



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
LABORATOIRE DE GÉNIE MÉCANIQUE ET
DÉVELOPPEMENT



Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
Mécanique

*Conception et réalisation de pales du rotor d'une turbine éolienne à partir de
matériaux composites à base de fibres de palmier dattier*

*MOHAMMED MOUNSIF SERAOUI
MEROUANE OURDANE*

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2023

Composition du Jury :

Président	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Promoteur	M. Said RECHAK	Professeur	ENP
Promoteur	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP
Promoteur	M. Abdelhamid BOUHELAL	MCA	ENP
Examineur	Mme. Mouna MAHFOUD	Doctorante	ENP
Invité	M. Noureddine Laskri	Ingénieur	HG Craft
Invité	M. Madjid TATA	MR	CDER



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
LABORATOIRE DE GÉNIE MÉCANIQUE ET
DÉVELOPPEMENT



Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
Mécanique

*Conception et réalisation de pales du rotor d'une turbine éolienne à partir de
matériaux composites à base de fibres de palmier dattier*

MOHAMMED MOUNSIF SERAOUI
MEROUANE OURDANE

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2023

Composition du Jury :

Président	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Promoteur	M. Said RECHAK	Professeur	ENP
Promoteur	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP
Promoteur	M. Abdelhamid BOUHELAL	MCA	ENP
Examineur	Mme. Mouna MAHFOUD	Doctorante	ENP
Invité	M. Noureddine Laskri	Ingénieur	HG Craft
Invité	M. Madjid TATA	MR	CDER

Dédicace

J'ai dédié ce travail

À mes parents qui ont toujours redoublé d'efforts pour me voir réussir, à qui je témoigne ma plus profonde reconnaissance.

À mes sœurs qui m'ont toujours épaulé, et qui m'ont chaleureusement soutenu et encouragé tout au long de mon parcours.

À mes amis avec qui j'ai passé les meilleurs moments de ma vie.

Aux étudiants de troisième année Génie Mécanique promo 2023, pour tous les moments que nous avons partagés ces trois dernières années, ce fut un plaisir.

Merci de m'avoir aidé et d'être toujours là pour moi.

"Mohammed Mounsif SERAOUI"

Dédicace

À ma mère et mon père bien-aimés,

Cette dédicace est tout d'abord pour vous, mes piliers les plus solides. Vous m'avez donné l'amour, le soutien et les encouragements nécessaires pour que je puisse poursuivre mes études et atteindre cet important jalon de ma vie. Votre dévouement et votre confiance en moi ont été ma source d'inspiration constante. Merci d'avoir cru en mes rêves et de m'avoir poussé à donner le meilleur de moi-même.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes professeurs et mes collègues de classe. Votre enseignement de qualité, vos discussions stimulantes et notre collaboration m'ont aidé à développer mes compétences et à élargir mes horizons.

Un merci spécial à mes amis qui ont été mes piliers dans les moments de doute et de fatigue. Votre amour, votre patience et votre croyance en moi ont été une source d'inspiration constante.

"Merouane OURDANE"

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements et notre franche reconnaissance à nos encadrants, M. Said RECHAK, M. Arezki SMAILI et M. Abdelhamid BOUHELAL, pour leur patience, leurs conseils avisés, leur encadrement, leur assistance et leur soutien pendant toute la période du stage, mais également tout au long de notre cursus au sein du département.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers notre encadreur dans leur atelier HG CRAFT, M. Nourddine LASKRI, pour leur disponibilité, leur encouragement et leur bienveillance.

Nous vous remercions chaleureusement M. TATA Madjid d'avoir accepté notre invitation à assister à notre soutenance de projet fin d'étude. Votre présence honorera cette occasion spéciale, et nous sommes impatients de partager notre travail avec vous. Merci encore pour votre soutien précieux.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers nos enseignants du département Génie Mécanique et des classes préparatoires, pour les connaissances qu'ils nous ont inculquées et leur accompagnement tout au long de notre formation, plus particulièrement M. BELKACEMI Yacine, M. GUERGUEB Brahim et bien sûr Mme. MAHFOUD Mouna.

Nous remercions par avance les membres du Jury, qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, plus particulièrement notre camarade Lyes Chouaki.

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تصميم وتصنيع شفرات لتوربين هوائي رأسي منزلي من نوع حاوا باستخدام مواد مركبة تعتمد على ألياف نخيل التمر. تشمل الأهداف تطوير الشفرات الدوارة تجريبياً للتحقق من صلاحيتها الهيكلية، وإعداد عينات من المواد المركبة باستخدام ألياف نخيل التمر، وإجراء اختبارات ثابتة وديناميكية على هذه العينات، وأخيراً، تصنيع الشفرات. يمثل هذا المشروع مساهمة مبتكرة في استخدام مواد مركبة تعتمد على الألياف الطبيعية لتطبيقات الطاقة الريحية المستدامة، مع التركيز على استغلال الموارد الطبيعية المحلية.

الكلمات الرئيسية طاقة الرياح، أجنحة الدوران، ألياف نخلة التمر، مواد مركبة، صب القوالب، الطباعة ثلاثية الأبعاد، اختبارات المتانة.

