticité du film et améliore les propriétés mécaniques (résistance à l'impact, à l'usure), notamment l'impact du gravier. La sélection de la résine détermine les caractéristiques de base de la couche de l'apprêt. Les résines de polyester ou les résines époxy sont les plus utilisées. L'apprêt contient un pourcentage de colorant plus élevé: entre 30% et 55% selon les propriétés mécaniques souhaitées. Cette couche permet de se débarrasser de tous les résidus présents en surface et de l'éliminer. La dernière couche se divise en couche, une couche de (base pigmenté + vernis) ou couche de peinture brillante (laque). La couche de base ou de couleur, constituée de résine organique et de pigments organiques ou inorganiques, avec une épaisseur de 15 à 20  $\mu\text{m}$  [3]. L'ajout de coquilles ou de feuilles d'aluminium dans la couche de base est le responsable de l'apparence métallisé ou irisé du film [4]. Les laques ou peintures brillante direct (solvantées) ; sont des peintures de ' finition brillante ', dure et résistante et n'ont pas besoin d'être revernies.

Une couche finale de vernis vient recouvrir la couche de base afin de donner un éclat et de la protéger des contraintes mécaniques et chimiques en construisant le premier mur contre les agressions extérieures telles que l'humidité, la lumière, la température, les chocs, les rayures, l'érosion par sable, les pluies acides et le contact avec les produits chimiques. Elle permet également d'augmenter la durée de vie du revêtement. Plusieurs recherches sur la résistance de cette couche aux agressions environnementale sont réalisées. B.Ramezanzadeh et al. ont étudié l'influence d'exposer la couche de vernis pendant longtemps aux fientes de pigeon [5]. Cette couche est composée d'une résine souvent à base acrylique, nommée aussi « liant », et divers additifs qui lui confèrent certaines de ses propriétés fonctionnelles, telles que la protection contre les UVs. Cette couche est d'environ 40  $\mu\text{m}$  d'épaisseur [6].

### **1.3 Concept de base de la peinture des véhicules**

Une peinture est une couche déposée sur un substrat ayant pour but la protection ou la décoration. L'objectif des travaux de recherche est de trouver un système de peinture

assurant la solidité et l'adhérence le plus longtemps possible d'utilisation. En outre, il doit avoir l'aspect esthétique et l'éclat requis.

Plusieurs composants font partie de la structure générale d'une peinture: liant polymère, solvants, plastifiants, charge, pigments, divers adjuvants.

### **1.3.1 Liants polymères**

Les liants sont les constituants principaux qui apportent l'essentiel des caractéristiques physico-chimiques et qui déterminent la nature de la peinture. Ils sont utilisés pour maintenir la cohésion globale de pigment à la surface. Le liant est une substance polymère qui est soit dissoute dans la peinture, soit suspendue dans celle-ci par des émulsifiants. Les peintures en solvants sont généralement classées en fonction du type de résine qu'elles forment [7] :

- Liants naturels
- Dérivés cellulosiques
- Dérivés du caoutchouc
- Vinyliques et acryliques
- Alkydes (glycérophtaliques)
- Polyesters
- Epoxydes
- Polyuréthanes

### **1.3.2 Solvants**

Les solvants sont nécessaires pour assurer un mélange homogène des composants de la peinture et faciliter leur application. Il faut choisir un solvant qui sèche uniformément et dans lequel le liant est soluble mais pas si soluble qu'il ne polymérise pas. Pour les peintures en émulsion, le solvant est simplement de l'eau, et pour les peintures à base de résine, divers composés organiques sont utilisés, le plus commun étant l'essence de térébenthine [7]. Les facteurs qui influent sur le choix du solvant sont nombreux, à savoir la solvabilité, la viscosité, le point ou la plage d'ébullition, le taux d'évaporation, le point d'éclair, la nature chimique, la toxicité et le coût. En particulier, l'odeur, la toxicité et le coût sont devenus de plus en plus importants. Les solvants peuvent être classés comme suivant:

- Hydrocarbures :
  - Les hydrocarbures aromatiques

- Les solvants pétroliers
- L'essence de térébenthine
- Les hydrocarbures chlorés
- Les hydrocarbures nitrés
- Alcools
- Éthers de glycol
- Esters
- Cétones

### 1.3.3 Plastifiants

Les plastifiants sont des composés généralement liquides, polymérisés ou non, de faible masse molaire [8]. Ils modifient les propriétés rhéologiques du polymère ou mélange polymère, améliorent la mise en œuvre, permettent d'améliorer la souplesse du produit fini, sa tenue aux chocs et aux basses températures. Deux familles des plastifiants sont les plus utilisées [8]:

- Plastifiants primaires
  - Les phtalates
  - Les adipates et les sébaçates
  - Les huiles époxydées (de lin et de soja)
  - Les plastifiants polyesters
  - Les phosphates
  - Les glycols et leurs dérivés
- Plastifiants secondaires
  - Les dérivés organiques chlorés
  - Les dérivés de l'acide toluène-sulfonique

### 1.3.4 Charges

Les charges sont des matériaux de faible force de coloration, elles sont incorporées dans les revêtements pour certaines raisons techniques ou économiques [7]. Elles ont également un effet sur les propriétés des peintures telles que la perméabilité, la flexibilité, la brillance, la résistance à l'abrasion, le ponçage, la résistance au feu, les agents chimiques, les taches, etc. On peut les classer selon l'utilisation en quatre groupes [7]:

- Carbonate (craie, calcite, chaux),
- Sulfate (sulfate de baryte, sulfate de chaux),

- Silicate (kaolin, amiante, talc, mica),
- Silice (sous forme cristalline, artificielle, fossile).

### 1.3.5 Pigments

Les pigments sont utilisés pour apporter de la couleur à la voiture. Bien que les colorants solubles puissent également être utilisés, leur résistance à la lumière n'est généralement pas suffisante pour les applications automobiles [7]. Un pigment est défini comme tout solide particulaire coloré, noir, blanc ou fluorescent, qui est insoluble dans le véhicule dans lequel il est incorporé et qui n'est pas affecté par celui-ci. Un pigment conservera sa structure cristalline ou particulaire tout au long du processus de coloration. Il modifiera l'apparence d'un objet par l'absorption sélective et / ou dispersion de la lumière [7].

Les pigments sont classés comme suit:

- Pigments organiques
- Pigments inorganiques
- Pigments d'aluminium
- Pigments à effets (sans aluminium)
- TiO<sub>2</sub>, noirs de carbone
- Pigments fonctionnels - corrosion, diluants, nanoparticules.

Le rôle des pigments dans la couche de peinture supérieure est la coloration et la stabilisation le long du temps d'utilisation [9].

### 1.3.6 Additifs

Les additifs sont utilisés pour contrôler et corriger les interactions à l'intérieur du revêtement et dans les couches limites. Ces additifs agissent essentiellement au niveau des couches limites, en partie des interfaces internes entre le pigment et la matrice du liant et en partie des limites externes c'est-à-dire le mouillage du substrat et de la surface pour modifier la tension superficielle [7]. Les constructeurs doivent minimiser l'utilisation et la quantité d'additifs, car une interaction mutuelle et un surdosage peuvent neutraliser les effets souhaités [7].

**1.4 Caractérisation des vernis**

À la fin des années 80, il est devenu évident que l'environnement pouvait endommager gravement les couches de finition (Vernis) des véhicules automobiles. Cela était particulièrement évident dans les zones de stockage des importations des véhicules automobiles de Blount Island à Jacksonville, en Floride. De nombreuses voitures ont été gravement endommagées et ne pouvaient pas être vendues « en l'état » en raison de phénomènes de gravure extrêmes sur la surface de la peinture. Ce problème est devenu évident à la fin des années 80 pour deux raisons fondamentales. La première concerne l'introduction de systèmes de couche de base – Vernis, qui présentent un brillant élevé et une distinction d'image (DOI : Distinctness-of-Image). Les nouveaux niveaux de brillance et de DOI permettent à l'œil de détecter les petits défauts qui ne sont pas visibles dans les revêtements à faible brillance - DOI. La deuxième raison du problème est liée à la réglementation stricte sur les émissions décomposées organiques volatiles (COV).

**1.4.1 Caractérisations physico-chimique**

Des analyses de résonance magnétique nucléaire (RMN), d'infrarouge, de chromatographie et de pyrolyse permettent de déterminer les principaux monomères de la matrice, le type de durcisseur (mélamine et/ou isocyanate), la présence ou non de styrène, de polyester, le type d'absorbeur UV (Ultraviolet) et de HALS (hindered amine light stabilizer), les différents solvants. La température de transition vitreuse  $T_g$  du vernis est déterminée par DSC (Differential Scanning Calorimetry) [6].

**1.4.2 Caractérisation mécanique**

Les trois méthodes d'essais les plus courantes pour évaluer les propriétés mécaniques des revêtements polymères sont l'indentation (mesure de la dureté et du module d'élasticité), la résistance au rayage (mesure de l'intégrité du revêtement, la résistance à la rayure et les propriétés viscoélastiques) et la résistance à l'usure (propriétés de frottement et taux d'usure). Après l'application du vernis sur la base, des contraintes dues à l'évaporation des solvants se développent (contraintes résiduelles). L'évolution de ces contraintes en fonction de la température et du taux d'humidité est déterminée grâce au Stressmeter.

**1.5 Phénomènes de dégradation des vernis de peinture**

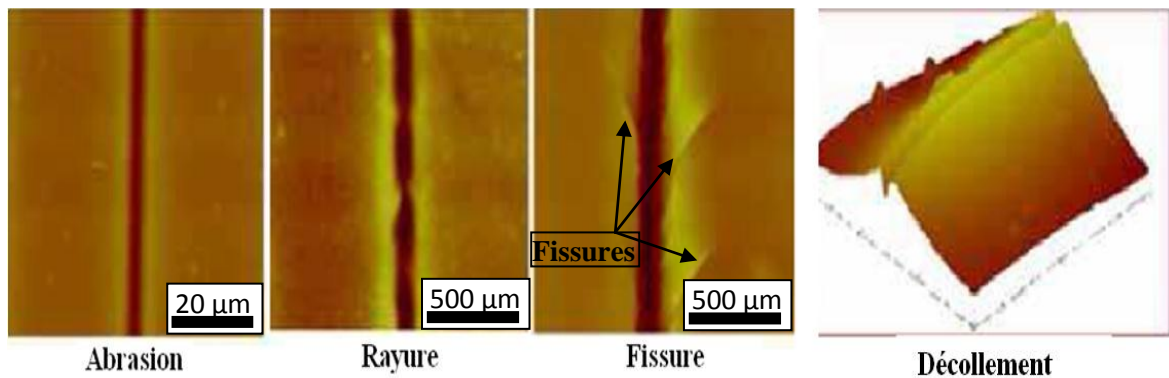
Les endommagements rencontrés sur la couche de vernis dans les systèmes de peinture automobile ont des origines chimiques et mécaniques.

### 1.5.1 Dégradations d'origine chimique

Les dégradations chimiques sont excitées par les polluants atmosphériques et les pluies acides, causant les taches sur le vernis. L'acide sulfurique contribue à la détérioration de la couche de vernis. En plus de l'humidité, la chaleur et la lumière stimule l'hydrolyse du vernis.

### 1.5.2 Dégradations d'origine mécanique

Les revêtements automobiles soumis à différentes conditions environnementales au cours de leur durée de vie. Les objets mécaniques peuvent avoir des effets graves sur ces revêtements. Selon le type de contrainte imposée à ces revêtements, différents types de dégradation peuvent être observés [10]. Le plus important entre eux est visible dans la Figure 1-2.



**Figure 1-2** Différents types d'endommagements mécaniques survenant sur les revêtements automobiles [10].

### 1.6 Effet environnemental sur les peintures automobiles

Presque tous les objets créés par l'homme destinés à un service extérieur sont peints. La peinture a une fonction décorative, dans laquelle son but est d'améliorer ou de changer l'apparence d'un objet, de changer sa couleur ou son niveau de brillance ou d'attirer l'attention sur une région particulière de l'objet. Cependant, tout aussi important, les objets sont peints pour les protéger de l'environnement et pour allonger leur durée de vie. Maximiser la durée de vie d'un revêtement, est l'objectif clé des recherches scientifiques [11-13]. Pour atteindre celui-ci, une variété de méthodes d'exposition et de protocoles d'essais ont été développés pour anticiper le comportement à long terme des revêtements.



**1.7 Processus de dégradation de la couche de peinture**

Les revêtements, comme tous les autres matériaux, commencent à se dégrader lorsqu'ils sont exposés à l'environnement extérieur. Leur dégradation est due à l'effet de diverses pressions environnementales placées sur le revêtement. Le processus d'altération est dominé par les effets du rayonnement électromagnétique (principalement les rayons ultraviolets (UVs)), la chaleur, l'eau (liquide et vapeur) et les polluants atmosphériques. Chacune d'entre elles joue un rôle plus ou moins important selon le revêtement et l'emplacement géographique dans lequel le revêtement est utilisé.

**1.7.1 Effet des radiations UVs**

L'ozone dans la haute atmosphère de la terre empêche les rayonnements de moins de 295 nm d'atteindre la surface de la terre.

Pour la plupart des revêtements, le rayonnement UV du spectre électromagnétique cause la plupart des dégradations pendant l'altération. Ainsi, pour les revêtements exposés à l'extérieur, le rayonnement entre 295 et 400 nm est le plus nuisible, car ce rayonnement est le plus susceptible d'amorcer la photo-oxydation. La photo-oxydation est un processus radical par lequel la matière organique se décompose en présence de lumière et de l'oxygène. Cet événement peut être dû à l'absorption de la lumière UV par n'importe quel chromophore du revêtement, par exemple des molécules de polymère, des particules de pigment ou même des traces d'impuretés dans la résine. Chaque événement d'initiation peut conduire à plusieurs dizaines d'événements de propagation avant que la chaîne radicale se propage. Des additifs peuvent être ajoutés aux revêtements pour retarder le processus de photo-oxydation. Un absorbeur de lumière ultraviolette (UVA) peut être ajouté pour empêcher l'absorption primaire, réduisant ainsi la vitesse d'amorçage, ce sont des molécules organiques qui absorbent la lumière entre 295 et 370 nm et qui sont capables de convertir l'énergie acquise sous d'autres formes comme la chaleur. Un stabilisant amine-lumière encombré (HALS) peut être ajouté aux radicaux de capture une fois qu'ils sont produits, ce qui détruit les radicaux au cours de l'étape de propagation. L'utilisation de ces additifs peut prolonger de manière significative la durée de vie des revêtements organiques exposés à l'extérieur.

Les traitements thermiques par UVs d'un verni de peinture automobile ont le potentiel d'augmenter la résistance à la rayure, car ils peuvent atteindre des densités de réticulation élevés [14]. Seung et all [15] étudiés le comportement de double traitement d'un verni automobile. Par un traitement thermique suivi par exposition aux UVs et la deuxième

exposition aux UVs suivi par un traitement thermique, ils ont trouvé que le 2<sup>ème</sup> traitement améliore les propriétés mécaniques du vernis y compris la résistance aux rayures. Tae et al. [11] étudiés l'influence du vieillissement et de la rugosité du substrat sur l'adhérence interfaciale des revêtements acryliques par des essais de rayage. Leurs résultats montrent que la résistance au rayage augmente à cause de l'amélioration de la densité de réticulation par irradiation UVs. Hamad [16] trouve que l'exposition des revêtements à base d'époxy aux irradiations UVs entraîne des microfissures dans la surface. La profondeur et le nombre des microfissures augmentent avec l'augmentation du temps d'exposition [16].

### **1.7.2 Effet de l'eau**

L'eau a des effets chimiques et physiques délétères sur les revêtements. Les liants organiques dans la plupart des revêtements sont soumis à une hydrolyse, c'est-à-dire un clivage des chaînes polymères en présence de molécules d'eau, en particulier en présence d'acide (provenant d'une exposition environnementale ou d'un catalyseur de durcissement résiduel). Ce processus se produit à toutes les températures, mais particulièrement prévalent à des températures plus élevées, comme celles qui se produisent lors d'une exposition à l'extérieur. Les revêtements réticulés à la mélamine ainsi que les polyesters sont particulièrement sensibles à l'hydrolyse, tandis que les uréthanes sont particulièrement résistants.

L'eau peut également agir pour dégrader physiquement les revêtements. L'action de lavage avec l'eau liquide sur la surface de la carrosserie a tendance à extraire les petites molécules solubles des revêtements en plus d'éliminer les débris de surface. Cela peut entraîner une perte de brillance ou de farinage plus rapide que celle qui serait observée sans lavage à l'eau.

### **1.7.3 Effet de la température**

Les températures élevées accélèrent les effets délétères des rayonnements et de l'eau. Puisque les réactions d'hydrolyse et les étapes de propagation de la photo-oxydation sont des activités thermiques, des températures plus élevées conduiront à des vitesses de dégradation plus rapides et peuvent même modifier la voie de dégradation. Cela peut être particulièrement important lorsque l'on compare le comportement aux intempéries d'une série de revêtements de différentes couleurs. Les objets peints en couleurs foncées seront généralement plus chauds que d'autres de couleurs claires. Cette différence de température

peut amener le taux de dégradation d'un revêtement à être fortement dépendant de la couleur.

La température d'un système de peinture joue également un rôle important du point de vue des contraintes mécaniques. Chaque cycle de chauffage et de refroidissement, tel qu'un cycle journalier, introduit une contrainte mécanique due à un décalage des coefficients de dilatation thermique entre le substrat et le revêtement[14]. La taille de ces cycles de contrainte est directement proportionnelle au changement de température.

Les systèmes de peinture dont la température élevée aura tendance à être soumis à des contraintes mécaniques plus importantes que celles qui sont exposées à des températures basses [18]. Hainsworth et Kilgallon [19] ont étudié l'influence de plusieurs températures sur les peintures automobiles, ils ont remarqué que la charge critique et la dureté des peintures diminue quand la température augmente.

L'étude menée par Trezona et al. [20] sur les facteurs affectant la résistance de vernis automobile à l'érosion a montré que la résistance à l'érosion de vernis été élevée à 65°C. Ce résultat est attribué à la température de transition vitreuse de vernis à environ 49°C. De plus, le taux d'érosion diminue quand la température est au -20 ° C, et il augmente avec l'augmentation de la température [21].

#### **1.7.4 Autres variables d'exposition**

Bien que le rayonnement UV, l'eau et la température jouent les rôles les plus importants dans la dégradation des revêtements, d'autres facteurs peuvent jouer un rôle important dans la dégradation. La pollution atmosphérique peut abaisser le pH de la pluie et entraîner une attaque acide aux revêtements. Les zones situées proche des opérations industrielles peuvent subir une attaque chimique plus importante que celles isolées des retombées industrielles. L'attaque par des micro-organismes peut également conduire à la dégradation d'un revêtement. Des biocides peuvent être ajoutés aux formulations de peinture pour minimiser les attaques de ces micro-organismes. En raison de sa plus faible énergie, les effets de la lumière visible sur les systèmes de peinture sont considérés moins importants que les effets de la lumière UV. Cependant, pour les systèmes pigmentés, en particulier les pigments organiques, les effets ne peuvent être ignorés.

Nargess et al. [22] ont trouvé que les abrasions et la résistance au rayage diminue avec l'augmentation du temps d'exposition à la photooxydation, ce qui augmente la possibilité de la fissuration de la couche transparente et la propagation des fissures vers la couche de

base. La résistance à l'érosion des revêtements à base polymère naturellement âgés peut être améliorée par l'ajout des nanoparticules de silice et l'alumine [23].

### **1.8 Conclusion**

Ce chapitre présente les différents matériaux utilisés dans les peintures automobiles et les phénomènes de dégradation. Chaque couche qui constitue le système de peintures possède une importance particulière. Cependant, la dégradation diffère d'une couche à une autre. En effet, le vernis apporte la brillance nécessaire à l'esthétique et également protège la peinture contre les agressions extérieures. La couche de base ou bien la couche colorée, n'est pas en contact direct avec le milieu extérieur. Elle possède une résistance aux radiations solaires UVs, ce qui permet d'augmenter la durée de vie de la couche de peinture et de garder la couleur le long du temps d'utilisation. La couche primaire et la couche électrostatique ont un rôle de protéger la tôle contre la corrosion et lier la tôle à la couche de base. Ces différentes couches de peinture permettent donc non seulement de garder la couleur et la brillance mais aussi de résister contre le rayage et l'érosion.

---

# **Chapitre II**

## **Résistance au rayage des peintures des véhicules**

---

## **2. 1 Introduction**

L'attribut principal que les fabricants et les consommateurs aspirent à avoir dans les produits est une bonne qualité de surface, que ce soit par souci de fonctionnalité ou par pur esthétisme. Le véritable défi consiste à fabriquer un produit avec la finition de surface souhaitée, car il est difficile de maintenir la bonne qualité de surface tout au long de la durée de vie du produit. Le problème de la qualité de surface dans les applications de polymères peut être globalement classé en termes d'esthétisme de surface, d'intégrité et de durabilité. Pour l'esthétisme des surfaces, les rayures réduisent simplement l'attractivité du produit d'origine, tandis que les fonctionnalités recherchées restent largement inchangées, comme dans les peintures automobiles. En termes de durabilité, le milieu saharien aride caractérisé par des intensités UVs élevée, une température haute et un gradient de température important entre le jour et la nuit ont une influence considérable sur l'adhérence des peintures automobiles sur le substrat et par conséquent sur la durée de vie.

Dans ce chapitre, une étude expérimentale de la résistance des peintures automobiles au rayage, des tôles revêtues utilisées réellement dans le sahara algérien pendant 3, 5, 8 et 10 années, est menée. La microscopie optique est utilisée pour caractériser l'endommagement dans la surface des échantillons. Le microduromètre est utilisé pour déterminer la microdureté de l'ensemble peinture-substrat afin de pouvoir discuter les résultats de rayage obtenus. Les essais expérimentaux sont réalisés sur la machine fabriquée par l'auteur de cette thèse dans le Laboratoire de Rhéologie et Mécanique. La microscopie électronique à balayage est utilisée pour caractériser l'endommagement dans les rayures obtenues. Les discussions sont articulées sur la microdureté, la durée d'utilisation des échantillons, le type d'indenteur et sur l'endommagement observé par microscopie optique dans la surface et dans les rayures.

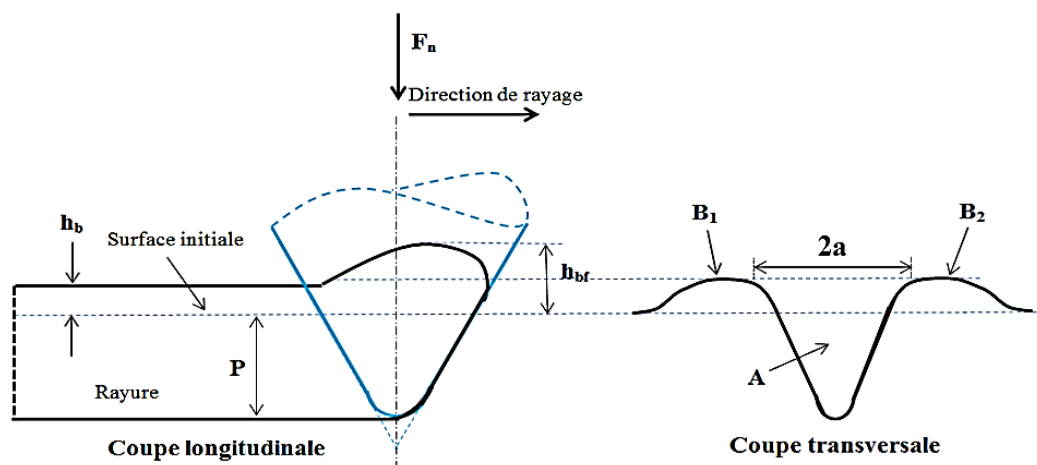
## 2. 2 Comportement des matériaux au rayage

Durant le rayage d'une surface, l'abrasion se produit lorsque le matériau subit une déformation et / ou un décollement du matériau par le contact avec des particules solides sur sa surface. Ces particules peuvent être des bords rugueux d'une surface rigoureuse ou des particules solides bouclées entre deux surfaces glissant l'une contre l'autre. L'usure abrasive est l'un des modes d'usure les plus fréquents et les plus sévères. Il conduit à des défauts de surface qui peuvent provoquer une dégradation des propriétés optiques, mécaniques ou esthétiques des pièces sollicitées, et ainsi leur faire perdre leurs fonctions principales. Le comportement des matériaux au rayage peut être décrit selon : d'abord, la morphologie de la rayure qui peut être analysée avec ses dimensions. Ensuite, lorsque les rayures nuisent aux propriétés visuelles de la surface, on mesure sa perception esthétique. Enfin, les mécanismes d'endommagement résultants peuvent être observés par microscopie optique puis analysés.

### 2. 2. 1 Morphologie et mécanique du rayage des matériaux massifs

#### 2. 2. 1. 1 Morphologie d'une rayure

En rayant une surface d'un matériau de comportement élastoplastique, il est généralement observé que l'on crée une trace ou un sillon, des bourrelets se forment dans les côtés de la rayure. La forme morphologique qui est générée pendant le rayage reflète la déformation plastique. La figure 2-1 illustre la morphologie résiduelle classique d'une rayure ductile. Elle décrit également les différents paramètres morphologiques définis par Jardret et al. [24]. La topographie du sillon donne accès à la largeur du contact  $2a$ , ce qui permet d'estimer l'aire de contact projetée dans le plan vertical  $A$ .



**Figure 2-1** Morphologie résiduelle d'une rayure et définition des différents paramètres morphologiques.

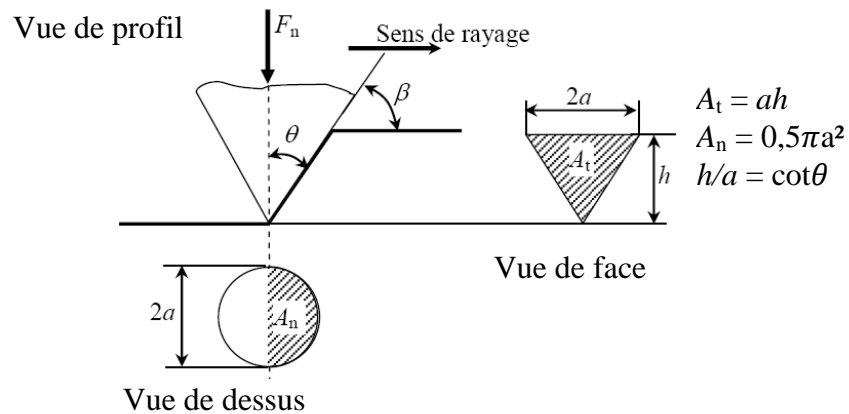
Où :  $h_b$  est la hauteur de bourrelet latéral,  $P$  est la profondeur résiduelle de la rayure, depuis la surface initiale,  $h_{bf}$  est la hauteur de bourrelet frontal,  $F_n$  est la force normale appliquée,  $B_1$  et  $B_2$  sont les bourrelets latéraux.

La mesure de la hauteur ou de la largeur d'une rayure n'est pas facile, le premier obstacle est la présence des bourrelets au front et dans les côtés de la rayure. Le deuxième, si les fissures se propagent jusqu'au point de décollement du matériau, les dimensions du contact ne sont plus mesurables. D'un autre côté, la profondeur et la largeur de la rayure, pendant l'essai, sont différentes à celles mesurée après rayage. Ceci est dû au retour élastique du matériau.

2. 2. 1. 2 Géométrie des indenteurs utilisés

La géométrie de contact dans le cas d'une pointe conique est caractérisée par deux parties sphérique et conique (Figure 2-2-a). Le contact pyramide face avant- matériau est présenté sur la Figure 2-2-b.

a) Cas d'une pointe conique



b) Cas de la plaquette en carbure métallique

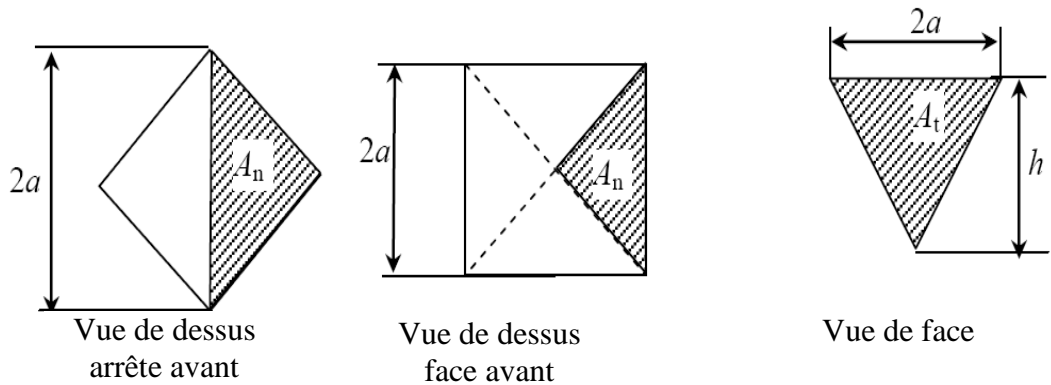


Figure 2-2 Géométrie du contact pour les deux pointes : a) pointe conique, b) plaquette en carbure métallique.

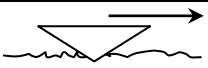
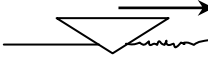
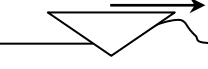

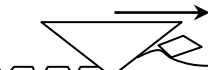



Où :  $\theta$  est le demi-angle de l'indenteur,  $\beta$  est l'angle d'attaque de l'indenteur,  $2a$  est la largeur de la rayure,  $A_t$  est l'aire tangentielle projetée,  $A_n$  est l'aire normale projetée,  $h$ : est la profondeur de l'enfoncement de la pointe.

### **2. 2.1.3 Mécanique du rayage des matériaux massifs**

Souvent, de nombreux polymères sont utilisés pour l'apparence ou l'esthétique optique d'un composant. Pour telles applications, la qualité de la surface est jugée par l'aspect visuel. Ce dernier peut être quantifié en mesurant la réflectivité ou la dispersion optique d'une surface [25, 26]. Ainsi, lorsque la surface d'un matériau se déforme uniquement par déformation plastique ou par rupture fragile, les valeurs de réflectivité optique ou de dispersion de la surface déformée seront différentes pour ces deux cas extrêmes. La connaissance de la distinction entre les mécanismes de déformation, à pour but de prédire la défaillance à la suite des endommagements superficiels.

Une définition de la nature de déformation rencontrée lors du rayage des polymères est présentée dans les figures 2-4 et 2-5. On peut avoir une déformation élastique lorsque la pointe de rayage ne laisse aucune trace optiquement visible. Cela s'apparente à un glissement purement élastique souvent rencontré lorsque la contrainte imposée est extrêmement faible. Le repassage est le terme utilisé lorsque nous observons un type de marquage sur la surface du polymère qui indique un lissage des aspérités élevées à la surface, sans aucune déformation plastique observée sur la surface du polymère. Ce type de déformation peut être défini comme une étape entre la déformation élastique et le labourage ductile. Ainsi, le labourage plastique est défini comme une déformation plastique de la surface du polymère provoqué par l'indenteur. Aucune présence de microfissures n'est remarquée à l'intérieur ou le long de la rayure. Souvent, un matériau ductile présente des empilements ou des bourrelets formés sur les côtés de la rayure lorsque le labourage est profond. Des fissures se produiraient dans et autour de la rayure si le comportement du matériau est fragile. Enfin, le comportement fragile est reconnu lorsqu'il s'agit de produire des copeaux et des débris résultant de l'initiation et de la propagation de fissures. Ces types d'endommagement peuvent intervenir séparément ou simultanément dans un processus d'abrasion. Plus précisément, si on modélise l'objet rayant par une aspérité unique, de forme conique, ces déformations peuvent intervenir séparément ou simultanément suivant l'angle  $\alpha$  du cône, comme présenté dans la figure 2-3 [27].

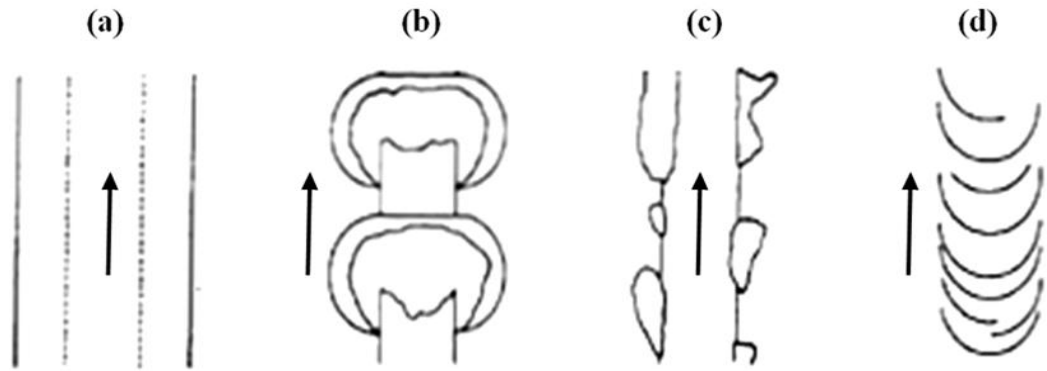
	Schématisation	Régime d'endommagement	Conditions de rayage
a		Elastique	$2\theta = 180^\circ$
b		Repassage ( <i>Ironing</i> )	Matériaux viscoplastiques, faible, niveau de déformation, $2\theta = 150^\circ$
c		Labourage plastique ( <i>ductile ploughing</i> )	Métaux, polymère, faible niveau de déformation, $2\theta = 120^\circ$
d		Usinage plastique + fissuration ( <i>Ductile machining+cracking</i> )	Matériaux caoutchoutiques, verre, acétate, $2\theta = 90^\circ$
e			Matériaux fragiles, PMMA, $2\theta = 60^\circ$
f		Usinage fragile ( <i>brittle machining</i> )	Métaux, polycarbonate, niveau de déformation important, $2\theta = 0^\circ$

**Figure 2-3** Schématisation des différents endommagements générés sur un polymère par rayage en fonction de l'angle au sommet  $2\theta$  d'un cône dur [27].

## 2. 2.2 Endommagement déterminé par observation microscopique

### 2. 2.2.1 Mode d'endommagement fragile

Un certain nombre de modes d'endommagement ont été observés dans le cas où le substrat est fragile. Les principaux modes d'endommagement dans le cas où le substrat est fragile sont illustrés schématiquement ci-dessous (Figure 2-4). Un grand écaillage, (Figure 2-4-a), est courant si l'adhérence est faible ou si le niveau de contrainte résiduelle dans le revêtement est élevé. Dans ce cas, lorsque l'indenteur est en contact avec le revêtement, une fissure se forme à l'interface du revêtement-substrat, laquelle peut se propager sur une distance considérable jusqu'aux deux côtés de la rayure. Cette fissure peut provenir à partir d'un défaut interfacial ou d'une fissure à travers l'épaisseur [28]. Un mode d'endommagement courant est l'écaillage dans lequel le revêtement est détaché afin de minimiser la quantité d'énergie élastique stockée par les fortes contraintes de compression devant le mouvement de l'indenteur. Cela implique une adhérence relativement faible et conduit à des fissures semi-circulaires qui se propagent vers l'extérieur de l'axe de la rayure, (Figure 2-4-b).



**Figure 2-4** Mode d'endommagement fragile dans l'essai de rayage [28] : (a) grand écaillage, (b) écaillage devant l'indenteur, (c) recouvrance d'écaillage derrière l'indenteur, (d) fissure par traction.

Ce mode d'endommagement conduit à un écaillage dans les côtés de la rayure (pour les substrats fragiles) si la fissure interfaciale se propage à l'extérieur de la rayure avant que l'indenteur passe au-dessus. Une fois l'indenteur atteint la région écaillée, il pousse le revêtement et le rend en contact avec le substrat ou il provoque l'enlèvement d'un morceau de la couche de peinture. Ce type d'endommagement laisse généralement des traces d'endommagement dans la rayure ainsi que des écailles le long des bords. À mesure que l'épaisseur du revêtement augmente, ce type de d'endommagement devient plus probable.

En plus de l'écaillage dans la rayure, on observe un autre type d'écaillage qui n'est pas lié à un décollement initié devant l'indenteur. Ceci est le résultat de la recouvrance élastique différentielle du revêtement et du substrat, (Figure 2-4-c). Ces traces de recouvrance peuvent souvent être trouvées avec des fissures d'écaillage compressif sur un segment de fissure donné. Les deux peuvent être difficiles à différencier. Cependant, à mesure que le niveau de contraintes résiduelles dans le revêtement augmente, l'endommagement d'écaillage compressif devient plus apparent. Les deux types d'endommagement dépendent de l'adhérence du revêtement et peuvent être utilisés pour déterminer la charge critique. Cependant, ils conduiront tous les deux à des valeurs différentes car la recouvrance des fissures survient à des charges appliquées faible [28]. L'occurrence de la recouvrance élastique d'écaillage peut être améliorée en augmentant la différence de module d'élasticité entre le revêtement et l'indenteur.

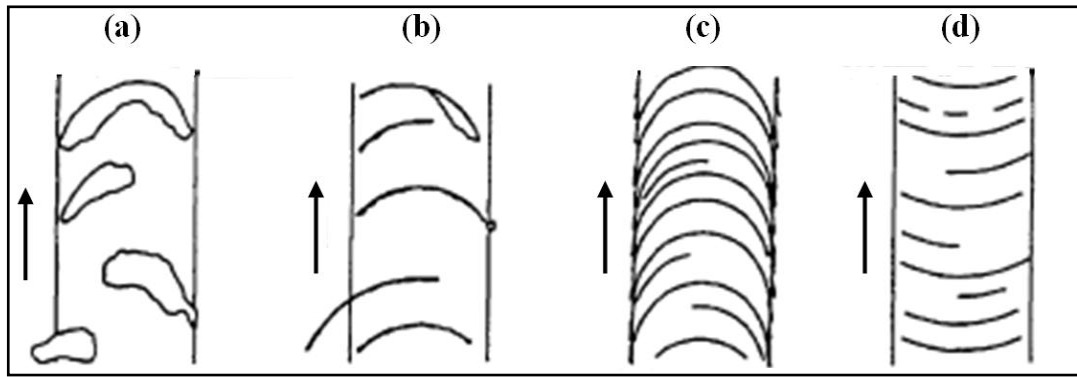
La figure 2-4-d montre un mode d'endommagement typique des substrats très fragiles. Les contraintes radiales de traction sur le bord du contact de l'indenteur génèrent une fissure de forme d'un anneau qui se propage de la surface jusqu'au substrat à travers le revêtement. Une fois la fissure est formée, la forme du contact entre l'indenteur et le

revêtement change et la charge est alors principalement supportée sur la moitié avant de l'indenteur. Cela conduit à des fissures perpendiculaires à la direction de glissement [28].

### **2.2.2.2 Mode d'endommagement ductile**

Les endommagements ductiles sont généralement caractérisés par des zones de fissure plus petites par des régions ébréchées ou éclatées. Les schémas de mode d'endommagement typiques sont illustrés ci-dessous (Figure 2-5). Les modes d'endommagement d'écaillage et de flambement, (Figure 2-5-a et b), sont similaires au mode d'écaillage dans le cas du mode d'endommagement fragile, sauf que l'ampleur de la défaillance est plus petite. Ces deux modes d'endommagement se produisent devant l'indenteur pendant l'essai. En général, le phénomène d'écaillage se produit lorsque l'adhérence est faible entre la couche de revêtement et le substrat et aussi pour les revêtements épais où la force motrice nécessaire pour réduire l'énergie élastique stockée est plus grande [28].

