

ANALYSE DE RESISTANCE A L'ABRASION D'UN MATERIAU COMPOSITE SABLE/POLYESTER POUR RENFORCER LES BORDS D'ATTAQUE DES PALES D'EOLIENNE

ABRASION RESISTANCE ANALYSIS OF SAND/POLYESTER COMPOSITE MATERIAL FOR WIND TURBINE BLADE LEADING EDGE REINFORCEMENT



| Levao Nantenaina Paulin ^{*,1,2} | Ratsifaherandahy Flemond Dolin ² | Mamiharijaona Ramaroson ^{1,2} | et | Rajaonah Rabevala ^{1,2} |

¹ Université d'Antsiranana | Ecole Supérieur Polytechnique | Laboratoire de Métallurgie et Chimie | B.P: O, 201, Antsiranana | Madagascar |

² Université d'Antsiranana | Ecole Supérieur Polytechnique | Laboratoire de Mécanique Appliquée | B.P: O, 201, Antsiranana | Madagascar |

| Received June 25, 2022 |

| Accepted June 06, 2022 |

| Published June 10, 2022 |

| ID Article | Levao-Ref13-ajira250622 |

RESUME

Introduction : Dans le monde, le développement des matériaux et les progrès technologiques sont interdépendants. L'invention de nouveaux matériaux est l'un des processus de développement d'une nouvelle technologie. La découverte d'un nouveau matériau est basée sur la connaissance et la maîtrise des ressources naturelles d'un pays. **Contexte :** A Madagascar, il y a plusieurs sources de matériaux naturels que nous pouvons exploiter et utiliser pour résoudre les problèmes dans la construction et la fabrication des différentes infrastructures et machines. Cette communication est focalisée sur l'analyse de performance à l'abrasion des composites à base de sable et de résine polyester pour résoudre les problèmes des usures des bords d'attaque des pales d'éoliennes. Dans cette étude, nous avons utilisé des sables de la région DIANA, commune rurale d'Ambolobozibe. **Objectifs :** C'est un matériau composite obtenu à partir du sable et du polyester. L'objectif est de trouver la composition optimum du mélange et de comprendre l'influence de la grosseur des grains de sables sur la résistance à l'abrasion. **Méthodes :** Pour apprécier la qualité de ces composites, tout d'abord nous avons fait l'analyse granulométrique du sable, pour qu'on puisse sélectionner le sable par leur grosseur de grain. Ensuite, nous réalisons des éprouvettes cylindriques avec des variations de quantités de résine et de sable. Après, on utilise la machine polisseuse et des papiers abrasifs avec différentes références pour frotter la surface de chaque éprouvette. Enfin, on mesure la perte de masse pour déterminer la quantité d'usure. **Résultats :** Après les études expérimentales et les différents essais que nous avons réalisés, nous avons trouvés différents résultats avec des valeurs cohérentes. D'après l'analyse granulométrique, les échantillons de sables possèdent une grosseur de 600µm au maximum. On utilise une série de tamis de 1000 à 75[µm] de porosité, on obtient cinq (05) quantités avec des grosseurs différentes (600µm ; 425µm ; 300µm ; 150µm ; 75µm). Ensuite le mélange optimum est de 20% de résine polyester et 80% de sable, avec cette composition, la qualité de force de cohésion entre le sable et le polyester est optimale. Si on diminue la quantité de la résine, la décohésion des grains de sable sur une éprouvette est assurée pendant l'essai d'usure par l'abrasion. Pendant le test d'abrasion, on constate que plus la grosseur de grain augmente la quantité d'usure diminue (ce test est réalisé avec le même papier abrasif) et plus la grosseur des grains du papier abrasif augmente la quantité d'usure aussi augmente (ce test est réalisé avec la même grosseur de grain de sable dans chaque éprouvette). Et enfin, nous constatons aussi que ce composite subit un phénomène d'écrouissage pendant l'essai. La quantité d'usure diminue en fonction du temps et si la courbe d'évolution du phénomène d'écrouissage prend leur pic, à partir de là l'allure de l'usure reste constante. **Conclusion :** Madagascar possède plusieurs types de sables avec leurs caractéristiques spécifiques. Nous avons fait des études sur le sable continental au nord de l'île dans la région DIANA, et on le mélange avec du polyester. On réalise une analyse tribologique sur le mélange, on trouve différentes performances à la résistance à l'abrasion. Donc on peut utiliser ce matériau pour ralentir ou pour protéger contre l'érosion entraînée par des abrasifs agressifs.

Mots-clés : Tribologie ; Usure ; Cohésion ; Ecrouissage ; Eprouvette ; Mélange

ABSTRACT

Introduction: In the world, the development of materials and technological progress are interdependent. The invention of new materials is one of the processes of developing new technology. The discovery of a new material is based on knowledge and mastery of the natural resources of a country. **Context:** In Madagascar, there are several sources of natural materials that we can exploit and use to solve problems in the construction and manufacture of different infrastructures and machines. This communication is focused on the analysis of the abrasion performance of composites based on sand and polyester resin to solve the problems of wear of the leading edges of wind turbine blades. In this study, we used sands from the DIANA region, rural commune of Ambolobozibe. **Objectives :** It is a composite material obtained from sand and polyester. The objective is to find the optimal composition of the mixture and to understand the influence of the size of the grains of sand on the resistance to abrasion. **Methods:** To assess the quality of these composites, first of all we did the particle size analysis of the sand, so that we could select the sand by their grain size. Then, we carry out cylindrical tests with variations in the quantities of resin and sand. Afterwards, we use the polishing machine and abrasive papers with different references to rub the surface of each print. Finally, the mass loss is measured to determine the amount of wear. **Results:** After the experimental studies and the different tests we performed, we found different results with consistent values. According to the particle size analysis, the sand samples have a maximum size of 600 µm. A series of sieves with a porosity of 1000 to 75[µm] is used, in five (05) quantities with different sizes (600µm; 425µm; 300µm; 150µm; 75µm). Then, the optimal mixture is 20% polyester resin and 80% sand, with this composition, the quality of cohesive force between sand and polyester is optimal. If the quantity of resin is reduced, the decohesion of the grains of sand on a test is ensured during the wear test by abrasion. During the abrasion test, it is found that the more the grain size increases the amount of wear decreases (this test is carried out with the same abrasive paper) and the more the grain size of the abrasive paper increases the amount of wear also increased (this test is carried out