Abstract

This project aims to design and manufacture blades for a domestic Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) using composite materials based on date palm tree fibers. The objectives include the experimental development of the rotor blades to verify their structural viability, the preparation of composite material samples using date palm tree fibers, conducting static and dynamic tests on these samples, and finally, the fabrication of the blades. This project represents an innovative contribution to the use of natural fiber-based composite materials for sustainable wind energy applications, while also promoting the utilization of local natural resources.

key words : Wind Energy, Rotor Blades, Date Palm Fibers, Composite Materials, Molding, 3D Printing, Strength Testing.

Résumé

Le présent projet consiste à concevoir et réaliser des pales pour une turbine éolienne domestique de type HAWT à partir de matériaux composites végétales à base de fibres de palmier dattier. Les objectifs sont de développer expérimentalement les pales du rotor en vue de vérifier leur viabilité structurelle, de préparer des échantillons de matériaux composites à base de fibres de palmier dattier, d'effectuer des tests statiques et dynamiques sur ces échantillons et enfin de fabriquer les pales. Ce projet représente une contribution innovante à l'utilisation des matériaux composites à base de fibres naturelles pour des applications éoliennes durables, tout en valorisant les ressources naturelles locales.

Mots clés : Énergie éolienne, Pales du rotor, Fibres de palmier dattier, Matériaux composites, Moulage, Impression 3D, Tests de résistance.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale	14
1 Généralités sur les éoliennes et les matériaux composites	17
1.1 Introduction	18
1.1.1 Les besoins en énergie	18
1.1.2 Les avancées scientifiques dans le domaine de l'énergie	18
1.2 Les éoliennes et les fermes éoliennes	19
1.3 L'énergie éolienne domestique et l'utilisation de matériaux composites	20
1.3.1 L'éolienne domestique	20
1.3.2 Les matériaux composites utilisés dans les éoliennes	21
1.3.3 Utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes	22
1.3.4 Conclusion	23
2 Extraction des fibres et particules du palmier dattier	25
2.1 Introduction	26
2.1.1 Le palmier dattier	26
2.2 Méthodes d'extraction des fibres et particules	29
2.2.1 Méthode manuelle	29
2.2.2 Méthode mécanique	30
2.3 Préparation des fibres et particules pour les tests	35
2.3.1 Nettoyage et séchage des fibres et particules	35
2.4 Conclusion	38
3 Conception et réalisation des moules	39
3.1 Introduction à la conception et réalisation des moules	40
3.2 Moule en impression 3D pour la pale de 1,20 m	40
3.3 Conception du système de fixation	61
3.4 Moule en impression 3D pour les éprouvettes	66
3.5 Moule en composites pour les pales	71
3.5.1 - Procédé de Fabrication du Moule en Matériaux Composites :	72
3.6 Conclusion	77
4 Caractérisation des matériaux composites à base de fibres naturelles (palmier dattier)	78
4.1 Introduction	79

4.2	Propriétés des fibres de palmier dattier	79
4.3	Matrices de composites	80
4.4	Procédés de fabrication des échantillons de composites	89
4.5	Choix des proportions de fibres et de matrices	90
4.6	Préparation des échantillons pour les tests	91
4.7	Caractérisation mécanique des composites	95
4.8	Résultats des tests mécaniques	98
4.9	Discussion des résultats	106
4.10	Limitations et améliorations potentielles	106
4.11	Conclusion	108
5	Élaboration des pales pour la réalisation	109
5.1	Élaboration des pales pour la réalisation	110
5.1.1	Les processus de fabrication des pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort de fibres de palmier dattier	111
5.1.2	Les processus de fabrication des Pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort hybride : fibres de palmier dattier et fibre de verre tissé (roving)	120
5.1.3	Conclusion	124
	Conclusion générale	126
	Bibliographie	131
	Annexes	132

Table des figures

1.1	Ferme éolienne de Kaberten d'Adrar	19
1.2	Classification des fibres végétales selon l'origine	23
2.1	Schéma du palmier dattier (MUNIER, 1973)	27
2.2	Tiges	28
2.3	Feuilles	28
2.4	Kornaf	29
2.5	Fibres de palmier dattier avant et après l'extraction manuelle	30
2.6	Processus d'extraction manuelle des fibres de palmier dattier à l'aide de brosses métalliques	30
2.7	Broyeur de végétaux GHE 150 STIHL	31
2.8	Tiges et bases pétiolaires (kornaf) de palmier dattier avant et après le broyage avec le broyeur GHE 150 STIHL	32
2.9	Broyeur kitchef grinder	33
2.10	Machine de tamisage	34
2.11	Particules de bases pétiolées (kornaf) de palmier dattier après tamisage	34
2.12	Particules tiges de palmier dattier après tamisage	35
2.13	Nettoyage des fibres et particules de palmier dattier	36
2.14	Feuilles de palmier dattier nettoyées et prêtes pour la suite du processus	36
2.15	Processus de séchage des fibres de palmier dattier	37
3.1	Imprimante 3D Creality CR-10	42
3.2	Filament PLA "acide polylactique"	42
3.3	Pale d'éolienne de profil S809 par similitude 'SolidWorks'	43
3.4	Bloc rectangulaire	44
3.5	La pale et le bloc rectangulaire : Les éléments clés de la conception SolidWorks pour le moule	44
3.6	Résultat final de la conception du moule	45
3.7	Vue en coupe du moule	45
3.8	Plan de coupe : Conception stratégique de la partie inférieure du moule pour la pale d'éolienne	47
3.9	Vue détaillée d'une section du moule de la pale d'éolienne avant assemblage	48
3.10	Détail de la liaison	48
3.11	Assemblage de la liaison avec une partie du moule de la pale d'éolienne	49
3.12	Ultimaker CURA	50
3.13	Paramètres d'impression	51
3.14	Paramètres de qualité	51
3.15	Paramètre des couches et remplissage "infill"	52
3.16	Temps d'impression et consommation de PLA	53
3.17	Vue éclatée des composants de la partie supérieure du moule	54

