

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Ferhat Abbas- Sétif 1**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Optique et Mécanique de Précision**

**Institut : Optique et Mécanique de Précision**

**Département : Mécanique**

**Spécialité : Mécanique des Matériaux**

**Mémoire de Master**

## **Etude de l'érosion d'un composite à renfort fibreux**

**Etudié par : FOURA Chahinez**

**Dirigé Par : Dr. MOUHOUBI Sabira**

**: Dr. LAOUAMRI Hind**

**Pr. MALOU Z. (Président)**

**Dr. ALI HELLAL A. (Examineur)**

**Soutenue le : 04/07/2023**

## Table des matières

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| REMERCIEMENT                                                 | ii  |
| Dédicace                                                     | iii |
| Résumé                                                       |     |
| <b>Erreur ! Signet non défini.</b>                           |     |
| Introduction générale                                        | 1   |
| Chapitre I : Matériaux composites                            | 3   |
| I.1 . Introduction                                           | 3   |
| I.2 . Matériaux composites                                   | 3   |
| I.3 . Classification des composites                          | 3   |
| I. 3. 1. Classification suivant la nature de la matrice      | 4   |
| I. 3. 2. Classification suivant la forme du renfort          | 4   |
| I.4 . Mise en œuvre des composites                           | 6   |
| I.5 . Utilisations des composites                            | 8   |
| I.6 . Matériaux composites et environnement                  | 9   |
| I. 6. 1. Impact des composites sur l'environnement :         | 10  |
| I. 6. 1. 1. . Composites biodégradables                      | 10  |
| I. 6. 1. 2. Recyclage des composites :                       | 11  |
| I. 6. 2. Impact de l'environnement sur le matériau composite | 11  |
| I. 6. 2. 1. La durabilité des composites                     | 12  |
| I. 6. 2. 2. Vieillissement des matériaux composites          | 12  |
| I.7 . L'impact d'érosion sur les matériaux composites        | 13  |
| I.8 . Conclusion                                             | 14  |
| Chapitre II : Erosion par des particules solides             | 3   |
| II. 1. Introduction                                          | 15  |
| II. 2. Définition                                            | 15  |
| II. 3. Principe d'EISP :                                     | 15  |
| II. 4. Paramètres d'érosion                                  | 16  |
| II. 4. 1. Angle d'impact :                                   | 17  |
| II. 4. 2. Vitesse d'impact des particules érosives :         | 18  |
| II.4.3. Forme et taille des particules érosives :            | 19  |
| II.4.4. Dureté de la cible et des particules :               | 20  |
| II. 5. Efficacité de l'érosion :                             | 21  |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| II. 6. Les principaux types de dispositifs de sablage :        | 22 |
| II.6. 1. Technique (jet impingement ou gras blast) :           | 22 |
| II.6. 2. Technique (recirculating loop) :                      | 22 |
| II.6. 3. Technique (whirling arm) :                            | 23 |
| II.6. 4. Technique (centrifugal Accelerator) :                 | 23 |
| II. 7. Conclusion :                                            | 24 |
| Chapitre III : Procédure expérimentale                         | 15 |
| III. 1 . Objectif de travail                                   | 25 |
| III.2. Matériaux utilisés :                                    | 25 |
| III.2.1. Jute                                                  | 25 |
| III.2.2. Résine :                                              | 26 |
| III.2.3. Sable :                                               | 26 |
| III.3. Méthode expérimentale :                                 | 28 |
| III. 3. 1. Élaboration du composite polyester/Jute :           | 28 |
| III.3.1.1. Préparation du renfort :                            | 28 |
| III.3.1.2. Préparation de la résine :                          | 28 |
| III.3.1.3. Elaboration du composite :                          | 29 |
| III.3.1.4. Découpage et polissage des échantillons :           | 30 |
| III. 3. 2. Sablage des échantillons :                          | 31 |
| III.4. Moyens de caractérisation :                             | 33 |
| III.4.2. Microscope optique :                                  | 33 |
| III.4.3. Balance                                               | 34 |
| III.4.4. Profilomètre :                                        | 34 |
| Chapitre IV : Résultats et discussions                         | 25 |
| IV.1. Introduction                                             | 36 |
| IV.2. Composite à fibre de jute unidirectionnel :              | 36 |
| IV. 2. 1. Observation des composites (macro et microscopiques) | 36 |
| IV. 2. 2. Taux d'érosion :                                     | 37 |
| IV. 2. 3. Mesure de la rugosité :                              | 39 |
| IV.3. Composite à fibre de jute bidirectionnel :               | 40 |
| IV. 3. 1. Observation des composites (macro et microscopiques) | 40 |
| IV. 3. 2. Taux d'érosion :                                     | 42 |
| IV. 3. 3. Mesure de la rugosité :                              | 43 |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| IV.4. Composite à fibre de verre :                             | 45 |
| IV. 4. 1. Observation des composites (macro et microscopiques) | 45 |
| IV. 4. 2. Taux d'érosion                                       | 46 |
| IV.4.3. Mesure de la rugosité :                                | 47 |
| Conclusion générale                                            | 48 |
| Références                                                     | 50 |