with the same size of grain of sand in each test). And finally, we also find that this compound undergoes a strain hardening phenomenon during the test. The amount of wear decreases as a function of time and if the evolution curve of the strain hardening phenomenon peaks, from then on the rate of wear remains constant. **Conclusion:** Madagascar has several types of sand with their specific characteristics. We have done studies on the continental sand in the north of the island in the DIANA region, and on the mixture with polyester. A tribological analysis is carried out on the mixture, we find different performances in terms of resistance to abrasion. So we can use this material to slow down or to protect against erosion caused by aggressive abrasives.

Keywords: Tribology; Wear ; Cohesion; Hardening; Test piece; Mixed

1. INTRODUCTION

Dans le monde d'aujourd'hui, l'évolution industriel est un indicateur de développement économique d'un pays. Le matériau composite occupe une place très importante dans le développement industriel, grâce à son avantage très pertinent [1]. On peut créer un matériau qu'on veut suivant les conditions d'utilisations. Le sable est l'un des matériaux le plus abondant dans le monde. La plupart des gens utilise des sables et du ciment pour fabriquer les matériaux de construction. Et les autres chercheurs utilisent le sable/polyester pour de béton et pavé [2,3,4]. Mais dans notre cas, nous allons créer un matériau composite granulaire à base de résine Polyester et du Sable. L'objectif est de déterminer les caractéristiques mécaniques de ce produit afin de pouvoir l'utiliser comme protection du bord d'attaque d'une pale d'éolienne qui installée dans des régions sableuses. A partir des résultats des essais mécaniques, nous pouvons conseiller dans quel cas de contrainte nous pouvons consulter le composite Sable/Polyester. Pour atteindre cet objectif, nous allons exécuter les processus suivants. Tout d'abord, nous allons effectuer l'analyse granulométrique du sable existant. L'analyse granulométrique est le moyen le plus simple pour sélectionner et déterminer les grosseurs de grains existants dans un échantillon donné. Ensuite, nous faisons le mélange du résine polyester et du sable et nous varions leur quantité pour avoir ce nouveau composite. La variation de quantité du sable/polyester nous permettra de déterminer le mélange optimum. Après, nous allons faire une analyse tribologique sur les éprouvettes que nous avons confectionnées à partir du sable/polyester. L'analyse tribologique est un moyen simple pour déterminer la faiblesse ou la performance d'un matériau par le mécanisme de frottement [5]. L'étude de la tribologie a pour objectif de réduire l'usure d'un matériau et d'améliorer leur durée de vie et leur fiabilité pour éviter la détérioration prématurée [6].

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Matériaux utilisées

Le sable est un matériau provenant de la dégradation des roches sous l'effet des diversifications des agents atmosphériques. En général, la désintégration des roches granitique peut entraîner la formation des sables [7]. Il est constitué du quartz, des feldspaths, des magnétites et du mica. Le quartz a une dureté de Mohs 7 [8]. Le sable peut avoir plusieurs couleurs selon leurs origines et leurs environnements. Comme dans notre cas, on utilise le sable blanc. La figure ci-dessous montre l'échantillon de sable que nous étudions.



Figure 1: Echantillon du sable blanc.

La résine polyester est un liquide visqueux et incolore. La réaction entre un alcool polyhydrique et acide polybasique est à l'origine de la formation du polyester. La résine polyester peut se durcir en présence de 0,8 à 2% de promoteur octoate de cobalt, il peut se durcir aussi en présence de chaleur [9,10]. Après le durcissement, la réaction réversible est impossible. Cette résine est la plus utilisée pour fabriquer des matériaux composites, grâce à ses caractéristiques mécaniques, le module d'Young est de 3-4 [GPa], contrainte à la rupture est de 40-50[MPa], allongement à la rupture 1,5-2,2% et leur coût de 1,5 à 2 [€/Kg], moins chère par rapport aux autres résines. On peut mélanger le polyester avec des matrices et des fibres, comme fibre de verre, fibre de carbone et la fibre végétale [11,12]. Dans l'expérience, on utilise la cire d'abeille comme huile de démoulage. La cire sert pour faciliter l'enlèvement des éprouvettes dans les moules après le durcissement des composites. On mélange la cire d'abeille avec du pétrole pour ralentir leur durcissement. On utilise aussi l'acide chlorhydrique (HCl) et de l'eau pour éliminer les débris des éléments organiques pendant le lavage de sable.

2.2 Matériels utilisés

L'étuve est un appareil de séchage des matériaux utilisés dans le laboratoire. Dans cette expérience, on utilise une étuve ayant une capacité de chauffage de 40 à 220°C. La température de séchage est de 110°C pendant 24h. On utilise deux balances de précision, l'une pour mesurer la masse de l'échantillon de sable pendant l'analyse granulométrique avec la précision de 10^{-3} kg. Et l'autre pour mesurer la perte de masse de l'éprouvette avant et après l'essai d'usure avec la précision de 10^{-2} g.



Figure 2: Etuve de séchage.



Figure 3: Balance de précision 10^{-3} kg.



Figure 4: Balance de précision 10^{-3} g.

On utilise des tamis de maille carré de dimension 75µm ; 150µm ; 300µm ; 425µm et 600µm pour sélectionner les grains de sables. Et, on confectionne une moule en bois de diamètre intérieur 25[mm].

Pour faire un essai d'usure, on utilise une machine polisseuse DAP-V avec la vitesse de rotation maximale 600[tr/min].



Figure 5: Série de Tamis.



Figure 6: Moule en bois.



Figure 7: Polisseuse DVA-P.