3.18	Assemblage des deux parties inférieure et supérieure	54
3.19	Réglage de la température du lit d'impression	55
3.20	Impression en cours sur l'imprimante Creality CR-10.	56
3.21	Moule des pales d'éoliennes	57
3.22	Moule des pales d'éolienne	58
3.23	Conception détaillée du bouchon 01 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.	59
3.24	Bouchon 01 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.	60
3.25	Conception détaillée du bouchon 02 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.	60
3.26	Bouchon 02 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.	61
3.27	Bouchons pour les extrémités du moule	61
3.28	Conception détaillée de la tige en L pour le système de fixation du moule de la pale d'éolienne	62
3.29	Conception détaillée des plaques de fixation en bois	63
3.30	Tige filetée	63
3.31	Vue éclatée du système de fixation	64
3.32	Solidité et fiabilité garanties : Vue détaillée du système de fixation assemblé	64
3.33	Moule avec système de fixation réalisé au niveau du laboratoire	65
3.34	Moule avec système de fixation réalisé au niveau du laboratoire	65
3.35	Conception de l'éprouvette conformément à la norme ASTM D-638	66
3.36	Conception du moule des éprouvettes première partie 'Pièce 01'	67
3.37	Conception de la pièce de fermeture 'Cache'	68
3.38	Conception de l'éprouvette	68
3.39	Vue éclatée de la conception de l'éprouvette	69
3.40	Prévisualisation du moule dans UltiMaker Cura avec les paramètres d'impression configurés.	69
3.41	Prévisualisation des couches d'impression.	70
3.42	Moule des éprouvettes conforme à la norme ASTM D-638.	71
3.43	Moule des éprouvettes assemblé conforme à la norme ASTM D-638	71
3.44	Logo de HG Craft : Symbole de notre Partenariat dans le Projet	72
3.45	Plaque en matériaux composites à renfort de fibre de verre : Résultat après démoulage	73
3.46	Précision sur Mesure : Découpe de la Plaque Composite pour la Forme de la Pale d'Éolienne	74
3.47	La Préparation Précise : Avant la Découpe de la Plaque Composite pour la Forme de la Pale d'Éolienne	74
3.48	Une Forme Parfaite : Après la Découpe de la Plaque Composite pour la Forme de la Pale d'Éolienne	75
3.49	Alignement Précis de la Plaque Coupée : Résultat de l'Équilibrage pour la Forme de la Pale d'Éolienne	76
3.50	Empreinte de la Pale d'éolienne et Cales pour l'Alignement Précis	76
4.1	Palmier dattier	79
4.2	Principe du moulage au contact[1].	82
4.3	Principe du moulage par projection simultanée.[1].	83
4.4	Moulage sous vide.[1]	84
4.5	Moulage par injection de résine.	84
4.6	Principe du moulage par compression à froid.	85
4.7	Principe du moulage par compression à chaud.	86
4.8	Moulage par injection.	86
4.9	Moulage par centrifugation[1, 2].	87

4.10	Machine RTM[3, 4].	88
4.11	Infusion de résine	89
4.12	Enroulement filamentaire	90
4.13	Schéma simplifié du procédé de pultrusion : 1 rouleau continu de fibres, 2 rouleau de mise sous tension, 3 résine, 4 fibre imbibée, 5 cuisson, 6 étirage, 7 produit fini.	90
4.14	Découpe des fibres	91
4.15	Les caractéristiques et propriétés de la résine époxy STR : Une résine exceptionnelle pour notre projet	92
4.16	Le moule métallique pour les tests de compression	92
4.17	Le moule des éprouvettes pour les tests de traction selon la norme ASTM D638	93
4.18	Forme finale des éprouvettes de compression après moulage	94
4.19	Forme finale des éprouvettes de traction de compression après moulage	95
4.20	La machine d'essai de compression et de traction : un outil essentiel pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux composites.	96
4.21	Positionnement de l'éprouvette de traction dans la machine d'essai	96
4.22	Positionnement de l'éprouvette de compression dans la machine d'essai	97
4.23	Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)	98
4.24	Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)	99
4.25	Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)	99
4.26	Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)	100
4.27	Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)	100
4.28	Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)	101
4.29	Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)	101
4.30	Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)	102
4.31	Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des feuilles (4)	102
4.32	Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des feuilles (4)	103
4.33	Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes des feuilles (4)	103
4.34	Force déplacement des éprouvettes en fibres longues des feuilles (5)	104
4.35	Force déplacement des éprouvettes en fibres longues des feuilles (5)	104
4.36	Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres longues des feuilles (5)	105
5.1	Assemblage des huit parties du moule : Préparation essentielle pour la fabrication précise des pièces.	112
5.2	Masticage des séparations	112
5.3	Application de la pâte démoulant	113
5.4	Système de fixation	114
5.5	Position verticale du système de fixation pour l'injection par gravité	114
5.6	Préparation des matériaux composites et de la résine.	115
5.7	Injection de la résine A : Remplissage initial avec la résine époxy A.	116
5.8	Mélange des résines A et B : Combinaison des résines époxy A et B.	116
5.9	Ajout des particules tiges : Intégration des particules tiges dans le mélange de résine époxy.	117
5.10	Le moule avant l'injection de la solution préparée.	118
5.11	Le moule après l'injection du mélange préparé	118
5.12	Le démoulage de la pale : libérer la pièce finale.	119
5.13	Finition de la pale : l'ultime étape pour la perfection.	120
5.14	Application précise du tissu de roving sur les parties extrados et intrados	121
5.15	Renforcement de la structure avec le tissu de roving et les mâches	121
5.16	Le démoulage de la pale : libérer la pièce finale	122
5.17	Utilisation de la machine de sculpture et de polissage pour ajuster les pales hybrides	123