Deux autres modes communs d'endommagement ductile sont la fissuration conforme et la fissuration par traction. Pour les matériaux ductiles, une fois que le glissement commence, la charge est transférée à la première moitié sur l'indenteur, ce qui donne une formation de rainures considérables. Deux facteurs contribuent alors à la contrainte devant l'indenteur, le premier est l'empilement du matériau devant et sur les côtés de l'indenteur qui provoque la flexion du revêtement, plaçant sa surface en tension ; et le deuxième est le frottement entre le revêtement et l'indenteur provoquant la contrainte maximale de traction radiale sur les côtés de ce dernier. Ceci est complété par une contrainte de traction à l'arrière du contact où l'indenteur libère le matériau déformé. Le frottement tangential ajoute des contraintes de compression devant l'indenteur, ce qui entraîne des endommagements par écaillage et flambement. La fissuration par traction se produit donc initialement sur les côtés de l'indenteur, ce qui donne des fissures parallèles au sens de rayage au bord de la rayure. Des fissures partielles de forme anneau peuvent se produire devant l'indenteur. Le revêtement peut se fissurer devant l'indenteur lorsqu'il est plié dans la rayure [28]. Cela conduit à une fissuration à travers l'épaisseur ou à la fissuration par compression, (Figure 2-5-c). Des fissures se produisent également à l'arrière du contact indenteur-revêtement en raison de la contrainte de traction générée lors du glissement (Figure 2-5-d).

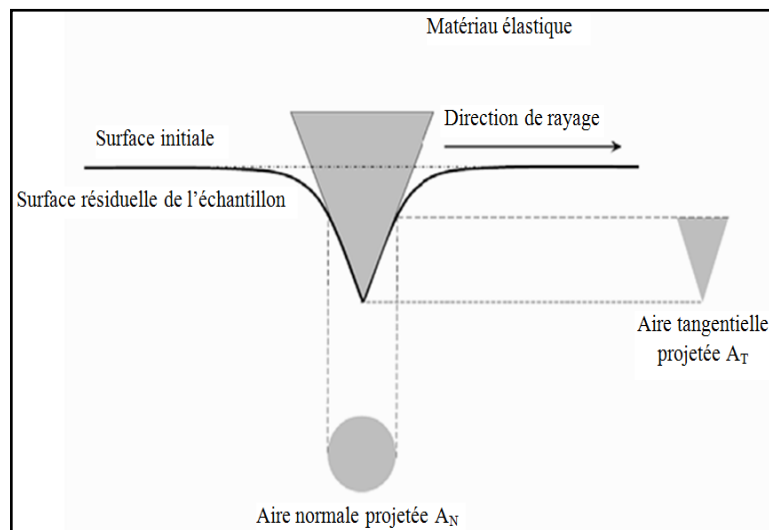


**Figure 2-5** Modes d'endommagement ductile dans le rayage [28] : (a) écaillage, (b) flambement, (c) fissuration par compression, (d) fissuration par traction.

### 2.2.3 Comportement au rayage des matériaux massifs à base de polymère

#### 2.2.3.1 Comportement élastique

L'élasticité se caractérise par une déformation réversible. Une rayure sur un matériau parfaitement élastique ne laisse aucune trace après le passage de l'indenteur (Figure 2-6).



**Figure 2-6** Représentation de la déformation élastique de la surface pendant le rayage [29].

#### 2.2.3.2 Comportement plastique

La déformation plastique d'un matériau est directement liée au seuil d'écoulement de la matière plastique et à son aptitude à s'écouler de façon plastique avant sa rupture. Le comportement ductile généré par les rayures peut être distingué de trois manières différentes. Le matériau peut être endommagé par un processus de densification dans la rayure, par la création de bourrelets qui se forment par le déplacement de la matière de la zone rayée vers les deux côtés et devant l'indenteur (Figure 2-7), et enfin par une coupe.

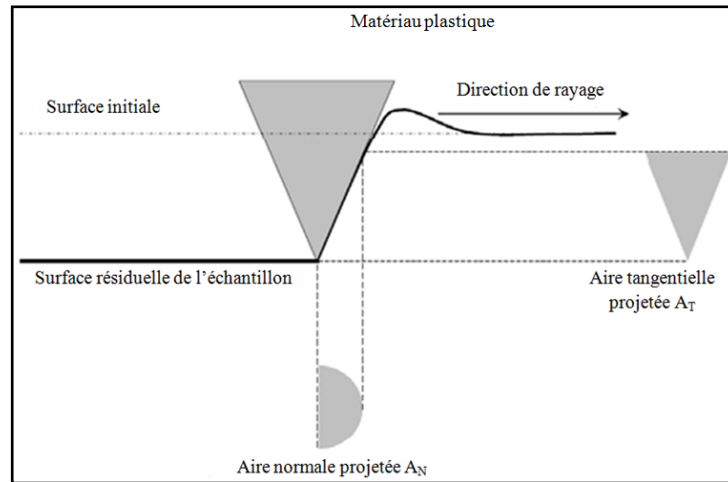


Figure 2-7 Représentation de la déformation plastique de la surface pendant le rayage [29].

### 2.2.3.3 Comportement élastoplastique

Pour les matériaux élastoplastiques, la déformation plastique causée par l'indenteur est accompagnée d'une recouvrance élastique dans la rayure. Elle peut être estimée par le demi angle dans la rayure ( $\alpha'$ ), qui est plus grand que le demi angle de l'indenteur ( $\alpha$ ) (Figure 2-8). L'aire de contact résiduelle est alors différente de l'aire de contact sous charge. Ce comportement est valable aussi bien en indentation qu'en rayure.

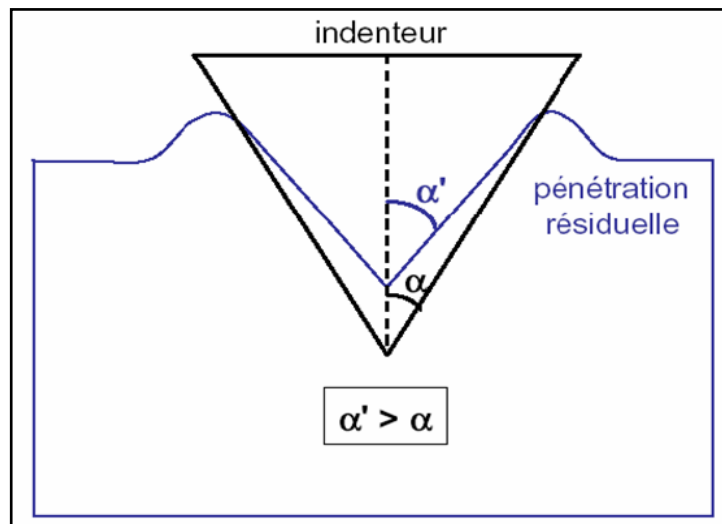
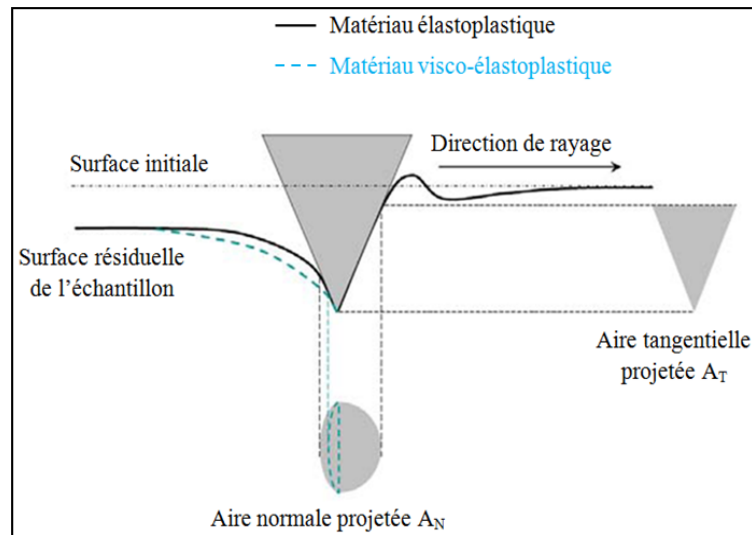


Figure 2-8 Recouvrance élastique, vue de profil. Schéma valable en indentation et en rayure [29].

### 2.2.3.4 Comportement visco-élastoplastique

Une indentation avec un déplacement tangentiel d'une pointe de forme géométrique (sphère, cylindre, cône...) peuvent être définis comme une rayure.

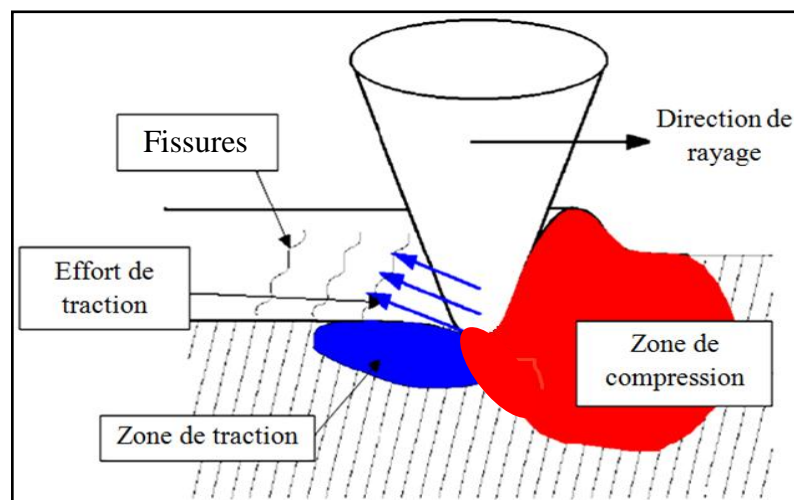


**Figure 2-9** Représentation de la déformation visco-élastoplastique de la surface pendant le rayage [29].

Dans l'essai d'indentation, la sollicitation imposée par l'indenteur est uniforme. D'autre part, lors du rayage, la sollicitation n'est plus uniforme, sauf dans le cas de déformation élastique (Figure 2-6). Dans le cas des matériaux plastiques (Figure 2-7), le matériau soutient l'indenteur à l'avant car il est complètement déformé à l'arrière et supporté par ce dernier pour les matériaux visco-élastoplastiques (Figure 2-9), cette figure présente aussi la projection des aires normale et tangentielle.

### 2.2.3.5 Comportement fragile

Au cours du rayage, le matériau devant l'indenteur est en compression et à l'arrière est en traction [30]. La figure 2-10 présente les champs de contrainte autour d'un indenteur rayant un matériau fragile.



**Figure 2-10** Distribution des contraintes localisées autour du contact lors d'un test de rayage [31].

Les contraintes en traction sont les plus critiques, elles peuvent engendrer un comportement fragile par la formation et la propagation des fissures. Localement, il est possible qu'il y ait des efforts de traction à l'avant, on peut alors observer la formation de copeaux.

#### **2.2.4 Déformation et importance de la vitesse de déformation**

En indentation ou en rayage, la déformation et la vitesse de déformation ont une influence majeure parmi toutes les conditions d'essai sur le comportement des matériaux polymères. Les matériaux polymères sont très sensibles aux petites variations de déformation et les propriétés mécaniques résultantes dépendent de la vitesse de contrainte.

##### **2.2.4.1 Déformation en rayage**

La déformation  $\epsilon$  est une grandeur sans dimension qui exprime l'étendue de l'enfoncement de l'indenteur. Elle est relative à la notion de volume frontière entre une zone déformée élastiquement et une zone déformée plastiquement [32].

L'évaluation de la déformation lors de tests sclérométriques est délicate, et il n'existe pas de relations fiables et universelles. Toutefois, en rayage, le taux de déformation a pu être directement corrélé à la géométrie de l'indenteur, pour un matériau élastique/parfaitement plastique [33, 34]. Le Tableau 2-1 récapitule les différentes déformations en rayage en fonction de la forme de la pointe. L'angle  $\psi$  est l'angle entre la hauteur du tétraèdre et une face, l'angle  $\theta$  est le demi angle interne équivalent à un cône,  $a$  est la largeur de contact et  $R$  le rayon de la sphère.

Odoni [32] remarque qu'il est toutefois surprenant de trouver que le pré-facteur de  $\cotan\theta$  soit dépendant de l'angle de l'indenteur ; en général ce pré-facteur est associé au rapport  $E/\sigma_y$ , distinguant le matériau [35, 36]. Ces valeurs de déformation sont également utilisées pour le rayage des matériaux élastoplastiques, et leur utilisation est élargie au cas des matériaux visco-élastoplastiques. Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'il s'agit uniquement d'une estimation de la déformation moyenne.



**Tableau 2-1** : Valeurs de déformation relative en fonction de la géométrie d'indenteur. Comparaison avec les formules issues de la littérature [32].

Indenteur	Angle $\psi$	Angle $\theta$	Déformation	Littérature [33,34]
sphère	/	/	0,2 a/R	0,2 a/R
Cône 60°	/	60°	0,144 cotan $\theta$ = 8,3%	/
Berkovich	65,3°	70,3°	0,194 cotan $\theta$ = 6,9%	0,2 cotan $\theta$
'Cube corner'	35,5°	42,3°	0,123 cotan $\theta$ = 13,6%	/
Vickers	68°	70,3°	0,246 cotan $\theta$ = 8,8%	0,25 cotan $\theta$

#### 2.2.4.2 Importance de la vitesse de déformation

La vitesse de déformation peut être définie comme l'inverse du temps nécessaire à l'indenteur pour s'enfoncer d'une unité de longueur dans le matériau. Elle est estimée dans l'équation (2-1) par Briscoe et al. [37] par le rapport entre la vitesse de glissement de l'indenteur  $v$ , la largeur de la rayure  $a$  et la déformation  $\varepsilon$  :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \dot{\varepsilon} = \frac{v}{a} \quad (2-1)$$

Dans le cas des matériaux polymères lorsque leur comportement est viscoélastique, la vitesse de sollicitation influe sur les dimensions de l'aire de contact, au même titre que la température dans le contact (échauffement local). Briscoe et al. [38] ont remarqué que de par la faible conductivité thermique des polymères, l'échauffement local qui se produit pendant le rayage est moins dissipé vers le cœur lorsque la vitesse de rayage augmente. Cet échauffement local de la matière réduit les contraintes de cisaillement, le contact est considéré comme lubrifié par une couche interfaciale plus souple. La déformation de la matière est alors principalement ductile. Sur des matériaux massifs amorphes tels que du PMMA, Gauthier et Schirrer [39] ont montré expérimentalement le passage du contact réversible (élastique) à irréversible (élastoplastique) en fonction de la vitesse de

glissement. Pour ce type de matériaux, des simulations expérimentales et numériques conduisent aux mêmes résultats [39]. A partir de simulations sur un matériau de type visco-élastoplastique, en utilisant une sphère de 10 µm de rayon, pour un enfoncement contrôlé de 3 µm, Kermouche [40] montre qu'à faible vitesse de rayure (entre 10<sup>-2</sup> et 10<sup>-4</sup> mm/s), le bourrelet frontal et le coefficient de frottement sont maximum, alors que la surface de contact à l'arrière est minimale. On retrouve le comportement d'un matériau élastoplastique. En revanche, pour des vitesses de rayage très élevées (de 10<sup>2</sup> à 10<sup>3</sup> mm/s), il n'y a pas de bourrelet frontal, le coefficient de frottement est quasiment nul, et la surface de contact à l'arrière de l'indenteur est très proche de la surface de contact à l'avant de l'indenteur. On retrouve le comportement d'un matériau élastique.

### 2.3 Coefficient de frottement

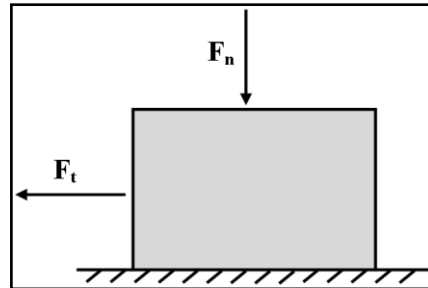
Dans les essais de rayage, un indenteur est déplacé sur une surface, ce qui provoque une combinaison de déformations élastiques et plastiques. La composante élastique est régie par le module de Young. La dureté de la surface est éliminée une fois la charge appliquée est retirée. La composante plastique dépend du frottement entre le pénétrateur et le système de revêtement / substrat et du flux de plastique de ce système sous l'indenteur. Afin de bien utiliser les mesures de la force tangentielle requise pour déplacer le revêtement sous l'indenteur, il est important de comprendre les mécanismes mis en jeu. Le frottement est défini comme la résistance rencontrée par un corps lorsqu'il se déplace sur un autre. La loi de frottement de Coulomb stipule que : (a) le frottement est proportionnel à la charge normale, (b) la force de frottement est indépendante de la zone de contact apparente. Une troisième règle stipule que le frottement est indépendant de la vitesse mais que la fiabilité de cette dernière affirmation est mise en doute [41,42]. La force de frottement requise pour initier le glissement est supérieure à celle nécessaire pour le maintenir. Par conséquent, le coefficient de frottement statique est supérieur au coefficient de frottement dynamique. Cependant, une fois le glissement commence, le coefficient de frottement dynamique reste indépendant de la vitesse sur une large plage de vitesses [41].

Le coefficient de frottement global est exprimé par l'équation (2-2) suivante :

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2-2)$$

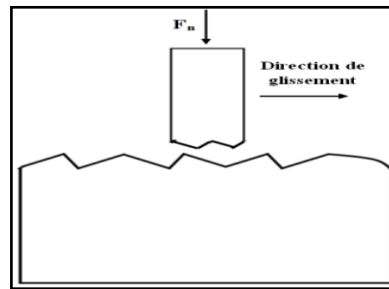
Où :  $\mu$  est le coefficient de frottement,  $F_t$  la force tangentielle requise pour déplacer le corps sur la contre face fixe et  $F_n$  la charge normale appliquée (Figure 2-11).

Bowden et Tabor [43] ont proposé un modèle de frottement par glissement qui suppose que la force de frottement provient de deux sources. Une force d'adhérence  $F_{adh}$  développée dans les zones de contact réel entre les surfaces et une force de déformation  $F_{def}$  requise pour creuser les aspérités d'un matériau tendre par un matériau dur [41].



**Figure 2-11** Schéma des forces impliquées dans le frottement par glissement

À faible charge, des frottements se produisent entre le contact des aspérités dans les surfaces, comme illustré dans la figure 2-12. En raison de pressions locales élevées, le soudage à froid et l'écrasement de la surface peuvent se produire. Les forces de frottement résultent des forces nécessaires pour casser ces points d'adhérence.



**Figure 2-12** Représentation schématique du contact entre les aspérités dans les surfaces.

À des charges plus élevées, les matériaux se déplacent loin dans les surfaces et les mécanismes de frottement peuvent changer. L'écoulement plastique devient le mécanisme principal et dépend des propriétés en vrac du revêtement. C'est particulièrement le cas aux pressions attendues sous la pointe d'un indenteur.

Utilisant une balance globale énergétique lors de rayage des revêtements mince sans fissuration, Le Houérou et al. [44] expriment la force tangentielle lors de rayage comme suit :

$$F_t = \delta W_{DF} + \delta W_{DP} \quad (2-2-a)$$

Tel que :

$$\delta W_{DF} = F_n \mu_{local} \quad \text{et} \quad \delta W_{DP} = \sigma_y S_t$$

Sachant que le coefficient de frottement apparent  $\mu_{app}$  est le rapport  $F_t/F_n$ , on obtient donc l'équation (2-3):

$$\mu_{app} = \frac{F_t}{F_n} = \frac{\delta W_{DF} + \delta W_{DP}}{F_n} = \frac{F_n \mu_{local} + \sigma_y S_t}{F_n}$$

$$\mu_{app} = \mu_{local} + \frac{\sigma_{yield} S_t}{F_n} \quad (2-3)$$

Où :  $\mu_{local}$  est le coefficient de frottement local (adhésif),  $\delta W_{DF}$  est le travail dû au vrai frottement local,  $\delta W_{DP}$  est le travail de déformation plastique du système par unité de distance de rayage,  $\sigma_{yield}$  est la contrainte d'écoulement plastique du substrat,  $S_t$  est l'aire de la section transversale et est donné par l'équation (2-4) :

$$S_t = \frac{\pi a^2}{2} - R^2 \arcsin \frac{a}{R} + a \sqrt{R^2 - a^2} - 2\pi a e \quad (2-4)$$

Où :  $a$  est le rayon de contact,  $R$  est le rayon de la sphère,  $e$  est l'épaisseur de la couche de revêtement.

Tel que le dernier terme de l'équation (2-3) est le rapport entre la force de création de surface dans le revêtement, substrat et l'interface revêtement-substrat ( $\sigma_{yield} S_t$ ) et la force normale appliquée ( $F_n$ ).

## 2.4 Dureté à la rayure

Au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, évaluer la dureté des matériaux était une question relative. L'échelle de dureté de Mohs a été développée en frottant divers minéraux ensemble. Le minéral qui endommageait l'autre était considéré comme le matériau le plus dur. Cette échelle varie d'une dureté de 1 (les matériaux les plus doux) à 10 (les matériaux le plus durs).

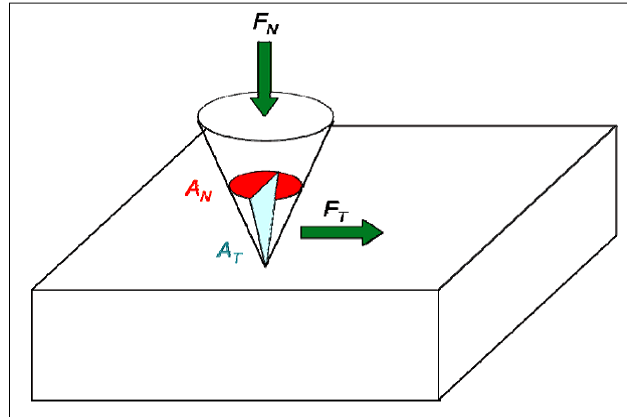
À mesure que la recherche devenait plus développée, une définition différente de la dureté du matériau était adoptée. Selon la nouvelle définition, la dureté d'un matériau dépend de l'étendue de la pénétration d'un pénétrateur sous une charge normale appliquée, et par conséquent des mesures des dimensions de l'empreinte résiduelle [33]. En indentation, la dureté est la résistance du matériau à la pénétration d'une pointe. Elle est définie par le rapport entre la force normale et l'aire de contact réelle dans le matériau. Dans une expérience de rayage, la dureté peut être définie comme la résistance du matériau à la pénétration de la pointe. En mesurant la dureté d'indentation  $H_N$  définie par l'équation (2-5) :

$$H_N = \frac{F_N}{A_N} \quad (2-5)$$

La dureté de la rayure  $H_T$  est donnée par l'équation (2-6) suivante :

$$H_T = \frac{F_T}{A_T} \quad (2-6)$$

Avec les indices **N** et **T** caractérisant respectivement les forces et aires de contact projetées normale et tangentielle (Figure 2-13).



**Figure 2-13** Schéma représentant les forces normale et tangentielle, ainsi que les aires de contact projetées normale et tangentielle dans le cas d'une rayure réalisée avec un indenteur conique [32].

La définition de la dureté à la rayure citée ci-dessus telle que mesurée par la dureté classique n'est pas la seule envisageable. De nombreux chercheurs ont suggéré leur propre définition. Jardret [45] a noté que la différence entre les définitions proposées dans la littérature est principalement due à la définition de l'aire de contact, qui dépend du comportement du matériau entourant l'indenteur. En réalité, pour un même matériau, la présence ou l'absence des bourrelets change l'aire de contact projetée. En prenant en compte les propriétés viscoélastiques de certains matériaux, la surface de contact peut être changée, parce qu'une grande partie du matériau peut ou pas être en contact à l'arrière de l'indenteur [46] (Figure 2-9). La définition donnée par Briscoe et al. [47] dans l'équation (2-7) prend en considération la dépendance de l'aire de contact avec le comportement du matériau, par le biais d'un facteur correctif  $q$  :

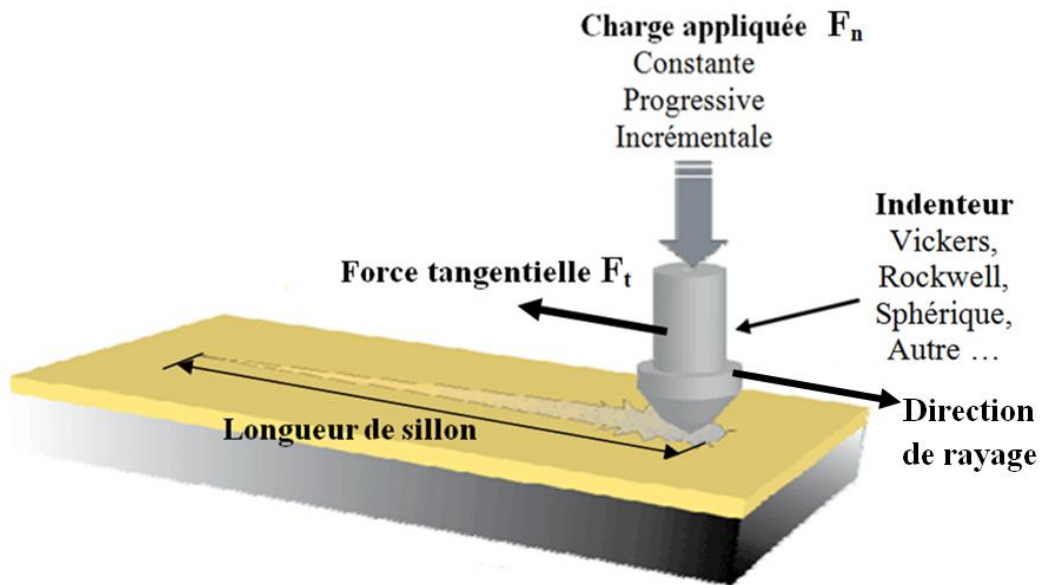
$$H_s = q \frac{4 \cdot F_N}{\pi a^2} \quad (2-7)$$

Où :  $H_s$  est la dureté de la rayure défini par Briscoe,  $a$  est la largeur de contact.

La variable  $q$  est un paramètre qui correspond à la recouvrance du polymère.  $q$  égal à 1 dans le cas de matériaux rigides élastiques, égal à 2 pour les matériaux plastiques et confiné entre 1 et 2 pour les matériaux visco-élastoplastiques.

### 2.5 Principe d'essai de rayage

Le principe de l'essai de rayage est illustré dans la figure 2-14. L'indenteur est glissé sur une surface avec une charge constante, progressive ou charge incrémentielle et une rayure est donc introduite à la surface de l'échantillon.



**Figure 2-14** Vue rapprochée d'un indenteur et un échantillon [48].

Le test de rayage comprend trois phases : pré-balayage, rayage et post-balayage. Dans la phase de pré-balayage, avant le test de rayage proprement dit, une charge négligeable est appliquée à l'indenteur pour enregistrer la topographie de la surface de l'échantillon. Cette étape est nécessaire pour calculer la profondeur de pénétration « réelle » et la profondeur résiduelle après le test en soustrayant les valeurs de pré-balayage de la profondeur mesurée. Ensuite, dans la deuxième étape, l'essai de rayage est effectué avec les paramètres sélectionnés. Dans cette phase, la charge normale, la force tangentielle et la profondeur de pénétration sont enregistrées. Dans la dernière phase, la table porte échantillon revient automatiquement à la position de départ et le post-balayage est effectué, en mesurant la profondeur résiduelle. Cette dernière étape est particulièrement importante pour les polymères en raison de leur comportement viscoélastique. Pour les peintures, la profondeur résiduelle est plus importante que la profondeur de pénétration car la profondeur résiduelle représente l'endommagement permanent.

La figure 2-15 présente les différents paramètres enregistrés lors du test de nanorayage.

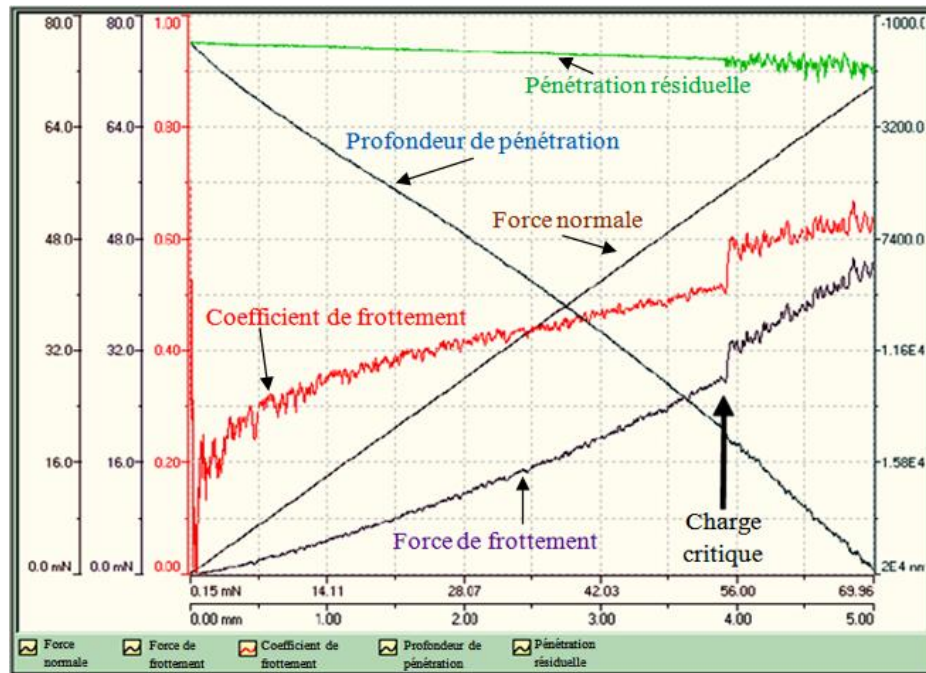


Figure 2-15 Diagramme des différents paramètres enregistrés lors du nanorayage.

Différents modèles sont proposés dans la littérature pour décrire les mécanismes de déformation dans la rayure [49-55]. Une rayure commence généralement par une déformation élastique et plastique du matériau et par la formation d'une agglomération de matériau dans les deux côtés de rayure. Lorsque la force normale augmente, la déformation induite par l'indenteur dépasse la résistance au déchirement du matériau testé, ce qui donne une création de fissures (Figure2-16). Toute évaluation de la résistance au rayage dans ce travail est basée sur la microdureté, la charge critique et le délai réel d'utilisation des échantillons dans le milieu saharien.

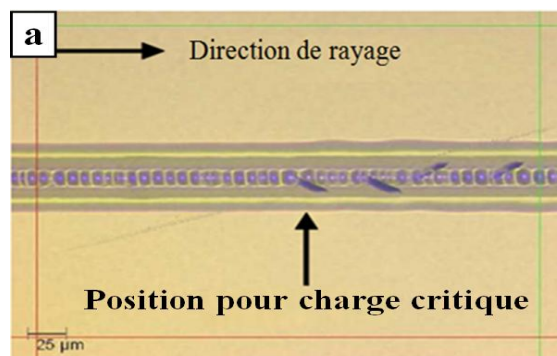


Figure 2-16 Chemin de rayage indiquant la présence des fissures [48].

Le model de Attar et al. [56] pour déterminer la charge critique  $L_{crit}$  est donné par l'équation (2-8) :

$$L_{crit} = \frac{d_{crit}}{\nu_c \mu_{crit}} (2tE_c W)^{1/2} \quad (2-8)$$

Où :  $d_{crit}$  est la largeur de la rayure à la charge critique,  $\nu_c$  est le coefficient de poisson de revêtement,  $\mu_{crit}$  est le coefficient de frottement à la charge critique,  $t$  est l'épaisseur de revêtement,  $E_c$  est le module de Young de revêtement,  $W$  est le travail mécanique de l'adhésion.

Au cours d'un essai de rayure, on impose un effort normal (Fn), une vitesse de rayage (V) et on mesure l'effort tangentiel résultant (Ft). L'équation (2-9) présente le model analytique proposé par Vincent et al. [44] pour déterminer la force tangentielle dans le cas des revêtements minces :

$$F_t = \frac{2\Delta A_{interf} \cdot \gamma_{s-interf}}{d} + \delta W_D + \delta W_E \quad (2-9)$$

Où :  $\Delta A_{interf}$  est la surface créée à l'interface,  $\gamma_{s-interf}$  est l'énergie de surface nécessaire pour créer une unité de nouvelle surface interfaciale,  $d$  est la distance de rayage,  $\delta W_D$  est le travail dissipatif (fracture exclue) par unité de distance de rayage,  $\delta W_E$  travail élastique par unité de distance de rayage.

**2.6 Facteurs affectant les résultats du test de rayage**

Les facteurs affectant les résultats des tests de rayage peuvent être séparés en deux catégories : les facteurs inhérents au test lui-même et les facteurs dépendant du système de substrat de revêtement. Le tableau 2-2 répertorie ces variables.

**Tableau 2-2 :** Facteur influençant sur les résultats du test de rayage [57].

Paramètres de l'essai	Paramètre des matériaux
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taux de chargement</li> <li>- Vitesse de rayage</li> <li>- Rayon de la pointe d'indenteur</li> <li>- Usure de l'indenteur</li> <li>- Facteurs machines</li> </ul>	<p>Substrat</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dureté</li> <li>- Module de Young</li> <li>- Coefficient de dilatation thermique</li> <li>- Rugosité du substrat</li> </ul> <p>Revêtement</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dureté</li> <li>- Fragilité</li> <li>- Module de Young</li> <li>- Rugosité de la surface</li> <li>- Contrainte et propriétés d'interface</li> </ul> <p>Force de frottement et coefficient de frottement</p>



## 2.7 Types des tests de rayage

Au cours des années, de nombreux dispositifs de test de rayage ont été conçus commercialement ou dans des laboratoires de recherche par des chercheurs pour étudier le rayage des matériaux. Dans les sections suivantes, une brève description de plusieurs tests sera donnée. La gamme et la fonctionnalité de chaque type de test seront mentionnées.

Généralement, il est reconnu qu'il existe deux types d'endommagements superficiels par rayage (abrasion) : Rayage sans formation de bourrelet et formation de bourrelet ou de débris d'usure sous forme de copeau. Un bon exemple d'endommagement typique des couches de peinture rayée par grain de sable. Une rayure avec formation de bourrelet est une trace formée par des bourrelets frontaux et latéraux. Les endommagements causés par le glissement d'une pointe dure sont les conséquences d'un développement de ces bourrelets à un débris d'usure. Il existe, actuellement, plusieurs tests de caractérisation de l'abrasion. Ci-dessous, quelques tests d'abrasion seront discutés.

### 2.7.1 Test de rayage avec une seule pointe

Ce procédé utilise une seule pointe qui glisse sur la surface de l'échantillon. La géométrie de la pointe peut être sphérique ou conique ou autres.

### 2.7.2 Essai de dureté de Mohs

Le test de dureté de Mohs pour les minéraux est utilisé depuis 1822 [33,43]. Si un solide est capable de rayer la surface d'un autre solide sélectionné, il aura donc une dureté élevée. L'échelle de dureté consiste simplement en 10 matériaux disposés dans l'ordre de 1 à 10. Le diamant est considéré comme le matériau le plus dur avec l'indice numéro 10 et le talc comme le plus doux avec l'indice numéro 1. Cette méthode n'est pas très utilisée, car plusieurs matériaux, tel que les polymères, ne sont pas indiqués dans cet échelle.

**Tableau 2-3 : Duretés Mohs.**

Matériau	Indice de Mohs
diamant	10
Corindon	9
Topaze	8

Quartz	7
Orthoclase (feldspath)	6
Apatite	5
Fluorine	4
Calcite	3
Gypse	2
Talc	1

### 2.7.3 Test de dureté au crayon

Similaire au test de dureté de Mohs et adopté par les industries de la peinture et des revêtements [58, 59]. Le test de dureté au crayon est utilisé pour évaluer la résistance des revêtements aux rayures. Les mines de crayon de différentes duretés (6B-9H) sont poussées dans la surface des éprouvettes selon un angle de 45°. La mine de crayon la plus dure est celle qui ne se casse pas et ne laisse pas de traces de rayures donne l'indice de résistance aux rayures de l'éprouvette.

### 2.7.4 Test par aiguille

Sur une machine d'essai de traction, Ramsteiner et al. [60] installent un support sur lequel une aiguille avec une pointe conique est attachée. Lorsque la machine de traction se déplace verticalement à une vitesse de 0,083 mm/s, l'aiguille crée une rayure verticale sur les éprouvettes. La charge normale au cours de l'essai est contrôlée par des poids compris entre 0,1 et 1,1 N et les aiguilles utilisées avaient des angles compris entre 60 °, 90 ° et 120°.

## 2.8 Quelques machines de rayage développées

### 2.8.1 Machine de rayage de Briscoe et al. [47, 61-63] :

La machine de rayage est constituée d'un bras rigide, réglable mais non mobile pendant l'essai, qui porte l'indenteur. Les échantillons sont placés sur une table dont le mouvement est contrôlé par un ordinateur. Des capteurs de force piézoélectriques sont installés sur le support de l'indenteur pour enregistrer les forces de frottement (force tangentielle) et une

cellule de chauffage a été intégrée pour effectuer des tests à différentes températures. Des poids morts sont placés sur les indenteurs pour imposer des charges normales aux échantillons. Les vitesses de rayage utilisés vont de 0,001 à 40 mm/s.

### **2.8.2 Machine de rayage de Gauthier et Schirrer [39] :**

Utilisant une machine d'essai de traction de marque Instron et un servomécanisme commercial, l'appareil de rayage consiste d'une boîte à température contrôlée (entre -70°C et 120°C) contenant les échantillons et les indenteurs. Un ordinateur est utilisé pour contrôler le mouvement et les vitesses des indenteurs et pour enregistrer les charges normales et tangentielles et les températures pendant le test. La table porte échantillon est animée par un mouvement horizontal et l'indenteur par un mouvement vertical pour appliquer la charge normale. La charge normale peut aller de 0,05 à 5 N et les vitesses de rayage peuvent être augmentées par pas de 0,01 à 100 mm/s au cours de rayage.

### **2.8.3 Machine de rayage de Wang et al. [64] :**

Le banc d'essai construit peut effectuer des tests avec des charges normales, comprises entre 1 et 100 N, appliquées de manière constante ou de manière croissante sur la longueur de la rayure et à des vitesses de rayage allant de 1 à 200 mm/s. Une platine chauffante est incluse dans le banc d'essai pour les tests à températures élevées. Les données telles que les charges normales et tangentielles et la profondeur de pénétration sont acquises à l'aide d'un ordinateur

### **2.8.4 Scléromètre à pendule à passe unique [65-68] :**

La machine pendulaire comprend une barre pivotante rigide qui pivote à une extrémité avec un indenteur ou une lame de disque et des poids morts fixés à l'autre extrémité. En relâchant l'extrémité libre de la barre d'une hauteur, des rayures sont réalisées sur l'échantillon au point le plus bas de la trajectoire de la barre oscillante. La longueur et la profondeur des rayures peuvent être ajustées en déplaçant la table de la machine où les éprouvettes sont fixées. Les indenteurs utilisés ont une forme conique avec divers angles (30 ° à 120 °) et de diamètre de la calotte sphérique allant de 6 à 14 µm. Des disques de 30 mm de diamètre et différents angles de (30 ° à 120 °) sont également utilisés dans ce test. Le calcul de la charge normale appliquée sera beaucoup plus compliqué et la rayure formée est différente de celle test précédents.