On utilise des papiers abrasifs en oxyde d'aluminium, avec la classification FEPA (Federation of European Producers of Abrasif). Avec cette classification, toutes les granulométries sont précédées de la lettre P. Dans cette expérience, on utilise des papiers abrasifs P150 ; P80 ; P50 ; P40 ; P36. [13].

Tableau 1 : Dimensions des grains abrasifs selon leur classe

Classification d'un papier abrasif	P150	P80	P54	P40	P30
Grosueur des grains des abrasifs en [µm]	75	180	300	425	600



Figure 9: Digital Micro.



Figure 10: Equotip.

Digital Micro 2.0 Scale est une caméra USB, portable et ayant des grossissements allant de 20 à 230 fois. Le fonctionnement de cette caméra exige une installation du logiciel Micro Capture. Nous allons utiliser cet appareil pour capturer les différents états de surfaces des éprouvettes avant et après essai. Equotip est un testeur de dureté portable d'un matériau. On utilise cet appareil pour détecter les différentes duretés d'une éprouvette avant et après essai.

2.3 Méthodes

Un échantillon de sable a été prélevé dans le site d'Ankoriko dans la région DIANA. La première chose à faire est de laver l'échantillon avec de l'eau mélangé de 5 à 10% d'acides chlorhydriques pour éliminer les éléments organiques. Pour sécher, on met l'échantillon dans une étuve pendant 24h à la température 105 à 110°C. Avant de faire l'analyse granulométrique, il faut mesurer la masse sèche de l'échantillon avec une balance. Et, on fait passer l'échantillon de sable dans une série de tamis de maille carré pour déterminer la quantité des différentes grosseurs de grains. Après, on mélange les sables bien définis avec une résine polyester pour avoir le matériau composite. Il faut varier la quantité du mélange sable/polyester suivant le pourcentage dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Variation des quantités des mélanges sable/polyester.

Teneur en sable	95%	90%	85%	80%	75%	70%
Teneur en polyester	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Sable + polyester	M1	M2	M3	M4	M5	M6

On verse les différents mélanges (avec 2% de promoteur) dans les moules préalablement lubrifiés avec de la cire d'abeille. Le but est de fabriquer des éprouvettes en sable/polyester. Ensuite, après 21 jours de séchage, on réalise des essais d'usure par abrasion avec une machine polisseuse DAP-V, de vitesse 350[tr/min], avec la masse de pression 450g et avec différents papiers abrasifs. Mais pour trouver le mélange optimum, l'essai d'usure est réalisé avec des grosseurs de grain moyen de 300µm et avec le papier abrasif P54. Enfin, on test la dureté de chaque éprouvette avec un appareil Equotip avant et après l'usure. On trouve différents résultats cohérents.

3. RESULTATS

3.1 Granulométrie

D'après l'analyse granulométrique, on obtient la courbe suivante.

Tableau 3 : Résultats d'analyse granulométrique.

Ouverture de tamis en (mm)	1	0,6	0,425	0,300	0,150	0,075
Passant total en (%)	100%	95%	84%	50%	40%	4%

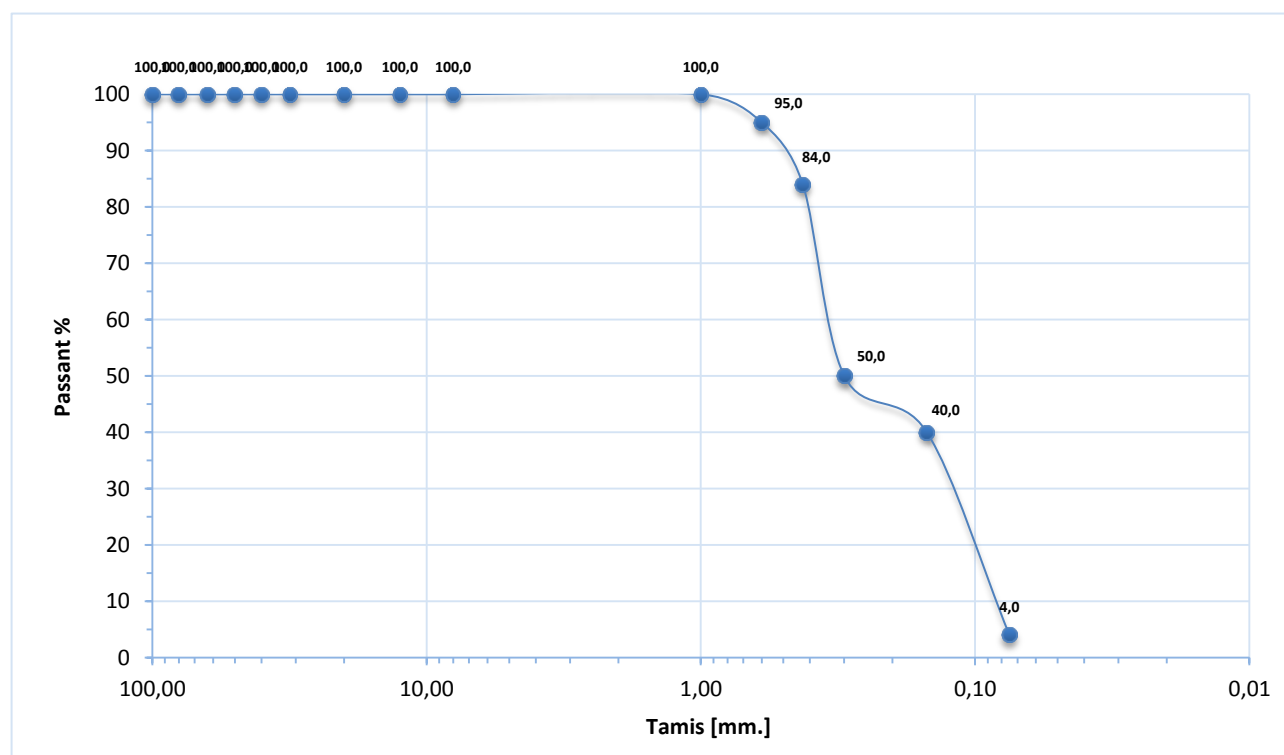


Figure11 : Courbe granulométrique d'un sable d'Ankoriko.