5.18 La pale hybride parfaitement finie : combinaison de force et d'élégance 123

Liste des tableaux

- 4.1 Éprouvette de traction ASTM D638 93
- 4.2 Éprouvette de compression cubique (15x15x15 mm³) 94

Liste des abréviations

ASTM	American Society for Testing and Materials (Société américaine pour les essais et les matériaux)
CAD	Computer-Aided Design (Conception assistée par ordinateur)
CAM	Computer-Aided Manufacturing (Fabrication assistée par ordinateur)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dynamique des fluides numérique)
CNC	Computer Numerical Control (Commande numérique par ordinateur)
CTM	Composite Testing Machine (Machine d'essai des composites)
ENP	Ecole Nationale Polytechnique
FAO	Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FEA	Finite Element Analysis (Analyse par éléments finis)
FEO	Fabrication Assistée par Ordinateur
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine (Turbine Éolienne à Axe Horizontal)
LGMD	Laboratoire de Génie Mécanique et Développement
PLA	Polylactic Acid (Acide polylactique)
PLD	Pulsed Laser Deposition (Dépôt laser pulsé)
PRF	Polymère Renforcé de Fibres
RTM	Resin Transfer Molding (Moulage par transfert de résine)
TEMPO	Time-Evolving Measurements and Parametric Observations

Introduction générale

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable prometteuse, propre et durable. Elle est considérée comme une alternative importante pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et pour contribuer à la lutte contre le changement climatique. Les turbines éoliennes, qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, sont un élément clé de cette industrie. Les pales des turbines éoliennes sont un composant crucial, car elles sont responsables de la capture de l'énergie éolienne et de sa conversion en énergie mécanique.

Les composites à base de fibres de verre et de fibres de carbone sont largement utilisés dans diverses industries en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, telles que la résistance à la traction et à la compression. Cependant, l'utilisation de ces composites pose des défis environnementaux et économiques en raison de leur production et de leur élimination.

C'est pourquoi les composites végétaux ont suscité un intérêt croissant dans l'industrie ces dernières années en raison de leur faible coût, de leur disponibilité locale, de leur faible densité et de leur potentiel d'être produits à partir de sources renouvelables. Les fibres de palmier dattier, en particulier, sont une source prometteuse de fibres végétales pour les composites en raison de leur résistance mécanique, de leur élasticité et de leur faible densité.

En utilisant des fibres de palmier dattier pour fabriquer des composites, nous pouvons minimiser l'utilisation de matériaux composites ordinaires à base de fibres de verre et de fibres de carbone, qui sont dérivés de matières premières non renouvelables et peuvent contribuer à la pollution environnementale. De plus, l'utilisation de fibres de palmier dattier peut stimuler les économies locales et offrir une alternative plus durable et respectueuse de l'environnement .

En somme, l'utilisation de fibres de palmier dattier pour la production de composites peut offrir une alternative écologique et économique aux matériaux composites traditionnels à base de fibres de verre et de fibres de carbone, tout en fournissant des propriétés mécaniques similaires. Notre projet d'ingénieur rentre dans le cadre des activités entreprises dans le Laboratoire de Génie Mécanique et Développement 'LGMD' de l'Ecole Nationale Polytechnique 'ENP'. Notre pays qui compte, selon l'organisation 'FAO' plus de 15 millions de palmiers selon les données les plus récentes de l'année 2023. Le but de ce projet est donc la mise en valeur de la fibre de palmier.[1, 2]

Dans ce contexte, le présent projet de fin d'étude vise à étudier la faisabilité de la fabrication des pales de turbine éolienne à partir de matériaux composites à base de fibres de palmier dattier. Plus précisément, ce projet se concentrera sur la conception, l'analyse, la fabrication et les tests des pales de turbine éolienne fabriquées à partir de ces matériaux composites. Les objectifs principaux sont d'explorer le potentiel des matériaux composites à base de fibres de palmier dattier pour la fabrication des pales de turbine éolienne, de vérifier leurs propriétés mécaniques.