**2.8.5 Test de nanorayage :**

Cette catégorie de tests de rayage est définie par l'ampleur des endommagements causés au cours de rayage. Un instrument tel que le microscope à force atomique (AFM) [69-72] est utilisé pour produire des rayures avec des largeurs allant du micron au nanomètre. Les caractéristiques d'endommagement par rayage présentent un comportement très différent à celui formé à l'aide des tests mentionnés précédemment. Cet essai est pertinent pour sonder le comportement des surfaces aux échelles micrométrique et nanométrique.

**2.8.6 Machine de rayage par Jardret et al [24] :**

Contrairement aux autres dispositifs effectuant des tests en fonction des charges mortes, cette machine de rayage peut effectuer des tests de rayages contrôlés par déplacement. Les rayures sont causées sur les échantillons par le mouvement de l'indenteur et un capteur piézoélectrique installé à côté du pénétrateur pour enregistrer toutes les forces. Dans leur étude, les indenteurs Berkovich sont utilisés. Mêmes types de machines spéciales sont aussi développées [73- 76].

**2.9 Installations de rayage commerciales**

Micro et nano testeurs de rayages [77,78], Nano Indenter® XP [79], Nano Indenter® XPW [80] et Triboindenter® [81,82].

**2.10 Présentation du dispositif expérimental réalisé****2.10.1 Schéma du banc d'essai**

Le banc d'essai de microrayage a été conçu et construit au laboratoire (LRM) (Voir annexe 1). Il est conçu de manière à ce qu'il soit rigide et capable de résister à des charges inférieures à 200 N et simple à manipuler (Figure 2-18). Les mouvements de ce banc d'essai sont contrôlés par ordinateur. Un programme, sous l'environnement ARDUINO, est utilisé pour commander les mouvements et acquérir les signaux des forces tangentielle et normale. Une description détaillée des mécanismes d'entraînement et d'acquisition des données est indiquée ci-dessous. Les différentes pièces mécaniques (Figure 2-17) sont répertoriées dans le tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Identification des composants de la machine de rayage

Numéro	Désignation
01	Ecrou pour la fixation des guides de chariot vertical
02	Chariot vertical
03	Capteur de force tangentielle
04	Indenteur
05	Table porte échantillon
06	Tige filetée pour l'entraînement du chariot horizontal
07	Vis pour l'assemblage des panneaux du chariot horizontal
08	Support de la machine
09	Support du moteur pour l'entraînement du chariot vertical
10	Vis pour l'assemblage des panneaux du chariot vertical
11	Panneau du chariot vertical
12	Bras porte-capteur de force tangentielle
13	Tige filetée pour l'entraînement du chariot vertical
14	Axe cylindrique pour le guidage des chariots vertical et horizontal
15	Chariot horizontal
16	Support du moteur pour l'entraînement du chariot horizontal
17	Capteur de charge normale

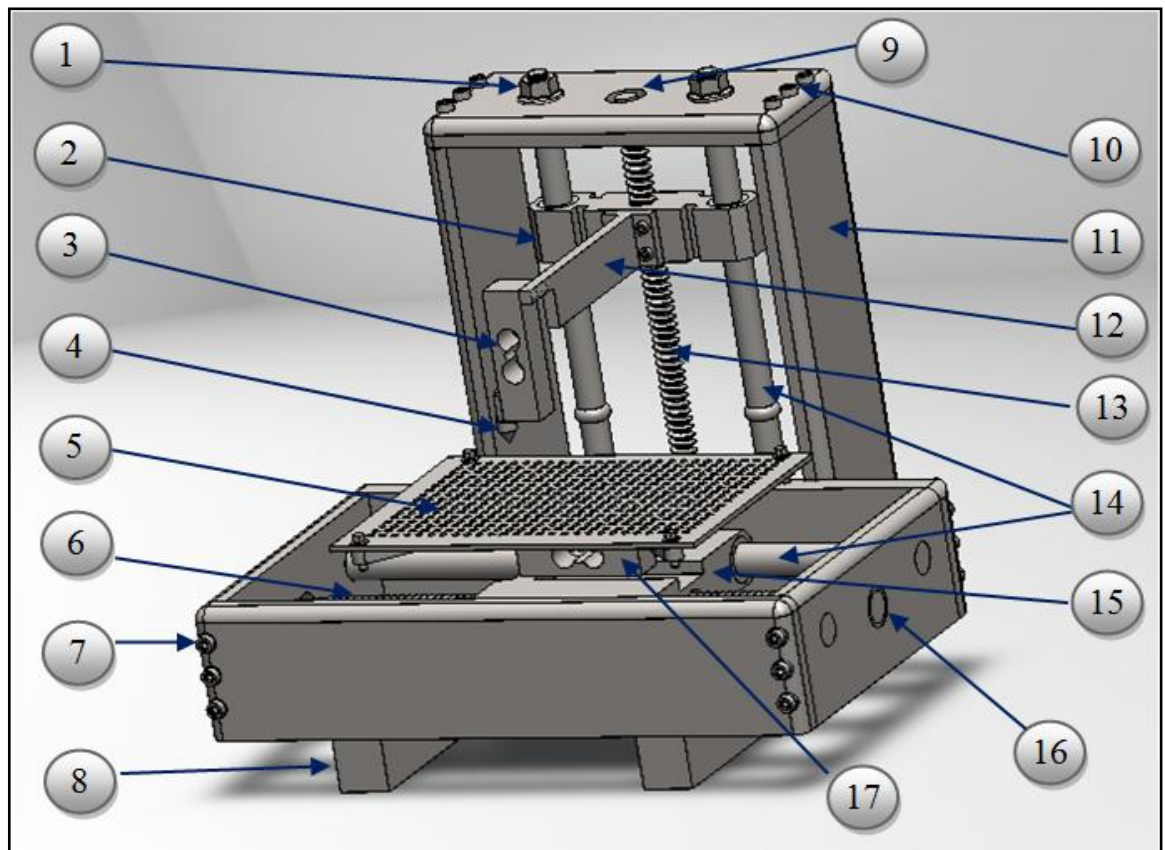


Figure 2-17 Schéma général du banc d'essai de microrayage



Figure 2-18 Banc d'essai de rayage réalisé et pointes utilisées, (a) vue générale du banc, (b) Pointe Conique et (c) Plaquette en carbure métallique.

### 2.10.2 Système de pilotage

Afin de générer une rayure, l'indenteur (4) est déplacé verticalement et un échantillon fixé sur la table (5) (Figure 2-17) est déplacé horizontalement. Le système d'entraînement des chariots permet de déplacer l'échantillon avec une vitesse constante. Les deux moteurs

pas à pas sont équipés d'un support à silentbloc pour minimiser les vibrations et assurer un déplacement continu de la table porte échantillon et du porte-indenteur. Deux glissières, soutenues par des bagues en Bronze, permettent de guider la table porte-échantillon et le porte-indenteur. La commande de la machine est assurée à l'aide de deux cartes électroniques Arduino UNO. Un programme a été réalisé et implémenté pour commander les moteurs. Ce programme permet le choix du type de chargement et la vitesse de déplacement requise.

### **2.10.3 Système d'acquisition des données**

Un capteur de force Omega [83] inséré entre la table porte échantillon et son mécanisme d'entraînement fournit une mesure calibrée de la charge normale ( $F_n$ ) appliquée par l'indenteur et un autre capteur entre l'indenteur et son support fournit l'enregistrement de la force tangentielle ( $F_t$ ). Les capteurs de force sont régulièrement étalonnés en utilisant des charges étalons (voir étalonnage de l'annexe 1). Les mesures des forces ( $F_t$  et  $F_n$ ) sont enregistrées automatiquement par un ordinateur pendant l'essai. Pour éviter les perturbations de mesure des forces normale et tangentielle, les deux capteurs de forces sont montés séparément.

## **2.11 Protocoles de l'essai de rayage**

### **2.11.1 Rayage avec une charge normale croissante**

Dans le mode de fonctionnement à charge normale croissante, le chariot porte échantillon et le chariot porte-indenteur sont mis en mouvement à une vitesse prédéfinie et constante. La charge augmente progressivement en fonction d'un taux de charge prédéfini jusqu'à atteindre la charge maximale prédéfinie. L'indenteur est ensuite retiré verticalement de la surface.

### **2.11.2 Rayage avec une charge normale constante**

En mode de fonctionnement à charge normale constante, le porte échantillon est mis en mouvement, tandis que l'indenteur reste sous une charge constante jusqu'à ce que la longueur de la rayure prédéfinie soit atteinte.

### **2.11.3 Rayage avec une charge croissante pas à pas**

Ce mode est utilisé dans les études d'adhérence des revêtements. En mode de fonctionnement à charge croissante pas à pas, la charge appliquée à l'indenteur est augmentée par pas jusqu'au décollement du revêtement.

## **2.12 Procédure expérimentale**

Les échantillons de peinture étudiés ont été obtenus à partir des tôles des véhicules utilisés dans le Sahara algérien. Le climat de cette région est caractérisé par une forte intensité des UVs et des gradients de température élevés. Durant l'été et pendant la journée, la température peut atteindre plus de 50 °C l'après-midi, alors que la nuit, elle peut descendre au-dessous de 0 °C et la gelée blanche y est courante [84]. Alors que durant l'hiver, la température pendant la journée est plus clémente et un faible gradient de température entre le jour et la nuit est enregistré.

Quatre échantillons de peinture automobile de dimensions 50×50 mm provenant de la toiture et de la carrosserie sont étudiés. Les véhicules à partir desquels sont tirés ces échantillons avaient 3, 5, 8 et 10 années d'utilisation.

Des observations par microscopie optique ont été effectuées pour analyser la morphologie de surface des peintures étudiées. Le microduromètre est ensuite utilisé pour déterminer la microdureté des couches de peinture. Quatre charges sont utilisées dans les essais : 0.05, 0.1, 0.3 et 0.5 kg et cinq mesures de microdureté ont été effectuées pour chaque charge.

L'essai de rayage est conduit, à température ambiante. Deux pointes ont été utilisées : une pointe conique d'angle au sommet  $2\theta = 120^\circ$  et un rayon de la calotte sphérique  $R = 200\mu\text{m}$  (Figure 2-18-b), et une plaquette en carbure métallique ayant un arrêt arrondi de rayon nominal de 400  $\mu\text{m}$  (Figure 2-18-c). La vitesse verticale de rayage est de 1 mm/min. La vitesse de déplacement horizontal de l'échantillon est de 8 mm/min.

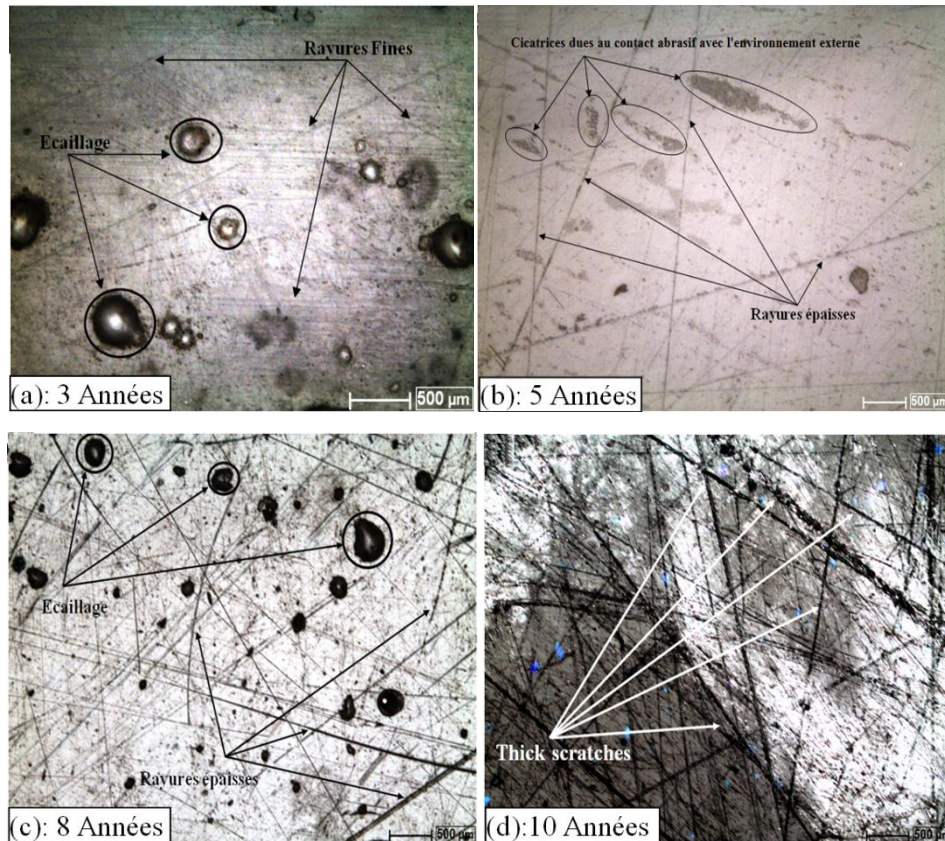
Un Microscope Electronique à Balayage (MEB), en mode environnemental, du Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'École Centrale de Lyon, France, a été utilisé pour caractériser l'endommagement dans les rayures obtenues.

## **2.13 Résultats expérimentaux et discussion**

### **2.13.1 Analyse préliminaire des surfaces des peintures**

L'impact de l'environnement aride sur la morphologie superficielle des échantillons de peinture, analysé par microscopie optique, sont illustrés dans la figure 2-19.





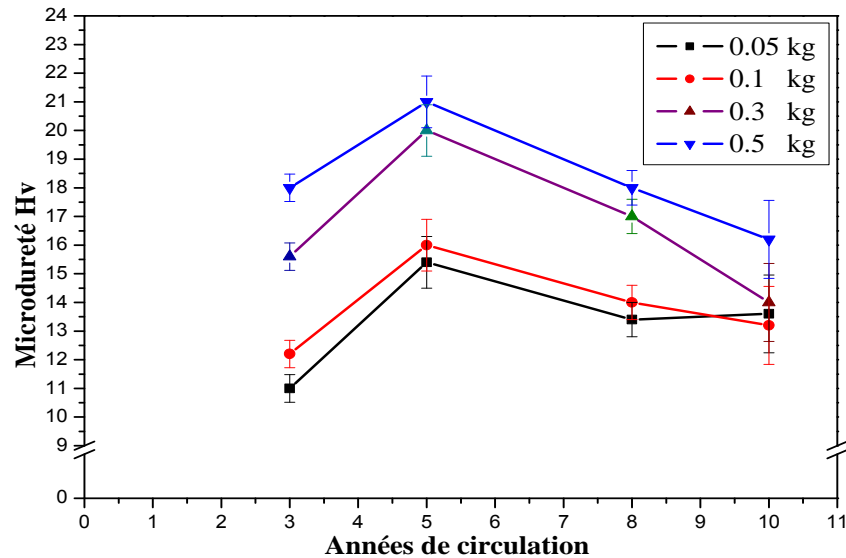
**Figure 2-19** Morphologie des surfaces des échantillons étudiés en fonction des années d'utilisation.

Des fines rayures dans les couches supérieures sont remarquées sur la figure 2-19. L'épaisseur et le nombre de ces rayures varient avec la durée d'utilisation. Sur la peinture de 3 années d'utilisation (Figure 2-19-a), on observe de fines rayures de différentes longueurs et largeurs ainsi que des points pores dans à la surface de l'échantillon. Ces points vides peuvent exister initialement dans la couche de vernis [85]. La peinture de 5 années d'utilisation (Figure 2-19-b) est occasionnée par des rayures et des cicatrices dans la surface plus prononcées par rapport à l'échantillon de 3 années d'utilisation. Certaines abrasions apparaissent clairement avec une longueur et une largeur supérieure à celles de l'échantillon de 3 années d'utilisation. Comme il a été aussi observé par Ulrich et al. [86], la création et la disparition de ces abrasions sont affectées par l'effet de vieillissement caractérisé par les UVs et par les précipitations acides et probablement aussi par le contact avec le milieu extérieur. Relativement aux deux premiers échantillons (3 et 5 années d'utilisation), les échantillons de 8 et 10 années d'utilisation présentent des endommagements de la surface plus importants. Le nombre et la taille des abrasions sont clairement plus importants. Comme il est indiqué par Jones et al. [87], la diminution de la

résistance aux rayures peut être liée à la fragilité de la couche de vernis protectrice qui s'endommage par les cycles répétés de vieillissement. L'analyse optique et morphologique des peintures étudiées montre qu'après 5 années d'utilisation, certaines rayures créées avant cette durée sont disparues. Cependant, au-delà de cette durée, certaines rayures créées se multiplient en nombre et deviennent plus larges.

### **2.13.2 Microdureté des peintures**

Des tests de microindentation Vickers (HV), réalisés sur un Duromètre de la marque BUHLER de l'LTDS, Ecole centrale de Lyon. La figure 2-20 montre les microduretés obtenues des peintures pour chaque échantillon. Les valeurs obtenues présentent les duretés globales de la couche de peinture et le substrat. Les résultats montrent que la microdureté (Figure 2-20) augmente avec l'augmentation de la durée d'utilisation de 3 à 5 années. Pour la durée de 5 années, la microdureté atteint une valeur maximale pour toutes les charges d'essai appliquées. Comme les peintures étudiées sont exposées au gradient de température et aux rayons UVs pendant la période d'utilisation, l'augmentation de la microdureté peut être due à la formation de nombreux effets tels que: l'amélioration de la réticulation [85, 11, 88, 89] et la modification de la structure de la chaîne moléculaire du polymère de la peinture [16], ainsi qu'aux réactions d'oxydation conduisant à l'incorporation de groupes fonctionnels contenant de l'oxygène dans la structure du polymère lorsque les couches de peinture se dégradent dans la condition aérobie (air ambiant) [89]. L'étude menée par Lörinczová et al. [14] a montré que les couches transparentes obtenues après exposition aux UVs ont été fortement réticulées et elles sont devenues plus dures et leur résistance aux rayures augmente avec le temps d'exposition aux UVs. Cependant, l'augmentation de la microdureté prend une limite en fonction de la durée d'exposition aux rayons UVs [14]. Au-delà de 5 années, la microdureté pour les échantillons de 8 et 10 années d'utilisation diminue à cause de l'endommagement dans la chaîne moléculaire de la peinture [14]. Il est remarqué que les résultats de microdureté obtenus ont donné une indication préliminaire sur l'effet de l'environnement aride sur la peinture automobile.

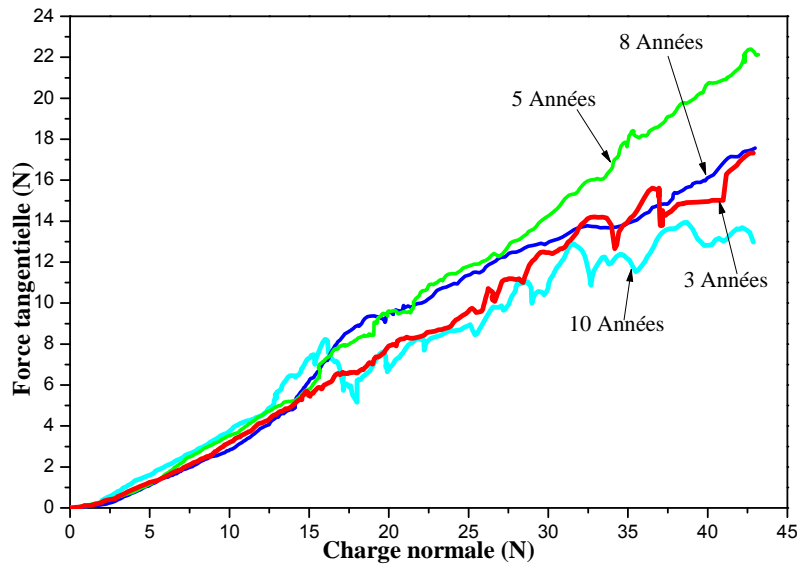


**Figure 2-20** Microdureté Hv en fonction des charges d'essai et des années d'utilisation des peintures étudiées.

### 2.13.3 Force Tangentielle

#### 2.13.3.1 Rayage avec la pointe conique

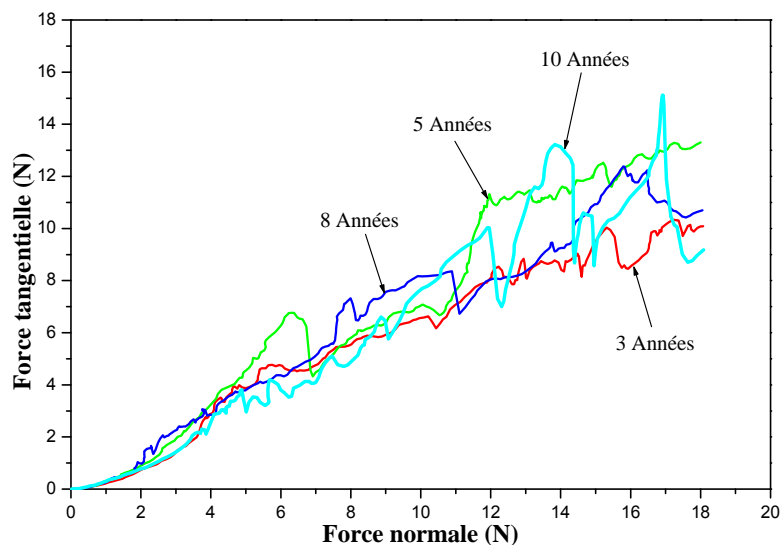
La figure 2-21 montre la variation de la force tangentielle en fonction de la charge normale appliquée et les durées d'utilisation en utilisant un indenteur conique. Pour des charges normales inférieures à 10 N, la force tangentielle augmente presque linéairement pour tous les échantillons. Pour cette charge, le mode d'endommagement de labourage est dominant avec aucune fissure ou décollement de la peinture. Au-delà de 10 N, la force tangentielle, dans le cas de l'échantillon de 5 années d'utilisation, a une tendance croissante linéaire avec l'augmentation de la charge normale appliquée. À une charge normale d'environ 16 N, une diminution significative de la force tangentielle est remarquée pour l'échantillon de 10 années d'utilisation (Figure 2-21). Cela indique qu'un enlèvement complet de la couche de peinture est survenu. Ceci est attribué à la faible microdureté de cet échantillon (Figure 2-20). Le microrayage des échantillons de 5 et 8 années d'utilisation est caractérisé par des forces tangentielles supérieures à celles des autres échantillons. Les fluctuations significatives de la force tangentielle des échantillons de 3 et 10 années montrent la formation des premiers phénomènes de fractures de la couche de peinture.



**Figure 2-21** Force tangentielle,  $F_t$ , en fonction de la force normale,  $F_n$ , utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

### 2.13.3.2 Rayage avec la plaquette en carbure métallique

La figure 2-22 présente l'évolution de la force tangentielle en fonction de la charge normale appliquée pour les quatre peintures étudiées.

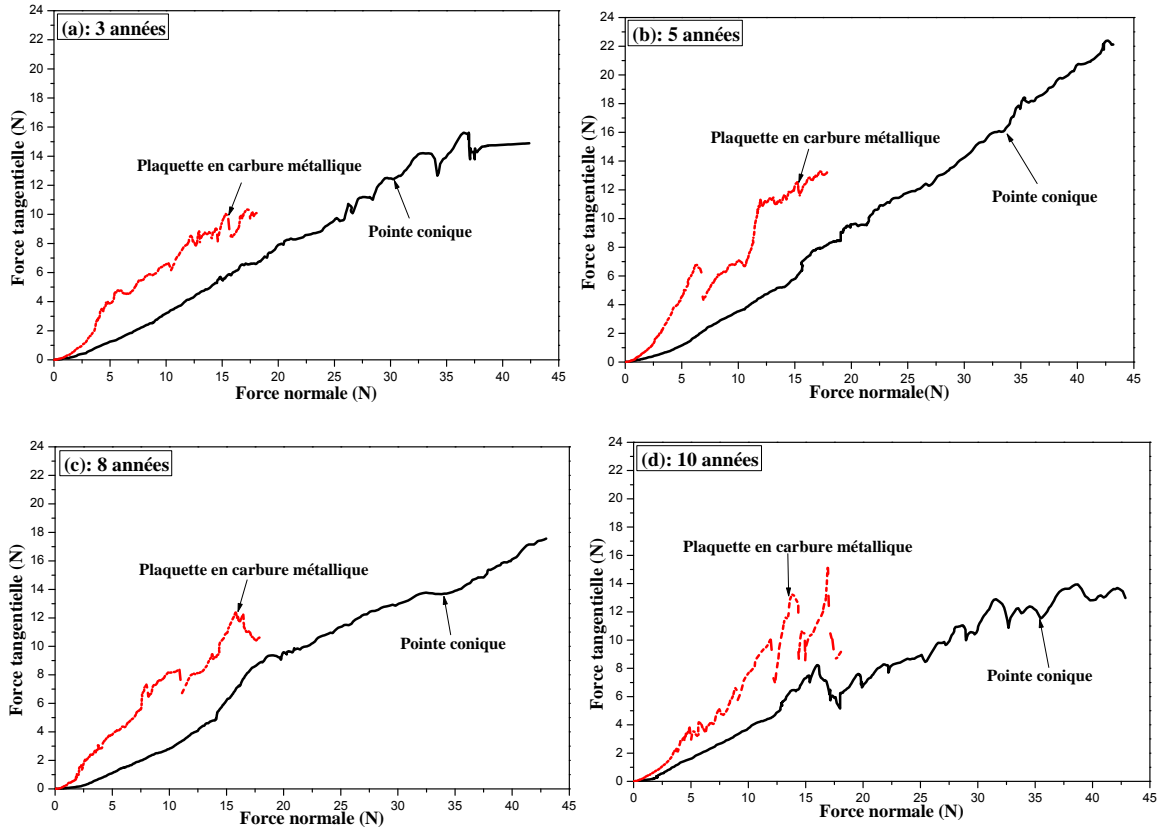


**Figure 2-22** Force tangentielle,  $F_t$ , en fonction de la force normale,  $F_n$ , utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

La force tangentielle dans ce cas évolue sans grande fluctuation pour des charges normales inférieures à 4 N. L'amplitude des fluctuations de la force tangentielle augmente avec la charge normale. L'échantillon de 5 années présente l'amplitude des fluctuations la plus faible par rapport aux autres échantillons et particulièrement par rapport à l'échantillon de 10 années.

### 2.13.3.3 Comparaison de la force tangentielle pour les deux pointes

La figure 2-23 présente la variation de la force tangentielle en fonction de la charge normale appliquée des échantillons testés en utilisant les deux pointes.



**Figure 2-23** Force tangentielle,  $F_t$ , en fonction de la force normale,  $F_n$ , utilisant les deux pointes et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

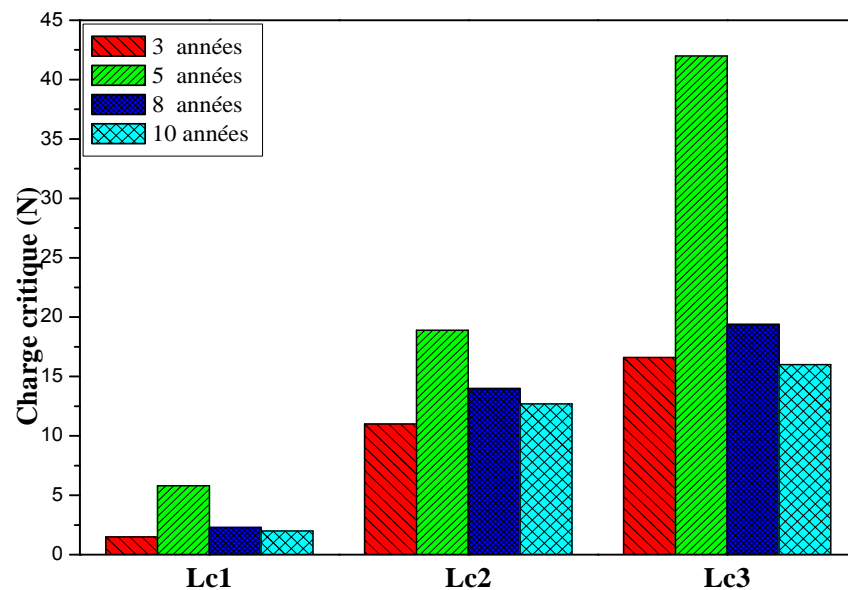
Pour les faibles charges normales, une augmentation de la force tangentielle est obtenue avec la charge normale appliquée pour toutes les durées d'utilisation. Toutefois, le rayage avec la plaquette en carbure métallique est occasionné avec de forces tangentielles nettement supérieures à celles obtenues avec la pointe conique. Ce résultat est attribué à la profondeur de pénétration de la pointe et aux endommagements causés (Figures 2-27 à 2-29 et 2-30 à 2-32). Une même évolution de la force tangentielle est remarquée pour le rayage de l'échantillon de 10 années et ce avec les deux pointes (Figure 2-23-d).

### 2.13.4 Charges Critiques

#### 2.13.4.1 Rayage avec la pointe conique

La figure 2-24 présente les valeurs des trois charges critiques : apparition de la première fissure ( $Lc_1$ ), fissuration ( $Lc_2$ ) et décollement de la couche de la peinture ( $Lc_3$ ) en fonction des années d'utilisation pour une pointe conique. L'échantillon de 5 années d'utilisation

montre une augmentation significative des charges critiques 1 et 2 par rapport aux autres durées, et plus particulièrement celle du décollement ( $Lc_3$ ). Ce résultat est dû à l'augmentation de la résistance des revêtements polymère en raison de l'amélioration de la densité de réticulation après exposition aux UVs [11, 85]. Malgré la courte durée d'utilisation de 3 années, les charges critiques sont inférieures à celles des autres échantillons (Figure 2-24). Les échantillons de 8 et 10 années d'utilisation ont presque les mêmes valeurs de charges critiques. Ceci attribué à la faible dégradation de la couche de peinture qui se produit après 8 années d'utilisation et que l'effet des UVs atteint sa limite [16]. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que les charges critiques augmentent au cours des premières années d'utilisation. Au-delà d'une période de 5 années d'utilisation, la résistance aux microrayures des peintures étudiées diminue mais reste supérieure à celle des peintures plus récentes (Figure 2-24). Pour l'échantillon de 10 années d'utilisation, la charge critique de décollement ( $Lc_3$ ) est environ 16 N inférieure à celle des autres échantillons. Ceci est dû à la fragilité de la couche de peinture de base après une durée d'exposition importante dans l'environnement caractérisé par une intensité des UVs élevée et un gradient de température important [14].

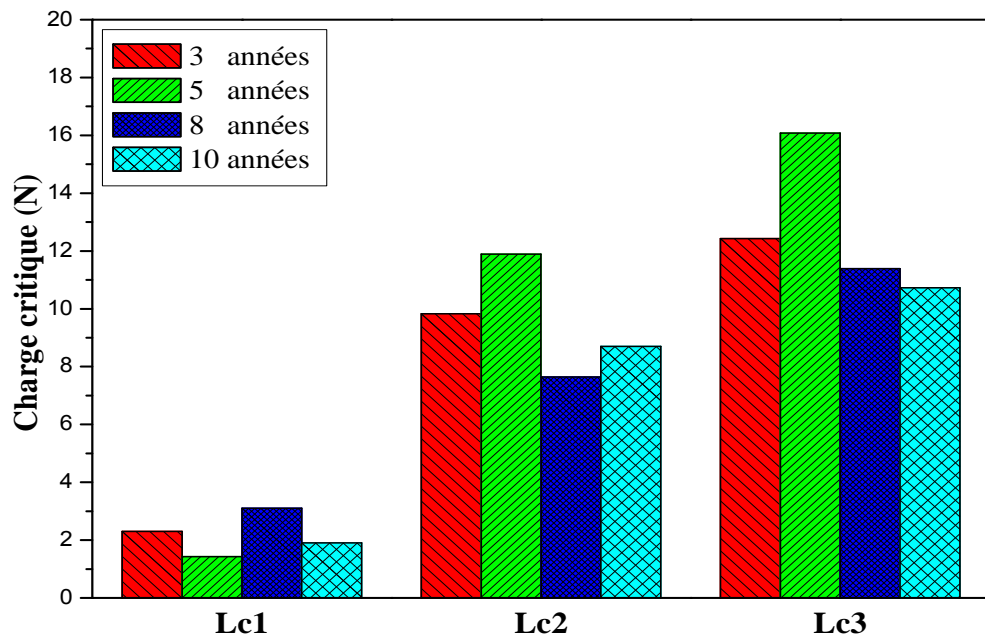


**Figure 2-24** Charges critiques :  $Lc_1$ ,  $Lc_2$  et  $Lc_3$  en fonction des années d'utilisation, utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

#### 2.13.4.2 Rayage avec la plaquette en carbure métallique

La figure 2-25 présente les trois charges critiques : apparition de la première fissure ( $Lc_1$ ), fissuration ( $Lc_2$ ) et décollement de la peinture ( $Lc_3$ ) en fonction des années d'utilisation en utilisant la plaquette en carbure métallique. Malgré sa bonne microdureté en comparant avec les autres échantillons, l'échantillon de 5 années d'utilisation présente

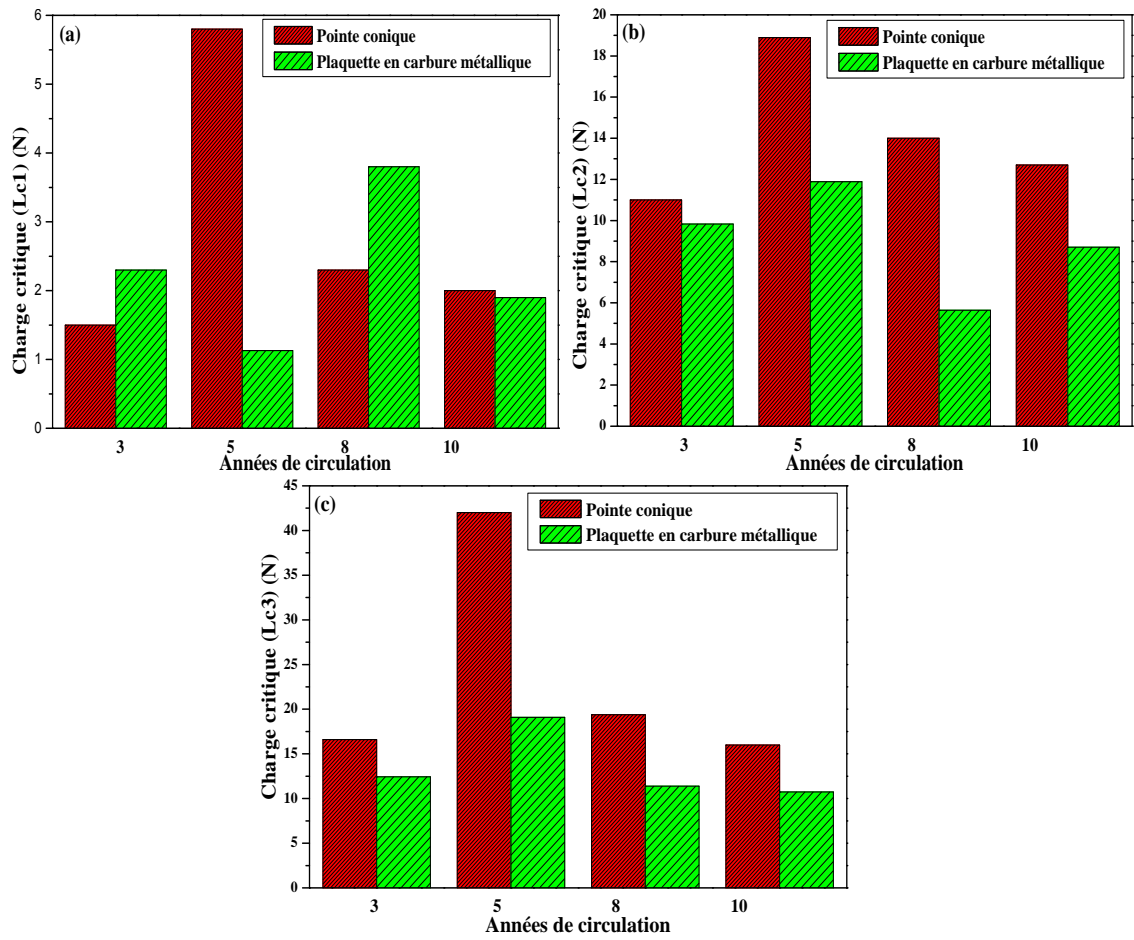
une faible résistance à la création de la première fissure ( $Lc_1$ ). En allant vers des charges normales plus importantes, cet échantillon montre la meilleure résistance à la fissuration et au décollement. Étonnamment, la charge de fissuration,  $Lc_2$ , de l'échantillon de 10 années est supérieure à celle de 8 années. Les tendances dans la 3<sup>ème</sup> charge critique de décollement,  $Lc_3$ , sont très compatibles avec les microduretés trouvées et avec les charges critiques de décollement pour une pointe conique.



**Figure 2-25** Charges critiques  $Lc_1$ ,  $Lc_2$  et  $Lc_3$  en fonction des années d'utilisation, utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

#### 2.13.4.3 Comparaison des charges critiques pour les deux pointes

La figure 2-26 illustre la variation des charges critiques :  $Lc_1$ ,  $Lc_2$  et  $Lc_3$  en fonction des années d'utilisation des échantillons testés. Le matériau et la géométrie des deux pointes sont différents. Le rayon et l'angle d'attaque de la plaquette en carbure métallique (rayon 400  $\mu\text{m}$  et un angle d'attaque de 60°) sont supérieures à ceux de la pointe conique (rayon 200  $\mu\text{m}$  et angle d'attaque de 30°). La géométrie de contact dans les deux cas de pointe diffère, la plaquette en carbure métallique est de contact coin à base triangulaire avec face devant. Le choix de cette géométrie de contact est dans le but d'étudier les cas extrêmes de rayage de la peinture.



**Figure 2-26** Comparaison des charges critiques  $Lc_1$ ,  $Lc_2$  et  $Lc_3$ , pour les deux points (conique et plaquette en carbure métallique) et une vitesse de rayage de 8 mm/mn.

En général, on remarque sur la figure 2-27 que le rayage avec la pointe conique est occasionné par des valeurs de charges critiques supérieures à celles trouvées pour le rayage avec la plaquette en carbure métallique. En fonction de la géométrie des deux pointes, ce résultat semble normal. Un résultat différent est remarqué pour les valeurs de  $Lc_1$  après rayage des peintures de 3 années et 8 années de mise en circulation. Ce dernier résultat est attribué à l'existence des pores et des abrasions dans le verni (Figure 2-19). Ces défauts de surface peuvent influencer le contact pointe-surface et donc inverser les valeurs de la première charge critique des peintures et en particulier pour les faibles charges normales.