On trace la courbe granulométrique par rapport aux pourcentages passants en fonction des ouvertures des tamis. Cette courbe nous montre que les quantités prépondérantes dans l'échantillon appartiennent aux grosseurs de grains 150µm et

75 μ m. Car, à partir de ces valeurs, la quantité de sables passants diminue c'est-à-dire le pourcentage de retenus augmente. Donc, le sable que nous avons étudié est classé dans le sable fin [7].

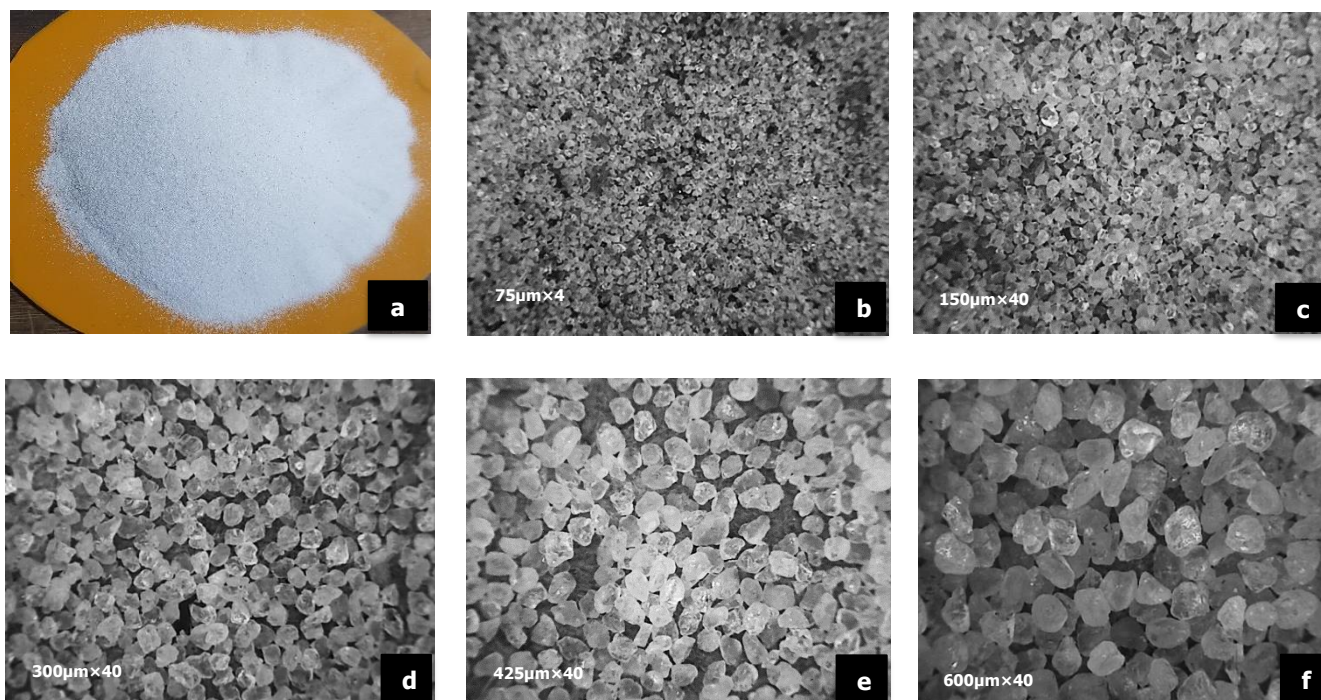


Figure 12 : Grosseur de grain de sable.

La figure (a) montre l'échantillon du sable blanc et brut, non encore sélectionné selon leur grosseur de grain. Et les autres figures (b ; c ; d ; e ; f) sont des sables avec leurs grosseurs de grains bien déterminées. Ces images sont obtenues à partir de DIGITAL MICROSCOPE, avec le grossissement 40fois.

3.2 Mélange optimum :

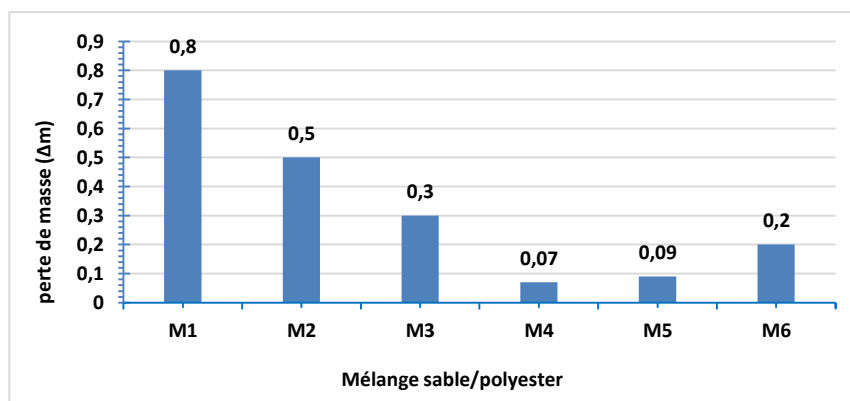


Figure 13: Influence de la quantité de sable/polyester à la résistance d'abrasion.

D'après la courbe sur la **figure 13**, le mélange optimum c'est le M4 (20% résine + 80% sable), car avec M4, la perte de masse après l'usure est minimale. On applique ce mélange pour toutes les grosseurs de grains de sables.

3.3 Résistance à l'abrasion

On fabrique les éprouvettes avec le mélange M4 (20% polyester+80% sable). On représente dans les figures ci-dessous les éprouvettes de composites sable/polyester.