### Liste des figures :

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I. 1:Exemples de matériaux composites courants [3].                                                                                                              | 3  |
| Figure I. 2:Différentes familles de matrice [5]                                                                                                                         | 4  |
| Figure I. 3: Formes de renforts pour matériaux composites [6].                                                                                                          | 5  |
| Figure I. 4 : formes courantes de renforts fibreux [5].                                                                                                                 | 5  |
| Figure I. 5: principe de différents procédés en moule ouvert [9]                                                                                                        | 7  |
| Figure I. 6: principe de différents procédés en moule fermé [9].                                                                                                        | 8  |
| Figure I. 7: utilisations des composites dans l'aéronautique [10]                                                                                                       | 8  |
| Figure I. 8: utilisations des composites dans l'automobile [11]                                                                                                         | 9  |
| Figure I. 9: des voiles en composites [12].                                                                                                                             | 9  |
| Figure I. 10 : exemples de différentes applications des composites (a)une caravane (b) tubes pour plates-formes (c) supports de disjoncteurs (d) cellules d'habitation. | 9  |
| Figure I. 11 : effet d'érosion sur la surface [17].                                                                                                                     | 13 |
| Figure II. 1 : Principe de l'érosion [20].                                                                                                                              | 15 |
| Figure II. 2 : l'endommagement formé par impact de particules [20].                                                                                                     | 16 |
| Figure II. 3: Particule, cible et les paramètres opérationnels pour L'EIPS [25].                                                                                        | 16 |
| Figure II. 4 : Schéma montrant l'angle d'impact [26].                                                                                                                   | 17 |
| Figure II. 5 : l'influence de l'angle d'impact sur $E_r$ selon le type du matériaux [24]                                                                                | 17 |
| Figure II. 6 : Taux d'érosion en fonction rapport HP/HT [36].                                                                                                           | 20 |
| Figure II. 7 : Technique (jet impingement ou gras blast) [20].                                                                                                          | 22 |
| Figure II. 8 : Technique (recirculating loop) [20].                                                                                                                     | 23 |
| Figure II. 9 : Technique (whirling arm) [20].                                                                                                                           | 23 |
| Figure II. 10 : Technique (centrifugal Accelerator) [20].                                                                                                               | 24 |
| Figure III. 1 : Toile de jute naturelle.                                                                                                                                | 25 |
| Figure III. 2 : Particules de sable brute utilisé dans les essais de l'érosion.                                                                                         | 27 |
| Figure III. 3 : Pastille sable-résine époxy                                                                                                                             | 27 |

Figure III. 4 : (a) Presse à chaud (CARVER.3856-460), tissu de jute : (b) avant pressage et (c) après pressage.  
28

Figure III. 5 : Préparation des stratifiés. 30

Figure III. 6 : Dispositif créateur de vide. 30

Figure III. 7 : Une plaque composite élaborée 30

Figure III. 8 : (a) Ciaribon, (b) La polisseuse, (c) échantillons avant polissage, (d) échantillons après polissage. 31

Figure III. 10 : schéma de principe du dispositif de sablage utilisé. 32

Figure III. 11 : le Micro-duromètre. 33

Figure III. 12: Microscope optique OXION-Euromex. 34

Figure III. 13: Balance utilisée. 34

Figure III. 14: Profilomètres utilisés. 35

Figure VI. 1: Vue générale des composites UD avant et après sablage, pour différents angle d'impact. 36

