

RENFORCEMENT ET REVÊTEMENT DES BORDS D'ATTAQUES DES PALES D'ÉOLIENNE AÉROGÉNÉRATEUR PAR DES NANOCOMPOSITES À BASE D'ARGILE/POLYMÈRE



REINFORCEMENT AND COATING OF WIND TURBINE BLADE LEADING EDGES WITH CLAY/POLYMER NANOCOMPOSITES

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

1. Université d'Antsiranana | Ecole Supérieure Polytechnique | Laboratoire de Métallurgie et Chimie | B.P. : 0, 201, Antsiranana | Madagascar |

2. Université d'Antsiranana | Ecole Supérieure Polytechnique | Laboratoire de Mécanique Appliquée | B.P. : 0, 201, Antsiranana | Madagascar |

| Received June 13, 2023 |

| Accepted July 16, 2023 |

| Published July 20, 2023 |

| ID Article | Paulin-Ref19-1-17ajiras130723 |

RESUME

Contexte : Le développement de l'énergie renouvelable représente un défi majeur pour les chercheurs à l'échelle mondiale. L'énergie éolienne est une source d'énergie propre largement utilisée grâce aux éoliennes aérogénératrices. Les pales des éoliennes jouent un rôle essentiel dans la capture et la transformation de l'énergie du vent en énergie mécanique. Bien que l'énergie éolienne présente de nombreux avantages et soit largement adoptée par de nombreux pays, les éoliennes rencontrent des difficultés lors de leur installation. Après plusieurs cycles de fonctionnement, il est difficile de maintenir leurs performances initiales, ce qui nécessite un entretien important, en particulier au niveau des pales. Cette étude se concentre sur le renforcement des bords d'attaque des pales d'éoliennes à l'aide de nanocomposites à base d'argile/polymère. **Objectifs** : L'objectif de cette étude est de remédier et de protéger les pales exposées à des environnements agressifs, tels que les régions côtières et semi-arides, où les pales sont soumises à l'érosion. Ce phénomène peut entraîner une détérioration prématurée des pales. **Méthodes** : Pour atteindre cet objectif, nous étudions le mécanisme de dégradation du bord d'attaque des pales d'éoliennes causé par l'impact de particules solides. Ensuite, nous effectuons des études caractéristiques sur les matériaux capables de résister à l'impact des particules solides. Nous déterminons ensuite le procédé de renforcement ou de revêtement du bord d'attaque à l'aide de nouveaux matériaux, ainsi que les techniques d'application de ces nouveaux matériaux sur le bord d'attaque. **Résultats** : À travers nos études expérimentales et les différents essais réalisés, nous obtenons des résultats prometteurs pour remédier au problème des bords d'attaque des pales d'éoliennes. Nous constatons que la résistance à l'érosion des nanocomposites est supérieure à celle du matériau de base habituellement utilisé par les fabricants de pales. **Conclusion** : L'analyse de la résistance des nanocomposites est une étude approfondie des propriétés mécaniques des matériaux composites contenant des nanoparticules. L'ajout de nanoparticules telles que l'argile dans la matrice du composite peut considérablement améliorer ses propriétés mécaniques, telles que la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure et la résistance aux chocs.

Mots-clés : Nanocomposite, Érosion, Bord d'attaque, Revêtement, Polymère, Argile.

ABSTRACT

The development of renewable energy is one of the challenges faced by international researchers today. The current world harnesses wind energy through the use of wind turbines. The blades of the turbines play a crucial role in capturing and converting wind energy into mechanical energy. **Background**: Wind energy is a clean source of energy, and many countries find advantages in using this technology. However, wind turbines face difficulties during installation. After a few operating cycles, it becomes challenging to maintain their original performance, requiring significant maintenance, especially for the turbine blades. This paper focuses on strengthening the leading edge of wind turbine blades using clay/polymer nanocomposites. **Objectives**: The aim is to find solutions to protect and enhance the performance of turbine blades exposed to harsh environmental conditions. Regions such as coastal areas and semi-arid regions often experience erosion, which can lead to premature deterioration of the blades. **Methods**: To achieve our goal, we study the degradation mechanism of the leading edge of wind turbine blades caused by the impact of solid particles. Subsequently, we conduct characteristic studies on materials that can withstand the impact of solid particles. We determine the reinforcement or coating process for the leading edge using new materials, as well as the techniques for their application. **Results**: Through experimental studies and various tests conducted, we achieve promising results in addressing the issues related to the leading edge of wind turbine blades. The erosion resistance of the nanocomposites is found to be higher compared to the conventional base material commonly used by blade manufacturers. **Conclusion**: Analyzing the strength of nanocomposites involves an in-depth study of the mechanical properties of composite materials containing nanoparticles. The addition of nanoparticles, such as clay, to the composite matrix significantly improves its mechanical properties, including tensile strength, rigidity, wear resistance, and impact resistance.

Keywords: Nanocomposite, Erosion, Leading Edge, Coating, Polymer, Clay.

1. INTRODUCTION

L'étude et la découverte de nouveaux matériaux jouent un rôle essentiel dans la progression technologique mondiale. Dans cette communication, nous nous penchons sur la résistance à l'usure par érosion des nanocomposites à base de polymère et d'argile. L'objectif est de renforcer et de protéger les surfaces des matériaux exposés à des environnements érosifs, tels que les bords d'attaque des pales des éoliennes. Plusieurs méthodes sont disponibles pour simuler l'érosion par abrasion. Dans notre cas, nous utilisons un dispositif d'érosion par jet de sable [1]. Cette méthode consiste à projeter des particules abrasives à grande vitesse sur les échantillons de nanocomposites à l'aide d'une aérogommeuse [1,2]. Pour atteindre nos objectifs, nous devons suivre plusieurs étapes. Tout d'abord, nous effectuons une sélection de matériaux en fonction des besoins spécifiques. De nombreuses études ont été réalisées sur la caractérisation des nanocomposites à base de polymère et d'argile, démontrant que l'ajout d'argile améliore les propriétés mécaniques et thermiques du nanocomposite [3]. Dans

notre cas, nous utilisons des argiles, des poudres et des fibres de verre, du dioxyde de titane (TiO_2), de la résine polyester et de la résine époxy. Ensuite, nous procédons à la préparation du mélange, à la fabrication des échantillons et à des essais d'érosion afin de déterminer la composition optimale. Nous déterminons également l'angle d'attaque le plus érosif pour évaluer les performances des nanocomposites. Enfin, nous réalisons une étude comparative et proposons des solutions pour renforcer les bords d'attaque des pales des éoliennes. Cette partie consistera à comparer les performances en termes d'érosion de chaque matériau composite et à choisir les options de revêtement et de renforcement les plus efficaces pour les bords d'attaque des pales des éoliennes.