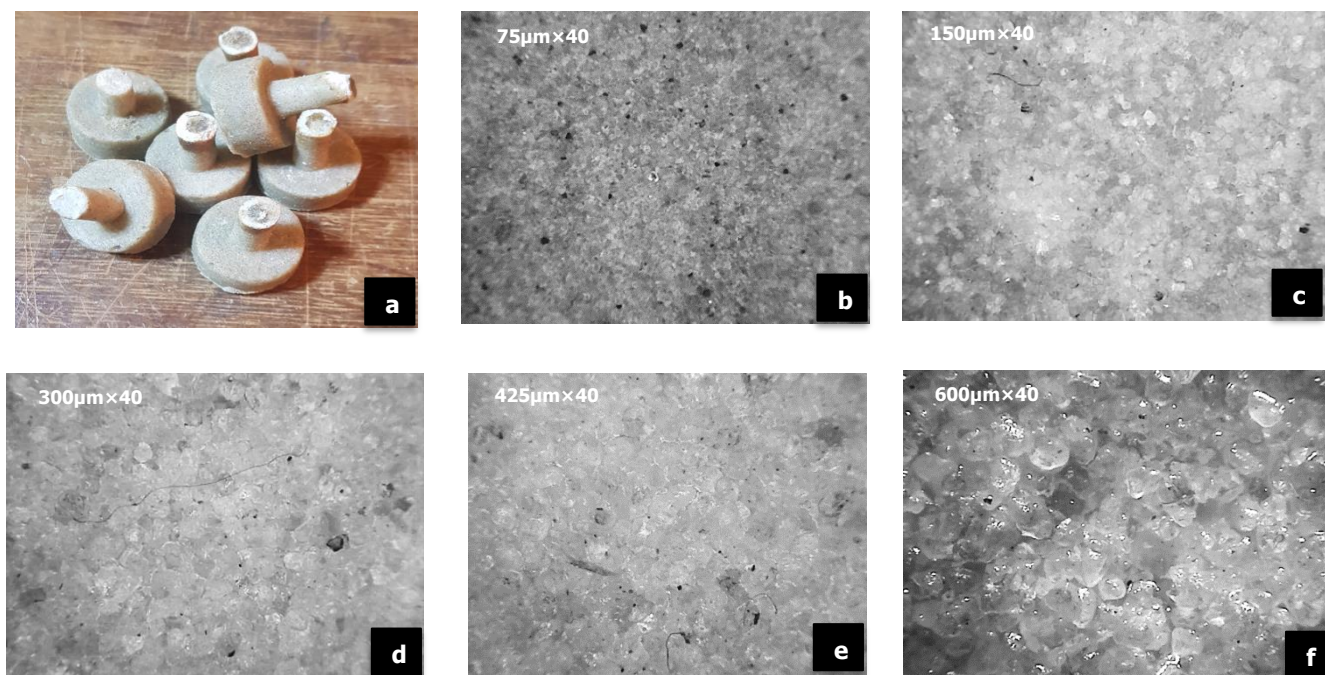


Figure 14: Eprouvettes et leurs états de surface avant essai d'usure.

a) : éprouvettes avec de 20% de résine et 80% du sable ; **b)** : Surface de l'éprouvette à 75µm de grain de sable ; **c)** : Surface de l'éprouvette à 150µm de grain de sable ; **d)** : Surface de l'éprouvette à 300µm de grain de sable ; **e)** : Surface de l'éprouvette à 425µm de grain de sable ; **f)** : Surface de l'éprouvette à 600µm de grain de sable.

Les figures ci-dessus sont des éprouvettes et leurs surfaces avant l'essai d'usure. Maintenant, nous allons voir les résultats des essais d'usure selon les grosseurs de grain de sable et du papier abrasif. Dans cette partie nous analysons le défaut de masse de chaque éprouvette en fonction du temps, de la vitesse de rotation et de la masse de pression. Le temps d'usure est de 15min.

Tableau 4 : Perte de masse des éprouvettes sur l'abrasion.

Papier Abrasif	Perte de masse des éprouvettes				
	Δm 75µm	Δm 150µm	Δm 300µm	Δm 425µm	Δm 600µm
P150	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
P80	0,08	0,05	0,03	0,02	0,02
P54	0,28	0,09	0,07	0,05	0,03
P40	0,31	0,1	0,09	0,07	0,04
P30	0,34	0,24	0,2	0,17	0,1

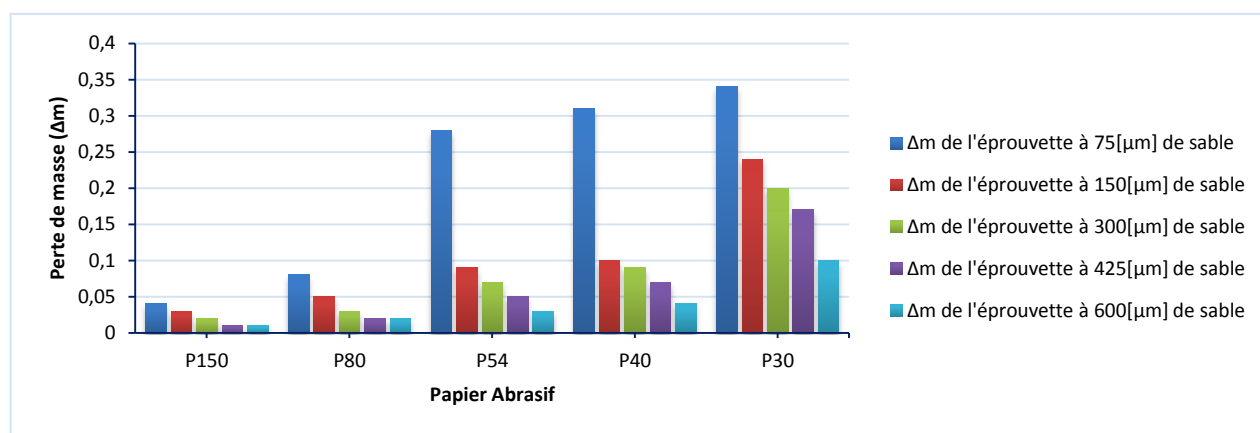


Figure 15: Influence de la grosseur de grain des éprouvettes sur l'abrasion.