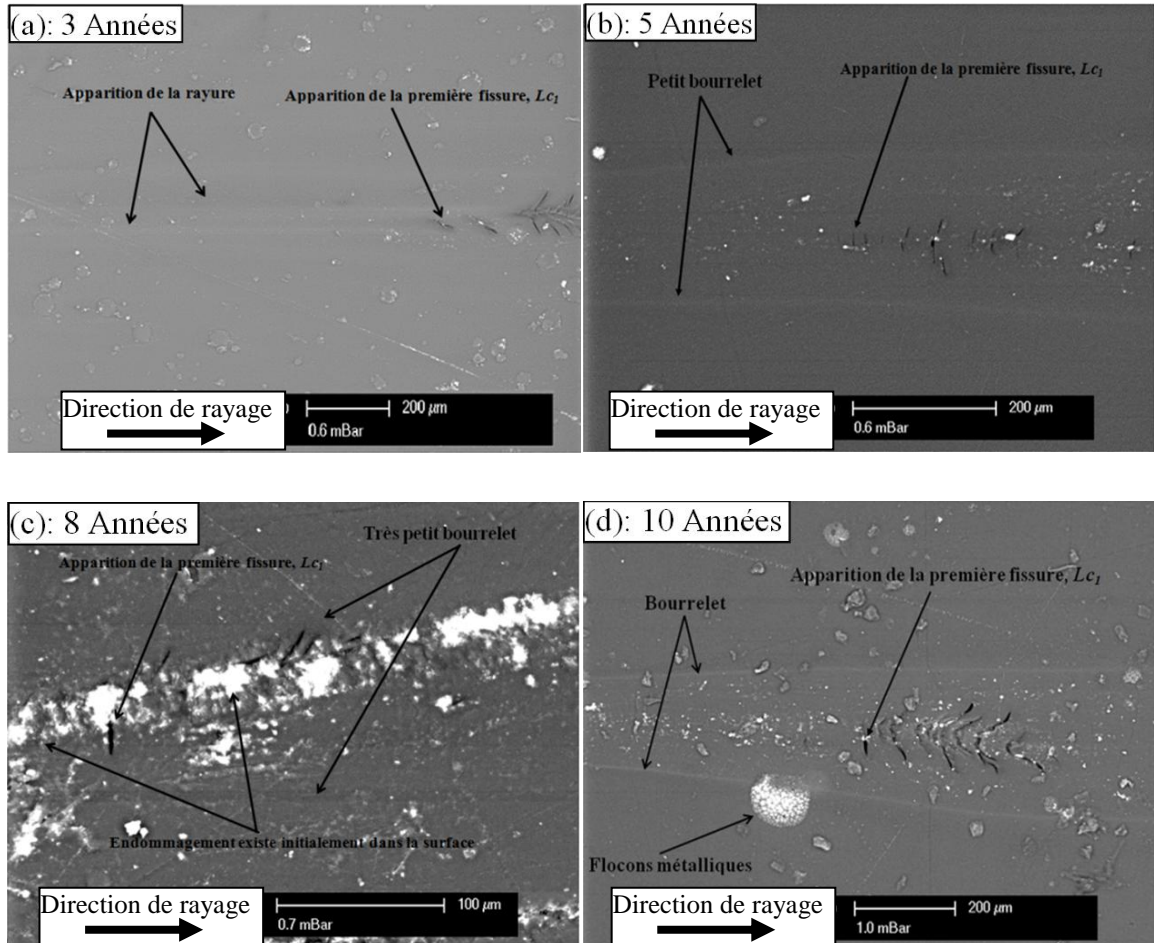
### 2.13.5 Observations par MEB

#### 2.13.5.1 Rayage avec la pointe conique

Les figures 2-27 à 2-29 présentent les endommagements de la peinture observés après rayage avec la pointe conique. Plusieurs zones caractéristiques dans les rayures sont observées et qui sont : apparition de la première fissuration (Figure 2-27) qui correspond à



$L_{c1}$ . Lorsque la charge normale est augmentée, on remarque que la fissuration devient plus importante en nombre en longueur (Figure 2-28) qui correspond aux charges critique de fissuration  $L_{c2}$ . Au grandes charges normales appliquées ( $L_{c3}$ ), l'endommagement devient plus catastrophique et il est caractérisé par un décollement de la peinture et un débris d'usure est formé (Figure 2-29).



**Figure 2-27** Images MEB du premier stade d'apparition des fissures ( $L_{c1}$ ), utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

A la lumière des analyses des rayures par MEB, trois zones d'endommagement dans la rayure peuvent être donc identifiées :

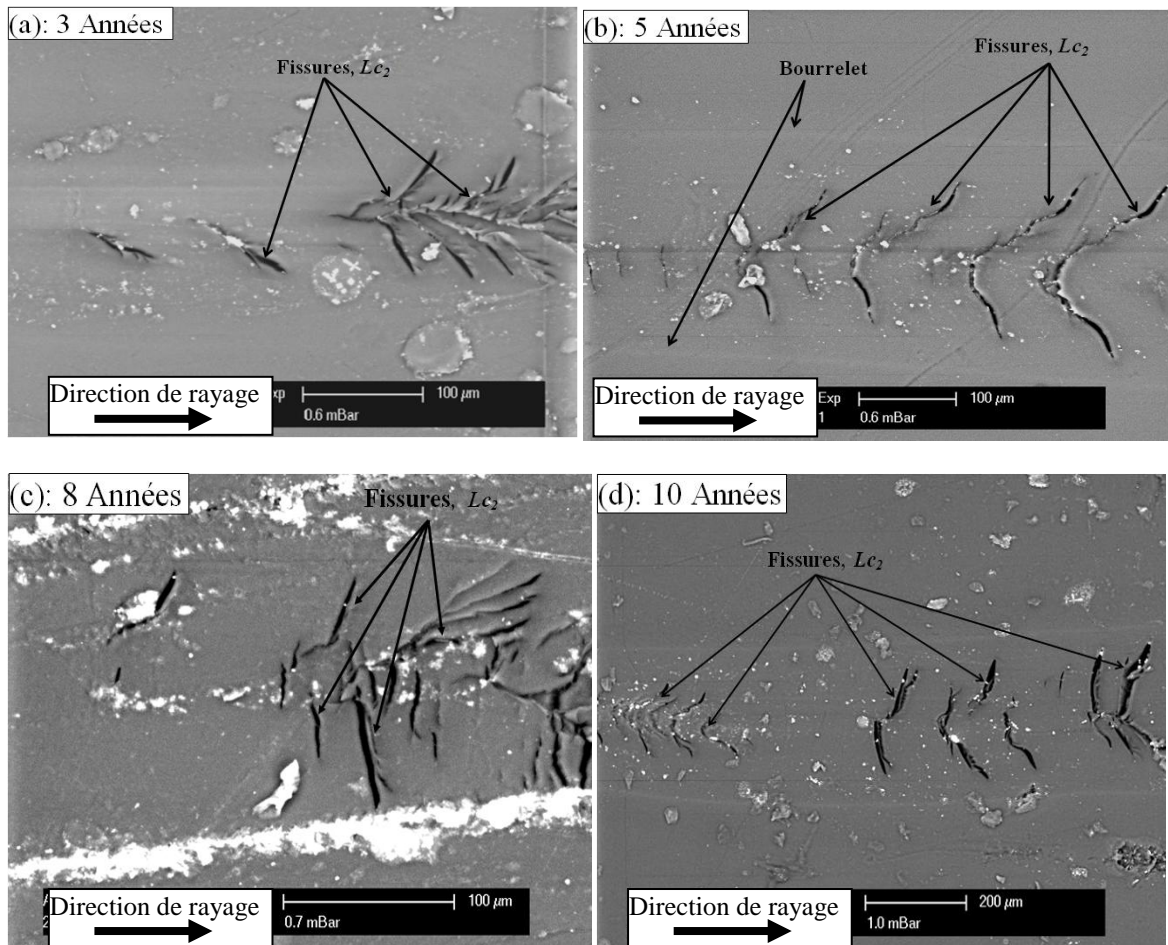
**Zone 1** : après le premier contact, la charge normale est faible, la couche de peinture se déformer plastiquement et des fissures sont localisées au fond de la rayure. Elles sont de petites fréquences et de petites longueurs (Figure 2-27). Dans cette zone, le matériau commence à s'empiler devant l'indenteur [90], c'est la première charge critique  $L_{c1}$ .

**Zone 2 :** lorsque la charge normale appliquée augmente, l'indenteur continue à pénétrer dans la couche de peinture, et le volume de matériau déplacé et empilé devant l'indenteur augmente. À ce stade, des déformations radiales considérables dans le matériau empilé sont observées. Ces déformations sont suffisantes pour créer des fissures qui se propagent vers les côtés de la rayure (Figure 2-28), c'est la deuxième charge critique  $Lc_2$  [90].

**Zone 3 :** Au grandes charge normales appliquées, la profondeur de pénétration de l'indenteur est plus grande et donc la couche de peinture est complètement entamée jusqu'à au rayage de la tôle en acier (Figure 2-29). La charge normale correspondante au décollement de la peinture est appelée la troisième charge critique ( $Lc_3$ ).

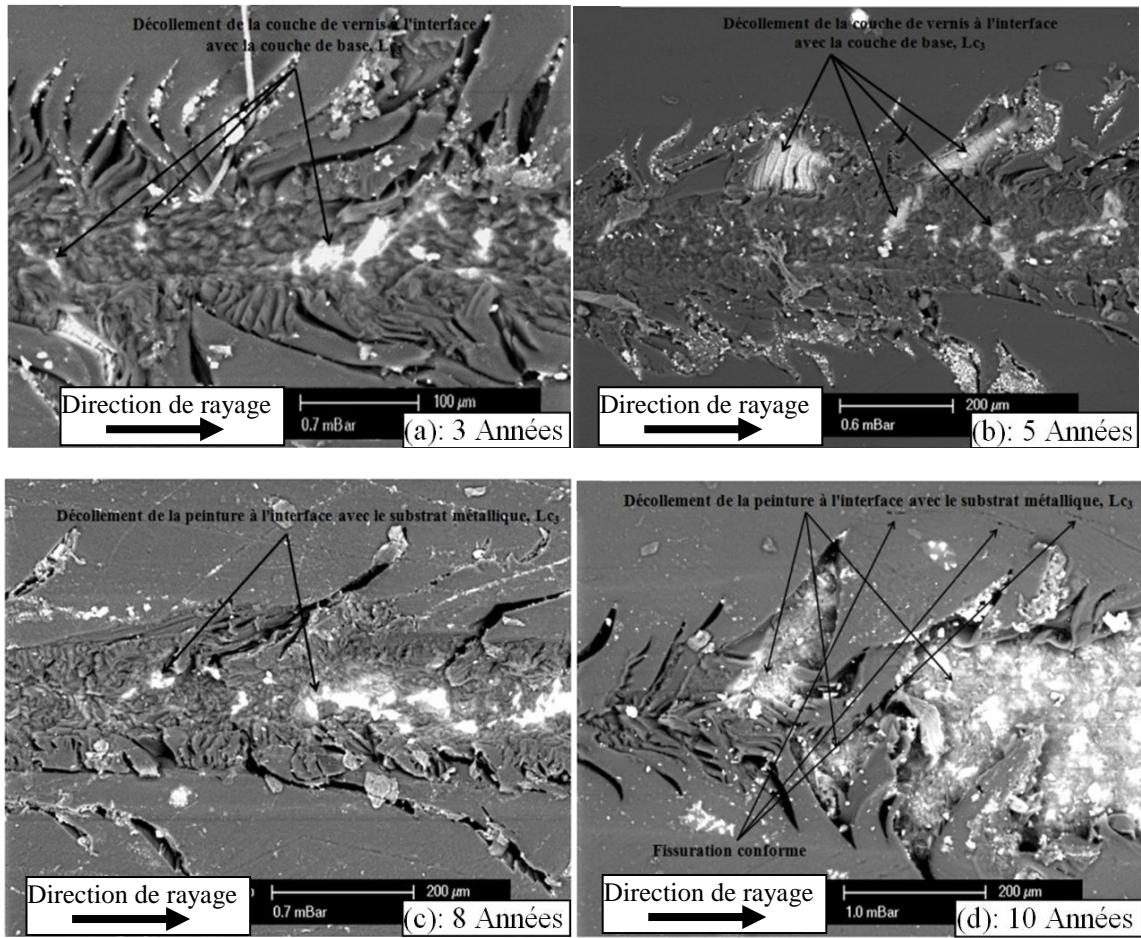
Dans la figure 2-27, on remarque qu'au début de la rayure, le mode de déformation plastique est dominant. Pendant l'essai de rayage, la couche de peinture est soumise à une contrainte de compression devant l'indenteur, alors qu'une contrainte de traction se produit à l'arrière de l'indenteur [30]. Lorsque les contraintes de compression et de traction surmontent la résistance ultime de la peinture, des fissures peuvent être simultanément formées (Figure 2-27). On remarque aussi que la couche transparente s'endommage par fissuration de faible nombre.

La figure 2-28 présente les endommagements observés lors de rayage avec la deuxième charge critique ( $Lc_2$ ). Les micrographies MEB obtenues ont révélé que l'endommagement dans l'échantillon de 3 années d'utilisation est caractérisé par des fissures interconnectées entre elles (Figure 2-28-a). L'échantillon de 5 années d'utilisation présente moins de fissures (Figure 2-28-b). Cependant, la fissuration devient plus grande pour les échantillons de 8 et 10 années d'utilisation (Figures. 2-28-c et d). Ces résultats sont attribués à la faible microdureté de ces deux derniers échantillons (Figure 2-20). Pour cette gamme de forces de microrayage, aucun décollement important n'est remarqué, mais seulement des fissures qui se situent principalement au fond de la rayure et qui sont créées à cause de l'augmentation de la charge normale appliquée. La fissuration survient lorsque les contraintes de compression et de traction appliquées par le pénétrateur dépassent la résistance ultime de la couche de peinture [90]. Ceci conduit à une grande déformation plastique et des fissures circulaires et transversales se forment dans la direction de rayage. Ce type d'endommagement correspond à la charge critique de fissuration ( $Lc_2$ ).



**Figure 2-28** Images MEB du deuxième stade d'endommagement ( $Lc_2$ ), utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

Les micrographies MEB de la figure 2-29 montrent que la couche de peinture au stade des charges normales élevées s'endommage avec ou sans décollement complet. En effet, pour ces forces normales, le décollement de la peinture correspondant à la 3<sup>ème</sup> charge critique ( $Lc_3$ ) observé pour les échantillons de 3 et 8 années d'utilisation (Figure 2-29-a et c). Un décollement plus important de la couche de peinture se produit pour l'échantillon de 10 années d'utilisation et le substrat se trouve rayé (Figure 2-29-d). D'autre part, dans le cas de l'échantillon de 5 années d'utilisation, il a été observé que la couche de peinture est endommagée sans décollement complet et que les fissures dans les côtés de la rayure sont de faible taille et plus courtes (Figure 2-29-b).



**Figure 2-29** Images MEB du troisième stade d'endommagement ( $Lc_3$ ), utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

### 2.13.5.2 Rayage avec la plaquette en carbure métallique

La figure 2-30 montre les micrographies MEB de l'endommagement observé dans la rayure au niveau de la 1<sup>ère</sup> charge critique ( $Lc_1$ ) après rayage par la plaquette en carbure métallique. À ces faibles charges, l'analyse des images MEB montre que le rayage s'effectue avec une faible profondeur pour les échantillons de 3 et 5 années d'utilisation (Figure 2-30-a et b). En augmentant la charge appliquée, la pénétration de l'indenteur dans la peinture augmente et des fissures se forment dans la rayure dans le sens de rayage. On remarque clairement la formation des bourrelets après rayage de l'échantillon de 10 années d'utilisation (Figure 2-30-d). Un endommagement important montrant un déplacement du matériau de la peinture est aussi observé pour l'échantillon de 8 années d'utilisation (Figure 2-30-c).

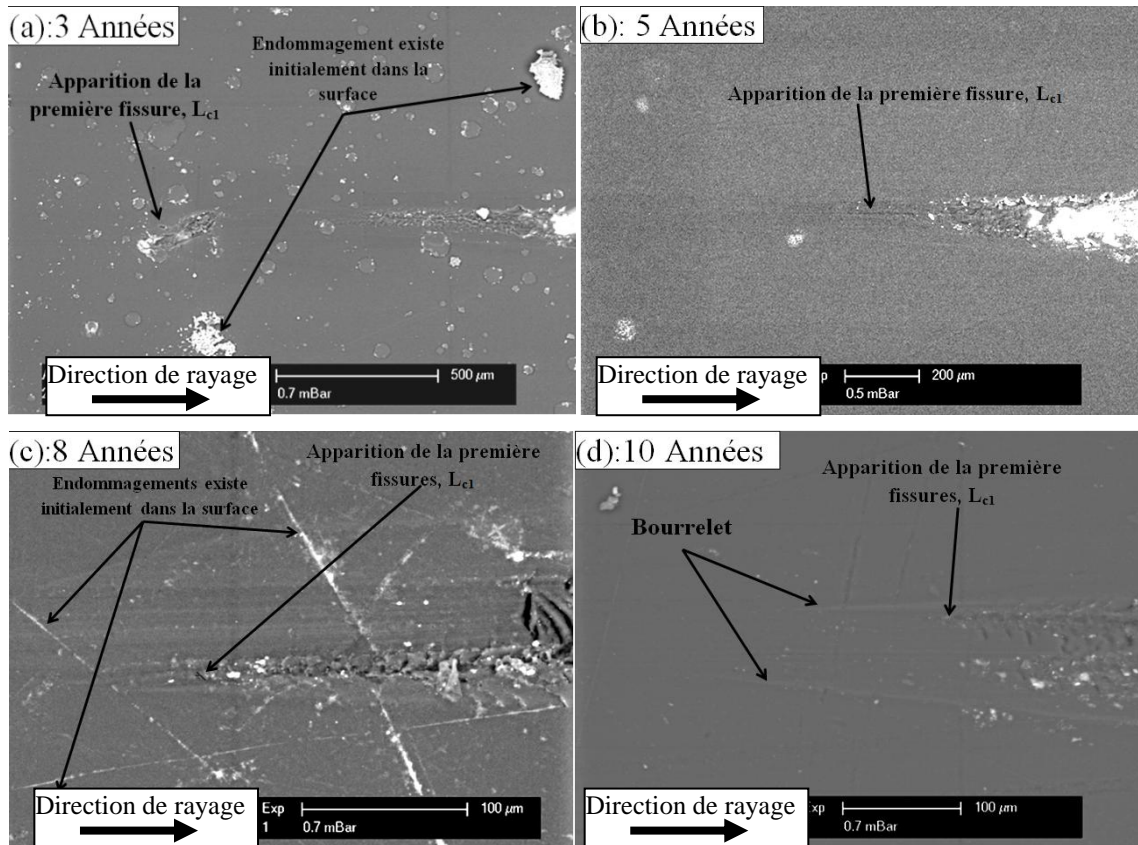


Figure 2-30 Images MEB du premier stade d'apparition des fissures ( $L_{c1}$ ), utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

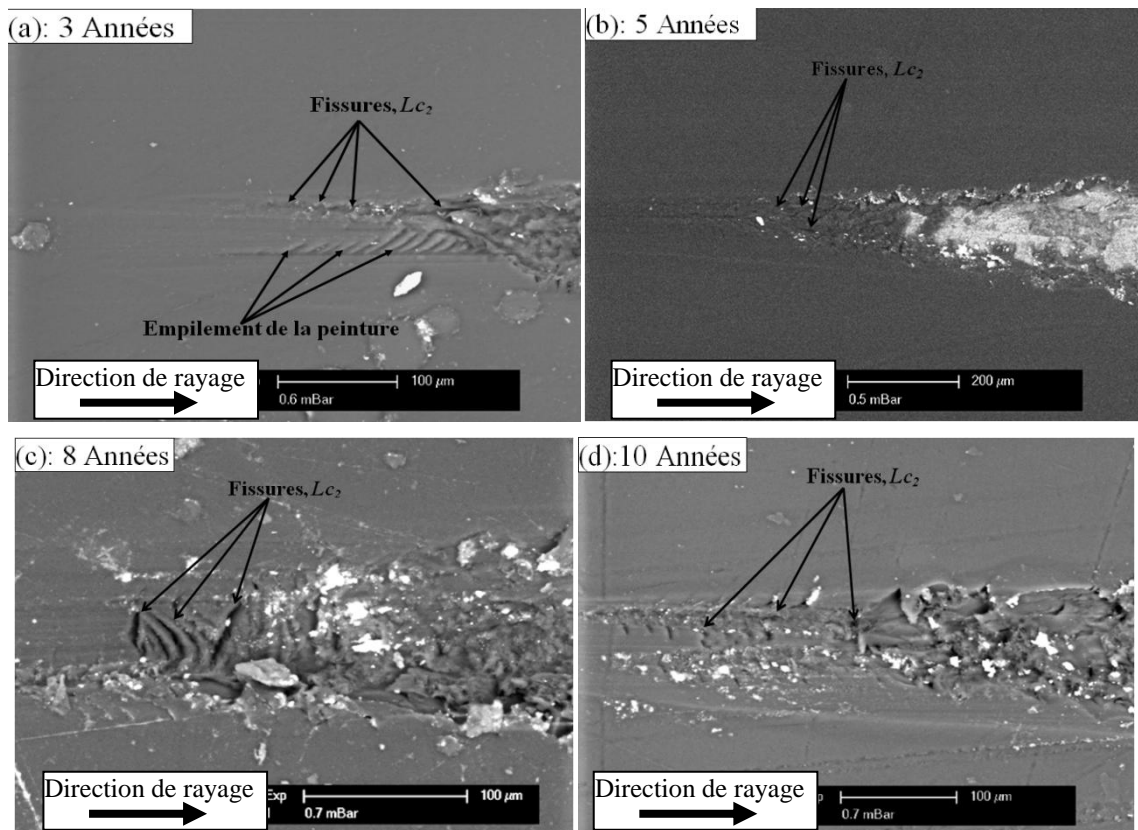
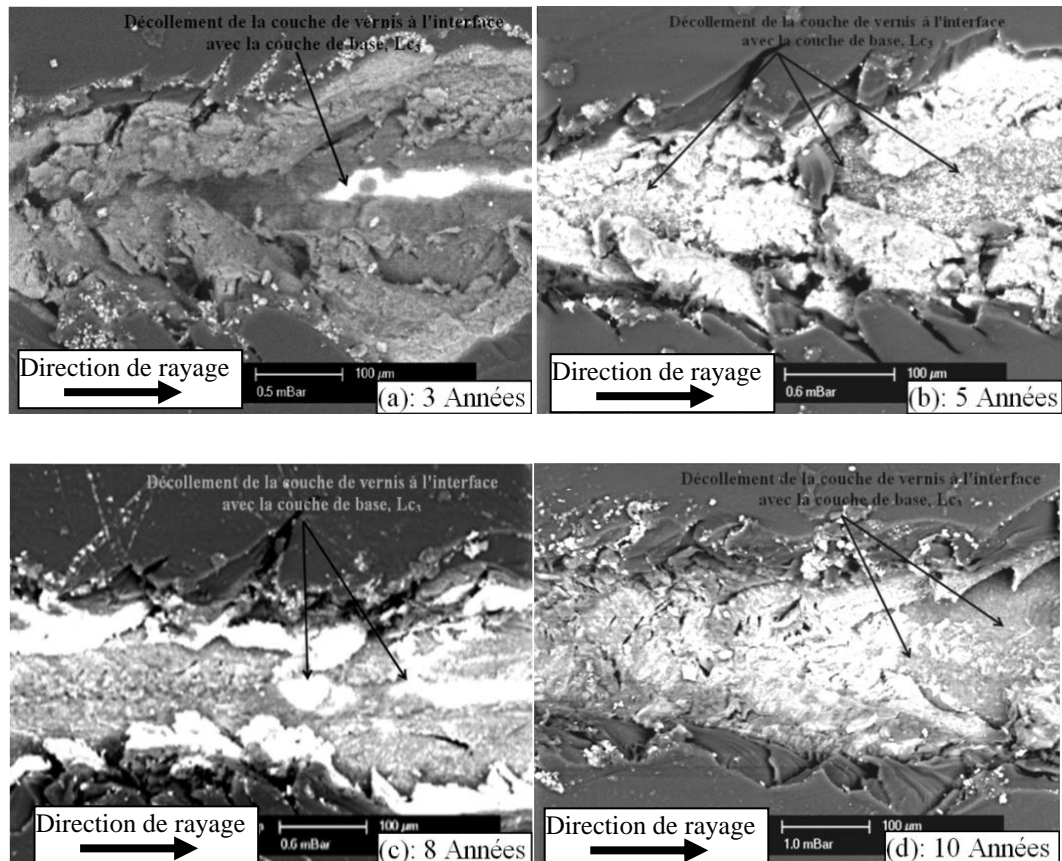


Figure 2-31 Images MEB du deuxième stade d'endommagement ( $L_{c2}$ ), utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

La figure 2-31 montre les endommagements observés par MEB dans la rayure pour la 2<sup>ème</sup> charge critique ( $Lc_2$ ) en utilisant la plaquette en carbure métallique. À ce stade, il est remarqué qu'un déplacement important du matériau de la peinture et ce déplacement s'accroît avec la durée d'utilisation. Ces déplacements sont occasionnés par des fissures radiales devant l'indenteur (Figure 2-31). On peut voir que la fissuration devient beaucoup plus importante, en particulier pour les échantillons de 8 et 10 années d'utilisation (Figure 2-31-c et d).



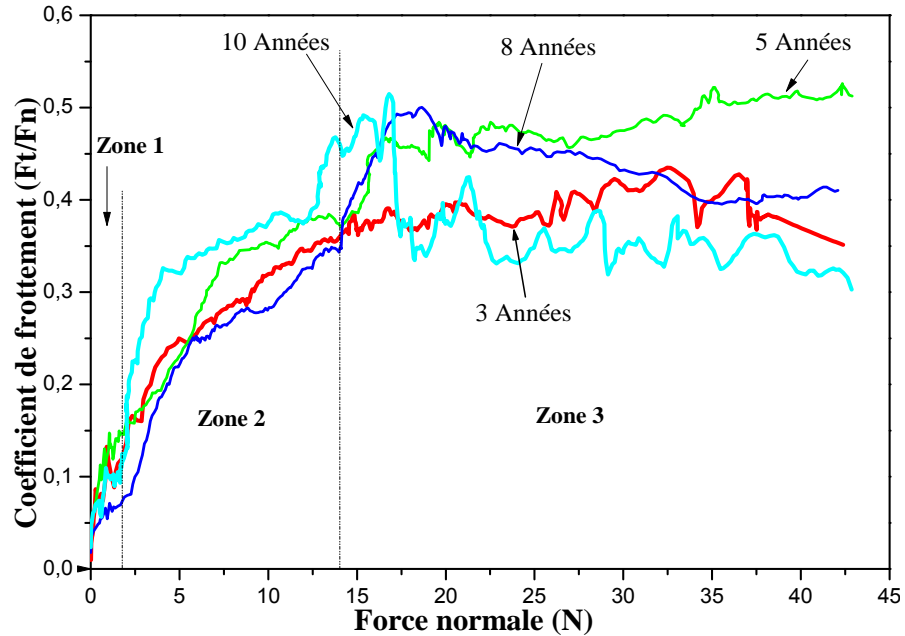
**Figure 2-32** Images MEB du troisième stade d'endommagement ( $Lc_3$ ), en utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage 8 mm/mn.

La figure 2-32 montre la micrographie MEB de l'endommagement observé dans la rayure au niveau de la plus grande charge critique ( $Lc_3$ ) en utilisant la plaquette en carbure métallique. Des endommagements importants sont obtenus et qui sont caractérisés par des déplacements et décollement de la peinture. Le rayage avec cette charge, on a pu remarquer que le décollement se produit à l'interface entre la couche de peinture et le substrat. Dans cette phase, le substrat métallique est rayé et devient exposé au milieu extérieur (Figure 2-32).

### 2.13.6 Coefficient de frottement

#### 2.13.6.1 Rayage avec la pointe conique

La figure 2-33 présente la variation du coefficient de frottement en fonction de la force normale appliquée des échantillons testés.



**Figure 2-33** Coefficient de frottement global ( $F_t/F_n$ ) en fonction de la force normale,  $F_n$ , utilisant la pointe conique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

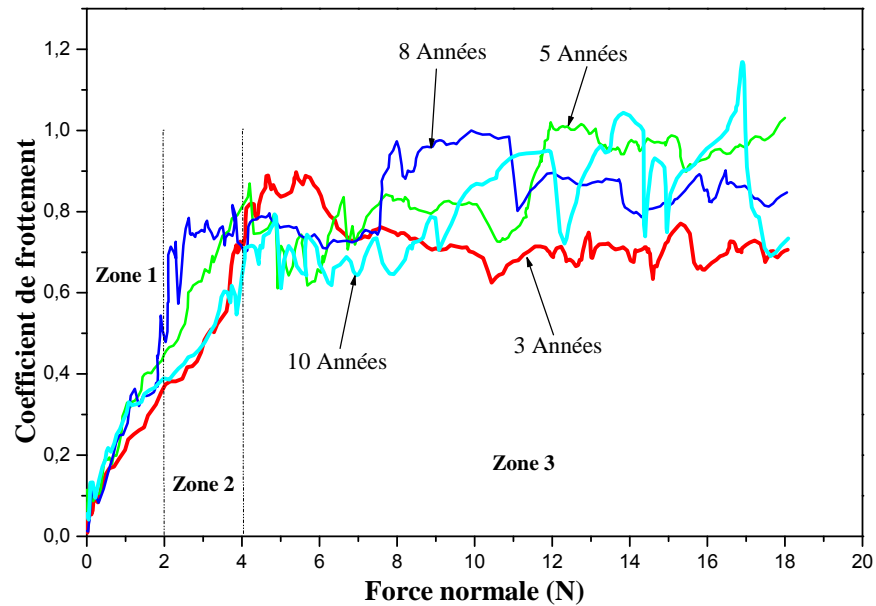
Le coefficient de frottement est calculé comme le rapport entre la force tangentielle ( $F_t$ ) et la charge normale appliquée ( $F_n$ ). Pour les charges normales inférieures à 2 N, zone 1, le coefficient de frottement augmente avec la charge normale, accompagnée avec quelques irrégularités dues notamment aux défauts dans la surface tels que les abrasions (Figure 2-19). Pour les charges normales comprises entre 2 N et 14 N, zone 2, le coefficient de frottement augmente avec une moins de fluctuation. Au-delà de 14 N, zone 3, les fluctuations dans les valeurs du coefficient de frottement deviennent plus prononcées pour tous les échantillons testés. Ceci est dû à la formation des premières fissures et à cause de l'accumulation répéter du matériau au-dessous de l'indenteur.

Selon le modèle de Bowden et Tabor [91], le coefficient de frottement global est le résultant de deux composantes : adhésif ( $\mu_a$ ) et de labourage ( $\mu_p$ ). Les irrégularités du coefficient de frottement sont principalement dues à la composante adhésive. Pour les charges normales appliquées moins de 16 N, le rayage de la peinture d'une durée de 10 années d'utilisation donne le coefficient de frottement le plus élevé par rapport aux autres

durées d'utilisation (Figure 2-33). En fait, à cause de décollement complet de la couche de peinture de ce dernier échantillon, une diminution brusque est remarquée dans les valeurs du coefficient de frottement à environ une charge de 17 N.

### 2.13.6.2 Rayage avec la plaquette en carbure métallique

La figure 2-34 présente la variation du coefficient de frottement global en fonction de la charge normale appliquée en utilisant la plaquette en carbure métallique.



**Figure 2-34** Coefficient de frottement global ( $F_t/F_n$ ) en fonction de la force normale,  $F_n$ , utilisant la plaquette en carbure métallique et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

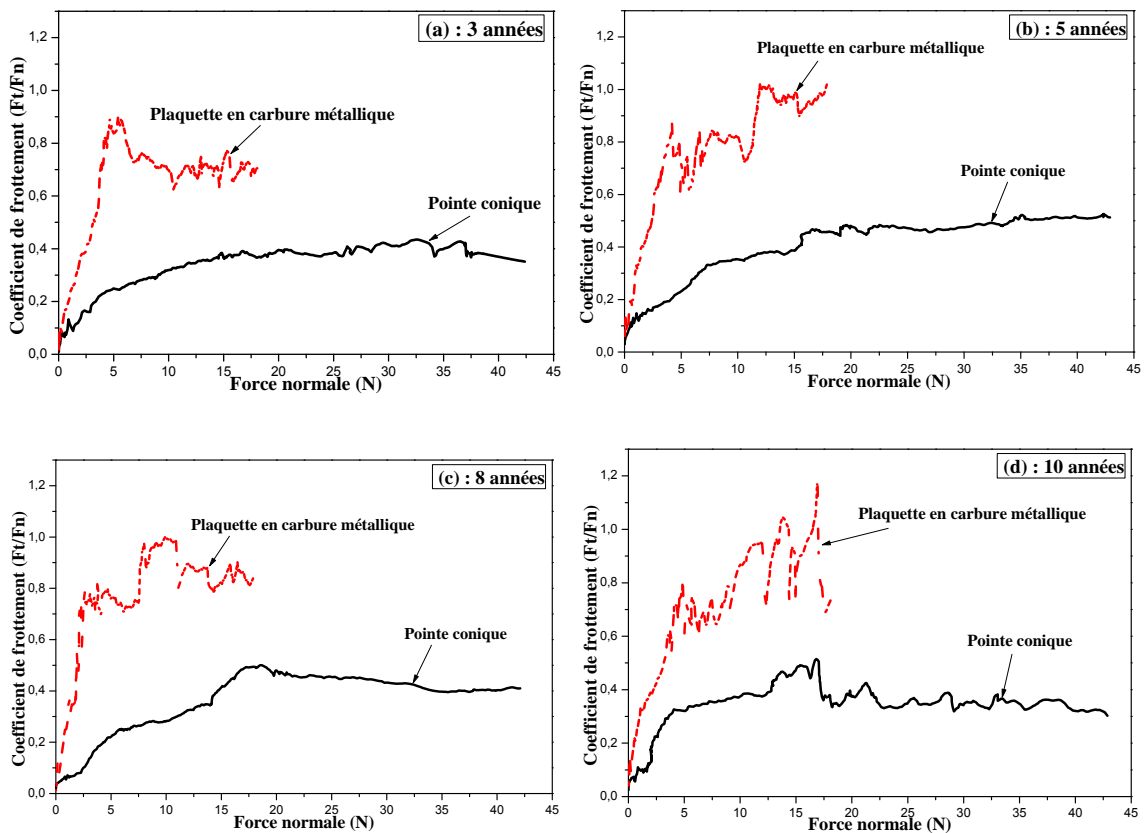
Trois zones de variation du coefficient de frottement peuvent être distinguées en fonction des charges normales appliquées (Figure 2-34). La première zone correspond au moins de 2 N de charge appliquée. Dans cette zone la pente de variation du coefficient de frottement est importante pour tous les échantillons testés. Cette zone représente donc le stade de labourage de la peinture. La deuxième zone est pour les charges normales appliquées comprises entre 2 et 4 N. Dans cette zone, les pentes de la variation du coefficient de frottement ne sont pas les mêmes. La plus grande pente est obtenue pour l'échantillon de 8 années et les plus faibles pentes sont obtenues pour les échantillons de 3 et 10 années d'utilisation. Les analyses conduites par MEB (Figures 2-30 à 2-32) montrent les endommagements par rayage sont presque les mêmes pour les faibles charges appliquées (Figure 2-30) et qui deviennent plus importants (Figure 2-31) en particulier l'échantillon de 8 années (Figure 2-31-c). Au-delà de 4 N qui correspond à la troisième zone, le coefficient



de frottement de tous les échantillons testés évolue de la même manière avec des fluctuations assez importantes et principalement pour l'échantillon de 10 années.

### 2.13.6.3 Comparaison des coefficients de frottement pour les deux points

La figure 2-35 compare la variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale appliquée des échantillons testés en utilisant la pointe conique et la plaquette en carbure métallique. A cause des endommagements important, la plage des charges appliquées lors du rayage avec la plaquette en carbure métallique est moins grande par rapport à celle de la pointe conique en diamant.



**Figure 2-35** Coefficient de frottement global ( $F_t/F_n$ ) en fonction de la force normale,  $F_n$ , utilisant les deux pointes et la vitesse de rayage de 8 mm/mn.

Comparativement pour la pointe conique, les valeurs du coefficient de frottement avec la plaquette en carbure métallique ont très importantes pour tous les échantillons testés. Sachant que le matériau de la pointe et la géométrie de contact différent. Ceci est la source importante de cette différence dans les valeurs du coefficient de frottement. Le rayage avec des charges normales appliquées inférieure à 2 N, la pente de variation du coefficient de frottement dans le cas de la pointe conique est plus faible par rapport à la plaquette en carbure métallique. Cette gamme de charge normale englobe les deux modes de

glissement, adhésif et de labourage, pour les deux pointes. Dans ce mode de déformation, l'angle d'attaque a une influence importante sur le coefficient de frottement [92, 93]. Au-delà des faibles charges appliquées de 2 N, le mode de labourage est accompagné par plusieurs formes d'endommagement en fonction de la durée de mise en circulation et du type de pointe utilisée. Généralement, les endommagements observés après rayage par la plaquette en carbure métallique (Figure 2-30 à 2-32) sont plus importants et se développent rapidement par rapport au rayage par la pointe conique (Figure 2-27 à 2-29). Le coefficient de frottement devient plus ou moins constant pour la même gamme de charges (Figure 2-35-a à c) sauf pour l'échantillon de 10 années (Figure 2-35-d).

### **2.14 Conclusion**

On a pu mettre en évidence les modes de déformation et les formes d'endommagement après rayage de plusieurs échantillons de peinture de véhicule.

Ce chapitre décrit aussi une classification des machines de rayage développée aux différents laboratoires de recherche ainsi que les installations commerciales.

Dans le cadre de cette thèse, une installation de microrayage conçue et réalisée au laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM) a été utilisée dans l'étude de rayage des peintures automobiles.

Plusieurs paramètres : forces, observation aux microscopes optiques et MEB et évolution du coefficient de frottement sont combinés pour comprendre et identifier le comportement au rayage des peintures étudiées.

Dans ce chapitre, l'influence du milieu saharien aride en Algérie, caractérisé par des radiations UVs intenses, une température élevée et un important gradient de températures, sur la résistance au rayage des peintures automobiles a été étudiée.

Les analyses par microscopie optique montrent la génération des abrasions dans la surface des peintures au cours des premières années d'utilisation. Ces abrasions diminuent en nombre pour une durée de 5 années d'utilisation. Elles deviennent de plus en plus visibles pour des durées plus longues.

Les microduretés des peintures changent considérablement en fonction du temps d'utilisation. On observe que la microdureté de la couche de peintures augmente dans les premières années d'utilisation et atteint le maximum après une durée de 5 années

d'utilisation, au-delà de cette durée la couche de peinture commence à perdre sa microdureté.

La charge critique de décollement de l'échantillon de 5 années d'utilisation est supérieure à celle des autres échantillons pour les deux pointes utilisées.

Différents mécanismes de déformation ont été identifiés après rayage des peintures étudiées. Le mode de labourage au début de la rayure suivie par des fissures séparées donnant la première charge  $Lc_1$ . En augmentant la charge normale appliquée, ces fissures deviennent interconnectées qui correspond à la 2<sup>ème</sup> charge critique  $Lc_2$ . La croissance de la charge appliquée de plus en plus provoque l'enlèvement de la couche de matière au point de  $Lc_3$ .