2. MATERIELS ET METHODES

La valorisation des ressources locales est l'un des principaux objectifs de notre laboratoire de recherche. Dans cette étude, nous utilisons des matériaux disponibles sur le terrain, récupérés à partir de déchets d'usine et facilement accessibles en grande quantité. Les matériaux composites se composent d'au moins deux phases, ce qui leur confère de nombreux avantages en termes de propriétés combinées de leurs constituants [4]. Dans le cas des nanocomposites, au moins une des phases présente une dimension de l'ordre du nanomètre [5].

2.1 Matériaux utilisées

Argile locale provenant du village d'AMBAVARANO, commune rurale d'Antsiranana II. Dont les coordonnées GPS sont $12^{\circ}24'0''$ S $49^{\circ}30'0''$ E ~ 0m asl 08:19 (EAT - UTC/GMT+3)



Figure1 : Echantillon d'Argile.

Les poudres de verre d'emballage récupérées et incolores sont utilisées dans cette étude. Ces poudres de verre présentent des dimensions maximales inférieures ou égales à $75 \mu\text{m}$. Elles sont produites au sein du laboratoire de matériaux de l'École Supérieure Polytechnique d'Antsiranana. Pour obtenir cette poudre, nous utilisons un broyeur de verre à marteau qui transforme les éclats de verre en une fine poudre. Ensuite, nous utilisons une analyse granulométrique à l'aide d'un tamis pour spécifier et séparer les grains de verre. L'objectif de cette étude est d'exploiter la poudre de verre (Figure 2) en tant que charge dans les matériaux composites.



Figure2 : Poudre de verre du laboratoire de matériaux.

La fibre de verre (Figure 3) est largement utilisée comme charge dans les matériaux composites. Pour nos expérimentations, nous avons utilisé une fibre de verre avec une densité surfacique de 450 g.m^{-2} .



Figure3 : Fibre de verre.

Le dioxyde de titane (Figure 4) est un composé chimique largement utilisé dans de nombreux domaines en raison de ses

propriétés uniques. Il est constitué d'oxygène et de titane, et sa formule chimique est TiO_2 . Le dioxyde de titane se présente sous forme de poudre blanche avec des dimensions variant de l'échelle micrométrique à nanométrique. Il est insoluble dans l'eau ainsi que dans de nombreux solvants organiques. Ce produit possède une température de fusion de $1843^{\circ}C$ et une température d'ébullition de $2972^{\circ}C$. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons le dioxyde de titane sous forme de nanocharges.



Figure4 : Dioxyde de titane.

La résine polyester (Figure 5) est un type de résine synthétique largement utilisée dans divers domaines, notamment l'industrie des composites. La résine polyester est un polymère thermodurcissable qui se durcit grâce à une réaction exothermique provoquée par l'ajout d'un catalyseur [6]. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons une résine polyester insaturée de type isophtalique (UPR). Cette résine est synthétisée à partir d'un mélange d'anhydride maléique, d'acide isophtalique et d'un glycol [7].



Figure5: Résine polyester et leur durcisseur.

La colle utilisée dans cette étude est une résine époxy de fabrication locale (Figure 6). Cette colle est connue pour sa grande résistance et sa durabilité, et elle est largement utilisée dans divers domaines tels que l'artisanat, la construction et l'ingénierie. Il s'agit d'une colle bicomposants, composée d'une résine et d'un durcisseur. Lorsqu'ils sont mélangés, ces deux composants réagissent chimiquement pour former une liaison solide. La colle époxy est reconnue pour être un adhésif puissant et polyvalent, idéal pour les projets nécessitant une adhérence solide et une résistance durable [8].



Figure6 : Résine époxy et leur durcisseur.

2.2 Matériels

Dans cette étude, nous avons utilisé une balance d'analyse (Mettler AE 100) (Figure 7) pour mesurer précisément la masse de chaque composant dans les composites. Cette balance a également été utilisée pour déterminer la perte de masse des éprouvettes après les essais. L'appareil présente une précision de 10^{-4} (g) et une capacité maximale de 100 (g).



Figure7 : Balance de précision de laboratoire de matériaux. METTLER AE 100.

Nous avons utilisé une caméra numérique Micro 2.0 (Figure 8), une caméra USB portable offrant des grossissements allant de 20 à 230 fois. Pour utiliser cet appareil, nous avons installé le logiciel MICRO CAPTURE. Cette caméra a été utilisée pour analyser les surfaces des éprouvettes avant et après les essais, permettant ainsi d'observer les différents états. De plus, nous avons utilisé un microscope métallographique MM6 Leitz Wetzlar à fort grossissement [9] pour une observation plus détaillée.



Figure8 : Microscope Optique.

Un anémomètre (Figure 9) est un instrument utilisé pour mesurer la vitesse du vent. Dans notre étude, il est essentiel de connaître la vitesse du vent transportant les grains de sable à la sortie de la buse. Pour cela, nous plaçons un anémomètre portable en aval de la buse, à une distance précise de 220mm.



Figure9 : Anémomètre portable, PROSTER.

L'aérogommeuse est un procédé de décapage novateur qui implique la projection, à basse pression, d'un mélange d'air comprimé et d'abrasif naturel sur la surface à traiter. Cet équipement est couramment utilisé dans les domaines de la rénovation, de la restauration et de la préparation des surfaces avant la peinture ou le revêtement. Il se compose d'un compresseur d'air, d'un réservoir d'abrasif, d'une buse de projection et d'un tuyau de connexion. Dans cette étude, nous utilisons une aérogommeuse avec une cabine dédiée en tant que banc d'essai pour l'érosion, comme illustré dans la Figure 10 ci-dessous.



Eprouvette

Buse

Figure10 : Stand d'essai d'érosion.

2.3 Méthodes

Un échantillon d'argile a été prélevé dans la région DIANA. La première étape de préparation de l'échantillon consiste à le broyer afin d'obtenir une poudre d'argile ultrafine avec des dimensions à l'échelle nanométrique. Nous avons utilisé un mixeur électrique pour cette opération. Ensuite, nous avons tamisé la poudre d'argile à travers un tamis de porosité inférieure ou égale à 70 [μm] afin de retirer les agrégats indésirables.



Figure11 : Processus de préparation d'argile.

Avant d'élaborer le composite, nous commençons par préparer la résine polyester en dosant correctement son durcisseur. Ensuite, nous mélangeons les deux composants pendant une durée de 120 secondes afin d'assurer l'homogénéité du mélange de résine polyester et de durcisseur. Par la suite, nous ajoutons les quantités d'argile préalablement déterminées dans la résine bien préparée. Nous procédons ensuite à un mélange pendant 180 secondes pour obtenir une homogénéité parfaite, puis nous coulons le composite dans un moule adapté à la forme et aux dimensions des éprouvettes requises pour cette expérience. Le démoulage est facilité en utilisant de la cire d'abeille appliquée sur la paroi intérieure des moules. Le Tableau 1 présente les quantités du mélange argile/polyester utilisées dans cette étude.

Tableau 1 : Variation des quantités du mélange d'argile/polyester.