Le diagramme dans la **figure 3.3.2** : représente la perte de masse de chaque éprouvette avec leur grosseur de grain respective. Plus la grosseur de grain dans l'éprouvette augmente, la perte de masse diminue. Ce diagramme représente aussi l'évolution de perte de masse en fonction de la grosseur de grains du papier abrasif. Plus la grosseur de grain du papier abrasif augmente, la perte de masse augmente [14].

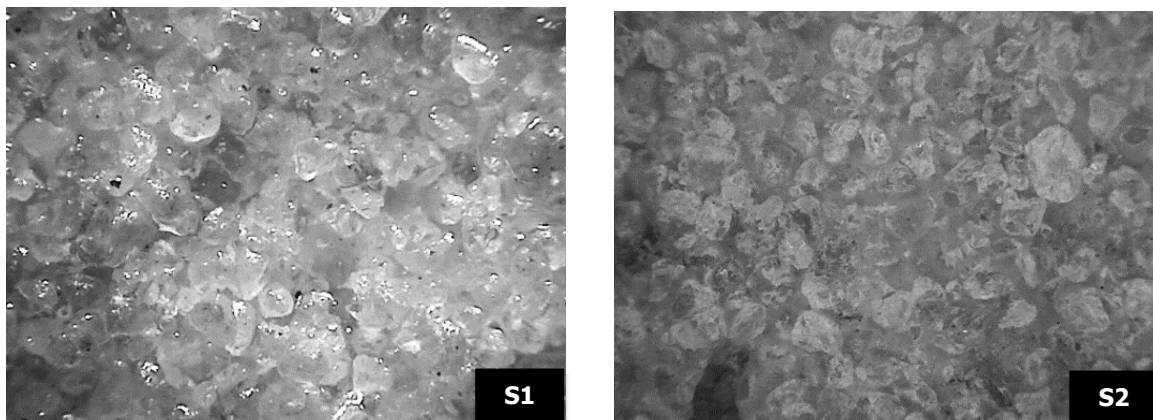


Figure 16: Comparaison de l'état des Surfaces avant et après l'usure.

La figure ci-dessus représente l'état de surface des éprouvettes de 600 μ m de grain de sable. Le **S1**, c'est l'état de surface avant l'usure. Les grains de sables sont enveloppés par la résine, il est brillant et réfléchissant quand on projette le rayon lumineux. Le **S2**, c'est l'état de surface après le frottement. Il est opaque et présente un faciès rugueux. Pendant l'étude expérimentale, nous remarquons que la vitesse d'usure d'une éprouvette diminue en fonction du temps. Pour bien comprendre ce fait, on réalise des essais d'une façon discontinue, avec un intervalle de temps de 3min. On mesure le défaut de masse tous les 3min et on reprend jusqu' à cinq (05) fois pour avoir le temps total d'usure. On a la courbe suivante :

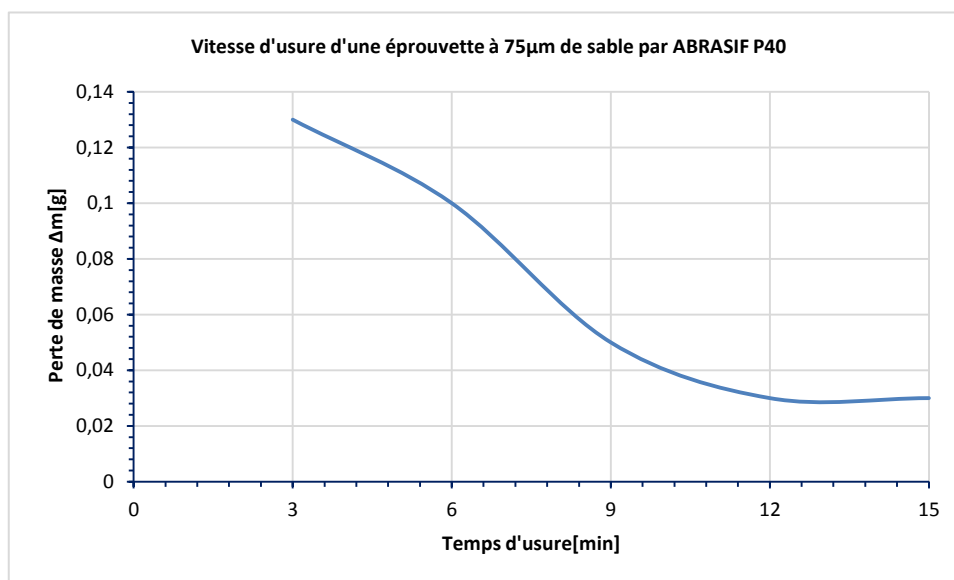


Figure 17 : Comportement de la vitesse d'usure d'une éprouvette.

La vitesse d'usure diminue lentement en fonction du temps. A un certain temps donné, la diminution s'arrête et l'usure prend son allure constante jusqu'à ce que le temps d'essai d'usure soit écoulé.

4. DISCUSSION

Dans cette étude, les matériaux que nous avons utilisés sont des matériaux locaux sauf la résine polyester. Tous les matériels utilisés appartiennent aux laboratoires de mécanique appliquée et laboratoire de matériaux. On utilise les tamis pour séparer les sables en cinq (05) quantités selon leurs grosseurs de grains.

On choisit la résine polyester selon les critères suivants : module d'Young 3-4[GPa], contrainte à la rupture 40-50[MPa], allongement à la rupture 1.32.2% et leur coût moins chère 1.5 à 2[€/kg].

On utilise le papier abrasif en oxyde d'aluminium parce que leur abrasif est plus dur que le quartz, la dureté du quartz est 7 tandis que celle de l'oxyde d'aluminium est 9. Donc, il est fort probable que pendant l'essai d'usure, les éprouvettes en sable soient érodées.