Chapitre 1

Ce chapitre fournit une introduction à l'énergie, en soulignant son importance dans notre société. Il présente les différents types d'énergie, leurs sources et leurs applications. Il met en évidence les enjeux actuels tels que la transition vers les énergies renouvelables et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus, il établit le contexte de l'étude en soulignant l'intérêt de l'éolienne domestique et l'utilisation de matériaux composites à base de fibres naturelles.

Chapitre 2

Ce chapitre se concentre sur l'extraction des fibres et des particules du palmier dattier. Il présente les différentes techniques utilisées pour prélever les fibres du tronc du palmier et explique le processus de transformation des fibres brutes en fibres utilisables dans la fabrication des composites. Le chapitre aborde également les méthodes de séparation et de traitement des particules de palmier dattier, mettant en évidence leur potentiel en tant que renforts dans les matériaux composites.

Chapitre 3

Dans ce chapitre, nous aborderons la conception et la réalisation des moules utilisés dans la fabrication des échantillons de composites à base de fibres de palmier dattier. Il présente différentes techniques, telles que l'impression 3D et la fabrication assistée par ordinateur, pour concevoir les moules. Les étapes de fabrication, y compris la découpe, l'assemblage et les ajustements, sont détaillées. L'importance de la précision et de la qualité des moules dans la production de composites de haute qualité est également soulignée.

Chapitre 4

Ce chapitre sera dédié à la caractérisation des matériaux composites à base de fibres naturelles provenant du palmier dattier. Il présente les méthodes et les techniques utilisées pour évaluer les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de ces composites. Différents tests, tels que la résistance en traction, la résistance à la compression, Les résultats obtenus sont présentés et interprétés afin d'évaluer les performances des composites à base de fibres de palmier dattier.

Chapitre 5

Le chapitre 5 présente le processus d'élaboration des pales d'éolienne en utilisant des matériaux composites à base de fibres de palmier dattier. Les étapes clés de fabrication, telles que la conception, la découpe des moules, la préparation des matériaux composites, l'assemblage des pales et les finitions, sont détaillées. Les considérations techniques et esthétiques liées à la conception des pales d'éolienne sont également abordées. Enfin, ce chapitre souligne les avantages et les défis associés à l'utilisation de matériaux composites à base de fibres naturelles dans la fabrication des pales d'éolienne.

Chapitre 1

Généralités sur les éoliennes et les matériaux composites

1.1 Introduction

1.1.1 Les besoins en énergie

Les besoins en énergie sont devenus un enjeu majeur dans notre société moderne. Avec la croissance de la population mondiale et l'industrialisation croissante, la demande en énergie n'a cessé d'augmenter. Il est essentiel de trouver des sources d'énergie durables et renouvelables pour répondre à ces besoins croissants, tout en préservant notre environnement.

L'énergie éolienne est l'une des solutions prometteuses pour répondre à ces besoins énergétiques. Elle repose sur l'utilisation du vent pour produire de l'électricité de manière propre et renouvelable. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité grâce à un générateur.

Aujourd'hui, les besoins en énergie sont de plus en plus pris en compte dans les politiques énergétiques nationales et internationales. L'énergie éolienne, en tant que source d'énergie propre et renouvelable, joue un rôle important dans la transition énergétique vers un avenir plus durable.

Dans ce chapitre, nous explorerons les besoins croissants en énergie, les avancées scientifiques dans le domaine de l'énergie éolienne, ainsi que les défis et les opportunités associés à son utilisation. Nous examinerons également la problématique spécifique de notre étude, en mettant l'accent sur l'éolien domestique et les applications des matériaux composites à base de fibres naturelles dans les éoliennes. Enfin, nous présenterons une vue d'ensemble des chapitres qui composent ce mémoire, qui vise à approfondir notre compréhension de l'énergie éolienne et à contribuer au développement de solutions durables pour répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs.

1.1.2 Les avancées scientifiques dans le domaine de l'énergie

Les avancées scientifiques dans le domaine de l'énergie ont joué un rôle crucial dans le développement de solutions énergétiques durables. De nombreux scientifiques et inventeurs ont contribué de manière significative à l'avancement de la technologie et à la recherche de sources d'énergie alternatives.

Parmi ces visionnaires, Nikola Tesla occupe une place prépondérante. Célèbre ingénieur et inventeur du XIXe siècle, Tesla a réalisé d'importantes avancées dans le domaine de l'énergie électrique. Ses travaux sur les alternateurs et les systèmes de distribution d'électricité ont révolutionné l'industrie de l'énergie et ont posé les bases de l'utilisation de l'énergie éolienne à grande échelle.

Aujourd'hui, grâce à ces avancées scientifiques, l'énergie éolienne est devenue une source d'énergie renouvelable de premier plan, contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la transition vers une économie plus propre et durable.

L'énergie éolienne a connu une évolution remarquable au fil du temps. Depuis les premières utilisations de moulins à vent dans l'Antiquité jusqu'au développement moderne des éoliennes, cette source d'énergie renouvelable a gagné en efficacité et en popularité. Au cours du 19e siècle,

les moulins à vent ont commencé à être utilisés pour produire de l'électricité, marquant le début d'une nouvelle ère pour l'énergie éolienne. Au fil des décennies, les technologies éoliennes ont continué à évoluer, conduisant à des éoliennes plus puissantes et plus efficaces.