Mélanges	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Argile[%]	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Résine[%]	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5

Le tableau présenté illustre les différentes variations possibles du mélange argile/polyester. Pour des raisons économiques, la quantité de résine polyester ne doit pas dépasser 50%. Les éprouvettes utilisées dans cette étude (Figure 12) présentent deux formes géométriques différentes : des disques circulaires et des plaques carrées.

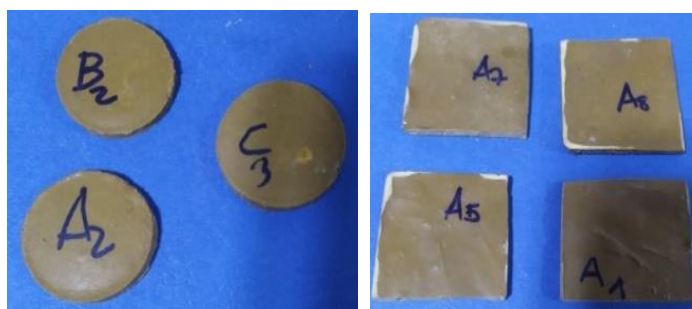


Figure12 : Eprouvettes pour le test d'érosion.

Nous avons observé qu'à partir de 15%, 10% et 5% de résine, il devient difficile de réaliser les éprouvettes car la quantité de résine est insuffisante pour mouiller les argiles en raison de la capacité d'absorption élevée de l'argile. Dans notre étude expérimentale, nous avons fabriqué deux formes d'éprouvettes, carrées et rondes, mais les résultats obtenus après les essais sont identiques. Pour caractériser les éprouvettes, nous les retirons des moules après 48 heures, puis nous réalisons les essais d'érosion sur un banc d'érosion après un séchage de 7 jours. L'objectif est de déterminer le mélange optimal offrant la résistance à l'érosion maximale. Les essais sont réalisés selon les conditions suivantes :

- Le diamètre de la buse est fixé à 8 mm.
- Le débit moyen pendant les tests d'érosion est de 25 g/s.
- Le diamètre des particules abrasives est de 200 μ m.
- L'angle d'impact est déterminé par la position axiale de la buse par rapport à la surface de l'éprouvette (dans notre expérience, cet angle varie de 0 à 90°).
- La distance entre la sortie de la buse et l'éprouvette est fixée à 220 mm.
- La pression moyenne du flux d'air pendant l'expérience est de 5,5 bar.
- La vitesse du flux d'air à 220 mm, à la pression moyenne, est de 21,4 m/s.
- La durée de chaque essai d'éprouvette est de 200 s.

La méthode utilisée pour quantifier la résistance à l'érosion consiste à mesurer la masse de chaque éprouvette avant et après les essais, puis à calculer la différence de masse. La quantité de masse perdue nous permet de comparer la résistance de deux éprouvettes pour différentes compositions.

3. RESULTATS

3.1 Angle d'attaque le plus érodant

La détermination de l'angle d'attaque le plus érodant revêt une importance primordiale dans cette étude, car il permet de déterminer la résistance de chaque éprouvette en fonction de la position de l'angle où l'érosion est maximale. L'éprouvette présentant la meilleure résistance correspondra au mélange optimal. Cette étape est cruciale pour évaluer les performances et identifier la composition la plus résistante face à l'érosion.

Tableau 2: Résultat d'érosion en fonction des angles d'attaques obtenus à partir du mélange de 35% de résine polyester et 65% d'argile.

Mélanges	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Angle	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Masse Avant [M1]	19,4271	19,4012	19,2953	19,1191	18,8959	18,6628	18,4772	18,3328	18,1885
Masse Après [M2]	19,4012	19,2953	19,1191	18,8959	18,6628	18,4772	18,3328	18,1885	18,0443
Perte de masse (g)	0,0259	0,1059	0,1762	0,2232	0,2331	0,1856	0,1444	0,1443	0,1442

Le Tableau 2 présente les résultats d'érosion en fonction des angles d'attaque obtenus à partir du mélange de 35% de résine polyester et 65% d'argile. Ces données permettent d'évaluer la résistance à l'érosion des différentes compositions du mélange, en fonction des angles d'attaque testés. Pour chaque mélange et angle d'attaque, les mesures de masse avant (Masse Avant [M1]) et après (Masse Après [M2]) les essais d'érosion ont été enregistrées. En analysant les données, on observe que la perte de masse due à l'érosion augmente avec l'augmentation de l'angle d'attaque. Par exemple, pour le mélange M1 (35% de résine polyester et 65% d'argile) et un angle d'attaque de 10°, la perte de masse est de 0,1598 g. Cette perte de masse augmente progressivement pour les angles d'attaque suivants : 0,2332 g pour 20°, 0,3025 g pour 30°, 0,3589 g pour 40°, 0,3822 g pour 50°, 0,308 g pour 60°, 0,2674 g pour 70°, 0,2453 g pour 80°, et 0,2271 g pour 90°. Ces résultats indiquent que l'érosion est plus prononcée à mesure que l'angle d'attaque augmente, ce qui entraîne une plus grande perte de masse pour les échantillons du mélange étudié. Ces données fournissent des informations précieuses pour évaluer la résistance à l'érosion du matériau composite et pour déterminer l'angle d'attaque optimal où la perte de masse est minimale.

Tableau 3 : Résultat d'érosion en fonction des angles d'attaques obtenus à partir du mélange de 20% de résine polyester et 80% d'argile.

Mélanges	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Angle	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Masse Avant [M1]	20,7883	20,6004	20,3017	19,9992	19,6403	19,2581	18,9501	18,6827	18,4374
Masse après [M2]	20,6004	20,3017	19,9992	19,6403	19,2581	18,9501	18,6827	18,4374	18,2103
Perte de masse (g)	0,1598	0,2332	0,3025	0,3589	0,3822	0,308	0,2674	0,2453	0,2271

Le Tableau 3 présente les résultats de l'érosion en fonction des différents angles d'attaque (A1 à A9) et des mélanges de résine polyester et d'argile (M1 à M9).

Pour chaque mélange et angle d'attaque, les mesures de masse avant (Masse Avant [M1]) et après (Masse Après [M2]) les essais d'érosion ont été enregistrées. En analysant les données, on observe que la perte de masse due à l'érosion augmente avec l'augmentation de l'angle d'attaque.

Par exemple, pour le mélange M1 (35% de résine polyester et 65% d'argile) et un angle d'attaque de 10°, la perte de masse est de 0,1598 g. Cette perte de masse augmente progressivement pour les angles d'attaque suivants : 0,2332 g pour 20°, 0,3025 g pour 30°, 0,3589 g pour 40°, 0,3822 g pour 50°, 0,308 g pour 60°, 0,2674 g pour 70°, 0,2453 g pour 80°, et 0,2271 g pour 90°.

Ces résultats indiquent que l'érosion est plus prononcée à mesure que l'angle d'attaque augmente, ce qui entraîne une plus grande perte de masse pour les échantillons du mélange étudié.