La résistance à l'abrasion est déterminée à partir de la quantité des défauts de masses après l'usure. Dans notre étude, avec le même papier abrasif, la quantité d'usure de l'éprouvette diminue en fonction de l'augmentation des grosseurs de grains. Le composite sable/polyester est plus résistant en abrasion que le composite verre/polyester car la dureté de sable (grain de quartz) est supérieure à la dureté du verre.

Pendant l'essai d'usure, on remarque que la vitesse d'usure de chaque éprouvette diminue en fonction du temps. La diminution d'usure est expliquée par l'existence d'un phénomène d'écrouissage.

Il existe une étude comparative concernant l'usure par abrasion des composites polyester/fibre de verre et polyester/Kevlar [15]. Cette étude est réalisée avec les conditions suivantes : mélange de polyester/fibre de verre, 16% polyester et 84% de fibre de verre, l'autre 16% polyester et 84% kevlar. L'effort normal exercé sur l'éprouvette est de 4.5[N]. Cette éprouvette est de diamètre 9,5[mm] et 20[mm] de hauteur. Les autres paramètres sont : la vitesse de rotation 100[tr/min] ; le temps d'essai : 600 [secondes] ; le déplacement linéaire est 1,9[m/s] et les papiers abrasifs utilisés sont très fines 1500 et 1000. Cette étude a révélé des résultats suivants : $2,75 \times 10^{-6}$ [mm³/mm] de perte en volume de composite polyester/kevlar. En convertissant en masse par millimètre, on trouve une perte en masse de $3,85 \times 10^{-6}$ [mg/mm]. Pour le cas du verre/polyester on obtient $5,25 \times 10^{-6}$ [mm³/mm] en perte volumique et la perte massique par millimètre est de $12,39.10^{-6}$ [mg/mm] [15]. Mais pour notre cas, les conditions expérimentales sont : mélange de 20% de résine polyester et 80% de sable, vitesse de rotation 350[tr/min] et effort normal sur l'éprouvette est de 4.5[N], le déplacement linéaire est de 3.66[m/s], le temps d'essai est de 900[secondes] et le papier abrasif utilisé est de P150, P80, P54, P40 et P30. On trouve le résultat d'usure $9,80 \times 10^{-6}$ [mg/mm] avec celle du papier abrasif P54 et éprouvette avec de grain de sable 300[μm]. Si on compare ces résultats, on trouve que la quantité d'usure de polyester/fibre de verre est supérieure à celle du polyester/sable.

Pour le polyester/kevlar, leur quantité d'usure est inférieure à celle du polyester/sable mais avec des conditions très largement différentes. Le papier abrasif utilisé en sable/polyester est très agressif que celle utilisé en polyester/Kevlar. Et la vitesse de déplacement et le temps d'usure sont inférieurs que ce qu'on utilise dans l'usure de sable/polyester. Enfin, on réalise un autre test d'usure par abrasion avec éclat de verre, avec la même condition que le test d'usure du polyester/sable. On a le résultat dans le diagramme ci-dessous.

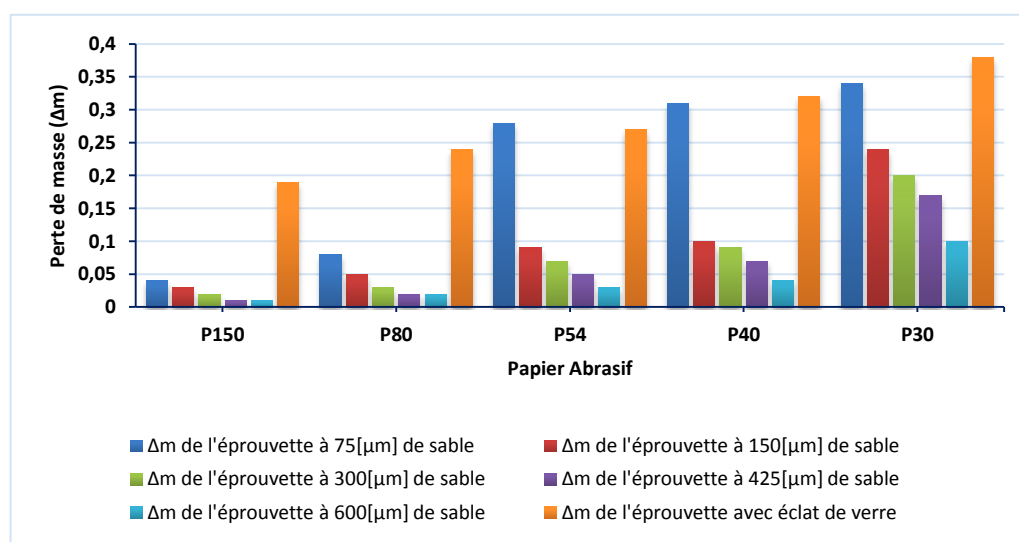


Figure 18 : Diagramme de quantité d'usure entre éclat de verre et le composite sable/polyester.

Ce diagramme montre la quantité d'usure d'un éclat de verre dans un temps bien déterminé. La perte de masse est supérieure à celle du composite sable/polyester. Donc le sable/polyester est plus résistant en frottement que le verre.

5. CONCLUSION

D'après l'étude que nous avons réalisée, on trouve les résultats suivants :

- ❖ L'analyse granulométrique nous montre que la grosseur de grain la plus abondante est la grosseur de grain 150[μm] et après 75[μm]. Donc, on peut classer cet échantillon dans la catégorie de sable très fin. [7]
- ❖ Avec la quantité massique de 18 à 20% de polyester et de 80 à 82% de sable, le composite présente une force de liaison suffisante entre sable/polyester pour faire l'analyse tribologique. Donc le mélange est optimum avec ces quantités.
- ❖ En général, la performance tribologique de sable/polyester est largement supérieure que la fibre de verre/polyester, par raison de leur dureté.
- ❖ La performance en abrasion d'un éclat de verre sans résine est inférieure à celle du composite sable/polyester, avec la même condition d'essai d'usure.