Au cours des dernières décennies, l'énergie éolienne a connu une croissance exponentielle. Les parcs éoliens ont émergé dans de nombreux pays, générant une quantité importante d'électricité verte. L'énergie éolienne est devenue une composante essentielle de la transition énergétique, permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diversifier le mix énergétique. Avec des innovations continues dans la conception des éoliennes, l'amélioration de leur rendement et la réduction des coûts de production, l'énergie éolienne devient de plus en plus compétitive sur le marché de l'énergie.

L'avenir de l'énergie éolienne est prometteur, avec de nouvelles avancées technologiques qui ouvrent la voie à des éoliennes offshore, plus puissantes et capables de produire de l'électricité dans des zones à fort potentiel éolien. L'énergie éolienne joue un rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique et la transition vers un avenir plus durable. Grâce à son caractère renouvelable, son potentiel de développement continu et son impact environnemental favorable, l'énergie éolienne est appelée à jouer un rôle de plus en plus important dans le mix énergétique mondial.

1.2 Les éoliennes et les fermes éoliennes

Les éoliennes sont des dispositifs utilisés pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, électrique ou thermique. Elles sont devenues une technologie couramment utilisée dans la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables. Les éoliennes se composent généralement de plusieurs composants essentiels qui permettent leur fonctionnement efficace.



FIGURE 1.1 – Ferme éolienne de Kaberten d'Adrar

Tout d'abord, nous avons les pales, qui captent l'énergie du vent. Les pales sont conçues de manière aérodynamique pour maximiser la capture du vent et minimiser les pertes d'énergie. Elles sont généralement fabriquées à partir de matériaux composites légers et résistants, tels que la fibre de verre ou la fibre de carbone, qui offrent à la fois robustesse et flexibilité. Ensuite, nous avons le rotor, qui relie les pales à l'axe principal de l'éolienne. Le rotor est responsable de la transformation du mouvement linéaire des pales en un mouvement de rotation. Il est généralement composé d'un moyeu central et de bras de rotor qui soutiennent les pales.

La génératrice est le composant clé de l'éolienne responsable de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est généralement de type asynchrone ou synchrone à aimants permanents. La génératrice est connectée à l'axe principal et génère de l'électricité lorsque le rotor tourne. Enfin, nous avons le système de contrôle et de surveillance, qui régule le fonctionnement de l'éolienne en fonction des conditions du vent et des paramètres de performance. Il assure un fonctionnement optimal de l'éolienne et peut inclure des capteurs, des dispositifs de sécurité et des systèmes de communication.

Dans le domaine de l'énergie éolienne, notre laboratoire LGMD a également apporté des contributions significatives. Les chercheurs et experts tels que le Pr. Smaili et le Dr. Bouhelal ont réalisé des travaux de recherche novateurs et ont publié des articles scientifiques dans des revues renommées. Leurs contributions ont contribué à l'avancement des connaissances et des technologies dans le domaine de l'énergie éolienne.

Ces références de notre laboratoire démontrent notre engagement envers la recherche et l'innovation dans le domaine de l'énergie éolienne. Les travaux du Pr. Smaili et du Dr. Bouhelal, et d'autres chercheurs de notre laboratoire ont contribué à l'avancement des connaissances et ont ouvert de nouvelles perspectives pour l'utilisation des énergies renouvelables dans le secteur éolien.

1.3 L'énergie éolienne domestique et l'utilisation de matériaux composites

1.3.1 L'éolienne domestique

L'éolienne domestique, également connu sous le nom d'éolienne résidentiel, fait référence à l'utilisation de petites éoliennes pour la production d'énergie dans des applications domestiques. Cette approche vise à fournir de l'électricité aux foyers ou aux petites communautés en utilisant l'énergie éolienne disponible localement.

Dans le contexte de l'éolien domestique, il est essentiel de choisir des éoliennes adaptées à l'échelle et aux besoins spécifiques du ménage ou de la communauté. Les éoliennes domestiques sont généralement de petite taille, avec une capacité de production d'électricité allant de quelques kilowatts à quelques dizaines de kilowatts.

L'un des avantages de l'éolien domestique est qu'il permet aux utilisateurs de devenir plus autonomes sur le plan énergétique en produisant leur propre électricité à partir de sources renouvelables. Cela peut contribuer à réduire leur dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie

traditionnels et à diminuer leur empreinte carbone en utilisant une source d'énergie propre.

Dans le cadre de l'éolien domestique, les matériaux composites jouent un rôle important. Les pales des éoliennes domestiques sont souvent fabriquées à partir de composites renforcés de fibres, tels que les composites de fibre de verre ou de fibre de carbone. Ces matériaux offrent une combinaison optimale de légèreté, de résistance et de durabilité, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des conditions environnementales variées.

1.3.2 Les matériaux composites utilisés dans les éoliennes

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "constitué de deux ou plusieurs parties différentes". En fait, l'appellation matériau composite ou composite est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce chapitre. Nous en donnons pour l'instant la définition générale suivante. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément[1].