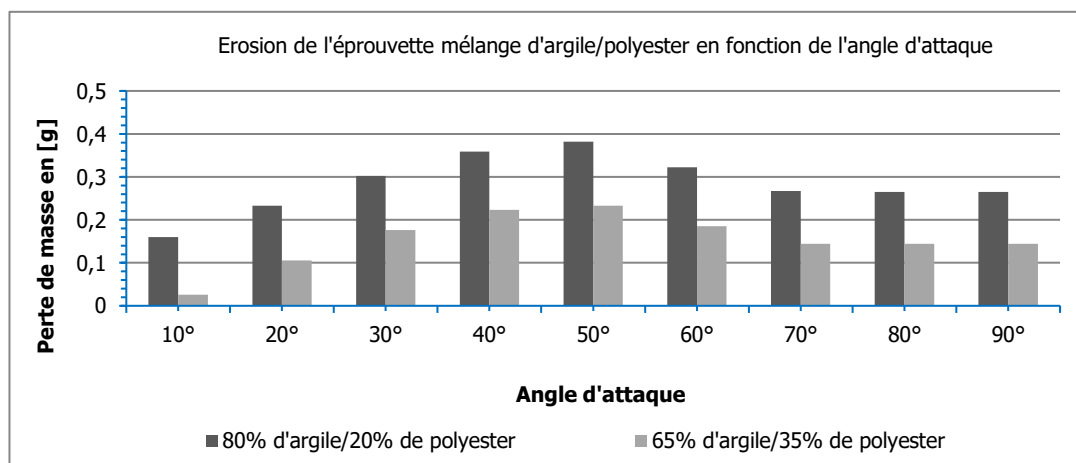


Figure 13 : Histogramme des essais d'érosion pour différent angle d'attaque.

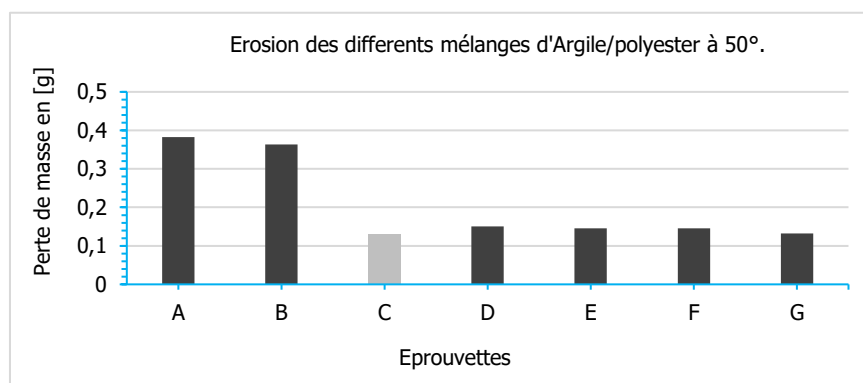
Le taux d'érosion augmente avec l'augmentation de l'angle d'attaque, comme illustré dans la Figure 13. Le diagramme à barres met en évidence que la valeur maximale d'érosion est atteinte aux angles compris entre 45° et 50°. Au-delà de 50°, plus précisément à 60°, le taux d'érosion commence à diminuer. Ces résultats indiquent que les angles d'attaque qui conduisent à une érosion maximale sont les mêmes, mais avec des taux d'érosion différents pour les différentes compositions d'argile/polyester. À partir de 70°, la diminution du taux d'érosion devient plus lente jusqu'à atteindre 90°.

3.2 Mélange optimum

La connaissance du mélange optimal nous permet de procéder à une analyse comparative de nos résultats par rapport à ceux d'autres chercheurs et de mettre en évidence les avantages potentiels tels que leurs applications et leur impact économique (coût). Afin de déterminer le mélange optimal, nous avons effectué des tests sur les éprouvettes avec un angle d'attaque de 50°, où la perte de masse est maximale. Cette approche nous permet d'identifier le mélange qui présente les meilleures performances en termes de résistance à l'érosion.

Tableau 4: Erosion des éprouvettes avec variation des quantités d'argile et du polyester à 50°.

Mélanges	A	B	C	D	E	F	G
Argile [%]	80	75	70	65	60	55	50
Résine [%]	20	25	30	35	40	45	50
Angle	50°	50°	50°	50°	50°	50°	50°
Erosion	0,3822	0,3631	0,1313	0,1501	0,1456	0,1455	0,1322

**Figure 14 :** Erosion pour l'angle de 50°.

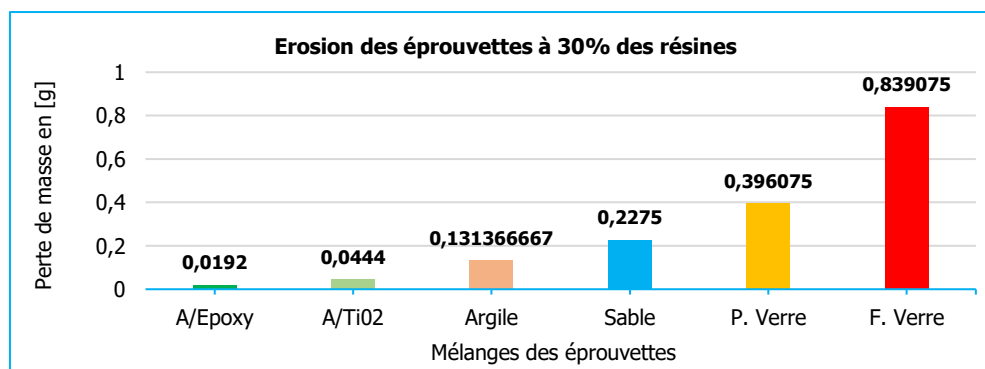
Après les expériences, les résultats ont démontré que l'éprouvette C, composée de 70% d'argile et de 30% de polyester, était le mélange optimal. En effet, cette composition a entraîné la perte de masse la plus faible. Pour l'éprouvette G, avec une composition de 50% d'argile et 50% de polyester, le taux d'érosion était également faible, mais légèrement supérieur à celui de l'éprouvette C. Cependant, parmi ces deux compositions, l'éprouvette G s'est avérée plus coûteuse que l'éprouvette C, car elle nécessitait une plus grande quantité de résine (50%), tandis que l'éprouvette C n'en nécessitait que 30%.

3.3 Résistance en érosion en fonction des propriétés des charges

Dans cette étude comparative, nous avons évalué la résistance à l'érosion du sable de différents composites. Les éprouvettes ont été fabriquées en utilisant une base de 30% de résine polyester, avec différents types de charges mélangées, notamment :

- 70% de poudre de verre avec un diamètre maximal de 75 μm ,
- 70% de sable avec un diamètre maximal de 75 μm ,
- 70% de fibre de verre avec une densité surfacique de 450 g.m^{-2} ,
- 30% d'argile mélangée à 40% de dioxyde de titane,

Il est important de noter que nous avons également réalisé d'autres éprouvettes en utilisant une composition de 30% de résine époxy et 70% d'argile. Toutes les procédures, méthodes et matériaux utilisés pour la fabrication des éprouvettes étaient identiques. Les essais expérimentaux ont également été réalisés dans les mêmes conditions. Les résultats obtenus ont donné la courbe suivante.