Figure VI. 2 : Observations microscopiques des échantillons UD après sablage avec la taille  $\phi > 400\mu\text{m}$ . 37

Figure IV. 3 : Variation du taux d'érosion des composite UD en fonction de l'angle d'incidence pour les deux tailles de grains de sable ( $m = 200\text{gr}$ ). 38

Figure VI. 4 : Variation du taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différentes masse projetées. 38

Figure VI. 5 : Exemples de profils de la rugosité analysée d'un échantillon UD avant sablage ;  $R_t = 3.22\mu\text{m}$ .  
39

Figure VI. 6 : Variation de la rugosité totale en fonction de la masse projetée. 40

Figure VI. 7 : Vue générale des composites BD avant et après sablage, pour différents angle d'impact. 40

Figure VI. 8 : Observation microscopique des échantillons BD après sablage avec la taille  $\phi > 400\mu\text{m}$   $90^\circ$  41

Figure VI. 9 : Variation du taux d'érosion des composite BD en fonction de l'angle d'incidence pour les différentes masse projetées. 43

Figure VI. 10 : Exemples de profils de la rugosité d'un échantillon BD avant sablage. 44

Figure VI. 11: Photographies des composites FV avant et après sablage, pour différents angle d'impact 45

Figure VI. 12 : Micrographies des composites FV avant et après sablage, pour différents angle d'impact. 45

Figure VI. 13 : Variation du taux d'érosion des composite BD en fonction de l'angle d'incidence pour les deux tailles de grains de sable ( $m = 200\text{gr}$ ). 46

Figure VI. 14 : Variation du taux d'érosion des composite BD en fonction de l'angle d'incidence pour les différentes masse projetées 46

## Liste des tableaux

Tableau IV. 1 : Paramètres de sablage du composite BD. 42

Tableau IV. 2 : Valeurs moyennes de la rugosité en fonction des angles choisis, pour le composite BD. 44

Tableau IV. 3 : Rugosité mesurée des composites FV, suivant les angles de projection pour différentes masses projetées 47

## ملخص

لقد تم دراسة سلوك تآكل الجسيمات الصلبة لثلاثة مركبات مقواة بالألياف. تم تقييم تآكل المركبات في مختلف زوايا الاصطدام (30.60 و 90 درجة). الجسيمات المستخدمة في قياسات التعرية هي رمل طبيعي بقطر كسرين من (Ø < 400 ميكرومتر) و (400-600 ميكرومتر) وبسرعة تأثير 30 م/ث. أظهرت جميع المركبات المدروسة سلوك تآكل هش مع اقصى معدل تآكل بزوايا اصطدام 90 درجة. كتلة الرمل كان لها تأثير كبير على التآكل. تم فحص شكل الاسطح المتآكلة باستخدام الفحص المجهرى وقياسات السمات. تمت مناقشة اليات التآكل المحتملة.

**الكلمات المفتاحية:** تآكل الجسيمات الصلبة. المركبات المقواة بالألياف. زوايا الاصطدام. الفحص المجهرى.

## Résumé:

Le comportement d'érosion des particules solides de trois composites renforcés de fibres a été caractérisé. L'usure par érosion des composites a été évaluée à différents angles d'impact (30, 60 et 90°). Les particules utilisées pour les mesures d'érosion étaient du sable naturel avec des fractions de diamètre de ( $\varnothing < 400 \mu\text{m}$ ) et ( $\varnothing \in [400-600] \mu\text{m}$ ), et la vitesse d'impact de 30 m/s. Tout les composites étudiés ont montré un comportement d'érosion fragile, avec un taux d'érosion maximal à un angle d'impact de 90°. La masse de sable projetée a eu une influence significative sur l'érosion. La morphologie des surfaces érodées a été examinée en utilisant la microscopie optique et la profilométrie. Les mécanismes d'érosion possibles sont discutés.