Les éoliennes font appel à une variété de matériaux composites pour répondre aux exigences de performance, de durabilité et d'efficacité énergétique. Les composites sont des matériaux fabriqués en combinant deux ou plusieurs composants différents, généralement une matrice et un renfort, pour obtenir des propriétés synergiques.

Dans le contexte des éoliennes, les matériaux composites sont utilisés principalement pour la fabrication des pales. Les pales d'éoliennes sont soumises à des forces importantes, telles que les forces aérodynamiques et les contraintes mécaniques, et doivent donc être à la fois légères et robustes. Les composites offrent une solution idéale, car ils combinent une matrice polymère résistante et un renfort de fibres pour fournir une résistance mécanique élevée tout en restant légers.

Les composites de fibre de verre sont couramment utilisés dans la fabrication des pales d'éoliennes. Les fibres de verre sont incorporées dans une matrice de résine pour former un matériau composite qui offre une bonne résistance à la flexion, une faible densité et une excellente résistance à la corrosion. Ce matériau est également largement disponible et relativement peu coûteux, ce qui en fait un choix populaire dans l'industrie éolienne.

Outre les composites de fibre de verre, d'autres matériaux composites sont également explorés pour les éoliennes, notamment les composites de fibre de carbone. Les fibres de carbone offrent une résistance exceptionnelle et une légèreté supérieure à celle des fibres de verre. Cependant, ils sont plus coûteux et leur fabrication peut être plus complexe. Néanmoins, les composites de fibre de carbone sont utilisés dans certaines applications d'éoliennes à haut rendement où la performance maximale est requise.

En outre, des recherches sont en cours pour évaluer l'utilisation de fibres naturelles, telles que les fibres de palmier dattier, dans les éoliennes. Cependant, des études approfondies sont nécessaires pour évaluer leur compatibilité avec les exigences spécifiques des éoliennes et garantir leur performance à long terme.

En conclusion, les matériaux composites, tels que les composites de fibre de verre et de fibre de carbone, jouent un rôle crucial dans la fabrication des éoliennes. Ils offrent une combinaison optimale de légèreté, de résistance et de durabilité, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité énergétique et la performance des éoliennes. Les recherches continuent d'explorer l'utilisation de nouveaux matériaux, y compris les fibres naturelles, pour répondre aux défis de durabilité et de réduction de l'empreinte environnementale des éoliennes.

1.3.3 Utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges[5].

Dans le temps moderne (depuis l'année 70), le premier composite liant avec les fibres végétales, c'est le plâtre. Plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales.

Actuellement, le monde connaît de récents développements dans le domaine du renforcement de ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales[6].

L'utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes suscite un intérêt croissant en raison de leurs avantages potentiels sur le plan environnemental et économique. Les fibres naturelles, telles que le lin, le jute, le chanvre et le bambou, sont des alternatives aux fibres synthétiques traditionnelles dans la fabrication des éoliennes.[1].