**Figure 15 :** Erosion à 30°.

Les résultats obtenus indiquent que le mélange contenant 30% de résine époxy et 70% d'argile présente la plus grande résistance. En effet, la résine époxy offre une bonne résistance à la perforation par rapport à la résine polyester. Cependant, elle est également plus coûteuse que la résine polyester. Pour le mélange contenant 30% d'argile, 40% de TiO₂ et 30% de résine polyester, la résistance à l'érosion est supérieure à celle du mélange argile/polyester. En effet, le matériau titane présente de bonnes propriétés mécaniques et thermiques en termes de résistance.

En comparaison, le composite argile/polyester présente une meilleure résistance à l'érosion que le composite sable/polyester. Cela est dû à l'état de surface plus uniforme de l'argile/polyester par rapport au mélange sable/polyester.

L'argile étant à l'échelle nanométrique, l'hétérogénéité morphologique de la surface provoquée par les grains de charge est minimisée à l'échelle macroscopique, contrairement à l'état de surface du composite sable/polyester.

La résistance à l'érosion du composite sable/polyester est intéressante par rapport au composite poudre de verre/polyester, car la résistance à l'érosion dépend également de la dureté du matériau cible et du matériau projeté. Nous savons que la dureté du sable est supérieure à celle du verre.

En ce qui concerne le composite poudre de verre/polyester et le composite fibre de verre/polyester, tous deux contenant 30% de résine, ils se distinguent par leur état de surface et la disposition des charges dans la matrice. L'état de surface du composite poudre de verre/polyester est relativement plus homogène par rapport au composite fibre de verre/polyester. Tous les résultats présentés reflètent le comportement de chaque composite à l'état sec.

3.4 Résistance à l'état humide

Dans cette étude, il est nécessaire d'effectuer une analyse de résistance à l'état humide, car le matériau que nous avons obtenu est destiné à être utilisé dans un environnement humide, plus précisément pour protéger le bord d'attaque d'une pale d'éolienne exposée à différents types de conditions, y compris la pluie. Afin d'obtenir des résultats, nous devons réaliser un test d'imprégnation



Figure 16 : Eprouvettes trempées dans l'eau.

Les éprouvettes sont placées dans un récipient rempli d'eau pendant une période de 7 jours. Après cette période, nous utilisons une balance d'analyse pour mesurer la masse des éprouvettes et ainsi déterminer la quantité d'eau absorbée. Les valeurs de masse de chaque éprouvette avant et après l'immersion sont présentées dans le tableau suivant. La différence de masse représente le taux d'absorption des composites.

Tableau 5 : Résultats pour le test d'imbibition d'eau pour cinq (05) éprouvettes.

Mélanges	A	B	C	D	E
Masse Avant en g	11,4522	9,0794	11,5642	23,683	5,2316
Masse Après en g	11,5687	9,2218	12,3292	23,893	8,0563
Perte de masse en g	0,1165	0,1424	0,765	0,2104	2,8247

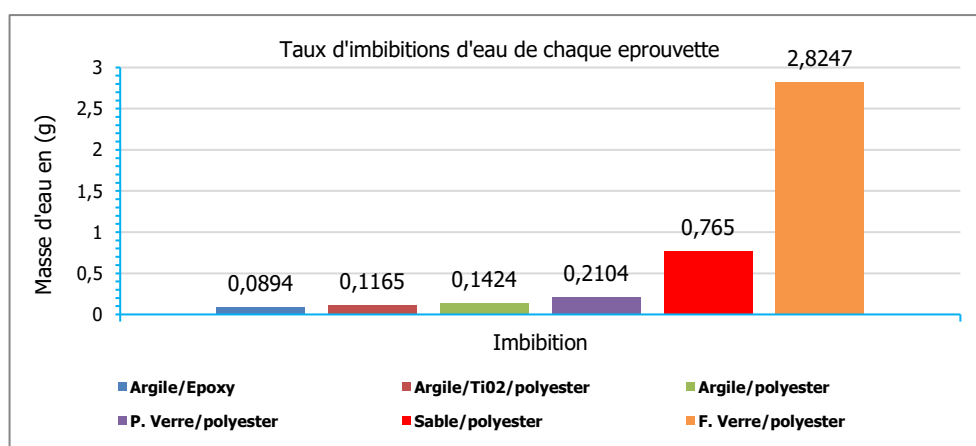


Figure 17 : Taux d'imbibition d'eau.

Le diagramme présente la quantité d'eau absorbée par chaque éprouvette pendant l'immersion. Nous observons que le composite fibre de verre/polyester est le plus absorbant, avec une quantité d'eau absorbée de 2,8247[g]. Ensuite, le composite sable/polyester présente une quantité d'eau absorbée de 0,765[g]. Ainsi, le composite fibre de verre/polyester est plus absorbant que le composite poudre de verre/polyester. Enfin, le composite argile/époxy présente la plus faible quantité d'eau absorbée.

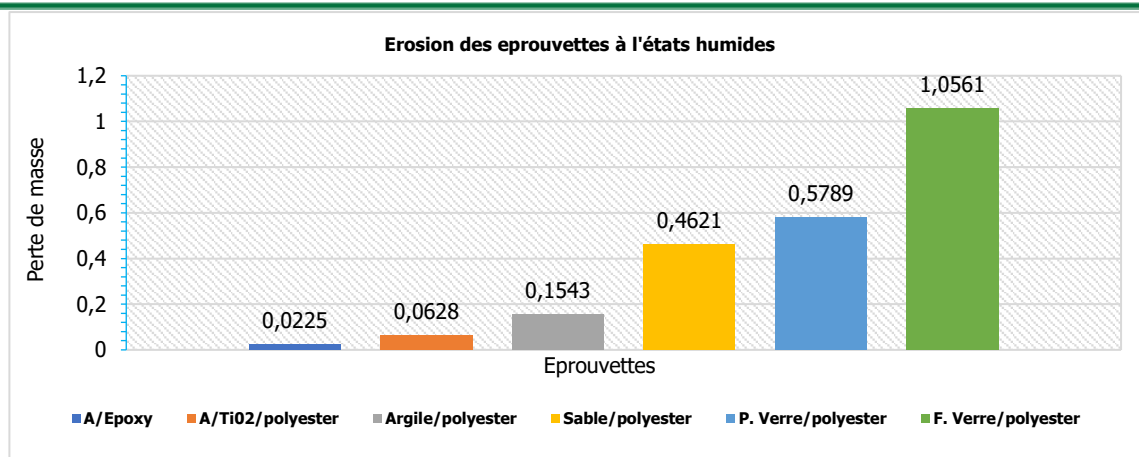


Figure 18 : Histogramme de l'érosion à l'état humide

Après l'imprégnation, nous avons effectué des tests d'érosion pour chaque éprouvette à l'état humide. Le diagramme présenté illustre le comportement des différents composites en termes de résistance à l'érosion. Après les essais, nous avons constaté que plus le matériau était absorbant, plus il était vulnérable, avec une perte de masse de 1,0561[g] pour le composite le plus absorbant. Les composites argile/époxy et argile/polyester ont montré une plus grande résistance à l'état humide par rapport aux autres composites.