Malgré la différence dans le matériau et la géométrie des pointes utilisées, les résultats trouvés de microrayage des peintures étudiées montrent que le coefficient de frottement se stabilise avec presque la même charge normale pour ces deux pointes.

---

# **Chapitre III**

## **Résistance à l'érosion des peintures des véhicules**

---

### **3.1 Introduction**

L'érosion est un phénomène physique, où l'impact des particules solides crée une perte ou un enlèvement de matière. Le sablage est un type de processus d'érosion qui est effectué sur deux types de matériaux différents, à savoir fragile et ductile. Les matériaux fragiles subissent une déformation élastique avant de se développer, tandis que les matériaux ductiles subissent de très grandes déformations plastiques avant de se développer.

La durabilité et la robustesse mécanique sont des conditions préalables pour que les revêtements soient appliqués sur des substrats destinés à la protection structurelle. La transparence est une autre exigence des revêtements utilisés dans différents domaines industriels.

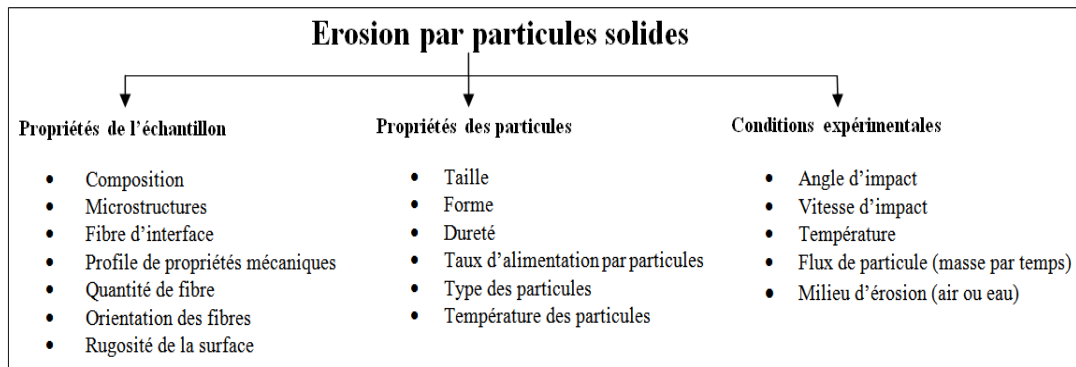
En raison de leur rigidité et de leur résistance spécifique acceptables, les polymères et leurs composites sont maintenant largement utilisés dans une multitude d'applications [94]. Les revêtements polymères servent souvent à protéger les structures du milieu extérieur.

Les environnements érosifs peuvent être extrêmement préjudiciables à la durée de vie et aux performances des composants en polymères, y compris les peintures automobiles. En termes de durabilité, le milieu saharien aride caractérisé par des intensités UVs élevées, haute température et un gradient de température important entre le jour et la nuit, a une influence considérable sur l'adhérence des peintures au substrat et par conséquent sur leur résistance à l'érosion.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement à l'érosion des peintures automobiles utilisées réellement dans le Sahara d'Algérie pendant 3, 5, 8 et 10 années. Les observations microscopiques des surfaces avant expérimentation et les résultats de microdureté sont utilisés dans les discussions des résultats d'érosion obtenus. Les essais expérimentaux sont réalisés sur une machine fabriquée dans le cadre de cette thèse au Laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM). La microscopie optique a été utilisée pour caractériser l'endommagement dans les cicatrices obtenues. Les discussions sont articulées sur la durée de d'utilisation des échantillons, la microdureté et l'angle d'impact ainsi de l'endommagement observé par microscopie optique dans les cicatrices.

**3.2 Définition du phénomène d'érosion**

Dans certains cas, l'érosion par particules solides est un phénomène utile, comme dans le sablage au jet et le coupage au jet d'eau abrasif à grande vitesse, mais c'est un problème sérieux dans de nombreux systèmes techniques, notamment les peintures esthétiques citant par exemple les peintures automobiles. Il peut entraîner une augmentation de la rugosité et du voile de surface, une perte de brillance et de transparence et même une défaillance prématurée des structures. Pour les objets mobiles à haute vitesse en plein air (véhicules, avions, pales d'éoliennes, bateaux de surf, etc.), leurs surfaces souffrent généralement de l'érosion par particules solides en raison des particules en suspension dans l'air. Par conséquent, l'érosion par particules solides est une préoccupation majeure pour ces applications. Les matériaux à haute résistance à l'usure par érosion sont nécessaires. Les différents facteurs influençant la résistance à l'érosion des surfaces sont montrés comme suit :

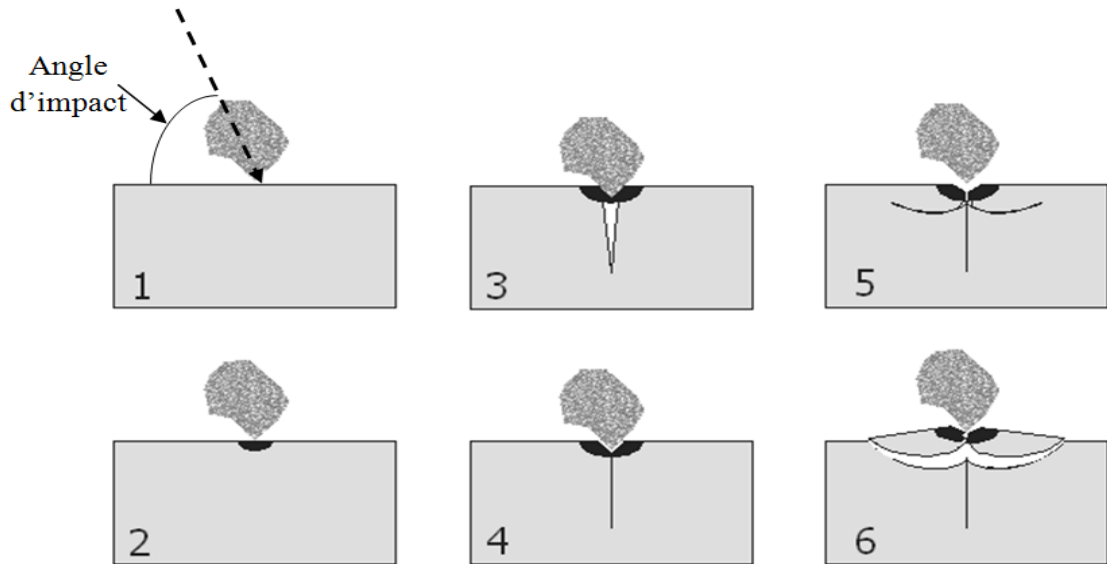


**3.3 Comportement des matériaux à l'érosion**

On distingue souvent trois comportements à l'érosion dans la littérature [95-97]: comportement fragile, semi-ductile et ductile. Le comportement fragile concerne l'enlèvement de la matière due à la formation des fissures, tandis que le comportement ductile concerne l'enlèvement de la matière due à la coupe et au labourage. La différence se manifeste dans le taux d'érosion (ER : Erosion Rate) dépendant de l'angle d'impact. Lorsqu'un matériau fragile est impacté par une particule dure et pointue, la zone de contact se déforme de manière plastique en raison des fortes contraintes de compression et de cisaillement et une fissure radiale se forme (Figure 3-1). Après l'impact, la déformation plastique conduit à une forte contrainte de traction qui résulte des fissures latérales entraînant l'enlèvement du matériau.

Les polymères trouvent, de plus en plus, d'applications comme matériaux structurels

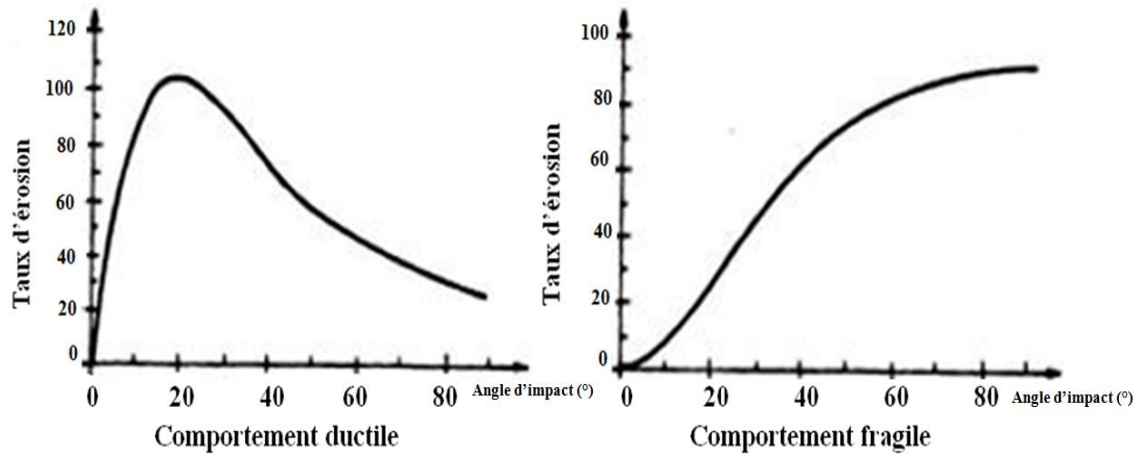
dans divers composants et systèmes d'ingénierie. La résistance spécifique et la rigidité améliorées des polymères sont principalement responsables de leur popularité.



**Figure 3-1** Séquence d'un impact de particule unique [98].

L'angle d'impact est généralement défini comme l'angle entre la trajectoire des particules et la surface de l'échantillon [99] (Figure 3-1-1). Si le taux d'érosion (ER) atteint un maximum aux angles d'impact vif, généralement compris entre 15 et 30°, le comportement du matériau en érosion est considéré comme ductile (Figure 3-2). En revanche, si ER augmente continuellement avec l'angle d'impact jusqu'à un maximum de 90° (impact normal), le comportement du matériau en érosion est considéré comme fragile (Figure 3-2). De plus, la taille de la particule érodante influe fortement sur le taux d'érosion [96]. Il convient toutefois de noter que ce qui est cité ci-dessus sur le comportement des matériaux en matière de ductilité ou de fragilité n'est pas absolu. Par exemple, si des particules sphériques sont utilisées en tant que particules érodantes au lieu de particules avec des arrêtes vifs, le taux d'érosion atteint un maximum pour un angle d'impact de 90° même pour des matériaux ductiles [100–102].

La résistance des matériaux polymères à l'érosion par particules solides s'est révélée médiocre [103], elle est inférieure de deux ou trois ordres de grandeur aux matériaux métalliques [104].



**Figure 3-2** Comportements typiques des matériaux vis-à-vis l'érosion [105].

Un certain nombre de chercheurs [103-111] ont évalué la résistance de divers types de la matrice polymère composite (PMC) à l'érosion par particules solides. Ces chercheurs ont observé que le taux d'érosion de PMC était plus élevé que celui du polymère non renforcé. Un grand nombre de chercheurs [104, 106–111] ont également noté de manière constante que le taux d'érosion des PMC était considérablement plus élevé que celui obtenu avec des matériaux métalliques. De plus, les composites à matrice thermodurcissable présentaient invariablement un taux d'érosion maximal aux angles d'impact normaux (c'est-à-dire un comportement fragile à l'érosion), tandis que pour les composites polymères thermoplastiques, le taux d'érosion atteignait un maximum à un angle d'impact intermédiaire compris entre 40 et 50°, signifiant un comportement à l'érosion semi-ductile.

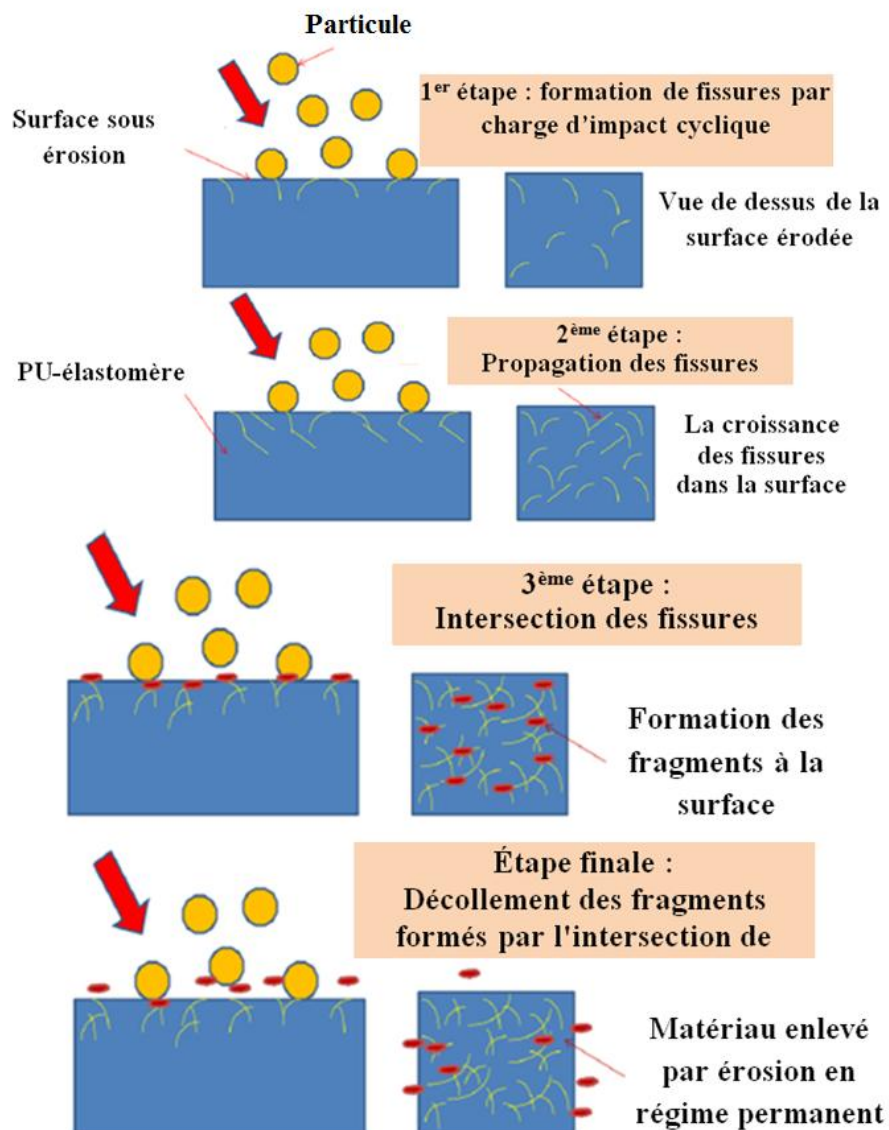
### 3.4 Mécanisme d'érosion des peintures des véhicules

La compréhension du mécanisme de l'érosion est indispensable pour progresser dans l'optimisation des matériaux actuellement utilisés pour la résistance à l'érosion. Arnold et al. [112] ont étudié le mécanisme d'enlèvement de la matière dans deux élastomères non chargés et ont expliqué qu'il existait une période d'incubation pendant laquelle l'énergie de choc transmise par l'impact des particules de sable était principalement utilisée pour rendre la surface rugueuse. Après cette période d'incubation, l'érosion à l'état d'équilibre survient et l'enlèvement de matière se produit par la formation des fissures. Zahavi et al. [104] ont exploré plus en détail le mécanisme d'érosion dans les revêtements de polyuréthane et ont constaté que la propagation de fines fissures de la surface à travers le revêtement conduisait à la formation de fragments. Le mécanisme d'érosion est mieux compris avec la prise en compte du temps de recouvrance. Les élastomères durs ont un temps de recouvrance plus long et mettent plus de temps à dissiper l'énergie absorbée. Par



conséquent, lorsque la particule de sable a un impact sur une région qui n'a pas encore complètement recouvert, l'impact cyclique répété sur cette région provoque une déformation plastique et le matériau est finalement décollé localement.

L'érosion par particules solides dans les revêtements de polyuréthane se produit en quatre étapes. Initialement, des fissures superficielles sont formées par la charge d'impact cyclique et ces fissures ont tendance à se propager par l'impact des particules de sable sur les fissures déjà existantes. Les fissures ont tendance à se déplacer à la fois en surface et dans le volume. Ensuite, lorsque les fissures qui se propagent se croisent, le matériau est décollé de la surface et forme des fragments.



**Figure 3-3** Mécanisme d'enlèvement de matière lors de l'érosion de polyuréthane [113].

Enfin, lors d'une érosion en régime permanent, les fragments sont retirés de la surface, ce qui entraîne une perte de masse du matériau. La figure 3-3 montre un schéma des quatre étapes d'enlèvement de matière lors de l'érosion par particules solides.

### **3.5 Paramètres influençant sur le comportement des matériaux à l'érosion**

Les paramètres influençant l'érosion sont très importants pour évaluer le processus d'érosion. Les différents paramètres qui affectent le processus d'érosion sont brièvement expliqués ci-dessous :

#### **3.5.1 Vitesses des particules**

De nombreuses expériences ont été réalisées dans le passé pour déterminer la perte de volume par impact due aux changements de vitesse [114, 115]. La vitesse des particules de sable a une influence importante dans le processus d'érosion car une vitesse plus élevée donne une énergie cinétique plus élevée aux particules pour dégrader la surface. Le taux d'érosion est principalement affecté par la vitesse d'impact des particules puisqu'il est considérée comme l'un des paramètres prédominant du processus d'érosion [115]. D'autres paramètres tels que l'angle d'impact, la taille, la forme et la dureté des particules, etc..., peuvent également affecter l'exposant de la vitesse. Goodwin et al. [116] ont étudié la diminution de la vitesse avec la diminution de la taille des particules et ont conclu qu'en général, plus la vitesse des particules est grande, plus le taux d'enlèvement de matière est grand.

#### **3.5.2 Taille des particules**

Smeltzer et al. [117] ont montré que la perte de volume par impact de particule varie linéairement avec le volume et la masse de la particule, à une vitesse constante, dans la plage de taille allant de 20 à 175  $\mu\text{m}$ . Yerramareddy et al. [118] ont indiqué que la coupe est le mécanisme principal pour les particules supérieures à 50  $\mu\text{m}$  (le diamètre critique « $d_c$ » pour le passage de mode de la déformation à la coupe) et que la valeur  $d_c$  dépend du matériau cible et de l'angle d'attaque. Selon Finnie et al [119], la perte de volume de matière augmente avec la diminution du diamètre des particules si la masse totale des particules est fixée. Fang et al. [120] ont montré que la perte de matière par érosion par particule solide varie linéairement avec la taille des particules pour le mode de coupe. En outre, il a été constaté que les particules abrasives fines ont tendance à créer des cratères plus profonds que les particules grossières [121].

### **3.5.3 Forme des particules**

C'est le principal facteur de prévision du taux d'érosion dû à l'impact, car il détermine la surface de contact entre la particule et la surface du matériau cible lors d'impact.

Les particules angulaires créent plus d'érosion pour les matériaux ductiles et fragiles. Hutchings et al. [122] utilisent des particules de forme sphères en acier de 9,5 mm de diamètre et de tôle de forme carrée de 8 mm à travers un système de pistolet à gaz comprimé à angles obliques. Ils ont constaté que les particules sphériques provoquaient un mode d'endommagement de labourage et que les particules angulaires provoquaient une déformation par coupure. L'angle entre la normale à la surface cible et le bord d'attaque de la particule impactante est appelé angle de coupe. En outre, il a été constaté qu'une particule sphérique atteindrait toujours la surface du matériau cible avec un grand angle de coupe, faisant du labourage. Mais une particule angulaire peut avoir un impact avec un angle de coupe petit, produisant une micro-coupe et un labourage. Ainsi, dans le cas des particules de SiO<sub>2</sub>, les grosses particules provoquent plus de labourage et les particules plus fines entraînent plus de micro-coupes, augmentant ainsi le taux d'érosion.

### **3.5.4 Angle d'impact de l'angle d'incidence**

L'angle d'impact joue également un rôle important dans l'érosion des matériaux. Pour les matériaux ductiles, le taux d'érosion augmente d'un minimum de zéro à une valeur maximale comprise entre 10° et 30° puis diminue pour une incidence normale. Alors que pour les matériaux fragiles, la perte par érosion augmente d'un minimum de zéro à un maximum de 90°. Carter et al. [123] ont montré que, pour un angle d'incidence donné, après la fin de la courte période d'incubation initiale, la profondeur de l'érosion devenait directement proportionnelle au taux d'érosion. La profondeur de pénétration augmente avec l'augmentation de l'angle d'incidence par rapport à la normale. L'énergie transmise par la particule augmente le volume extrudé et donc le taux d'érosion, jusqu'à ce que la profondeur de pénétration devienne si basse que le taux d'érosion diminue à nouveau. La diminution suivante de la profondeur de pénétration fait rebondir la particule avec une énergie substantielle, due à une perte d'énergie, avec des angles de réflexion inférieurs aux angles d'incidence. Par conséquent, les particules qui rebondissent avec une plus grande rétention d'énergie (cinétique) entraînent un taux d'érosion faible et des processus d'érosion secondaires.

### **3.5.5 Propriétés de matériau des particules et de l'échantillon**

#### **3.5.5.1 Dureté des particules**

L'érosion n'est possible que lorsque la dureté superficielle de la particule est supérieure à celle de la cible [124]. Wellinger et al. [124] ont observé que le taux d'érosion diminuait de façon spectaculaire à mesure que la dureté des particules diminuait en dessous de celle du matériau.

#### **3.5.5.2 Dureté de surface**

C'est le principal facteur utilisé pour décrire la variation du taux d'érosion des matériaux ductiles. Sheldon [125] a suggéré que la dureté de surface totalement abrasée puisse être utilisée pour décrire l'érosion. La dureté dynamique peut également être utilisée pour les matériaux ductiles et fragiles.

#### **3.5.5.3 Température**

Sundarajan [126] a constaté que le taux d'érosion augmente avec la température dans certains cas et diminue dans d'autres. La quantité d'endommagements causés par l'érosion varie en fonction des variables environnementales telles que la température et l'humidité. Par conséquent, leurs effets doivent être déterminés pour estimer la durée de vie des matériaux.

### **3.6 Installations d'érosion commerciales et de laboratoire**

#### **3.6.1 Appareils souffleurs de sable**

Pour pouvoir étudier l'érosion et les paramètres qui l'influencent, on aura recours à des dispositifs qui consistent à projeter des particules solides sur des matériaux cibles.

Plusieurs types de dispositifs ont été conçus pour simuler le processus d'érosion des matériaux par impact des particules solides. On rapporte dans la littérature que le premier simulateur a été conçu en 1955. Hutchings [122] a présenté quatre dispositifs d'essais pour simuler les phénomènes érosifs par les techniques suivantes :

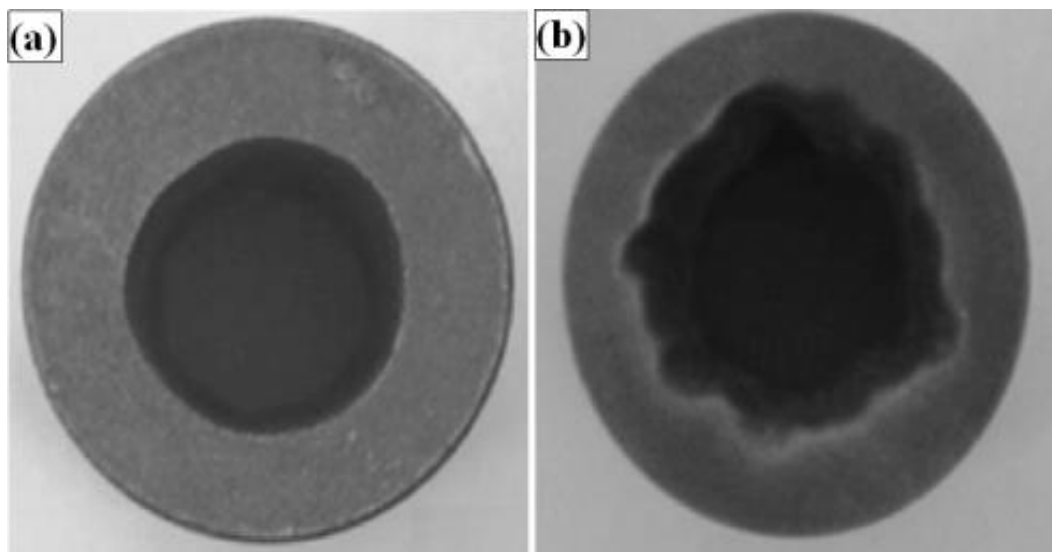
Impact par des jets de particules

- Boucle de recirculation
- Accélérateur par centrifugation
- Bras tourbillon.

Dans la littérature, on trouve des bancs d'érosion verticaux et horizontaux avec buse d'air ou de gaz. Le réglage et l'ajustage des paramètres des tests (distance buse-échantillon, angle et vitesse d'impact, réglage du débit des particules et positionnement des échantillons) se font avec une grande simplicité.

Différents capteurs peuvent être utilisés pour le contrôle de la masse de sable à projeter, ainsi que la concentration des particules transportées par le flux d'air [127]. Dans certaines études, le sable est recyclé [128]. L'angle d'impact peut être aussi fixé à  $45^\circ$  [129] comme il peut varier de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  [130]. Certains simulateurs avec recirculation de sable en circuit fermé sont équipés de capteurs pour la mesure et le contrôle de la température et de l'humidité [131] comme on peut le constater dans le tableau 3-1 qui résume les principaux paramètres ajustables pour quelques types de simulateurs d'érosion rencontrés dans la littérature.

Cependant et malgré l'avancée technologique importante, on note d'une part la difficulté de mesurer la vitesse des particules de façon individuelle et précise. Ceci est un inconvénient majeur de ces simulateurs. En plus de la variation de la vitesse d'impact (à cause de la chute de pression au niveau des compresseurs d'air ou le vieillissement du moteur), on mentionne l'usure (relativement rapide) de la buse (Figure 3-4) qui doit canaliser d'une façon uniforme le flux des grains érosifs sur l'échantillon. Donc la reproductibilité des essais s'avère altérée ou parfois impossible [132]. A la complexité du phénomène d'érosion, s'ajoutent ces inconvénients qui rendent son étude assez difficile, ainsi que la modélisation des résultats obtenus.



**Figure 3-4** Forme interne d'une buse : (a) avant utilisation, (b) après de 10 heures d'usage [132].

**Tableau 3-1 :** Quelques simulateurs du processus d'érosion utilisés dans les laboratoires.

Type de simulateur	Vitesse d'impact	Angle d'impact	Contrôle de la masse de sable	Contrôle de la concentration de sable	Recirculation du sable	Contrôle de la température	Contrôle de l'humidité
Sableuse à recirculation de sable en circuit fermé [129]	Variable en réglant la pression de l'air	Variable de 0 à 90°	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Dispositif à écoulement de sable [130]	Variable en réglant la distance entre la buse et le porte-échantillon	Fixé à 45°	Oui	Non	Non	Non	Non
Dispositif à tunnel pour sable [132]	-	-	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Sableuse à circuit ouvert [131]	Variable en réglant la pression de l'air et en	-	Oui	Non	Non	Non	Non
Sableuse à circuit ouvert (Lab.Mat.no n-métal)	réglant la distance entre la buse et le porte-échantillon	Variable de 0 à 90°	Oui	Non	Non	Non	Non

### 3.7 Composants utilisés dans la machine de sablage

En général, le sablage nécessite un pistolet, des abrasifs, une armoire, un compresseur. Ceux-ci sont décrits brièvement ci-dessous :

### **3.7.1 Pistolet de sablage**

Les pistolets d'alimentation à siphon et les pistolets d'alimentation à pression sont les deux types de Pistolet. Dans le pistolet d'alimentation à siphon, un courant d'air aspire l'abrasif (sable) et ressort à travers une large buse.

### **3.7.2 Matériaux abrasifs**

Il existe de nombreux types de matériaux abrasifs. Quelques-uns d'entre eux sont décrits ci-dessous :

- Sable de silice
- Oxyde d'aluminium
- Carbure de silicium
- Médias en plastique
- Médias en acier

### **3.7.3 Boîtiers de sablage abrasif**

En général, les opérations de sablage abrasif confiné et de sablage utilisent des boîtiers pour isoler le système à l'intérieur, pour contrôler la température et pour récupérer les abrasifs et protéger l'ouvrier de la poussière.

### **3.7.4 Dispositifs antipollution de l'air (équipement de réduction)**

Les filtres / collecteurs de poussière, les filtres à manches et les tissus de filtration sont placés dans les dispositifs de contrôle de la pollution atmosphérique. Les filtres à poussière/collecteurs sont divisés en collecteurs de poussières sèches et humides. Les collecteurs de poussières sèches sont à nouveau séparés en collecteurs de cartouches, collecteurs de sacs et collecteurs de sacs à enveloppes.

### **3.7.5 Compresseur d'air**

Il consiste en une pompe à air apte à prélever de l'air ambiant pour le mettre sous pression. Les compresseurs d'air peuvent être utilisés pour le transport d'air à forte pression mais en faible quantité.

## **3.8 Banc d'essai d'érosion réalisé**

Un banc d'essai d'érosion a été conçu et fabriqué au laboratoire LRM (Figure 3-6) (Voir annexe 2). La configuration utilisée dans ce banc d'essai d'érosion par particules solides est capable de créer des situations érosives reproductibles pour évaluer la résistance

à l'érosion des échantillons étudiés. Il se compose d'un compresseur d'air, d'un pistolet de sablage, d'une porte échantillon, d'un régulateur de pression, d'un réservoir de sable, d'un captonnage et d'un compresseur d'air. Le schéma d'installation du banc d'essai d'érosion est présenté dans la figure 3-5 et la machine réalisée est présentée dans la figure 3-6.

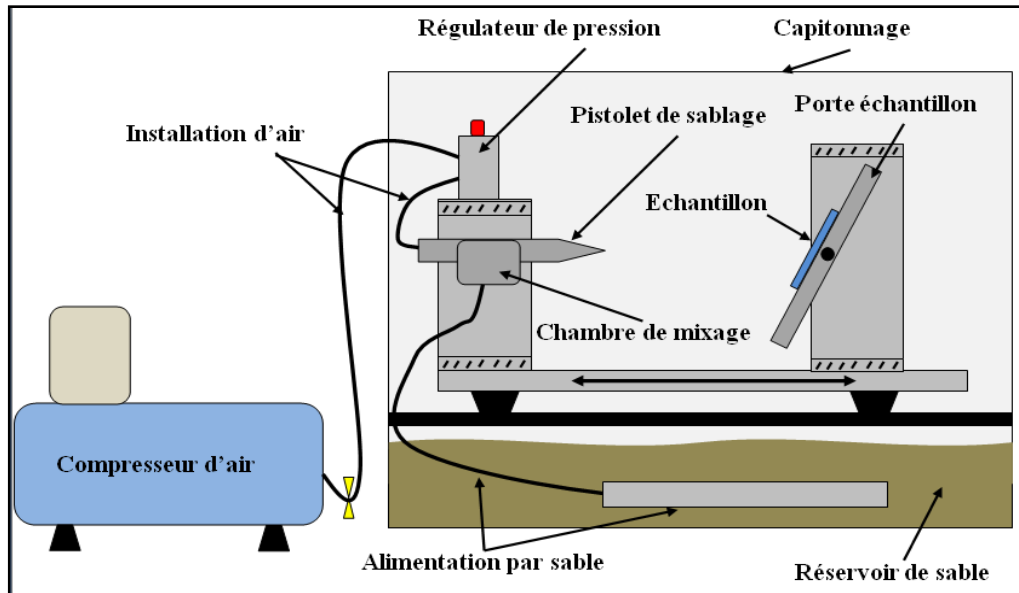


Figure 3-5 Schéma de banc d'essai réalisé.

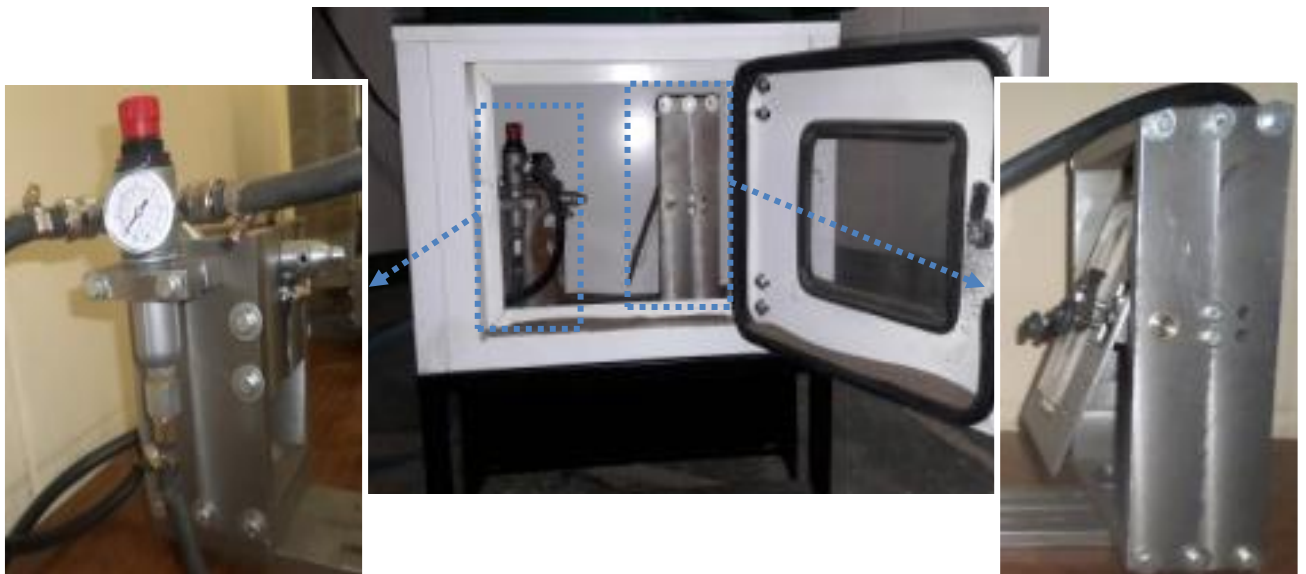


Figure 3-6 Banc d'essai d'érosion réalisé au LRM.

L'air comprimé sec mélangé aux particules abrasives est alimenté à vitesse constante par un régulateur de pression à travers le tube de buse, puis accéléré en faisant passer le mélange dans une buse en acier de 5 mm de diamètre interne. Ces particules impactent l'échantillon qui peut être maintenu à différentes distances et angles par rapport à la buse



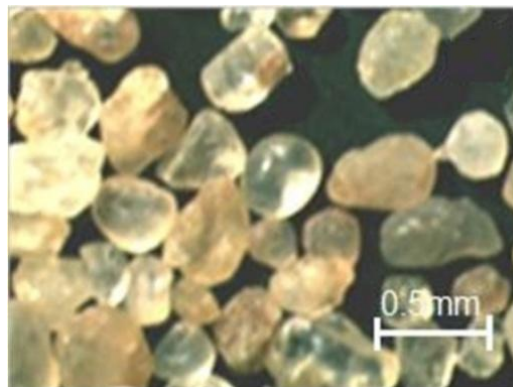
du flux érodant à l'aide d'un porte échantillon ajustable. Des échantillons carrés de taille 40×40 mm sont utilisés. Une procédure d'essai standard est utilisée pour chaque essai d'érosion. Les échantillons sont pesés avec une précision de 0,1mg à l'aide d'une balance électronique de la marque DENVER INSTRUMENT du laboratoire de département de Génie des procédés de l'Université de Hassiba Benbouali de Chlef. Les échantillons sont érodés pendant 1 minute, puis pesés de nouveau pour déterminer la perte de masse. Le rapport entre la perte de masse et la masse des particules érodantes, est ensuite calculé en tant que taux d'érosion (ER).

### 3.9 Principe de fonctionnement

Avant de procéder au test, la surface de l'échantillon est nettoyée. L'échantillon est serré dans le porte échantillon. L'angle requis et la distance entre l'échantillon et la buse ont été ajustés. L'air à la pression requise est mélangé avec les particules érosives dans une chambre de mixage (Figure 3-6) et dirigé vers l'échantillon pour une durée déterminée. La masse initiale et la masse de l'échantillon après l'essai d'érosion ont été pesées à l'aide d'une balance. Les étapes ci-dessus sont répétées pour les différents échantillons et paramètres sélectionnés.

### 3.10 Sable utilisé

Le sable utilisé dans les tests d'érosion provient de la région désertique de sud Algérien. Les molécules sont souvent de forme circulaire avec peu de particules de forme angulaire. Le sable utilisé a été caractérisé par Merouen [133]. La taille moyenne des particules varie de 250 à 500 microns, bien que des particules beaucoup plus grosses peuvent être rencontrées (Figure 3-7). La microdureté Vickers des grains de sable est  $12,43 \pm 2,27$  GPa [133]. En tamisant le sable brut, une sélection de grains de 500 $\mu$ m a été réalisée.



**Figure 3-7** Micrographies des particules de sable utilisées dans les essais d'érosion (500  $\mu$ m).

Le sable est composé de plusieurs oxydes dont les compositions (chimique et minéralogique) sont données dans les tableaux 3-2 et 3-3 [134]. La composition chimique contient essentiellement l'oxyde de Silicium ( $\text{SiO}_2$ ) en présence du  $\text{Na}_2\text{O}$ , et d'autres oxydes en faible pourcentage [135].

**Tableau3-2** : Composition chimique du sable utilisé.

Oxydes	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Masse (%)	72.88	24.00	0.80	0.43	1.84	0.05

**Tableau3-3** : Composition minéralogique du sable utilisé [136].

Constituants Minéraux	Quartz	Tourmaline	Liménite	Limonite	gypse
Dureté à l'échelle de Mohs	7	7-7.5	5-6	2-5	2

### 3.11 Conditions opératoires

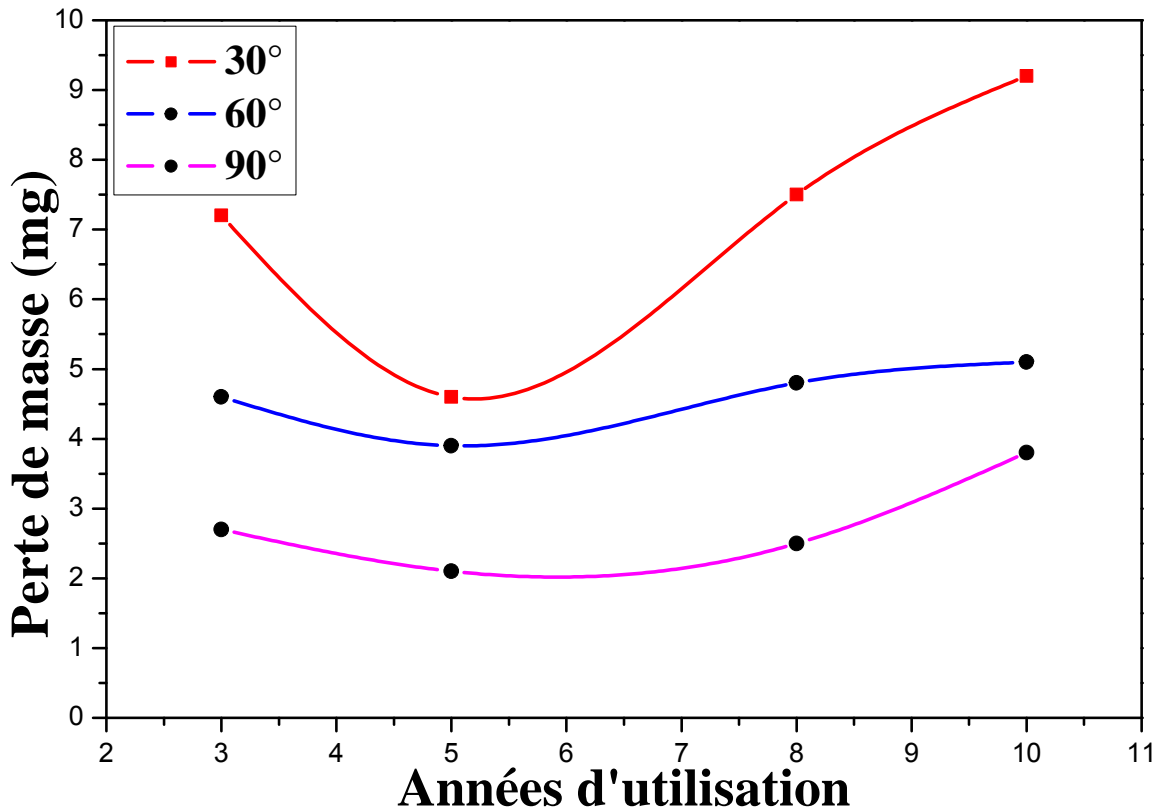
Les échantillons testés en érosion sont tirés de la même manière à ceux utilisés dans les essais de rayage. Les essais d'érosion sont réalisés à température ambiante de  $30^\circ\text{C}$ . Dans tous les essais, la distance entre la buse et l'échantillon est fixé à 10 mm, la durée d'érosion (t) est 60 secondes. La pression d'air ( $P_r$ ) est fixée à 0.150 bar. Plusieurs angles d'impact de :  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$  ont été utilisés. Les endommagements observés sont analysés en utilisant la microscopie optique.