D'après les résultats précédents, on trouve un nouveau matériau composite à base de polyester et sable. Ce matériau a une bonne performance en abrasion, on peut l'utiliser pour faire protéger le bord d'attaque d'une pale d'éolienne aérogénérateur contre l'érosion du sable. Car le problème majeur d'un parc éolien aérogénérateur dans les pays désertiques et semi-arides est la détérioration prématurée d'une pale par l'érosion du sable [16]. La rugosité sur le bord

d'attaque aussi provoque la chute de rendement [17]. On utilise ce nouveau matériau non seulement sur la protection du bord d'attaque, mais on peut également l'utiliser comme matériau de remplissage pour réparer un bord d'attaque érodé.

6. REFERENCES

- [1]. REKBI Fares Mohammed. Contribution à l'analyse de l'endommagement des matériaux composites. These de doctorat en Genie Mécanique. Université Mohamed Khider – Biskra en Algérie. 2016.
- [2]. Muhtasim Kader Mukita, M. A. Gafurb, Sajib Anindab Dhar, Aninda Nafis Ahmed et Muhammed Yusuf Miahc. PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POLYMER CONCRETE FROM UNSATURATED POLYESTER RESIN REINFORCED WITH SAND. *Conference paper*, Decembre 2016. Available on: [file:///C:/Users/nAnTe/Downloads/C132%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/nAnTe/Downloads/C132%20(1).pdf)
- [3]. P. Mani, A.K. Gupta et S. Krishnamoorthy. Comparative study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes. *int.j.adhesion and adhesives*. 3 July 1987. Available on: <file:///C:/Users/nAnTe/Downloads/Documents/0143-7496-2887-2990071-6.pdf>
- [4]. Yuxia Bai, Jin Liu, Yujun Cui, Xiao Shi, Zezhuo Song, Changqing Qi. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures. *Construction and Building Materials*. 5 July 2021 ; 290 : 123237. Available on: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123237>
- [5]. N. Brunetie. Introduction à la tribology. Institut Pprime Futuroscope, 2016. Accessed: Feb. 12, 2020. [Online]. Available on: <https://cel.archives-ouvertes.fr/hal-03356326v2/document>
- [6]. SENHADJI Salima. Etude expérimentale du comportement au frottement et à l'usure en contact plan du laiton et du bronze en milieu lubrifié. These de doctorat de l'Université de paris. 19/04/2018. Available on: http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=2655
- [7]. TRAORE Brahman. Elaboration and Characterization of Composite Materials made of Plastic Waste and Sand: Influence of Clay Load. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. July 2017; 6(7): 220-223. Available on: DOI:10.5958/2277-1581.2017.00024.9
- [8]. Eddine El Amrani El Hassani. Evaluation des propriétés physico-mécaniques des pierres de construction du Maroc à partir des vitesses des ondes P et de la résistance au choc. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*. 2009 ; n° 31 : 41-54. Janvier 2009. Available on: <https://www.researchgate.net/publication/267714247>
- [9]. Chedly Bradai, Tarak Bouraoui, Noura Hamed, Foued El Halouani. Réticulation et comportement mécanique d'une résine polyester insaturée pour différents taux de catalyseur. *Ann. Chim. Sci. Mat.* 2008 ; 33(4): 293-302. Available on: [10.3166/acsm.33.393-302](https://doi.org/10.3166/acsm.33.393-302) © Lavoisier. Paris
- [10]. L. Adghem Chikouche Mohamed Djamel. Renforcement d'un polymère (polyester insaturé) par des fibres végétales (Arundo donax). These de doctorat, 23/01/2016. Available on : <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/1673/1/These%20doctorat%20LADGHEM%20CHIKOUCHE%20Med%20Djamel.pdf>
- [11]. Yves Perrot. Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène. Thèse de doctorat de l'université de Bretagne Sud, 28 Novembre 2006. Available on <https://archimer.ifremer.fr/doc/2006/these-2485.pdf>
- [12]. Narayanan S., Schadler L.S. Mechanisms of Kink-band Formation in Graphite/Epoxy Composites: a Micromechanical Experimental Study », *Composite Materials and Technology*. 1999; 59: 2201-2213. Available on: https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/61844494/FULL_TEXT.PDF
- [13]. Laura VERNHET. Transfert métallique lors des opérations de toilage à sec des aciers: effet des charges actives. Thèse de doctorat de l'école centrale de Lion. 09/0.72015. Available on: <https://www.theses.fr/2015ECDL0016.pdf>.
- [14]. Harsha AP, Tewari US. Tribological Studies on Glass Fiber Reinforced Polyetherketone Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2004;23(1):65-82. doi:10.1177/0731684404029349
- [15]. Jamal Jalal Dawood. A Comparison Between the Wear Rate Behavior of Polyester Reinforced by Glass and Kevlar Fibers. *Eng &Tech. Journal*. 2009 ; 27(11) : 2273-2285. Available on: <https://www.iasj.net/iasj/download/b33b888d2aacb2c4>
- [16]. Ahmida Rezig, Ahmed Yousfi, Sylvain Fréour, Frédéric Jacquemin. Effet de l'érosion par des particules de sable sur la performance des pales d'éoliennes dans les zones arides et semi-arides. MATEC Web of Conferences 261, 05001 (2019). Available on : <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926105001>
- [17]. Timmer W. A., Schaffarczyk A. P. The effect of roughness at high Reynolds numbers on the performance of aerofoil DU 97-W-300Mod. *WIND ENERGY Wind Energ*. 2004; 7(4):295–307. Available on: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.136>



Cite this article: Levao Nantenaina Paulin, Ratsifaherandahy Flemond Dolin, Mamiharijaona Ramaroson et Rajaonah Rabevala. ANALYSE DE RESISTANCE A L'ABRASION D'UN MATERIAU COMPOSITE SABLE/POLYESTER POUR RENFORCER LES BORDS D'ATTAQUE DES PALES D'EOLIENNE. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2022; 14(1): 341-349.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>