3.5 Protection de bord d'attaque d'une pale d'éolienne par le nanocomposite

Dans le cadre de l'application des résultats, pour protéger le bord d'attaque d'une pale contre l'érosion par abrasion du sable, nous avons envisagé de revêtir la surface du bord d'attaque de la pale avec des nanocomposites. Afin d'évaluer cette approche, nous avons réalisé une dernière expérience qui se rapproche de la réalité, simulant les conditions réelles auxquelles une pale est confrontée lors de son fonctionnement, en présence d'un écoulement comportant des particules solides. Cette expérience a été effectuée en utilisant un profil NACA 4415. Ce profil a été choisi car il facilite les opérations de revêtement et de renforcement du bord d'attaque, ce qui est essentiel dans notre étude.

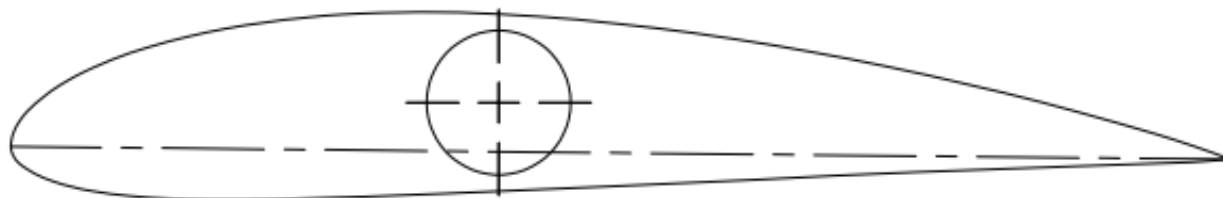


Figure19 : Profil aérodynamique, NACA4415.

Pour produire la section de pale du profil NACA 4415, nous avons construit un moule en bois avec des dimensions intérieures identiques à celles du profil réel de la pale.



Figure20 : Moules.

Le moule, tel qu'illustré dans la figure, est divisé en deux parties distinctes : la partie inférieure représente la forme de l'intrados, tandis que la partie supérieure correspond à l'extrados. L'axe de symétrie du moule se situe le long de la corde moyenne du profil. Une fois le moule fabriqué, nous procédons à la création de l'éprouvette. Nous coulons la résine polyester préalablement dosée avec le durcisseur dans le moule, préalablement lubrifié avec de la cire d'abeille.

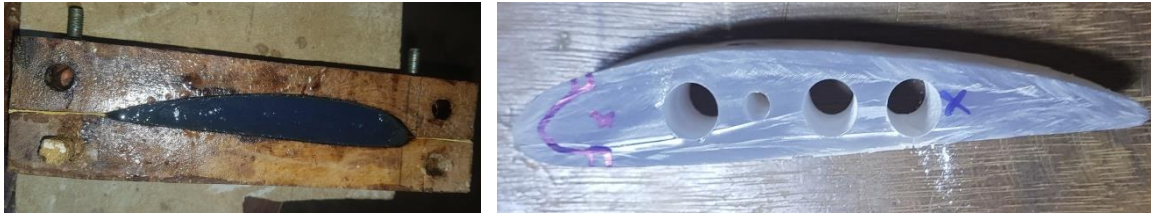


Figure 21 : Processus d'obtention de l'éprouvette.

Sur la partie gauche, nous pouvons voir le moule rempli de résine polyester, tandis que sur la partie droite, nous observons l'éprouvette obtenue après le démoulage. Un temps de séchage de 48 heures a été respecté pour éviter un durcissement trop rapide. Notre objectif principal est de renforcer le bord d'attaque à l'aide de matériaux composites tels que la poudre de verre/polyester, l'argile/polyester, l'argile/TiO₂/polyester, l'argile/époxy et le sable/polyester.



Figure 22 : Epreuve avec bord d'attaque renforcé

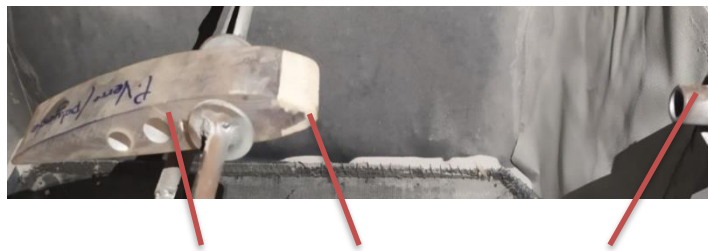


Figure 23 : Représentation de l'éprouvette dans un stand d'essai d'abrasion.

Tableau 6: Résultats pour les essais d'érosion des éprouvettes renforcées aux bords d'attaques.

Mélanges	A	B	C	D	E
Masse Avant (g)	91,707	98,8545	83,0559	92,8203	93,8421
Masse Après (g)	91,2707	98,5772	82,8295	92,6486	93,7641
[M1 - M2]	0,4363	0,2773	0,2264	0,1717	0,078

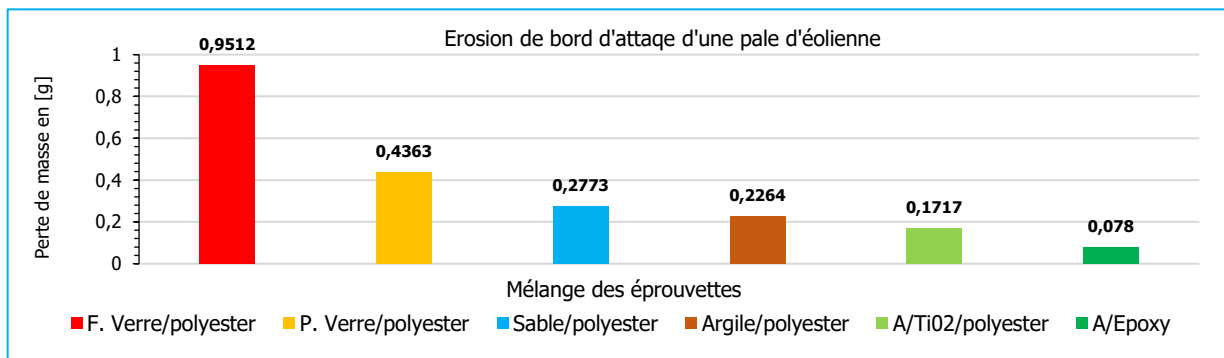


Figure 24 : Erosion du bord d'attaque d'une pale d'éolienne.