### 3.12 Résultats et discussions

#### 3.12.1 Perte de masse

##### 3.12.1.1 Effet de la durée d'utilisation de la peinture

La figure 3-8 présente la perte de masse en fonction des années d'utilisation et de l'angle d'impact. La cause derrière l'étude de la perte de masse en fonction des années d'utilisation et d'angles d'impact a pour de comparer la résistance des échantillons à l'érosion pour chaque angle d'impact.



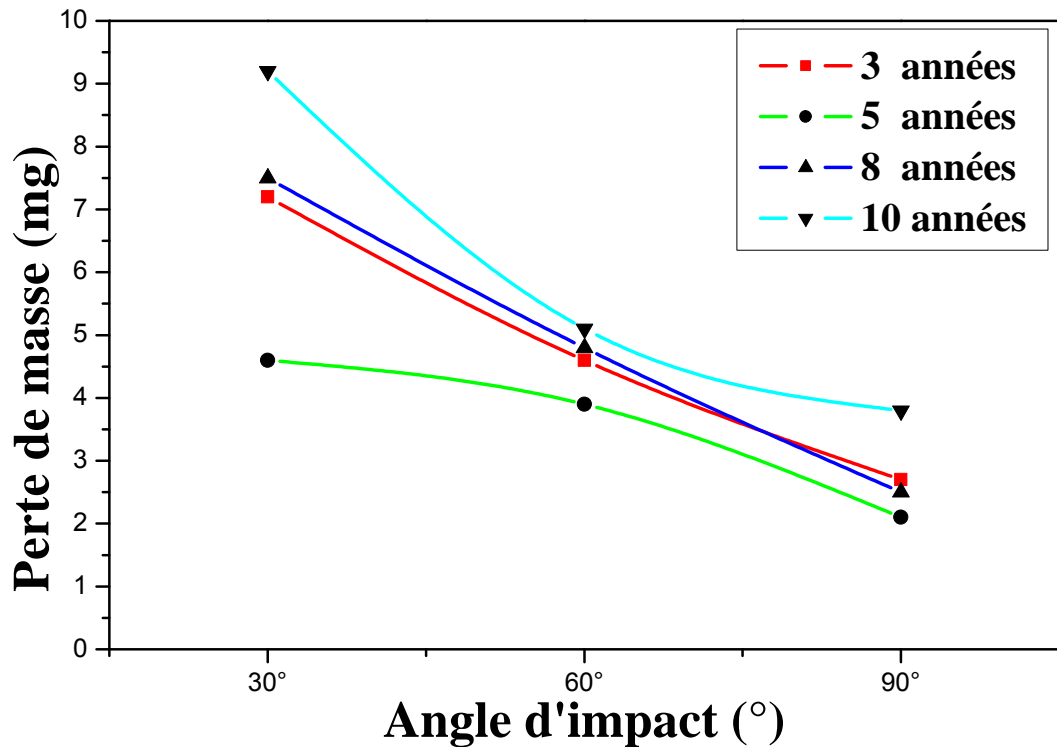
**Figure 3-8** Perte de masse de la peinture en fonction des années d'utilisation et d'angle d'impact.

Dans cette figure, on remarque l'influence du milieu aride sur la perte de matière dans la couche de peinture et par conséquent sur sa résistance à l'érosion. L'échantillon de 5 années d'utilisation montre une faible perte de masse en comparant avec les autres échantillons. L'échantillon de 10 années d'utilisation présente la plus grande perte de masse pour tous les angles d'impact utilisés. Les pertes de masse des échantillons de 3 et 8 années sont presque similaires.

### 3.12.1.2 Effet de l'angle d'impact

La plus grande perte de matière est remarquée à l'angle d'impact de 30°, montrant un comportement ductile des échantillons testés (Figure 3-8 et 3-9) [96, 97].

L'angle d'impact est l'un des paramètres les plus importants pour caractériser le comportement à l'érosion des matériaux. L'effet de l'angle d'impact sur la perte de masse des échantillons étudiés est illustré dans la figure 3-9.



**Figure 3-9** Perte de masse en fonction de l'angle d'impact des échantillons testés.

Les résultats montrent que l'échantillon de 10 années d'utilisation présente une perte de masse la plus élevée comparativement aux autres échantillons. Puisque sa microdureté est la meilleure par rapport aux autres échantillons (Figure 2-20), l'échantillon de 5 années d'utilisation a présenté la plus faible perte de masse. En prenant en considération l'effet de l'agressivité du milieu aride sur les peintures à base polymère, leur microdureté augmente dans les premières années d'utilisation et diminue après une durée optimale de 5 ans selon les résultats trouvés par Madaoui et al. [85]. Les échantillons de 3 et 8 années d'utilisation présentent presque la même microdureté (Figure 2-20), ce qui reflète sur les résultats de la même perte de masse (Figure 3-9). Par ailleurs, on remarque que la perte de masse diminue en augmentant l'angle d'impact pour tous les échantillons testés (Figure 3-9). La perte de masse maximale est observée pour un angle d'impact de 30°, cela signifie que tous les échantillons de peinture présentent un comportement ductile à l'érosion [96, 97]. Le même résultat est trouvé par Demirci et al. [137] pour un système de peinture contenant la couche d'apprêt et la couche de base.

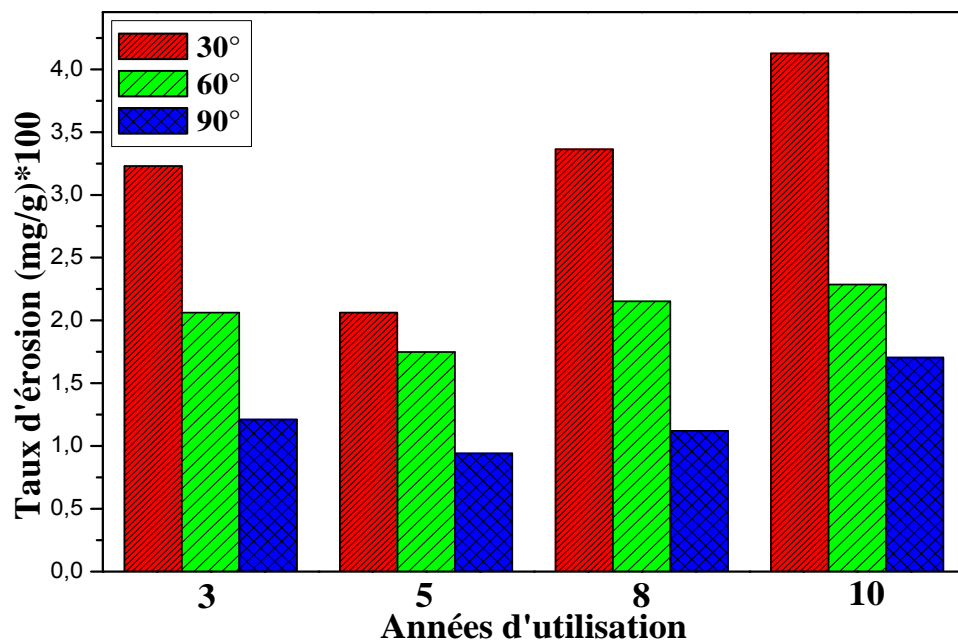
### 3.12.2 Taux d'érosion

#### 3.12.2.1 Effet de la durée d'utilisation de la peinture

L'effet de l'érosion a été concrétisé par le taux d'érosion (ER) qui est représenté dans l'équation (3-1) par le rapport entre la perte de masse ( $\Delta m$ ) dans l'échantillon cible et la masse des particules projetées ( $m_p$ ) :

$$ER = \Delta m / m_p \quad (3-1)$$

La figure 3-10 présente la variation du taux d'érosion en fonction des années d'utilisation et de l'angle d'impact.



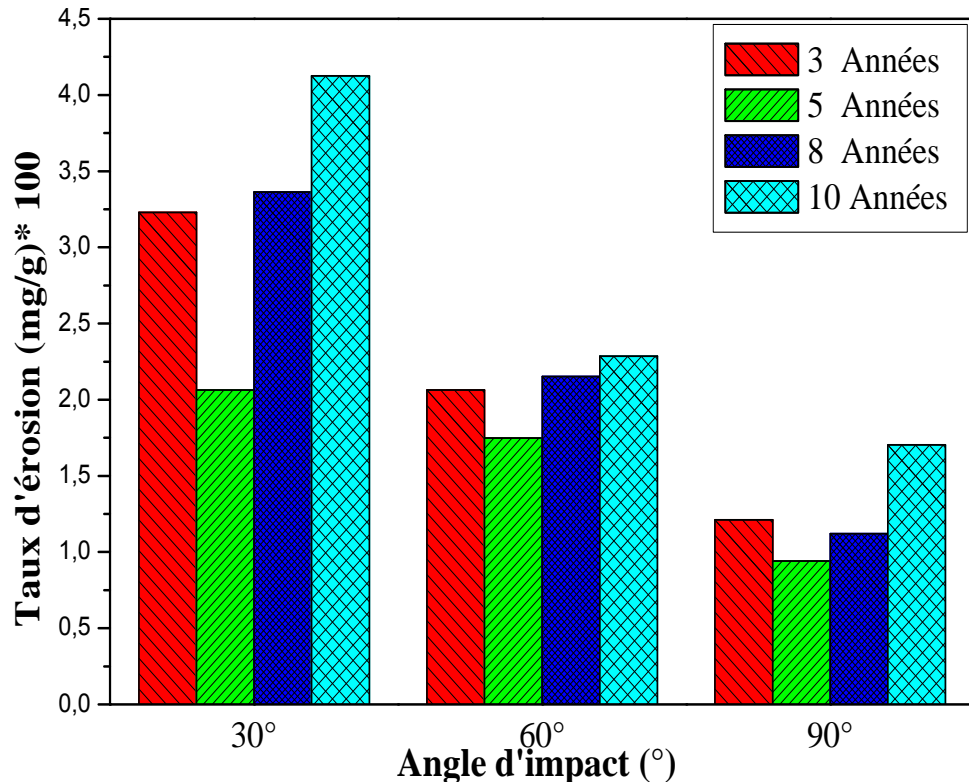
**Figure 3-10** Variation du taux d'érosion en fonction des années d'utilisation et d'angle d'impact.

Dans cette figure, il est montré que le milieu aride et l'angle d'impact ont une influence importante sur le taux d'érosion. Ce dernier donne une bonne indication sur la résistance des matériaux à l'érosion par particules solides. Dans tous les angles étudiés, la perte de masse est très élevée pour un angle d'impact de 30° et faible pour les angles d'impact allant de 60 à 90°. Il est aussi remarqué que l'échantillon de 5 années présente une très bonne résistance à l'érosion due à sa bonne microdureté.

#### 3.12.2.2 Effet de l'angle d'impact

Le taux d'érosion des peintures automobiles en fonction des angles d'impact et des années d'utilisation sont illustrés dans la figure 3-11.

Tous les échantillons présentent un taux d'érosion élevé pour un angle d'impact de 30°, ceci est attribué à la combinaison des trois formes d'endommagement : micro-labourage, micro-coupe et microfissuration. Pour un revêtement dur, cette combinaison est observée pour un angle de 60° [138]. Le taux d'érosion diminue en augmentant l'angle d'impact à 60° et 90° (Figure 3-11). On remarque que l'échantillon de 10 années d'utilisation présente le taux d'érosion le plus élevé dans tous les angles d'impact, ce qui veut dire une faible résistance à l'érosion, ceci est attribué à sa faible microdureté (Figure 2-20).



**Figure 3-11** Variation du taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact des échantillons testés.

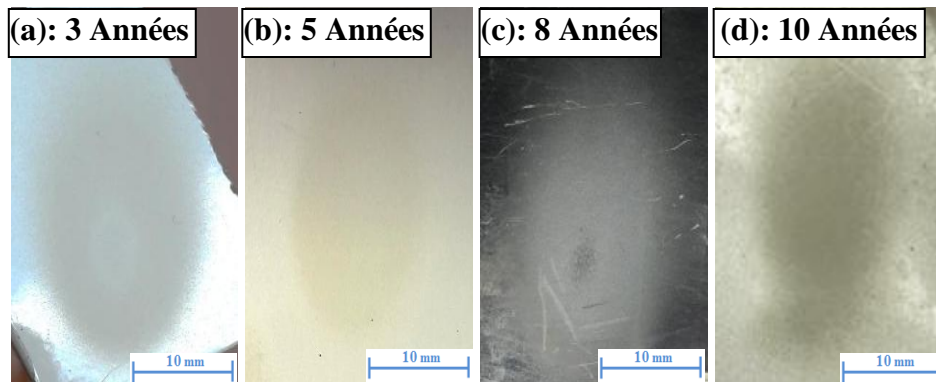
L'échantillon de 5 années d'utilisation montre le plus faible taux d'érosion (Figure 3-11), ceci est attribué à sa bonne microdureté en comparant avec les autres échantillons (Figure 2-20). Cet échantillon présente la meilleure résistance à l'érosion. Les échantillons de 3 et 8 années d'utilisation montrent presque le même taux d'érosion à cause de ses microduretés qui sont presque les mêmes (Figure 2-20).

### 3.12.3 Observations optiques des endommagements

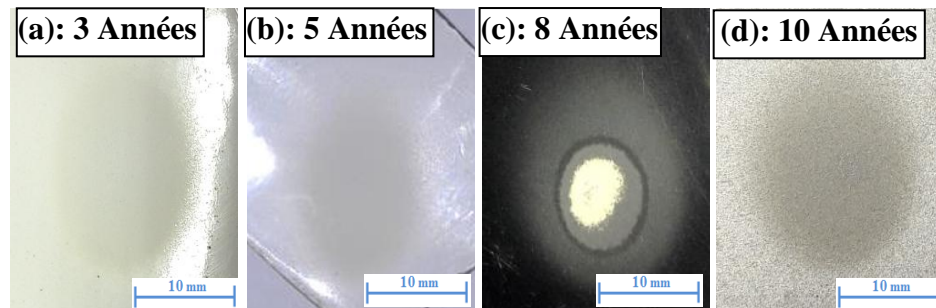
La figure 3-12 présente des observations par microscopie optique des cicatrices obtenues des échantillons érodés. Dans tous les cas, la taille des cicatrices est très grande à un angle d'impact de 30° et petite pour des angles d'impact allant de 60° et 90°. Une forme

elliptique est observée à 30° et 60° tandis qu'une forme approximativement circulaire est observée à 90°. Ce résultat peut être expliqué par la géométrie d'impact, qui est modifiée avec l'orientation de l'échantillon lorsque ce dernier est positionné à différents angles d'impact. De plus, cette forme elliptique est attribuée à une divergence plus élevée du flux de particules à des angles d'impact inférieurs, comme observé dans d'autres études sur l'érosion [139, 140]. Dans tous les cas de peintures étudiées, la surface de la zone endommagée est importante lorsque l'angle d'impact est réduit.

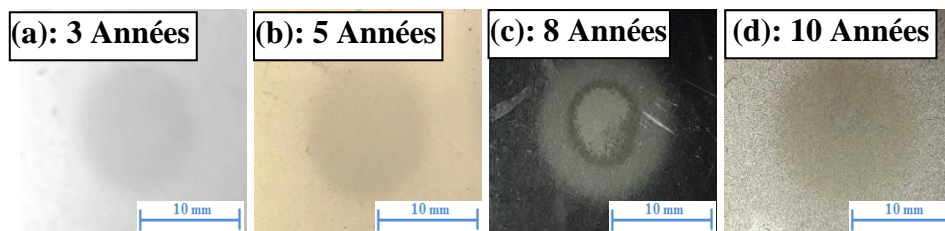
30°)



60°)

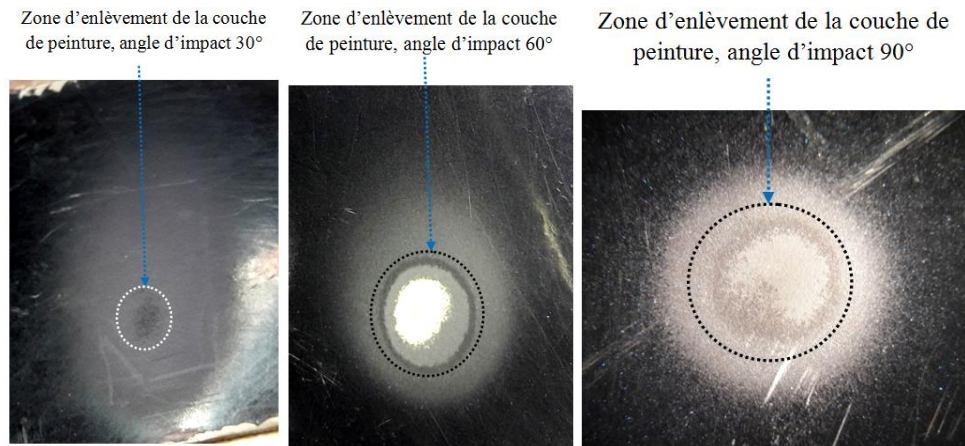


90°)



**Figure 3-12** Images optiques des cicatrices obtenues après érosion avec angle d'impact de 30°, 60° et 90°,  $t = 60$  sec et  $Pr = 0.150$  bar.

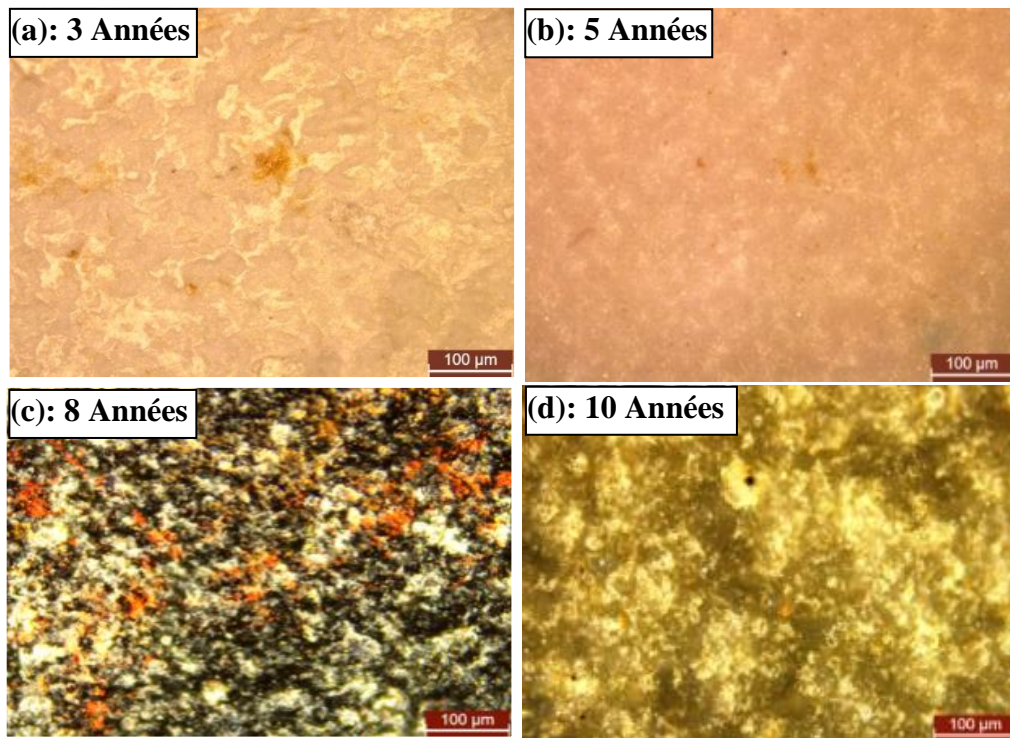
Les endommagements des peintures ont été analysés par microscope optique. Une difficulté a été trouvée pour caractériser ces endommagements. La figure 3-13 présente la zone d'enlèvement de la couche de peinture dans les échantillons à différents angles d'impact.



**Figure 3-13** Zones d'enlèvement de la peinture après érosion,  $t = 60$  sec et  $Pr = 0.150$  bar.

**a- Erosion avec un angle d'impact de 30°**

La figure 3-14 présente les observations par microscopie optique des endommagements au niveau du point de décollement pour un angle d'impact de 30°.



**Figure 3-14** Quelques endommagements observés par microscopie optique, angle d'impact 30°,  $t = 60$  sec et  $Pr = 0.150$  bar.

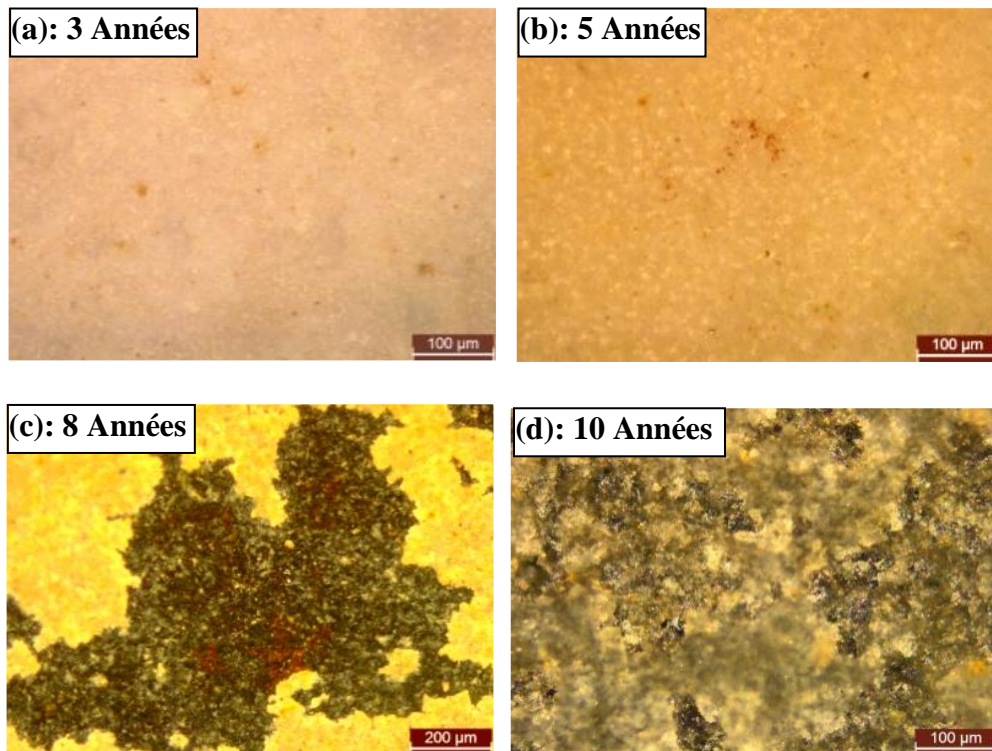


Il est bien évident que le vieillissement des couches de peintures à un effet significatif sur la résistance à l'érosion des peintures étudiées.

L'analyse de la figure 3-13 de la cicatrice montre que la zone de l'enlèvement de la matière est proche de début de la cicatrice et ceci est dû à la concentration des particules de sable dans cette zone pour cet angle d'impact ( $30^\circ$ ). Les observations dans cette zone montrent un enlèvement de la matière pour une durée d'exposition au milieu aride plus grande (Figure 3-14-c et d). Cependant, les échantillons ayant une courte durée d'utilisation, de 3 et 5 années, présentent des zones d'endommagement de faible taille, alors pour une longue durée d'utilisation de 8 et 10 années, ont des zones d'endommagement plus larges.

### b-Erosion avec un angle d'impact de $60^\circ$

La figure 3-15 présente les observations par microscopie optique des endommagements au niveau du point de décollement à un angle d'impact de  $60^\circ$



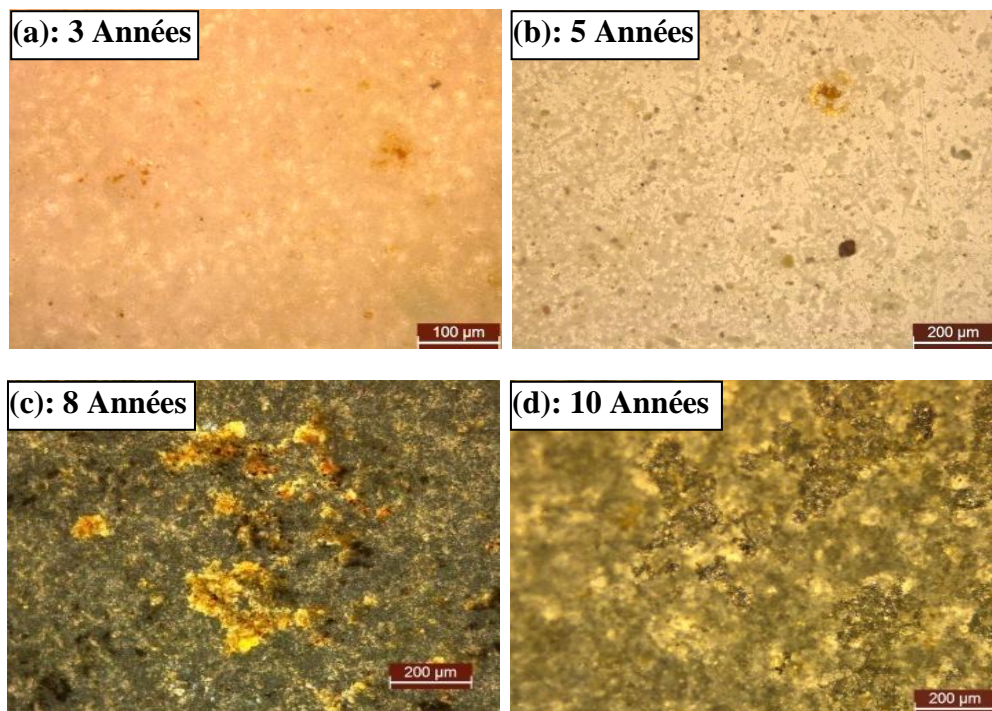
**Figure 3-15** Quelques endommagements observés par microscopie optique, angle d'impact  $60^\circ$ ,  $t = 60$  sec et  $Pr = 0.150$  bar.

On remarque que la surface de la cicatrice a diminué à cause de la diminution de la zone de contact entre le flux des particules solides et la surface de l'échantillon en augmentant l'angle d'impact à  $60^\circ$  (Figure 3-13). Pour cet angle, la zone de décollement de la matière

est décalée du début de la cicatrice en comparant à 30°. L'endommagement par enlèvement de la matière dans cette zone est plus sévère pour les échantillons érodés avec l'angle d'impact de 30° (Figure 3-14). Dans le cas des échantillons de 3 et 5 années d'utilisation, l'endommagement apparaît comme des points de couleur marron dans la zone d'enlèvement de la matière. Le nombre de ces points diffère de 3 à 5 années. Ces points sont nombreux pour l'échantillon de 3 années que pour 5 années (Figure 3-15-a et b). L'endommagement est très important dans les échantillons de 8 et 10 années d'utilisation, la peinture se trouve complètement décollée des surfaces et le substrat est exposé au milieu ambiant (Figure 3-15-c et d).

### c-Erosion avec un angle d'impact de 90°

La figure 3-16 présente les observations par microscopie optique des endommagements au niveau du point de décollement pour un angle d'impact de 90°.



**Figure 3-16** Quelques endommagements observés par microscopie optique, angle d'impact 90°,  $t = 60$  sec et  $Pr = 0.150$  bar.

A cet angle, la zone de décollement de la matière est située au milieu de la cicatrice (Figure 3-13). Identique aux endommagements observés dans les échantillons érodés avec un angle d'impact de 60° (Figure 3-15), les endommagements dans les échantillons de 3 et 5 années d'utilisation présentent des zones de couleur marron au milieu de la cicatrice. Ces zones sont nombreuses pour l'échantillon de 3 années (Figure 3-16-a) que pour 5 années

d'utilisation (Figure 3-16-b). Pour les échantillons de 8 et 10 années d'utilisation, l'endommagement est important, un enlèvement complet de la couche de peintures de son substrat est observé (Figure 3-16-c et d).

### 3.13 Conclusion

Dans ce chapitre, une simulation expérimentale de phénomène d'érosion pour étudier le comportement des peintures automobiles est réalisée. Quatre échantillons de peinture automobiles de différentes années d'utilisation de 3, 5, 8 et 10 ont été utilisés. Dans la section 1 de ce chapitre, une recherche bibliographique sur l'érosion des matériaux polymères, définition, comportement des matériaux à ce phénomène, paramètres influençant sur les résultats obtenus, types de système de sablage abrasif, installation commerciale et de laboratoire et différents composants utilisés pour avoir une machine de sablage a été réalisée.

Dans la 2<sup>ème</sup> section, la machine d'érosion fabriquée au (LRM) est présentée, son principe de fonctionnement, sable utilisé dans les essais et les différentes conditions opératoires sont présentées.

Dans la 3<sup>ème</sup> section, une présentation des différents résultats obtenus ainsi les discussions et une conclusion de ce chapitre sont illustrées.

Les résultats obtenus sont collectés ci-dessous :

1- La perte de masse est très influencée par le milieu aride et par l'angle d'impact. L'échantillon de 5 années d'utilisation présente la perte de masse la plus faible par rapport aux autres durées d'utilisation. Ce résultat est attribué à l'amélioration dans sa microdureté. L'échantillon de 10 années montre la plus grande perte de masse, ce qui signifie la plus faible résistance à l'érosion. Les échantillons de 3 et 8 années présentent presque la même perte de masse, ce qui indique la même résistance à l'érosion. Ces résultats sont remarquables pour tous les angles d'impact utilisés.

2- Le taux d'érosion aussi est très influencé par le milieu aride et par l'angle d'impact. D'après les résultats obtenus, le taux d'érosion est très important pour un angle d'impact de 30°.

3- Les observations optiques des cicatrices ont montrés que la taille de la cicatrice est très importante à un angle d'impact de 30° pour tous les cas étudiés. Cette taille diminue en allant vers des angles d'impact de 60° et 90°. L'enlèvement de la matière est au point de

concentration de flux de particules qui est positionné au début de la cicatrice à 30° d'angle d'impact et commence à se déplacer vers le centre pour les angles d'impact allant de 60 à 90°.

4- L'analyse des endommagements au fond des cicatrices a montré des points d'enlèvement de la peinture dans la zone de concentration de flux des particules pour les échantillons de 3 et 5 années d'utilisation, et un enlèvement important de la peinture dans le cas des échantillons de 8 et 10 années d'utilisation.

---

# **Conclusion générale et perspectives**

---

## **Conclusion générale**

Dans le cadre de cette thèse, une étude expérimentale de la résistance au rayage et à l'érosion des peintures automobiles utilisées dans un milieu agressif du sahara algérien est réalisée. Les échantillons testés ont des années d'utilisation réelle de 3, 5, 8 et 10 dans ce milieu aride. Pour les essais expérimentaux de rayage et d'érosion, deux bancs d'essai sont conçus et réalisés au Laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.

Avant les essais de microrayage et d'érosion, les échantillons ont été caractérisés par microscopie optique pour déterminer la morphologie superficielle des surfaces et par microduromètre pour étudier l'influence du milieu aride sur la dureté de la couche de peinture et son substrat. Les observations par microscopie optique ont révélé la création des abrasions sur la surface des échantillons. Ces abrasions sont de faibles tailles et d'un nombre important pour l'échantillon de 3 années. L'échantillon de 5 années a montré des abrasions de taille plus grande que l'échantillon de 3 années mais en nombre inférieur. En allant vers des années d'utilisation de 8 et 10 années, les abrasions deviennent de plus en plus importantes en taille et en nombre.

Les résultats de microdureté obtenus ont montré que l'échantillon de 5 années d'utilisation a la valeur de microdureté la plus élevée parmi tous les échantillons testés.

Deux pointes sont utilisées dans les essais de microrayage, une pointe conique et une plaquette en carbure métallique. Pour les deux pointes utilisées, les résultats obtenus montrent que l'échantillon de 5 années d'utilisation présente la résistance au rayage la plus élevée relativement aux autres échantillons, même l'endommagement observé par MEB dans la rayure pour cet échantillon est moins important en comparant avec les autres échantillons.

Dans l'essai d'érosion, trois angles ont été utilisés. Les résultats obtenus montrent que l'échantillon de 5 années d'utilisation présente une perte de masse et un taux d'érosion les plus faibles relativement aux autres échantillons pour tous les angles d'impact testés.

On remarque que la perte de masse et le taux d'érosion sont importants pour un angle d'impact de 30°.

Enfin, cette étude a montré que la morphologie, la microdureté et la résistance au rayage et à l'érosion de la couche de peinture se trouvent très affectées par ce milieu aride. Sur la base des résultats expérimentaux obtenus, il a été trouvé que l'échantillon de 5 années d'utilisation possède la résistance la plus élevée au rayage et à l'érosion. Ce résultat est la conséquence de l'amélioration de sa microdureté donc de ses propriétés mécaniques et de son adhérence au substrat.

### **Perspectives**

Au cours de l'élaboration de cette thèse, plusieurs perspectives ont été dégagées, on cite les plus importantes ci-dessous:

- Le développement des bancs d'essai réalisés pour mieux caractériser l'adhérence des revêtements et en particulier les peintures. Ce développement peut être effectué avec d'autres outils de caractérisation de l'adhérence des peintures.
- L'étude d'un moyen de traitement superficiel des peintures (traitement thermique ou autres) pour le but d'améliorer leurs performances au cours d'utilisation.
- L'utilisation de l'outil numérique avec les résultats expérimentaux obtenus sera un moyen attractif dans ce domaine.
- L'étude expérimentale sur la résistance au rayage et à l'érosion des peintures des véhicules vis-à-vis de la couleur et de la durée d'utilisation.
- Le développement du banc d'essai de microrayage par l'ajout d'un multi-fingers, d'un contrôle de la température, d'une optique de suivi de rayage ainsi que l'introduction d'un capteur des émissions acoustiques.

---

# Références bibliographiques

---



**Références bibliographiques**

1. J. Pospisil, S. Nespurek. 'Photo stabilization of coatings, mechanisms and performance', *Progress in Polymer Science*, 25, 1261-1335, (2000).
2. M. Horgnies. 'Adhésion et adhérence entre les peintures automobiles et des adhésifs sensibles à la pression : influence du nettoyage sur la physico-chimie et la tenue mécanique des interfaces', Thèse de doctorat, Ecole des mines de paris, France (2004).
3. M. B. Achour. 'Synthèse et caractérisation multi-échelle de nanoparticules pour des revêtements du secteur automobile', Thèse de doctorat, Paris, Ecole Nationale Supérieure des Mines, France, (2016).
4. H.-J. Streitberger, K.-F. Dossel, 'Automotive Paints and Coatings', 2nd ed, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
5. B. Ramezanzadeh, M. Mohseni. 'An evaluation of an automotive clear coat performance exposed to bird droppings under different testing approaches'. *Prog. Org. Coatings*, (2009) 149-160.
6. P. Bertrand lambotte. 'Les mécanismes de rayure des vernis de finition automobile'. Thèse de doctorat, Lyon, Ecole Centrale, France (2001).
7. P. Verrier, 'Plastifiants', *Techniques de l'Ingénieur*, A 3231 (1992) 1-11.
8. Bouhafer Ali, Etude de la dégradation d'une peinture de carrosserie automobile, thèse de magister, Univ. Boumerdes, Algérie, (2009).
9. Jean-claude-laout. 'protection et décoration par peinture'. *Techniques de l'ingénieur*, 36, (2009).
10. W. Shen, B. Jiang, A. Scholten, R. Schwenke, L. Mi, C. Seal, P. Wang. 'Quantitative index for mar and scratch resistance of materials for automotive glazing applications and quantitative evaluation of damages by different scratching modes'. *Tribology Letters*, 17 (2004) 637-644.
11. Tae-Won Seo, Jong-Il Weon. 'Influence of weathering and substrate roughness on the interfacial adhesion of acrylic coating based on an increasing load scratch test'. *J. Mater. Sci.*, 47 (2012) 2234-2240.
12. Karin J. van der Pal, Georgina Sauzier, Mark Maric, Wilhelm van Bronswijk, Kari Pitts, Simon W. Lewis. 'The effect of environmental degradation on the characterisation of automotive clearcoats by infrared spectroscopy'. *Talanta*, 148 (2016) 715-720.