**Mots clés:** érosion des particules solides, composites renforcés de fibres, angle d'impact, optique microscopie.....

## Abstract:

The solid particle erosion behaviour of three fiber reinforced composites have been characterized. The erosive wear of the composites have been evaluated at different impingement angles (30, 60 and 90°). The particles used for the erosion measurements were natural sand with two diameter fractions of ( $\varnothing < 400 \mu\text{m}$ ) and ( $\varnothing \in [400-600] \mu\text{m}$ ), and impact velocity of 30 m/s. All the studied composites showed fragile erosion behaviour, with maximum erosion rate at 90° impingement angle. The projected sand mass had a significant influence on erosion. The morphology of eroded surfaces was examined by using optical microscopy, and profilometry<sup>56</sup>. Possible erosion mechanisms are discussed.

**Key Words:** solid particle erosion, fiber reinforced composites, impingement angle, optical microscopy.....

## **Introduction générale**

Les premiers travaux concernant les problèmes de l'érosion avaient vu le jour à la fin de deuxième guerre mondiale avec la parution de la première publication de Wahl et Hartstein en 1946 [1]. Depuis cette date jusqu'au aujourd'hui des centaines de travaux ont été publiés évoquant les mécanismes de l'arrachement de matière et les paramètres pertinents qui interviennent dans ce processus. La plupart des études fournies par la littérature ont été réalisées dans des laboratoires et dans des conditions très strictes. Par contre, il est rare de trouver dans la bibliographie des résultats sur l'érosion des matériaux dans des conditions réelles.

Les matériaux polymères renforcés par des fibres synthétiques, comme les fibres d'aramide, les fibres de carbone ou les fibres de verre sont très utilisés dans l'industrie dans divers domaines d'application, comme ceux de l'automobile, de la construction, de l'aéronautique, et des sports. Les fibres de verre sont les plus utilisées en raison de leur faible coût, leur facilité de production et de leurs bonnes propriétés mécaniques. Cependant, ces composites présentent quelques défauts quant au respect de l'environnement. En effet, peu de solutions écologiques existent de nos jours pour le recyclage de ces matériaux. De plus, la mise en œuvre de matériaux verre/polymère nécessite une importante quantité d'énergie. Ces constats ont incité les chercheurs à développer une alternative basée sur des matériaux composites élaborés avec des renforts issus de ressources naturelles renouvelables. Les meilleurs candidats jusqu'à présent sont les fibres végétales et plus particulièrement les fibres libériennes (jute, chanvre, lin, ramie, kéraf). Ces dernières possèdent une faible densité, un faible coût et des propriétés mécaniques spécifiques qui concurrencent celles des fibres de verre.

Toutefois, les composites renforcés par des fibres végétales présentent quelques inconvénients qui limitent leurs utilisations dans le domaine industriel. En effet, les propriétés morphologiques et mécaniques des fibres sont variables d'une plante à une autre ainsi que dans une même plante. Un autre problème réside dans le caractère hydrophile de ces fibres qui tend à fragiliser les composites. Afin de limiter ces problèmes et d'optimiser les propriétés mécaniques de ces composites, il est tout d'abord nécessaire d'approfondir la connaissance de leur comportement et de leur tenue mécanique, notamment sous des chargements répétés (fatigue cyclique).

Le phénomène de l'érosion des matériaux est très fréquent dans le sud Algérien à cause des vents de sable qui sévissent dans cette région au courant des années avec de vitesse qui dépassent 120Km/h [1]. C'est pourquoi, nous attachons une attention particulière pour ce problème.

Notre objectif à travers ce travail est d'apporter une contribution à la compréhension des paramètres pertinents influençant l'érosion des composites, d'acquérir de bonnes connaissances sur les mécanismes d'endommagements.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne une étude bibliographique dans laquelle sont présentés des généralités sur les matériaux composites

Le deuxième chapitre est consacré au phénomène d'érosion des composites, concernant le principe, les paramètres affectent ce genre d'usure telle que la vitesse, l'angle d'impact, la dureté, la taille et la forme des grains....

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la procédure expérimentale, les matériaux utilisés, différentes étapes d'élaboration des composites, le sablage, les appareils utilisés.

Le quatrième chapitre englobera l'ensemble des résultats obtenus et leur discussion.

Cette étude est achevée par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus et leur discussion.