Les résultats montrent que les éprouvettes renforcées par les composites Argile/Epoxy ; Argile/TiO₂/Polyester et Argile/Polyester sont plus performant, par rapport à ceux qui sont renforcé par Fibre de verre/Polyester.

4. DISCUSSION

Nous avons varié les ratios d'argile et de polyester, avec une valeur maximale ne dépassant pas un rapport de 50/50, choisi pour des raisons économiques. La quantité de résine polyester ne doit pas dépasser la quantité de charge, car elle est coûteuse. Dans la fabrication des pales d'éolienne, la norme spécifie une valeur de 81,521% de fibre de verre et de 18,479%

de résine polyester [10, 11]. Le composite argile/polyester présente un comportement semi-ductile, avec un taux d'érosion maximum situé entre 45° et 60° [12]. Tous les tests ont été réalisés selon la norme ASTM G76-18 de l'American Standard Test Method [13].

À partir des résultats précédents, il est observé que les angles d'érosion restent cohérents pour différents ratios d'argile et de polyester dans chaque spécimen. Pour les matériaux à base de polymère, l'angle d'érosion correspond à 50° [14]. Ainsi, l'angle d'érosion ne dépend pas de la composition de l'argile, mais plutôt de la caractéristique spécifique du composite argile/polyester. Cependant, l'érosion des matériaux dépend de plusieurs paramètres, notamment de la composition du mélange. Lorsque la quantité de résine diminue, le taux d'érosion augmente, ce qui correspond à une augmentation de la teneur en argile dans la composition. La diminution de la résistance à l'érosion est due à un excès d'argile, entraînant la formation d'interactions argile-argile. Par conséquent, la liaison argile-polyester diminue dans le composite, le rendant plus vulnérable [15].

Avec une teneur en résine de 30% et une teneur en argile de 70%, la résistance est maximale, avec un taux d'érosion de 0,1313 g sur 200 secondes, à une vitesse des particules de 11,5 m/s, un débit massique de particules de 25 g/s et un diamètre de particules de 250 µm. L'interaction entre les particules de sable et la surface du composite entraîne l'élimination de matière due à une rupture fragile, facilitée par des fissures latérales [16, 17, 18]. La résistance aux chocs du nanocomposite argile/polyester est attribuée à l'orientation des particules d'argile, favorisée par l'intercalation interfoliaire dans le mélange [19]. De plus, la présence d'argile augmente la ténacité du composite. En comparant les résultats avec le composite fibre de verre/polyester pour la même quantité de résine, il est évident que le composite argile/polyester présente une résistance supérieure. La présence d'argile améliore la dureté de surface du nanocomposite [20]. L'état de surface contribue également à la différence de résistance à l'érosion entre les deux composites. Le composite argile/polyester présente une surface plus uniforme par rapport au composite fibre de verre/polyester [21]. La résistance à l'érosion des mélanges poudre de verre/polyester et sable/polyester est inférieure à celle du composite argile/polyester. Dans ces mélanges, les grains de sable ou de poudre de verre et le polyester forment un mélange hétérogène, où les charges n'affectent pas significativement les propriétés du polymère. Les particules érosives se détachent de la surface du matériau cible en raison de la collision et de l'interaction entre le liant et la particule érosive. Dans ce cas, la résine polyester a une dureté inférieure à celle du grain de sable. Le polyester agit comme un liant ductile, tandis que le sable est un matériau relativement fragile et dur [21].

Dans le cas du composite argile/TiO₂/polyester, sa résistance à l'érosion est supérieure à celle du composite argile/polyester. Cela s'explique par l'effet de la propriété mécanique du titane. L'ajout de titane réduit la quantité d'argile, avec un taux de dioxyde de titane de 40% et 30% d'argile. Cependant, ce composite est plus coûteux que le composite argile/polyester. Le composite le plus résistant est le composite argile/époxy, avec une teneur de 30% de résine époxy et 70% d'argile.

Lors des tests d'imprégnation, on observe une absorption plus importante pour le composite fibre de verre/polyester. Cela s'explique par le fait que 30% de résine polyester est insuffisant pour remplir les espaces entre les couches de fibres de verre, ce qui entraîne une porosité élevée dans ce composite. On remarque également que le taux d'absorption pour le sable/polyester est supérieur à celui de la poudre de verre/polyester. Dans notre expérience, les grains de sable sont plus absorbants que les grains de verre en raison de leur micro-rugosité de surface, ce qui favorise la capillarité. En revanche, les composites argile/TiO₂/polyester et argile/époxy présentent un faible taux d'absorption en raison de la propriété de barrière de l'argile. La présence de charges nanostructurées dans ces composites crée des nano-pores. La résistance à l'érosion en milieu humide est expliquée par le taux d'absorption, où une absorption plus importante rend le composite plus vulnérable.

En ce qui concerne la protection du bord d'attaque des pales d'éolienne, on constate que le taux d'érosion est plus faible avec le composite argile/polyester par rapport au composite fibre de verre/polyester. Même pour les composites argile/TiO₂/polyester et argile/époxy, le taux d'érosion est inférieur à celui du composite fibre de verre/polyester, avec une vitesse de particules de 11,5 m/s.

5. CONCLUSION

En conclusion, l'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable largement utilisée à l'échelle mondiale, avec des puissances allant de quelques watts à plusieurs mégawatts. Les pales jouent un rôle crucial dans la captation de l'énergie cinétique du vent et sa transformation en énergie mécanique, qui entraîne ensuite le rotor d'un générateur via un arbre de liaison si l'accouplement est direct. Dans les pays en développement tels que Madagascar, il est difficile d'installer des éoliennes de plusieurs mégawatts en raison des coûts élevés liés à leur installation et à leur maintenance.

L'un des problèmes majeurs rencontrés avec les profils aérodynamiques concerne la présence de rugosité au niveau des bords d'attaque. Cette rugosité peut entraîner une diminution du rendement et une usure prématurée des pales si les interventions appropriées ne sont pas effectuées en temps voulu. Les travaux de recherche présentés dans cet article visent à comprendre les facteurs et les mécanismes favorisant l'usure au niveau des bords d'attaque, ainsi qu'à proposer des solutions. Le bord d'attaque, qui est la partie de la pale faisant face à la direction du vent, est exposé aux particules solides transportées par le vent. L'impact de ces particules solides sur le bord d'attaque entraîne l'érosion de la matière de la pale, également connue sous le nom d'usure par abrasion. Pour prévenir ce type d'usure, nous proposons de renforcer ou de

revêtir le bord d'attaque avec un matériau présentant une résistance à l'érosion supérieure à celle du matériau de fabrication de la pale.

Notre proposition de solution repose sur l'élaboration et la caractérisation de nanocomposites à base d'argile/polyester, d'argile/TiO₂/polyester et d'argile/époxy. Les résultats précédents ont démontré que les composites d'argile/polyester, d'argile/TiO₂/polyester et d'argile/époxy présentent une résistance à l'érosion supérieure à celle de la fibre de verre/polyester. Ces composites ont été élaborés avec un mélange optimal de 70% d'argile/30% de résine, et pour l'argile/époxy, de 40% de TiO₂/30% d'argile/30% de polyester, avec une vitesse de particules estimée à 11,5 m/s.