13. Koen N.S. Adema, Hesam Makki, Elias A. J. F. Peters, Jozua Laven, Leendert G. J. van der Ven, Rolf A.T.M. van Benthem, G. de With. 'The influence of the exposure conditions on the chemical and physical changes of polyester-urethane coatings during photodegradation'. *Poly. Degradation Stability*, 123 (2016) 13–25.
14. J. Lange, A. Luise, A. Hult, "Influence of Crosslink Density, Glass Transition Temperature and Addition of Pigment and Wax on the Scratch Resistance of an Epoxy Coating" *J. Coat. Technol.*, 69 77–82 (1997)
15. Seung M. Noh, Jae W. Lee, Joon H. Nam, Ki H. Byun, Jong M. Park, Hyun W. Jung, 'Dual-curing behavior and scratch characteristics of hydroxyl functionalized urethane methacrylate oligomer for automotive clearcoats'. *Progress in Organic Coatings* 74 (2012) 257– 269
16. Hamad A. Al-Turaif, 'Surface morphology and chemistry of epoxy-based coatings after exposure to ultraviolet radiation'. *Progress in Organic Coatings* 76 (2013) 677–681.
17. M. E. Nichols, C. A. Darr. 'Effect of weathering on the stress distribution and the mechanical performance of automotive paint systems'. *J Coating Technol*, 70 (1998) 141–149.
18. Mark E. Nichols, 20 – Paint Weathering Tests, *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, (2012), pp 597–619.
19. S.V. Hainsworth, P.J. Kilgallon, Temperature-variant scratch deformation response of automotive paint systems, *Progress in Organic Coatings* 62 (2008) 21–27.
20. R.I. Trezona, M.J. Pickles, I.M. Hutchings, A full factorial investigation of the erosion durability of automotive clearcoats, *Tribology International* 33 (2000) 559–571
21. Na Zhang, Fan Yang, Lei Li, Changyu Shen, Jose Castro, L. James Lee, 'Thickness effect on particle erosion resistance of thermoplastic polyurethane coating on steel substrate', *Wear* 303 (2013) 49–55
22. Nargess Tahmassebi, Siyamak Moradian, 'Predicting the performances of basecoat/clearcoat automotive paint systems by the use of adhesion scratch and mar resistance measurements'. *Polymer Degradation and Stability* 83 (2004) 405–410
23. Danuta Kotnarowska, Michał Przerwa, Tadeusz Szumiata, Resistance to Erosive Wear of Epoxy-Polyurethane Coating Modified With Nanofillers, *Journal of Materials Science Research*; Vol. 3, No. 2; 2014

24. V. Jardret, H. Zahouani, J.L. Loubet, and T.G. Mathia, 'Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test', *Wear*, 218 (1998) 8-14.
25. Briscoe, B. J., Pelillo, E. and Sinha, S. K. 'Characterisation of the scratch deformation mechanisms for poly (methylmethacrylate) using surface optical reflectivity', *Polymer International*, 43 (1997) 359-367.
26. L-P. Sung, P. L. Drzal, M. R. Vanlandingham, A. M. Forster, 'Scratching of Materials and Applications', Volume 51, 1st Edition, (2006), Chapitre 5.
27. Briscoe, B. J., Evans, P. D., Pelillo, E. and Sinha, S. K. 'Scratching Maps for Polymers', *Wear*, 200 (1996) 137-147.
28. S.J. Bull, 'Failure modes in scratch adhesion testing', *Surf: Coat. Tech.* 50 (1991) 25-32.
29. B.J. Briscoe and S.K. Sinha, 'Scratch Resistance and Localised Damage Characteristics of Polymer Surfaces – a Review', 34 (2003) 989-1002.
30. Massimiliano Barletta, Silvia Vesco, Michel Puopolo, Vincenzo Tagliaferri, 'High performance composite coatings on plastics: UV-curable cycloaliphatic epoxy resins reinforced by graphene or graphene derivatives', *Surface & Coatings Technology*, 272 (2015) 322–336.
31. V. Jardret and W.C. Oliver, 'Viscoelastic behavior of polymer films during scratch test: a quantitative analysis', *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 594 (2000), 251-256.
32. L. Odoni, 'Propriétés mécaniques et effets d'échelle', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon (1999).
33. D. Tabor, *The hardness of metals*. Oxford: Clarendon Press, éditions. 1951.
34. K.L. Johnson, *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, éditions. 1985.
35. D. Tabor, 'The hardness of solids', *Review of Physics in Technology*. 1 (1970) 145-179.
36. K.L. Johnson, 'The correlation of indentation experiments', *J. of Mech. Phys. Solids*. 18 (1970) 115-126.
37. B.J. Briscoe, 'Isolated contact stress deformations of polymers: the basis for interpreting polymer tribology', *Tribology International*. 31 (1998) 121-126.
38. B.J. Briscoe, E. Pelillo, and S.K. Sinha, 'Scratch Hardness and Deformation Maps for Polycarbonate and Polyethylene', *Polymer Engineering and Science*. 36, 24 (1996) 2996-3005.

39. C. Gauthier and R. Schirrer, 'Time and temperature dependence of the scratch properties of poly (methylmethacrylate) surfaces', *Journal of Materials Science*. 35 (2000) 2121-2130.
40. G. Kermouche, 'Contribution à la modélisation théorique et numérique des essais d'indentation et de rayure', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon (2005).
41. LM. Hutchings, Tribology, 'Friction and Wear of Engineering Materials', Edward Arnold, London, UK, (1996).
42. A. W. Adamson, 'Physical Chemistry of Surfaces', 3rd Ed., John Wiley and Son, USA, (1976)
43. F.P Bowden, D. Tabor, 'The Friction and Lubrication of Solids Part II', Oxford University Press, Oxford, (1964).
44. Vincent Le Houérou, Christian Gauthier, Energy based model to assess interfacial adhesion using a scratch test, *J. master Sci.*, (2008).
45. V. Jardret, 'Apport des techniques sclérométriques à la caractérisation des propriétés mécaniques des surfaces', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon (1996)
46. T.G. Mathia, V. Verdret, B. Lamy. 'On the Applications of Sclero-Topometry for Measurement of Hardness, Toughness and Brittleness of Surfaces, Surface Coatings and the Interfaces'. *Proc. of Inter. Congres on Mechanics and Tribology of Transport Systems*. (2003) 77-80.
47. B.J. Briscoe, P.D. Evans, E. Pelillo, S. Sinha, "Scratching maps for polymers", *Wear*. 200 (1996) 137-147.
48. N. Conte, Nano Scratch Tester (NST), (2007).
49. R. R. Thridandapani, A. Mudaliar, Q. Yuan, R. D. K. Misra, 'Near Surface Deformation Associated With the Scratch in Polypropylene-Clay Nanocomposite: A Microscopic Study' *Mater. Sci. Eng., A*, 418 (2006) 292-302.
50. P. J. Burnett, D. S. Rickerby, 'the relationship between hardness and scratch adhesion, *Thin Solid Films*, 154 (1987) 403-416.
51. J. L. Bucaille, E. Felder, G. Hochstetter, 'Mechanical analysis of the scratch test on the elastic and perfectly plastic materials with the three-dimensional finite element modeling', *Wear*, 249 (2001) 422-432.
52. Wong JSS, Sue HJ, Zeng KY, Li RKY, Mai YW. 'Scratch damage of polymers in nanoscale'. *Acta Mater*, 52 (2) (2004) 431-443.

53. Demirci, C. Gauthier, R. Schirrer, 'Experimental study and mechanical analysis of damage of a thin polymeric coating during scratching: relation between thickness and roughness', *Thin Solid Films*, 479 (2005) 207-215.
54. C. Gauthier, A.-L. Durier, C. Fond, R.Schirrer, 'Scratching of a coated polymer and mechanical analysis of a scratch resistance solution', *Tribology International*, 39 (2006) 88-98.
55. R. D. K. Misra, R. Hadal, S. J. Duncan, 'Surface Damage Behavior During Scratch Deformation of Mineral Reinforced Polymer Composites', *ActaMater.*, 52 (2004) 4363–4376.
56. Fouad Attar, Thomas Johannesson, 'Adhesion evaluation of thin ceramic coatings on tools steel using the scratch testing technique', *Surface and coatings Technology*, 78 (1996), 87-102.
57. D.S. Rickerby, 'A review of the methods of measurements of coating substrate adhesion', *Metallurgical Coatings- Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference*. San Diego, California, USA. April 11-15 (Krutemat R.C., Ed.), Elsevier Applied Science, London, Volume I (1988) 541-558
58. P.R.J. Guevin, 'State-of-the-art instruments to measure coating hardness', *J. Coat. Technol.* 67 (840) (1995) 61-65.
59. T. Triplett, 'Two-component: the magic's in the mix, Ind'. *Paint Powder* 72 (4) (1996) 34-37.
60. F. Ramsteiner, T. Jaworek, M. Weber, S. Forster, 'Scratch resistance and embrittlement of coated polymers', *Polym. Test.* 22 (2003) 439-451.
61. B.J. Briscoe, E. Pelillo, S.K. Sinha, 'Scratch hardness and deformation maps for polycarbonate and polyethylene', *Polym. Eng. Sci.* 36(24) (1996) 2996-3005.
62. B.J. Briscoe, E. Pelillo, F. Ragazzi, S.K. Sinha, 'Scratch deformation of methanol plasticized poly (methylmethacrylate) surfaces', *Polymer* 39(11) (1998) 2161- 2168.
63. B.H. Stuart, B.J. Briscoe, 'Scratch hardness studies of poly (ether ether ketone)', *Polymer* 37(17) (1996) 3819-3824.
64. P.Z. Wang, I.M. Hutchings, S.J. Duncan, L. Jenkins, 'Quantitative characterization of scratch damage in polypropylene (TPO) for automotive interior applications', *SAE Transactions*, International Congress and Exposition Detroit, Michigan 1999-01-0243 (1999) 134-150.
65. B.J. Briscoe, A. Delfino, E. Pelillo, 'Single-pass pendulum scratching of poly(styrene) and poly(methylmethacrylate)', *Wear* 225-229 (1) (1999) 319-328.

66. O. Vingsbo, S. Hogmark, 'Single-pass pendulum grooving- a technique for abrasive testing', *Wear*, 100 (1984) 489-502.
67. Y.N. Liang, S.Z. Li, D.F. Li, S. Li, 'Some developments for single-pass pendulum scratching', *Wear* 199 (1996) 66-73.
68. B. Lamy, 'Effect of brittleness index and sliding speed on the morphology of surface scratching in abrasive or erosive processes', *Tribol. Int.*, 17(1) (1984) 35- 38.
69. B.Y. Du, M.R. Vanlandingham, Q.L. Zhang, T.B. He, 'Direct measurement of plowing friction and wear of a polymer thin film using the atomic force microscope', *J. Mater. Res.* 16(5) (2001) 1487-1492.
70. E. Hamada, R. Kaneko, 'Micro-tribological evaluations of a polymer surface by atomic force microscopes', *Ultramicroscopy* 42-44 Part A (1992) 184-190.
71. Y.C. Han, S. Schmitt, K. Friedrich, 'Nanoscale indentation and scratch of short carbon fiber reinforced PEEK/PTFE composite blend by atomic force microscope lithography', *Appl. Compos. Mater.* 6 (1) (1999) 1-18.
72. P. Bertrand-Lambotte, J.L. Loubet, C. Verpy, S. Pavan, 'Understanding of automotive clearcoats scratch resistance', *Thin Solid Films* 420-421 (2002) 281-286.
73. S.R. Kim, J.S. Song, Y.J. Choi, J.H. Kim, 'Preparation of hard coatings on polycarbonate substrate by high frequency ion beam deposition using CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> gases', *Mater. Res. Soc. Symp.–Proc.* 504 (1997) 265-270.
74. Blackman, G.S., Lin, L., and Matheson, R.R., 'Micro-Mechanical Characterization of Mar Behavior of Automotive Topcoats: Micro and Nano-Wear of Polymeric Materials', *Proc. Polym. Prep. (Am. Chem. Soc., Div. Polym. Chem.)*, 39 (2) (1998) 1224-1225.
75. A.C.-M. Yang, T.W. Wu, 'Abrasive wear and craze breakdown in polystyrene', *J. Mater. Sci.* 28 (1993) 955-962.
76. P. Leroux, A. Raveh, J.E., L. Martinu, 'Mechanical properties of plasma deposited functional coatings determined by microscratch measurements', *Proceedings, Annual Technical Conference – Society of Vacuum Coaters* (1993) 472-477.
77. Micro Photonics Inc., Micro Scratch Tester (MST), July 2003, <http://www.microphotonics.com/mst.html>.
78. CSM Nano Scratch Tester (NST), July 2003, <http://www.microphotonics.com/nst.html>.
79. MTS Systems Corporation, Nano Indenter® XP, July 2003, [http://www.mts.com/nano/nano\\_indenter\\_xp.htm](http://www.mts.com/nano/nano_indenter_xp.htm).

80. MTS Systems Corporation, New Nano Indenter® XPW, July 2003, <http://www.mts.com/nano/xpw.htm>.
81. Hysitron Inc., TriboIndenter® Nanomechanical Test Instrument, July 2003 [http://www.hysitron.com/docs/sell%20sheets/new\\_triboindenter.htm](http://www.hysitron.com/docs/sell%20sheets/new_triboindenter.htm).
82. Strojny, X. Xia, A. Tsou, W. W. Gerberich, 'Techniques and considerations for nanoindentation measurements of polymer thin film constitutive properties', *J Adhesion Sci. Technol.*, 12 (12) (1998) 1299-1321.
83. <https://www.interface-z.fr/pronfiture/contact/253-ultraforce-poids-legers.html>
84. S. B. Djelloul Saiah and A. B. Stambouli, 'Prospective analysis for a long-term optimal energy mix planning in Algeria: Towards high electricity generation security in 2062', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73 (2017) 26–43.
85. Z. Madaoui, M. Mendas, H. Zahloul, S. Benayoun, 'Scratch Resistance of Paints Degraded by Arid Saharan Environment's. *Prog. Color Colorants Coat.*, 11 (2018), 233-240.
86. U. Schulz, V. Wachtendorf, T. Klimmasch, P. Alers, 'The influences of weathering on scratches and on scratch and mar resistance of automotive coatings'. *Progress in Organic Coatings*, 42 (2001) 38–48.
87. Jones FN, Shen W, Smith SM, Huang Z, Ryntz RA. 'Studies of microhardness and mar resistance using a scanning probe microscope'. *Pro Org Coat*, 34 (1998) 119–129.
88. Lőrinczová and C. Decker, 'Scratch resistance of UV-cured acrylic clearcoats', *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, 89 (2006) 99–192.
89. H. Afifi, E. Hasan. 'Annealing effect on microhardness and elastic constants of PMMA', *Polym. Plast. Technol.*, 42 (2003) 543–554.
90. M. Barletta, A. Gisario, L. Lusvardi, G. Bolelli, G. Rubino, 'On the combined use of scratch tests and CLA profilometry for the characterization of polyester powder coatings: Influence of scratch load and speed', *Applied Surface Science*, 254 (22) (2008) 7198–7214.
91. F. P Bowden, D. Tabor, 'friction and lubrication of solids', Clarendon Press, Oxford, 1950
92. MENDAS Mohammed, indentation et rayage des matériaux homogènes et hétérogènes, thèse de doctorat ès sciences, Soutenue en 2009 à l'IGCMO.
93. MEZLINI Salah, étude de l'usure par abrasion d'alliages d'aluminium, thèse de doctorat, Soutenue en 2003, à ECL.

94. Anne-Françoise, Gourgues-Lorenzon, Jean-Marc Haudin, 'Matériaux pour l'ingénieur', Livre, École des Mines, 2006.
95. Finnie, I. 'Some Reflections on the Past and Future of Erosion', *Wear*, 186/187 (1996) 1–10.
96. A. W. Ruff, S. M. Wiederhorn, 'Erosion by Solid Particle Impact, In: Preece, C. M. (ed.), *Treatise on Materials Science and Technology*, 16(1979) 69–125, Academic Press, New York.
97. C. M. Preece, N. H. macmillan, 'Erosion', *Annual Review of Materials Science*, 7 (1977) 95–122.
98. B. Lawn, 'Fracture of Brittle Solids – Second Edition', Cambridge University press, Cambridge, United Kingdom (1993)
99. Y.I. Oka, S. Mihara, T. Yoshida, 'Impact-Angle Dependence and Estimation of Erosion Damage to Ceramic Materials Caused by Solid Particle Impact', *Wear*, 267 (2009) 129- 135.
100. I. Kleis, 'Probleme der Bestimmung des Shrahl verschleisses bei Metallen', *Wear*, 13(1969) 199–215.
101. A. K. Cousen, I. M. Hutchings, J. E. Field, N. S. Comey, (eds.). *Proc. 6th Int. CM on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, (1983) Paper 41.
102. Venugopal Reddy, A. And Sundarajan, G. Erosion Behaviour of Ductile Materials with a Spherical Non-friable Erodent, *Wear*, 111(1986) 313–323.
103. Tilly, G. P. Erosion Caused by Airborne Particles, *Wear*, 14 (1969) 63–76,
104. J. Zahavi, G. F. Schmitt, 'Solid Particle Erosion of Reinforced Composite Materials', *Wear*, 71 (1981) 179–190.
105. N. Adjouadi, 'Influence de l'Etat de Surface des Pare-Brises sur la Visibilité des Conducteurs', Thèse de doctorat en science, (2015) IOMP, ufa sétif.
106. G. P. Tilly, W. Sage, 'The Interaction of Particle and Material Behaviour in Erosion Processes', *Wear*, 16 (1970) 447–465.
107. T. H. Tsiang, 'Sand Erosion of Fiber Composites: Testing and Evaluation, In Chamis', C. C. (ed.), *Test Methods for Design Allowable for Fibrous Composites*, (ASTM) STP I003, Philadelphia, 2 (1989)55–74.
108. P.-J. Mathias, W. Wu, K. C. Goretta, L. J. Routbort, D. P. Groppi, K. R. Karasek, 'Solid Particle Erosion of a Graphite-fiber Reinforced Bismaleimide Polymer Composite', *Wear*, 35 (1989) 161–169.



109. A. M. Latifi, 'Solid Particles Erosion in Composite Materials', Masters Thesis, Wichita State University (1987).
110. K. R. Karasek, K. C. Goretta, D. A. Helberg, J. L. Routbort, 'Erosion in bismaleimide polymers and bismaleimide polymercomposites', *J. Mater. Sci. Lett.*, 11 (1992)1143–1144.
111. Tilly, G. P. 'The Erosion of Ductile Metals by Spherical Particles', *Wear*, 14 (1969) 241–248.
112. Arnold JC and Hutchings, IM. 'Mechanisms of erosion of unfilled elastomers by solid particle impact'. *Wear of Materials: International Conference on Wear of Materials*. (1989)99-107.
113. Nirmal Shankar Sigamani. 'Characterization of polyurethane at multiple scales for erosion mechanisms under sand particle impact. Thesis Master of Science. 2010
114. Finnie IA. 'Erosion of surfaces by solid particles'. *Wear*; 3 (1960)87–103.
115. Sheldon, G. L. 'Similarities and Differences in the Erosion Behavior of Materials', *Trans. ASME J. Basic Engr.*, 92(1970) 619–626.
116. J.E. Goodwin, W. Sage, G.P. Tilly, 'Study of Erosion by Solid Particles', *Proc. Inst. of Mech. Eng. (London)*, 184 (1969) 279-292.
117. Smeltzer C. E, Gulden M. E and Compton W. A, 'Mechanisms of material removal by impacting dust particles', *J. Basic Eng.*, 92(1970) 639-654.
118. S.yerramareddy, S.Bahadur, 'Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V', *Wear*, 142 (1991)253-263.
119. I.Finnie, G.R.Stevick, J.R.Ridgely, 'The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles', *Wear*, 152 (1992) 91-98.
120. C.-K Fang, T. H Chuang, 'Surface morphologies and erosion rates of metallic building materials after sandblasting', *Wear* 230(2)1999156-164.
121. Raask E. 'Tube erosion by ash impact'. *Wear*; 13 (1969)301–315.
122. M. I. Hutchings, 'Tribology : Friction and wear of engineering materials', london : CRC Press, 1992
123. G. Carter, I. J. Bevan, I. V. Katardjiev, and M. J. Nobes, 'The erosion of copper by reflected sandblasting grains', *Materials Science and Engineering: A* 132(1991) 231-236.
124. K. Wellinger, H. vetz, Gleit-Spül , Strahl verschleiss Prüfung, "Wear". 1 (1957-58) 225-231.

125. Sheldon G.L, 'Similarities and differences in the erosion behavior of materials'. Trans. ASME, J. Basic Eng., Ser. D. 92 (1970) 619–626.
126. P. R. Sundararajan, 'Conformational features of the carbosilane polysila propylene and comparison with polypropylene', *Macromolecules*, 23(1990) 3179–3183.
127. M. Karim, S. Naamane, C. Delord A. Bennouna, 'Laboratory simulation of the surface erosion of solar glass mirrors', *Solar Energy*, 118 (2015)520-532.
128. S. Caron, 'Accelerated aging of thick glass second surface silvered reflectors under sandstorm conditions', Master Thesis, European Solar Engineering School, 2011.
129. M. Magdich, 'Durability in Desert Environments', *Eco Guardian, Global CSP & PV Guardian*. (2011).
130. Y. Gachon, A. Vannes, , G. Farges, , M.Sainte Catherine, I. Caron, G. Inglebert, 'Study of Sand Particle Erosion of Magnetron Sputtered Multilayer Coatings', *Wear*, 233-235(1999)263-274.
131. E.G. Collier, 'Development and use of a dust storm simulation chamber to evaluate solar concentrator degradation as characterized by Loss in reflectivity', Master Thesis, Texas Tech University, (1980).
132. D. Jianxin, L. Lili, L. Jianfeng, D. Mingwei, Y. Xuefeng, 'Development of Sic/(W,Ti) C Gradient Ceramic Nozzle Materials for Sand Blasting Surface Treatments', *Intern. Jour. Of Refractory Metals & Hard Materials*, 25 (2007)130-137.
133. Marouani abdelhak, 'Etude des caractéristiques physiques de couches mince à base d'oxydes métalliques déposés par voie sol-gel', Thèse de doctorat en sciences, (2018).
134. Bouaziz, 'Etude des Propriétés d'un Verre Sodo-Calcique Erodé avec du Sable de Ouargla', Mémoire de Magister, IOMP, UFA Sétif, (2004).
135. T. Mahdaoui, 'Etude des Défauts Générés par Impacts de Sable et leurs Influences sur la Lumière Parasite: Application aux Pare-Brises', Thèse de doctorat d'état, domp - ufasétif, 2007.
136. C. Bousbaa, M.A. Madjoubi, Z. Hamidouche, N. Bouaouadja, 'Effects of Annealing and Chemical Strengthening on Soda Lime Glass Erosion Wear by Sand Blasting'. *J. Eur. Ceram. Soc.* 23 (2003) 331–343.
137. Demirci M., M.Bağci. 'Investigation of automotive primer and basecoat paint surface's adhesion by solid particle erosion'. *AIP Conference Proceedings*. (2018)
138. Mustafa Kaplan, Mesut Uyaner, Egemen Avcu, Yasemin yildiran Avcu, Abdullah Cahit Karaoglanli. 'Solid particle erosion behavior of thermal barrier coatings

produced by atmospheric plasma spray technique'. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. (2018)

139. Finnie I., G.R. Stevick, J.R. Ridgely, 'The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles', *Wear* 152 (1992) 91–98.
140. L. Lapidès, A. Levy, 'The halo effect in jet impingement solid particle erosion testing of ductile metals', *Wear*, 58 (1980) 301–311.

---

# Annexes

---

## Annexe 1

### DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE MICRORAYAGE REALISE

#### 1. Présentation générale

On peut distinguer trois parties dans ce dispositif. La partie informatique permet de commander le mouvement des moteurs pas à pas et d'introduire les conditions opératoires de l'essai de rayage. Ceci se réalise par l'intermédiaire d'un logiciel développé sous l'environnement Arduino UNO pour Windows.

La partie mécanique est constituée d'un ensemble de tables de déplacement horizontal et vertical, des capteurs de forces normale et tangentielle, ainsi que divers éléments de fixation de l'échantillon et de l'indenteur. La commande des tables de déplacement et l'acquisition des forces appliquées sont effectuées par ordinateur grâce à une interface de des cartes électroniques incorporées du boîtier de l'ordinateur.

Les solutions technologiques de la partie mécanique sont constituées d'une table sur l'axe horizontal pour la fixation de l'échantillon pendant le rayage, elle est entraînée par un moteur pas à pas. Un chariot sur l'axe vertical actionné par un moteur pas à pas est destiné pour entraîner l'indenteur pendant l'essai rayage.



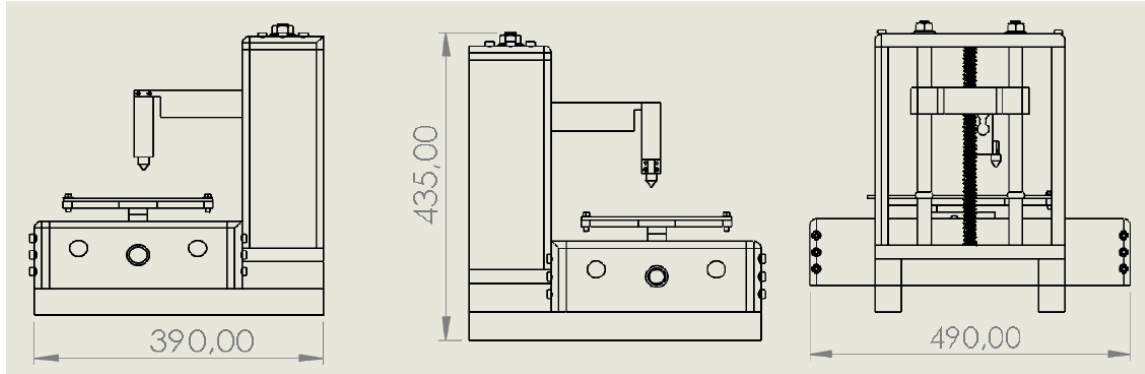
**Figure 1** Machine de rayage réalisée.

Tout d'abord, il est important que la surface de l'échantillon soit parallèle à la direction de déplacement de la table de rayage sur l'axe X. Pour ce faire, il suffit de placer un comparateur sur la machine et mettre la table sur l'axe X en marche, l'inclinaison de la

surface de l'échantillon peut être réglée grâce à quatre vis placées dans la table porte échantillon pour qu'elle soit parallèle à l'axe horizontal X.

## 2. Dimensions extérieures de la machine de microrayage

Les dimensions de la machine de microrayage sont illustrées dans la figure 2 suivante :



**Figure2** Dimensions extérieures de la machine de microrayage.

## 3. Description des éléments mécaniques constitutifs

La machine de microrayage est constituée de deux grandes parties : partie supérieure et partie inférieure. Les deux parties sont des chariots qui contiennent des panneaux horizontaux et transversaux, moteurs pas à pas, tiges filetées, axes de guidage, capteurs de forces et organes porte échantillon et indenteur. Chacune des deux parties est composée d'une partie mécanique et une autre électronique. La plupart des éléments constituant la machine sont en acier.

### 3. 1. PARTIE MECANIQUE :

#### 3. 1. 1. Vis d'entraînement trapézoïdal

L'utilisation de la vis de type trapézoïdal avec un écrou fixé sur le chariot (Figure 3) est la solution utilisée pour l'entraînement des chariots de la machine fabriquée. Les deux vis sur les axes X et Z, permettant de déplacer l'indenteur et l'échantillon dans les deux directions (quatre sens), grâce à la rotation de la vis d'entraînement dans l'un ou l'autre sens, selon la direction désirée.

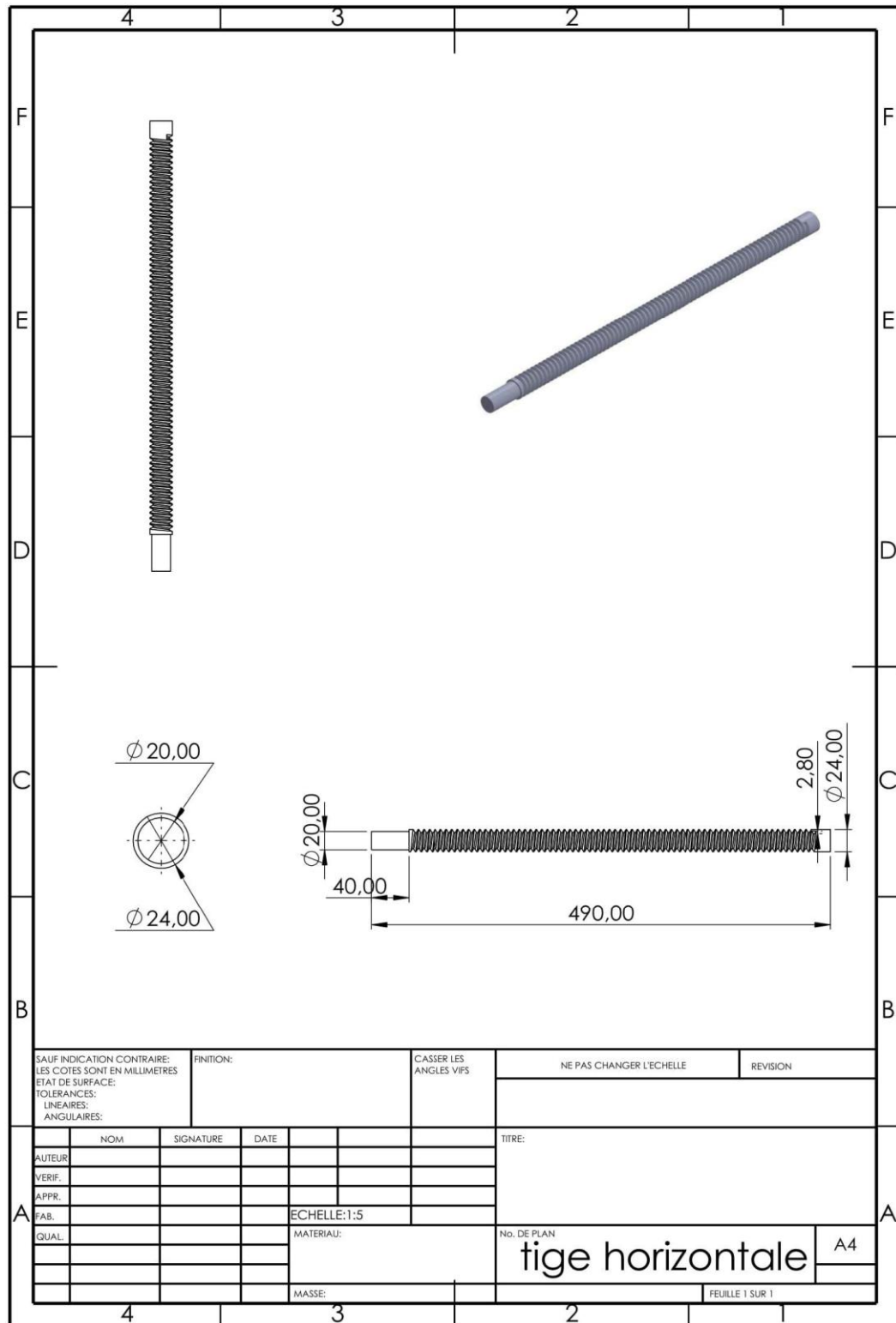
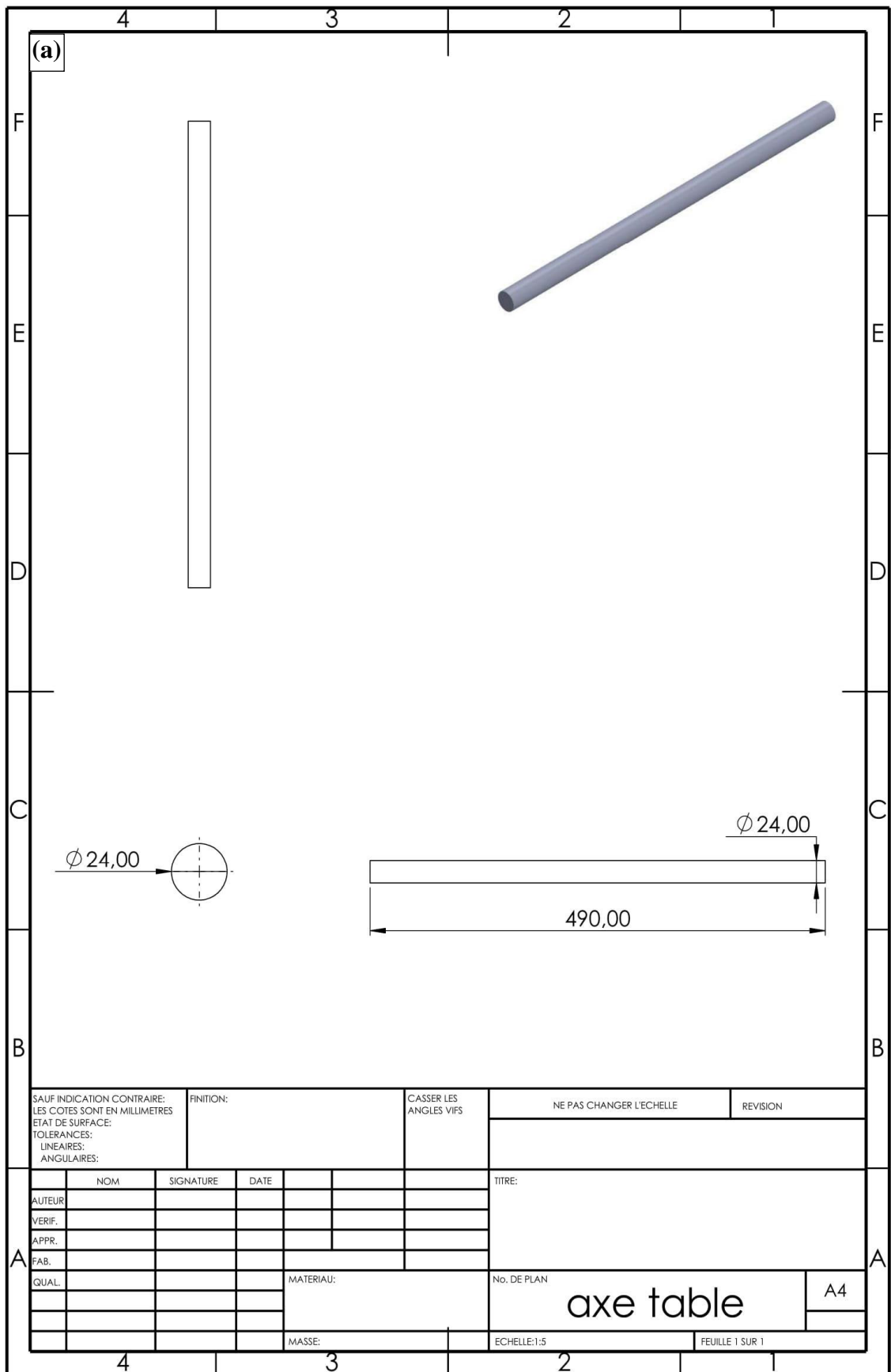


Figure 3 Vis trapézoïdale

### 3. 1. 2. Axes de guidage

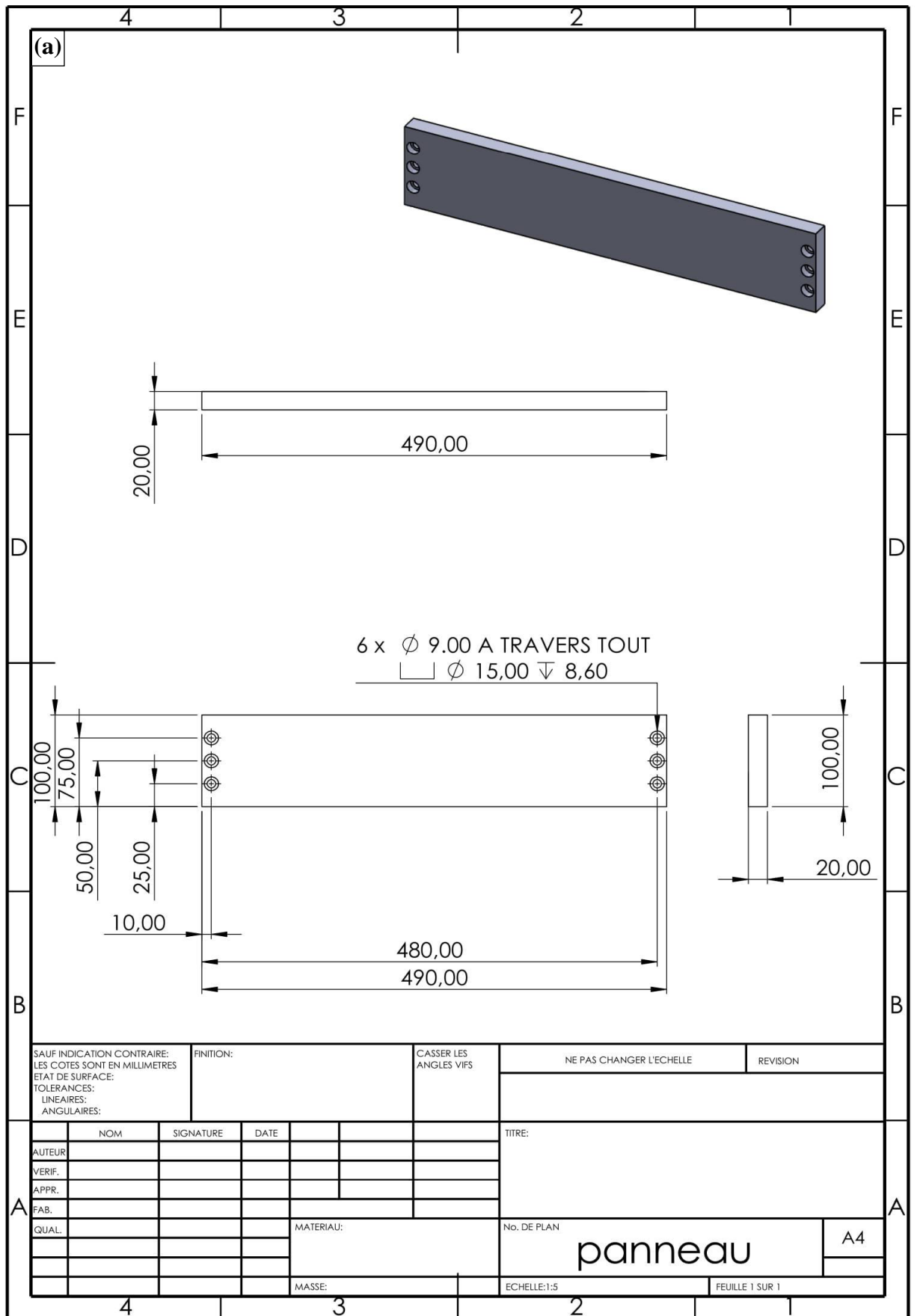
Les vis assurent le déplacement des chariots, ces derniers doivent être guidés et soutenus. C'est le rôle des axes de guidage linéaire (Figure 4). Les axes de guidage et la vis doivent absolument être parallèles entre eux et perpendiculaires à leurs points d'attache



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
AUTEUR		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
						axe table			
				MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	