Les résultats de cette étude peuvent fournir des informations essentielles pour la protection du bord d'attaque des pales d'éoliennes installées dans des zones désertiques ou semi-arides. Les nanocomposites d'argile/polyester, d'argile/TiO₂/polyester et d'argile/époxy peuvent être utilisés pour revêtir le bord d'attaque. L'utilisation de nanocomposites en tant que revêtement présente de nombreux avantages potentiels. Cependant, il est important de souligner que ces résultats sont issus de notre étude expérimentale spécifique et peuvent varier en fonction des conditions environnementales réelles et des caractéristiques spécifiques des pales d'éoliennes. Des études complémentaires et des tests sur le terrain sont nécessaires pour valider pleinement l'applicabilité et l'efficacité de ces nanocomposites dans des applications réelles d'éoliennes.

6. REFERENCES

1. Barka B. Etude comparative de l'érosion par particules de sable d'un verre organique en polystyrène et d'un verre sodocalcique [thèse de doctorat]. Université Ferhat Abbas Setif-1; 2019 Jan 24. Disponible sur: <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/3123>
2. Alhussein A. Transport et stockage des dérivés pétroliers, problématique d'endommagement des pipes par érosion de sable et par hydrogène [thèse de doctorat]. Université de Paul Verlaine de Metz; 2010 Oct 22. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748926v1/preview/Alhussein.Akram.SMZ1034.pdf>
3. Zenasni MA. Synthèse et caractérisation des nanocomposites biodégradables élaborés par trois procédés (intercalation en solution, polymérisation in situ et par voie fondue) [thèse de doctorat]. Université de Lorraine; 2015 Dec 18. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748926v1/preview/Alhussein.Akram.SMZ1034.pdf>
4. Callister WD. Materials Science and Engineering: An Introduction, Chapter 16, pp. 636-663. 2003. Disponible sur: <https://anupturnedworld.files.wordpress.com/2016/06/callister-materials-science-and-engineering.pdf>
5. Chaoui S. Elaboration et caractérisation de nanocomposite à matrice polymère: Approche expérimentale [thèse de doctorat]. Université Ferhat Abbas-Setif, spécialité: Génie des polymères. Disponible sur: https://tdoctorat.univ-setif.dz/images/stories/pdf_theses/facultes1/TEC/CHAOUISALIHA.pdf
6. Henne M, Breyer C, Niedermeier M, Ermanni P. A new kinetic and viscosity model for liquid composite molding simulations in an industrial environment. *Polymer Composites*. 2004;25:255-269.
7. Lamy Y. Nanostructuration de résines polyester insaturé par des copolymères à blocs: application aux composites SMC et BMC [thèse de doctorat]. École doctorale Matériaux de Lyon, Spécialité: Matériaux Polymères et Composites. 2012 Sep 6. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2012ISAL0071.pdf>
8. Glaris P. Ingénierie de surface de matériaux composites pour l'aéronautique. Chimie et topographie de surface, une aide au démoulage? [thèse de doctorat]. Université du Maine; 2013 Jun 20. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01016005/document>
9. Levao NP, Ratsifaherandahy FD, Mamiharijaona R, Rajaonah R. Analyse de résistance à l'abrasion d'un matériau composite sable/polyester pour renforcer les bords d'attaque des pales d'éolienne. 2022 Jun 10. Disponible sur: <Levao-Ref13-ajira250622.pdf>
10. Bédard PO. Analyse du cycle de vie et recommandations concernant la valorisation des pales d'éoliennes dans l'est-du-Québec [mémoire de maîtrise]. Université de Sherbrooke; 2018 Sep. Disponible sur: https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/13586/Bedard_Pierre_Olivier_MEnv_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
11. Beauchamp MA. Développement d'un procédé de recyclage des pales d'éoliennes en composite à matrice thermoplastique [mémoire de maîtrise]. Université de Montréal; 2010 Jan 11. Disponible sur: https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/256/1/BEAUCHAMP_Marc-Andr%C3%A9.pdf
12. Bagci H, Imrek A. Solid particle erosion behavior of glass mat-based polyester laminate composite materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2012. Disponible sur: DOI: 10.1177/0892705711429490.
13. American Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. Disponible sur: <https://pdfcoffee.com/download/norma-astm-g76-18-pdf-free.html?reader=1>
14. Thai CM, Tsuda K, Hojo H. Erosion Behavior of Polysterene. *Journal of Testing and Evaluation*. 1981 Nov 06. Disponible sur: <https://www.astm.org/jte11239j.html>.
15. Kouni B. Elaboration et caractérisation des nanocomposites à matrice PP/PP-g-AM/PA66 renforcés par des nanoargiles [thèse de doctorat]. Université M'Hamed Bougara-Boumerdes; 2014. Disponible sur: <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080123456789/1346>
16. Marshall DB, Lawn BR, Evans AG. Elastic-plastic indentation damage in ceramic: The lateral crack system. *Journal of the American Ceramic Society*. 1980 Sep 01. Disponible sur: DOI: 10.1111/J.1151-2916.1980.TB10768.X
17. Buijs M, Pasmans JM. Erosion of glass by alumina particles: transitions and exponents. *Wear*. 1995. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)06560-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)06560-8)
18. Slaïl D. Matériaux Nanostructurés: Synthèse, caractérisation et étude de quelques systèmes de nanocomposites hybrides polymères montmorillonite [thèse de doctorat]. Université Ferhat Abbas Setif-1; 2019 Jul 15. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-00730633/document>
19. Marouani A. Etude des caractéristiques physiques de couches minces à base d'oxydes métalliques déposés par voie sol-gel [thèse de doctorat]. Université de Ferhat Abbas-Setif-1; 2018 Nov 04. Disponible sur: <https://aurore.unilim.fr/theses/nxbigfile/default/4cc09354-efa8-4f34-bdf3-4f9197e96005/blobholder:0/2006LIMO0044.pdf>
20. Lawn BR. A model for the wear of brittle solids under fixed abrasive conditions. *Wear*. 1975;33:369-372. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(75\)90290-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(75)90290-2)
21. Fall M. Approche expérimentale et numérique de l'usure du carbure de tungstène sous impact-glissement [thèse de doctorat]. Université de Lyon; 2018 Apr 04. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-02537342v1/preview/TH_T2637_mfall.pdf



How to cite this article: Levao Nantenaina Paulin, Ramaroson Mamiharijaona, Rajaonah Rabevala. RENFORCEMENT ET REVETEMENT DES BORDS D'ATTAQUES DES PALES D'EOLIENNE AEROGENERATEUR PAR DES NANOCOMPOSITES A BASE D'ARGILE/POLYEMERE. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2023; 17(1): 98-109.

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/>