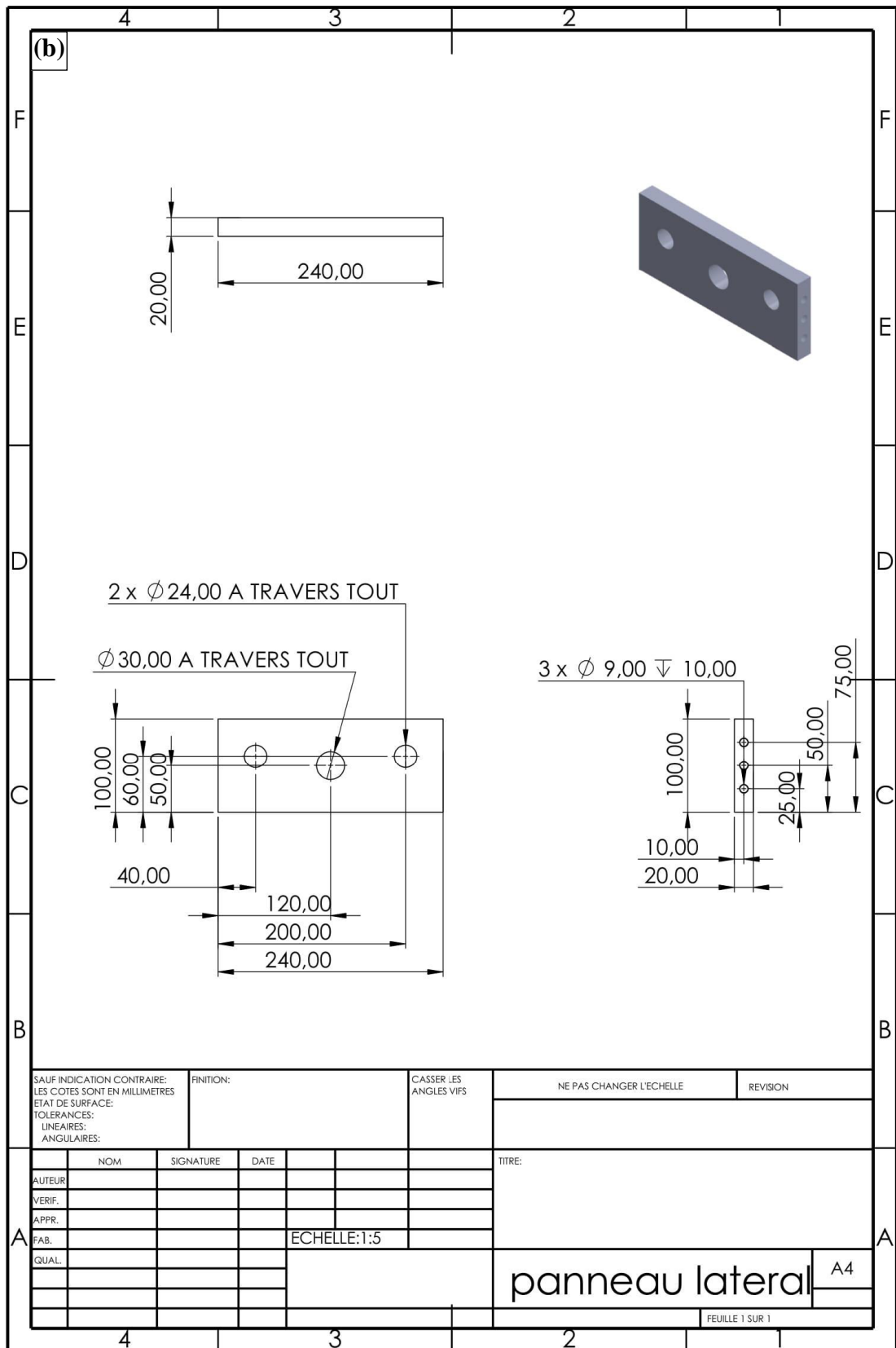
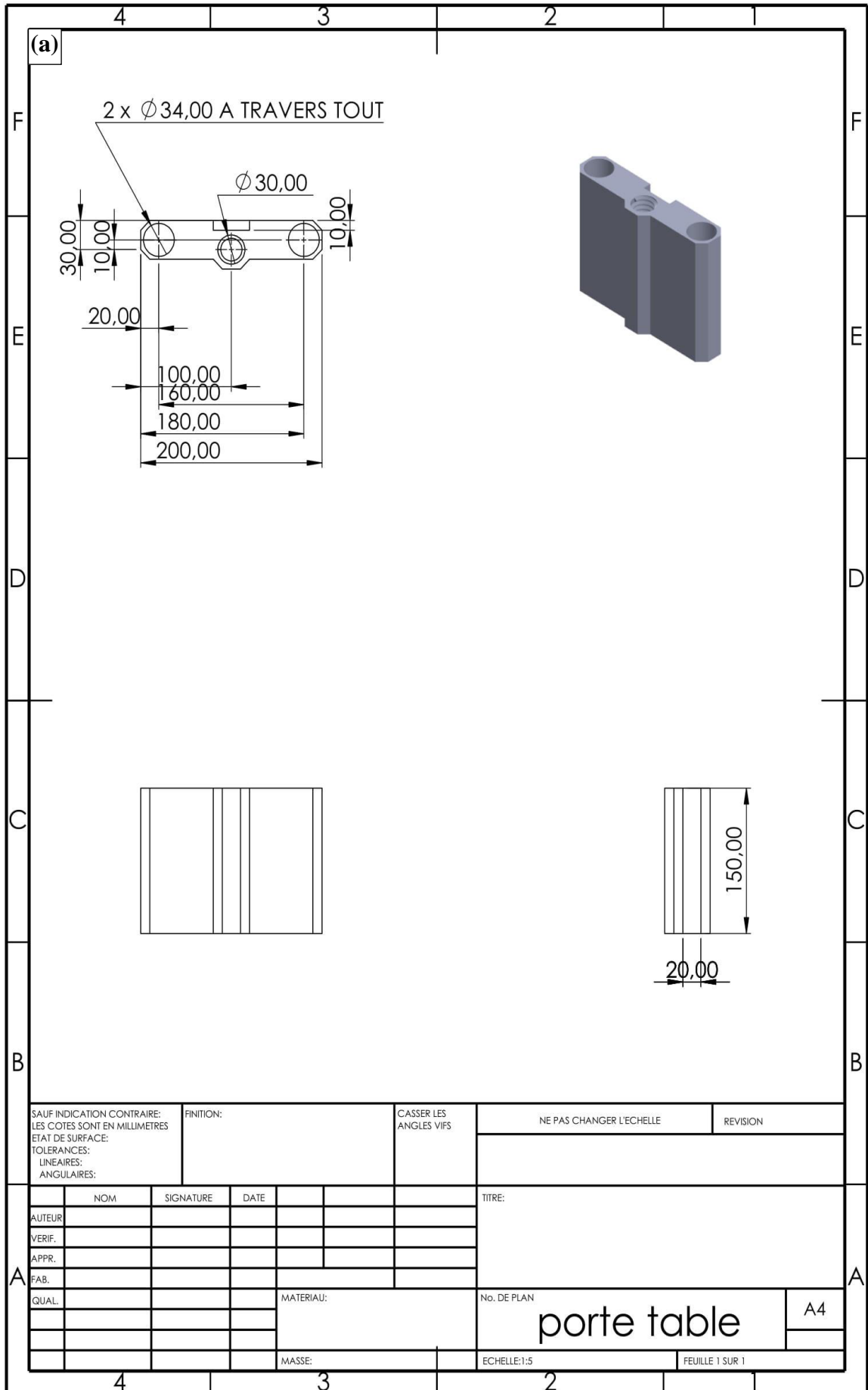


Figure 5 Panneaux réalisés : (a) horizontal, (b) transversal.

### 3. 1. 4. Coulissante

Est un organe qui contient l'écrou d'entraînement de la table et deux trous avec deux bagues en bronze qui permet le glissement de la table sur les axes (Figure 6).



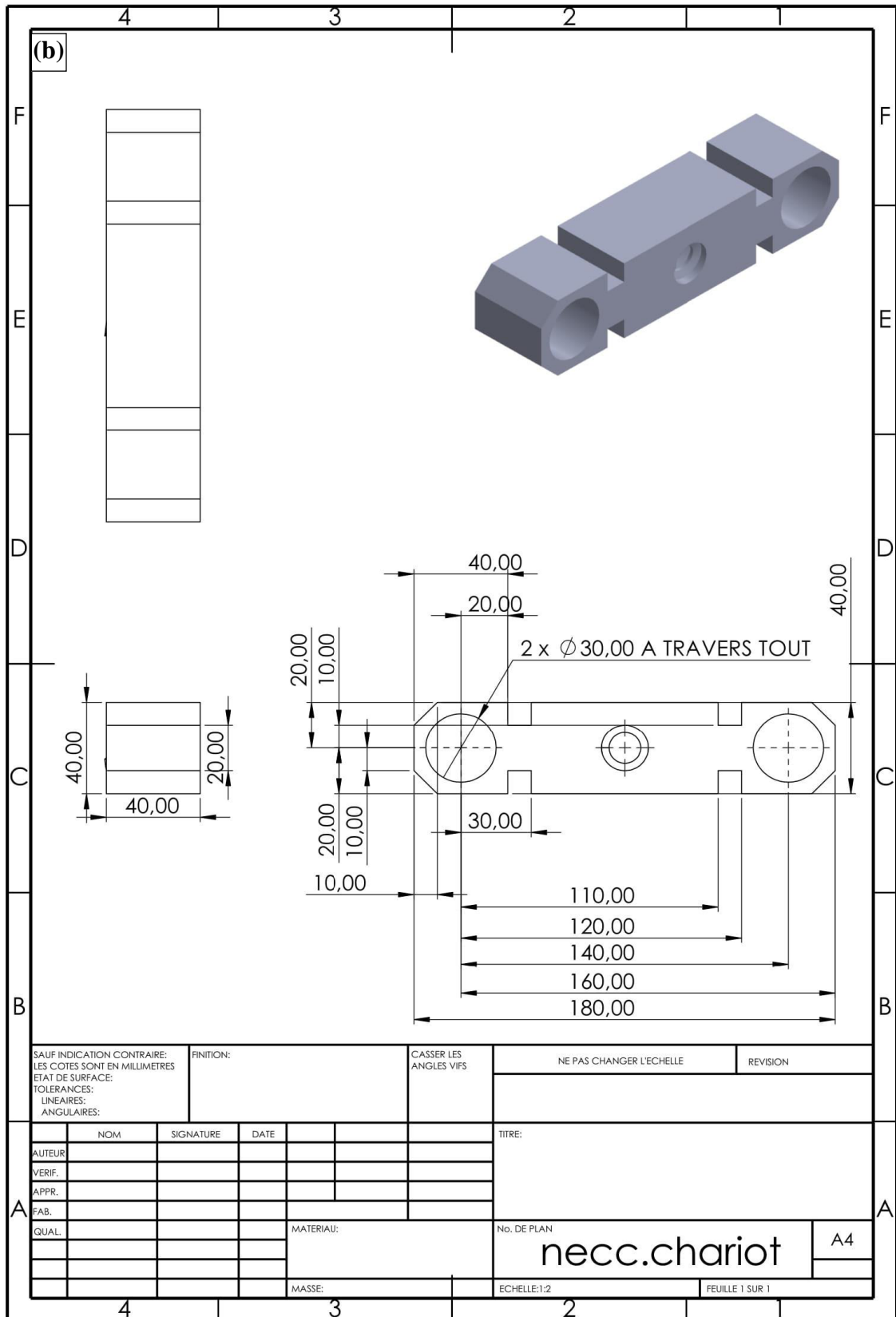
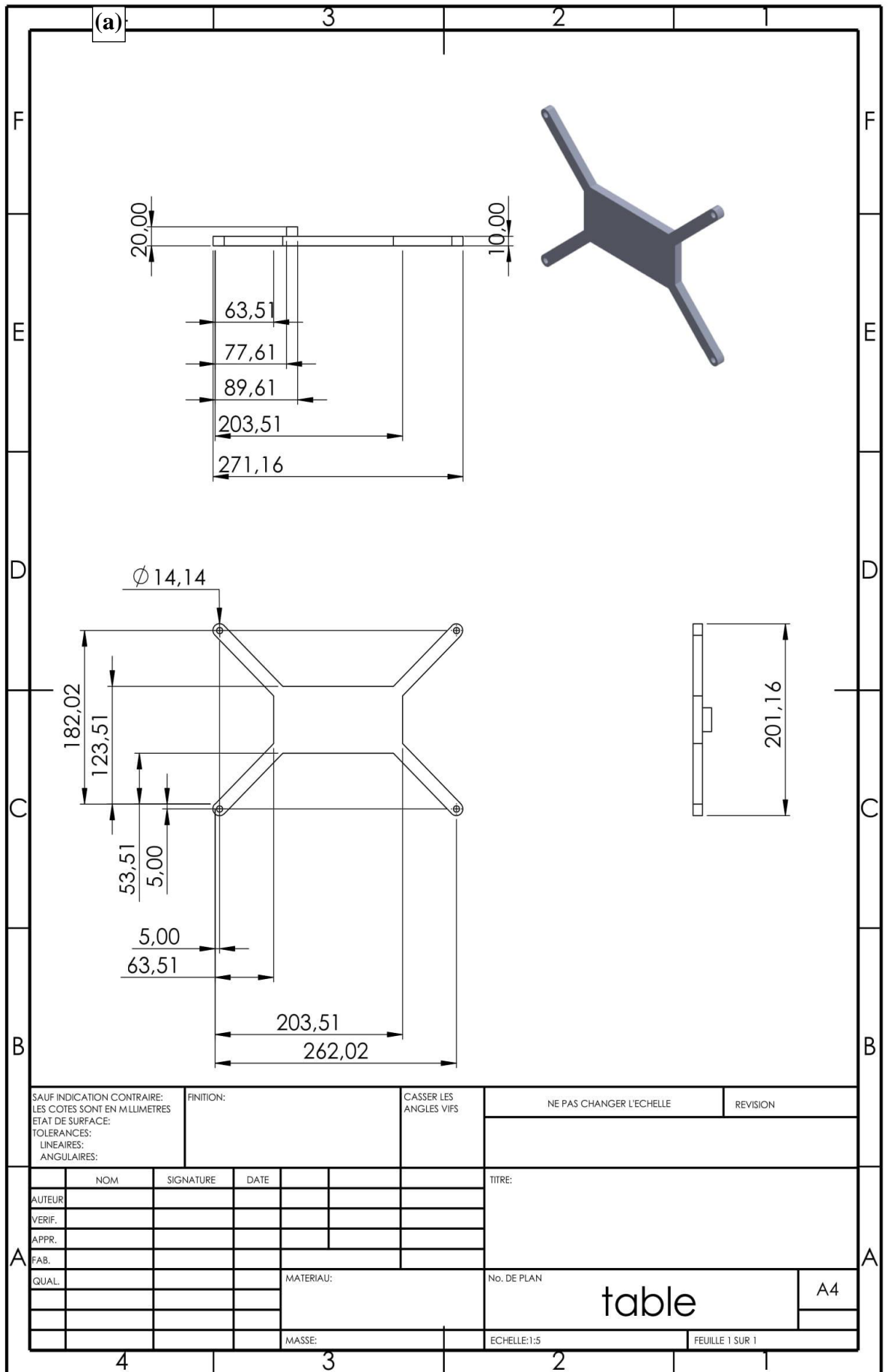
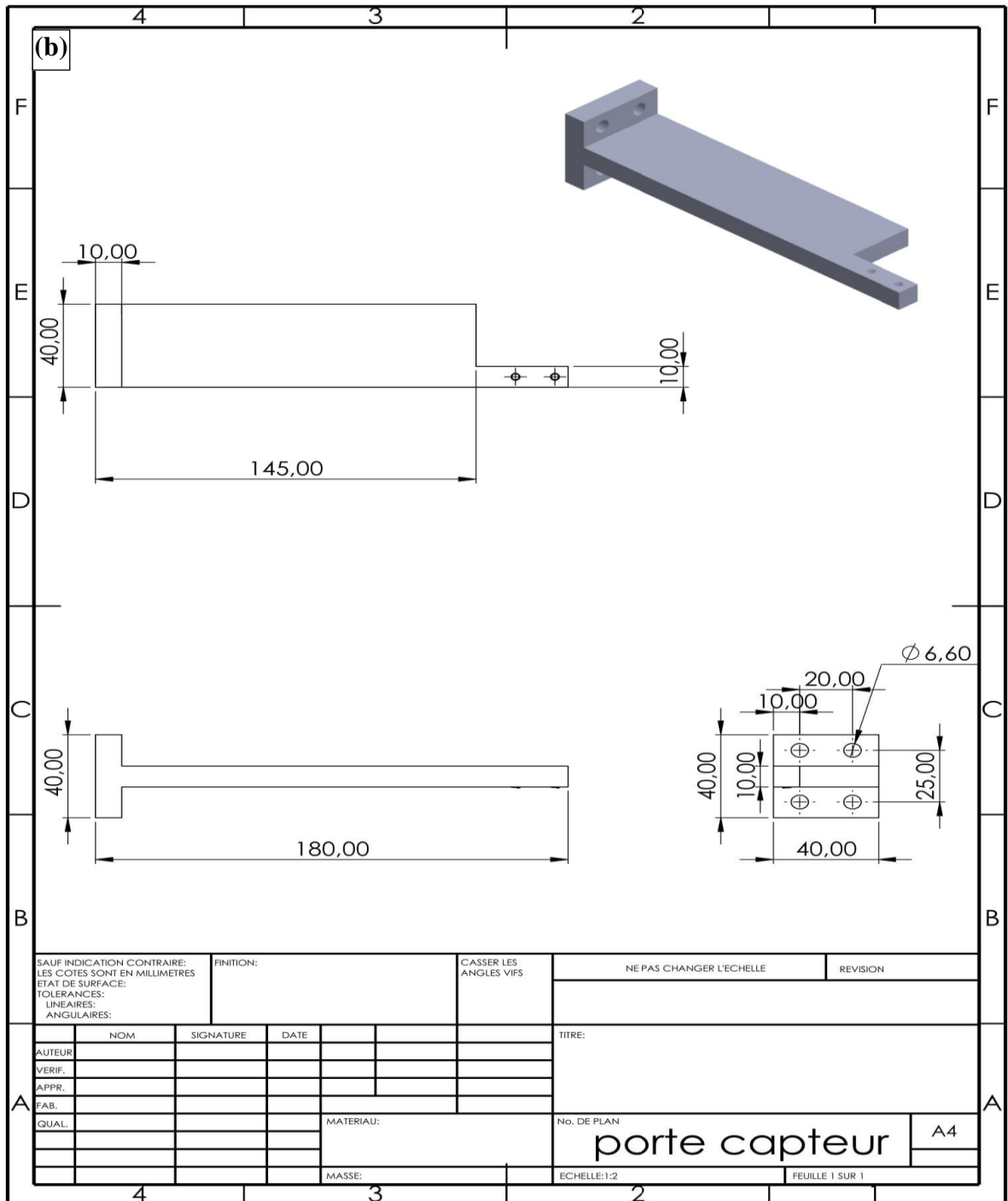


Figure 6 Coulissante : (a) pour chariot horizontal, (b) pour chariot vertical.

### 3. 1. 5. Balancier

Est un organe situé entre le porte échantillon et le capteur de force d'un côté et entre ce dernier et la coulissante d'un autre coté pour le chariot horizontal (Figure7-a).





**Figure 7** Le balancier : (a) pour chariot horizontal, (b) pour chariot vertical.

Ce balancier sert à répartir la charge sur le capteur de la force. Pour le chariot vertical, il est situé entre la coulissante et le capteur de force (Figure7-b).

### 3. 1. 6. Table porte-échantillon

Elle porte plusieurs trous filetés permettant la fixation de plusieurs types d'échantillons (Figure 8).

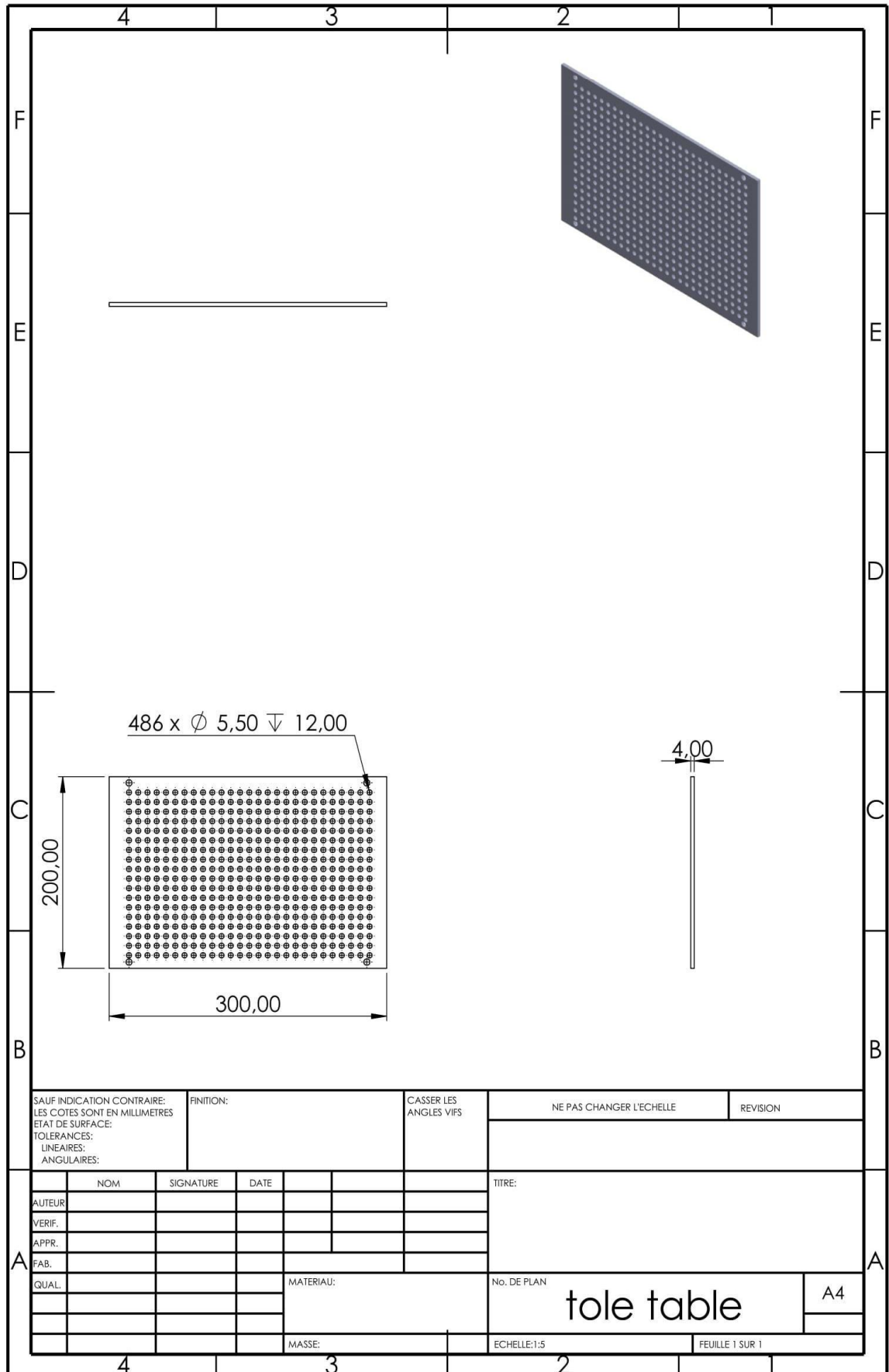
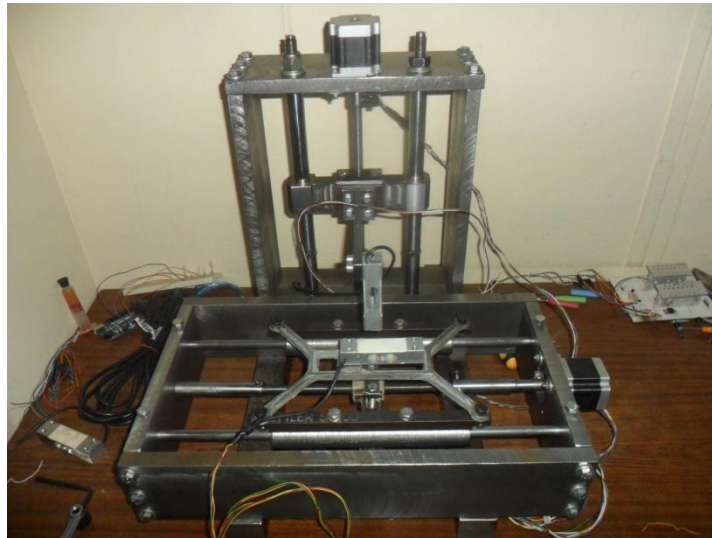


Figure 8 Table porte échantillon.



**3. 1. 7. Partie mécanique de la machine de microrayage assemblée**

L'assemblage des organes cités au-dessus forme le chariot horizontal qui porte l'échantillon et le chariot vertical porte indenteur (Figure 9)



**Figure9** Partie mécanique de la machine de microrayage.

**3. 2. PARTIE ELECTRONIQUE :****3. 2. 1. Capteurs de force**

C'est la partie la plus sensible de la machine, Il sert à mesurer la force appliquée sur l'échantillon. Deux capteurs de forces sont utilisés : l'un pour mesurer la force normale  $F_n$ , et l'autre pour mesurer la force tangentielle  $F_t$ . Ils sont fabriqués à partir d'un alliage d'Aluminium (Figure 10).

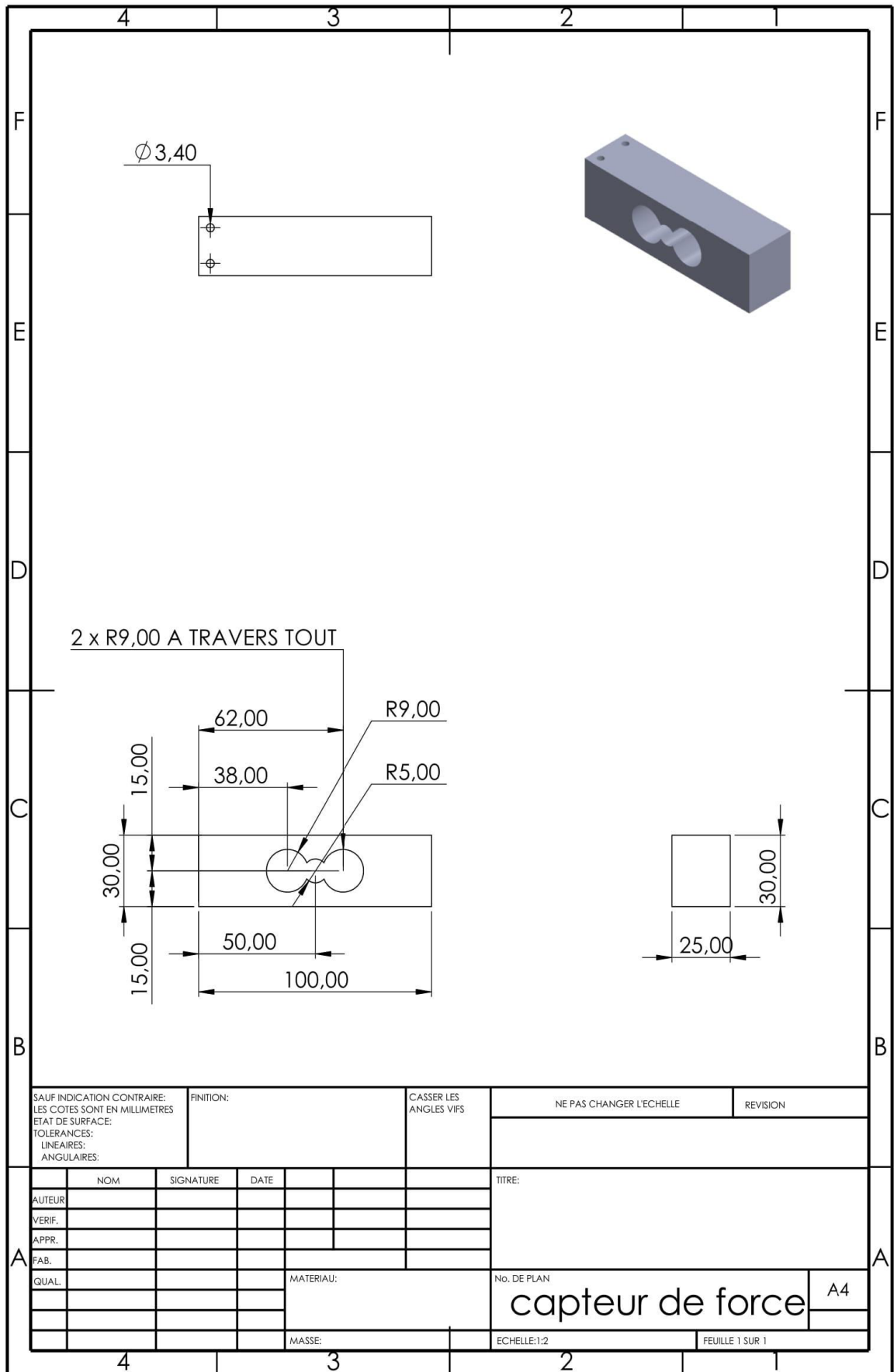
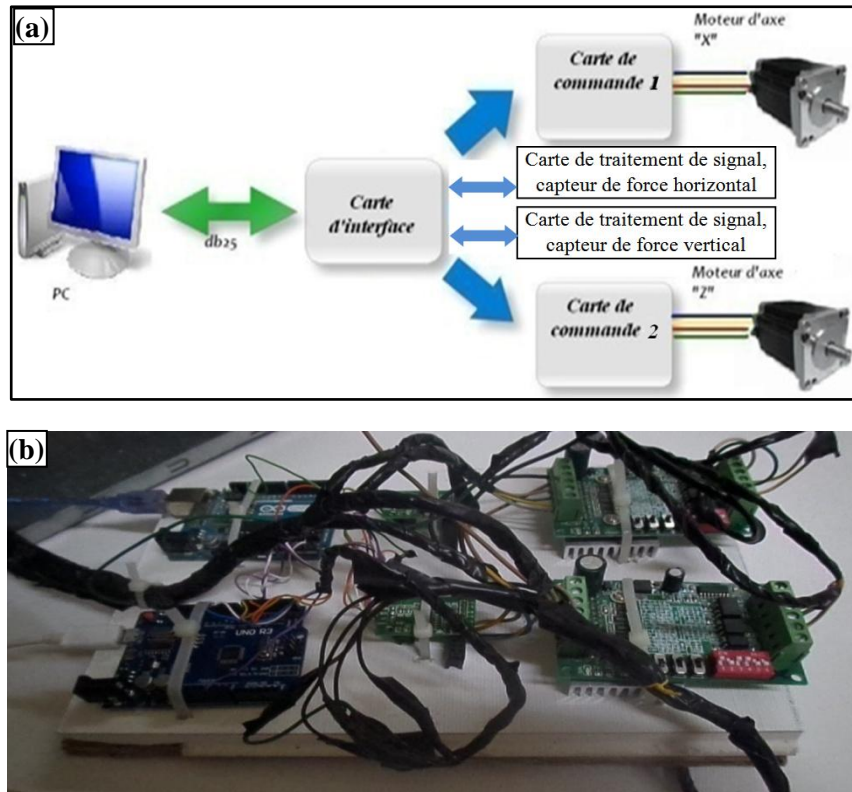


Figure10 Mise au plan du capteur de force utilisé.

### 3. 2. 2. Carte d'acquisition

Les moteurs pas à pas utilisés dans cette étude sont de marque NEMA 17. Ils sont très utilisés dans les applications mécaniques où l'on veut contrôler simplement la position ou la vitesse d'un système en boucle ouverte.

La machine est liée à un microordinateur via un port d'entrée-sortie dont les signaux issus de ce dernier sont envoyés vers les cartes de commande qui commandent la rotation des moteurs pas à pas à leurs tours (Figure11).



**Figure11**Partie électronique de la machine de microrayage: (a) Schéma explicatif de système de commande, (b) carte électronique assemblée.

### 3.3. Etalonnage des capteurs de forces :

Avant le lancement des essais de rayage, il est nécessaire d'étalonner les capteurs de forces. L'étalonnage est réalisé par plusieurs charges étalons calibrées. Elles sont placées sur la machine puis une mesure de ces charges est effectuée. L'opération d'étalonnage est effectuée pour chaque capteur séparément. La figure 12 présente l'étalonnage des capteurs de force normale et tangentielle :

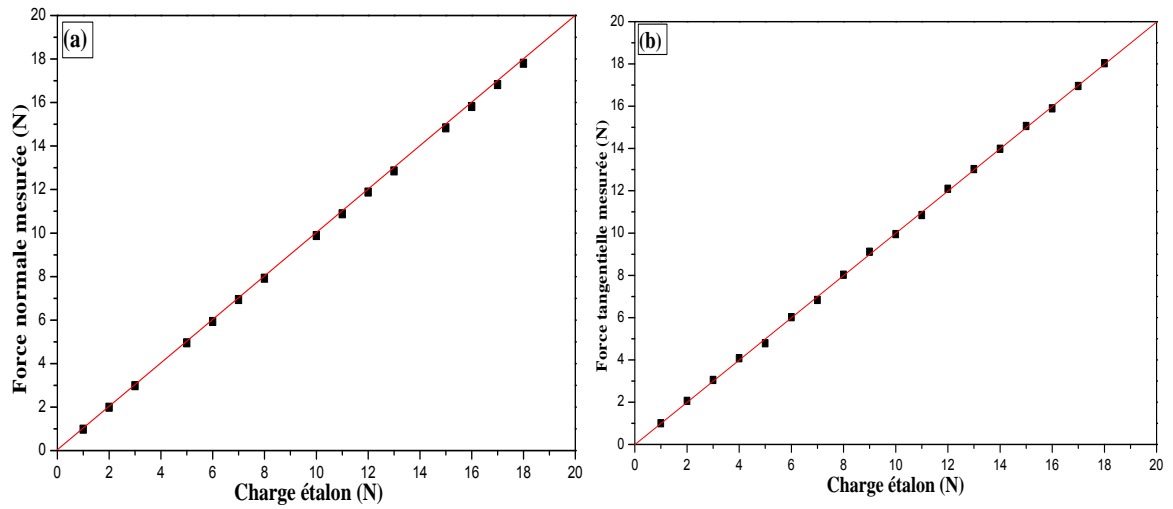


Figure 12 Etalonnage des capteurs de force : (a) normale, (b) tangentielle.

### 3. 4. Programme réalisé pour le contrôle des mouvements des moteurs et d'acquisition des signaux :

```

#define stepaxisx 7
#define diraxisx 6
#define stepaxisy 11
#define diraxisy 12
int a;
#define DELAY_TIME
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(stepaxisx, OUTPUT);
  pinMode(diraxisx, OUTPUT);
  pinMode(stepaxisy, OUTPUT);
  pinMode(diraxisy, OUTPUT);
}

void loop()
{
  Backx(2000);
  Backy(6000);
  Forwardx(2000);
  Forwardy(6000);
}

```

```

void Forwardx(int pluse)
{
    for(a=0;a<pluse;a++)
    {
        digitalWrite(diraxisx, LOW);
        digitalWrite(stepaxisx, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(stepaxisx, LOW);
        delay(10);
    }
}

```

```

void Backx(int pluse)
{
    for(a=0;a<pluse;a++)
    {
        digitalWrite(diraxisx, HIGH);
        digitalWrite(stepaxisx, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(stepaxisx, LOW);
        delay(10);
    }
}

```

```

void Forwardy(int pluse)
{
    for(a=0;a<pluse;a++)
    {
        digitalWrite(diraxisy, LOW);
        digitalWrite(stepaxisy, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(stepaxisy, LOW);
        delay(10);
    }
}

```

```

void Backy(int pluse)
{
    for(a=0;a<pluse;a++)
    {
        digitalWrite(diraxisy, HIGH);
        digitalWrite(stepaxisy, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(stepaxisy, LOW);
        delay(10);
    }
}

```

### 3.4.2. Acquisition des signaux

```

#include "HX711.h"
#include "Stepper.h"

// HX711.DOUT - pin #A1
// HX711.PD_SCK - pin #A0

HX711 scale(A4, A3); // parameter "gain" is omitted; the default value 128 is used by the library
HX711 scale1(A1, A0); // parameter "gain" is omitted; the default value 128 is used by the library

```

```
void setup() {
  float cal1=0;
  float cal2=0;
  Serial.begin(9600);
  scale.set_gain(128);
  scale1.set_gain(128);

  scale.set_gain(128);
  scale.read();
  scale.set_scale(2280.f);
  scale.tare();

  scale1.set_gain(128);
  scale1.read();
  scale1.set_scale(2280.f);
  scale1.tare();

  Serial.println("Readings:");
}

void loop() {
  scale.set_gain(128);
  scale1.set_gain(128);
  delay(700);
  float Ft = scale.get_units()*23;
  float Fn = scale1.get_units()*19;

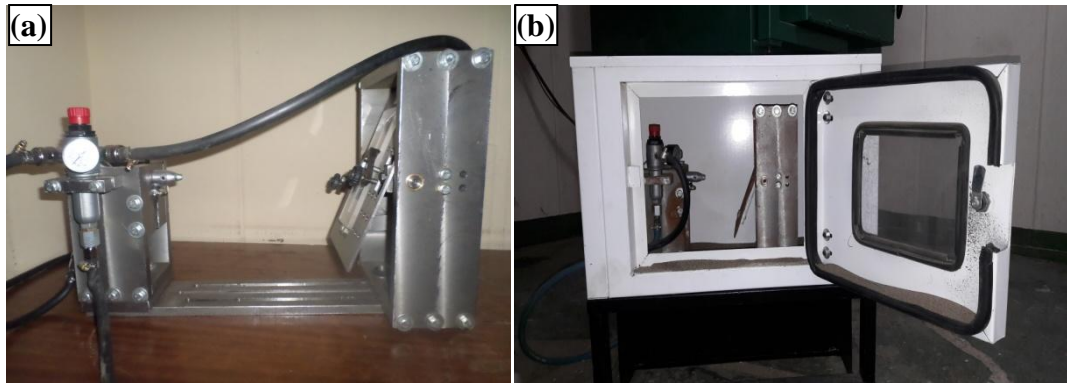
  Serial.print("\t Ft:\t");
  Serial.print(Ft, 3);
  Serial.print("\t Fn:\t");
  Serial.print(Fn, 3);
  Serial.print("\t Weight: \t");
  Serial.println((Ft+Fn), 1);
}
```

## Annexe 2

### DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'EROSION REALISE

#### 1. Construction de la machine

Dans le cadre de cette thèse, un banc d'essai d'érosion a été fabriqué au (LRM) et a été utilisé dans les essais d'érosion des peintures étudiées (Figure 1).



**Figure 1** Banc d'essai d'érosion réalisé: (a) sans capitonnage et réservoir de sable, (b) avec capitonnage et réservoir de sable.

#### 2. Partie mécanique

##### 2.1. Le porte échantillon

Le porte échantillon est prévu pour maintenir l'échantillon et pour l'incliner avec différents angles par rapport à l'axe de la buse de soufflage de particules abrasives (Figure 2). Le porte échantillon peut être disposé à des angles différents et il peut également être déplacé linéairement pour positionner à différente distance de la buse de sablage.



**Figure 2** Porte échantillon réalisé

## **2. 2. Porte pistolet de sablage et régulateur de pression**

Ce sont des panneaux réalisés pour la fixation de pistolet de sablage et de régulateur de pression d'air (Figure 3).



**Figure 3** Porte pistolet de sablage et régulateur de pression d'air utilisés

## **2. 3. Capitonnage et réservoir des particules abrasives**

Le capitonnage est un boîtier utilisé pour isoler le système de l'extérieur (Figure 4). Il sert pour le contrôle de la température et pour la récupération des particules abrasives ainsi qu'à la protection contre les grains abrasifs. La partie inférieure de la machine d'érosion est un réservoir des particules abrasives en acier et de forme triangulaire à l'intérieur.



**Figure 4** Capitonnage et réservoir des particules abrasives réalisés.

## **3. Partie pneumatique**

### **3. 1. Le pistolet de sablage**

Il contient deux entrées, la première pour l'air comprimé et la deuxième pour les particules solides (Figure 5). Les deux entrées se croisent dans une chambre de mixage.





**Figure 5** Pistolet de sablage avec son support.

### 3. 2. Régulateur de pression

Est un moyen utilisé pour varier la pression d'air à l'entrée de pistolet de sablage afin de pouvoir varier la vitesse des articles abrasives (Figure 6).



**Figure 6** Régulateur de pression

### 3. 3. Compresseur d'air

Un compresseur électrique est utilisé pour stocker l'air sous pression dans un réservoir.



**Figure 7** Compresseur et réservoir d'air.