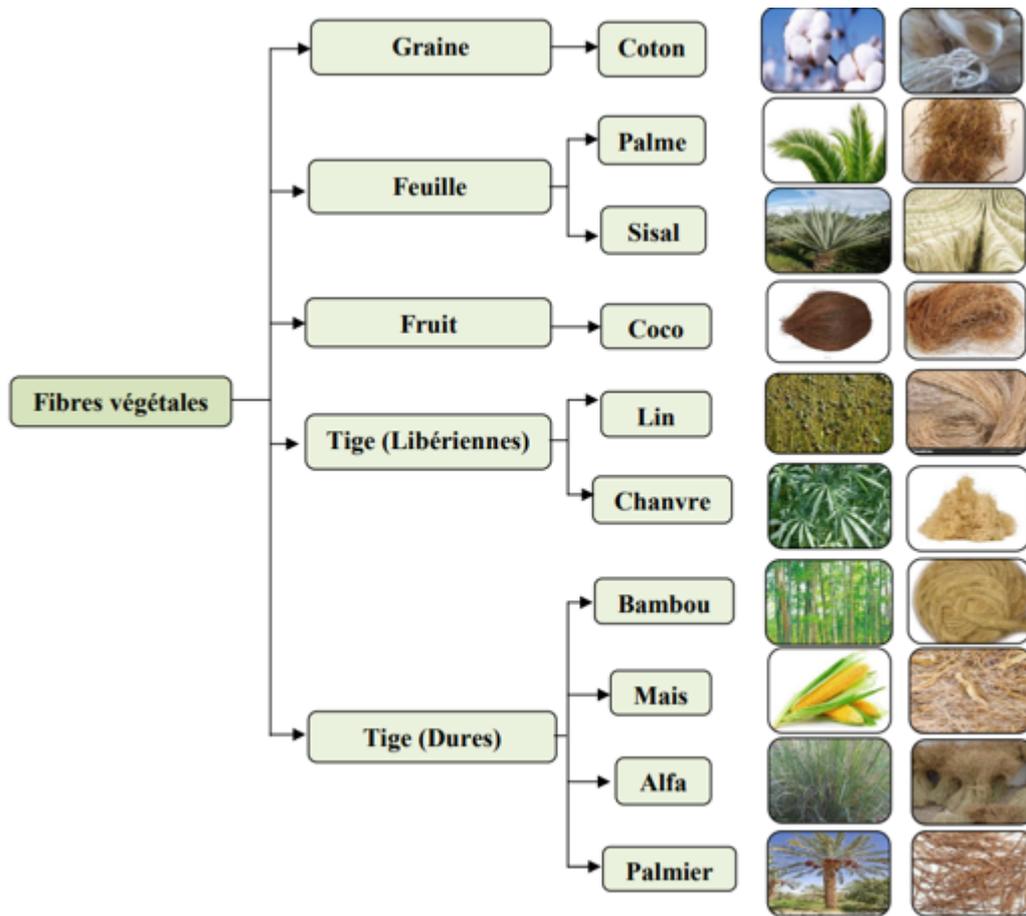


FIGURE 1.2 – Classification des fibres végétales selon l'origine

Les fibres naturelles offrent plusieurs avantages intéressants. Tout d'abord, elles sont renouvelables et biodégradables, ce qui contribue à réduire l'empreinte environnementale globale des éoliennes. Contrairement aux fibres synthétiques dérivées du pétrole, les fibres naturelles proviennent de ressources végétales renouvelables qui peuvent être cultivées de manière durable. Cela permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de limiter les émissions de gaz à effet de serre associées à la production de fibres synthétiques.

De plus, les fibres naturelles ont une empreinte carbone réduite par rapport aux fibres synthétiques. Leur production nécessite moins d'énergie et génère moins de déchets et de polluants. Par conséquent, l'utilisation de fibres naturelles contribue à une fabrication plus écologique des éoliennes, en alignement avec les objectifs de durabilité et de réduction de l'impact environnemental.

1.3.4 Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre a mis en évidence l'importance croissante des besoins en énergie dans notre société moderne et la nécessité de trouver des sources d'énergie durables et renouvelables. L'énergie éolienne se présente comme une solution prometteuse, reposant sur l'utilisation du vent pour produire de l'électricité de manière propre et renouvelable.

Les éoliennes, composées de divers éléments tels que les pales, le rotor, la génératrice et le système de contrôle, sont essentielles pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie

électrique. Les matériaux composites, tels que les composites de fibre de verre et de fibre de carbone, jouent un rôle crucial dans la fabrication des éoliennes en offrant une combinaison optimale de légèreté, de résistance et de durabilité. De plus, l'utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes suscite un intérêt croissant en raison de leurs avantages potentiels sur le plan environnemental et économique.

Ce chapitre d'introduction à l'énergie a permis de mettre en lumière les besoins croissants en énergie, les avancées scientifiques dans le domaine de l'énergie éolienne, ainsi que les composants et les matériaux clés utilisés dans la fabrication des éoliennes. Il a également souligné l'importance de l'éolien domestique et l'utilisation de matériaux composites, en mettant en évidence les avantages des fibres naturelles dans la conception des éoliennes. Ces informations jetteront les bases nécessaires pour approfondir notre compréhension de l'énergie éolienne et explorer les aspects spécifiques abordés dans les chapitres suivants de ce mémoire de maîtrise.

Chapitre 2

Extraction des fibres et particules du palmier dattier

2.1 Introduction

L'objectif de cette étape d'extraction est de séparer efficacement les fibres et les particules des autres composants de la plante, tels que les tiges, les feuilles et les résidus. Cela permet d'obtenir des fibres et des particules pures, prêtes à être utilisées dans la fabrication de composites.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'importance de l'extraction des fibres et particules du palmier dattier dans le contexte des composites. Nous discuterons également des objectifs de cette étape d'extraction, en mettant l'accent sur la nécessité de produire des matériaux de haute qualité et compatibles avec les procédés de fabrication ultérieurs.

2.1.1 Le palmier dattier

Parmi les fibres naturelles, ou plus précisément, les fibres agricoles, on cite les fibres de palmier dattier qui ont montré de la caractéristique mécanique très satisfaisante[5].

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est l'un des palmiers les plus cultivés par l'homme. Il résiste aussi bien à la chaleur, à la sécheresse et au froid. Il se trouve généralement sur la bande aride afro-asiatique qui s'étend de l'Afrique du Nord au Moyen-Orient, plus précisément dans les Oasis du Sahara. Les *Phoenix* sont des palmiers dioïques, il existe donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Ces dernières donnent une multitude de variétés de dattes[7, 8].

L'Algérie possède plus de 800 variétés de palmiers dattiers dans ses Oasis. Parmi les variétés les plus connues, nous mentionnons (en appellation locale), le Dokar (le palmier mâle), la Deglette Nour, Elghers et la Degla bida[9].

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est une plante polyvalente dont chaque partie présente des avantages spécifiques. Les dattes, ses fruits comestibles riches en nutriments, sont appréciées pour leur valeur nutritionnelle. Les feuilles du palmier sont utilisées dans la construction et l'artisanat, tandis que le tronc offre un matériau léger pour la construction. Les racines fournissent des fibres pour la fabrication d'objets artisanaux, et le bourgeon terminal, également connu sous le nom de "cœur de palmier", est consommé comme un mets délicat. Le palmier dattier est une ressource précieuse qui joue un rôle économique et culturel important dans de nombreuses régions du monde.

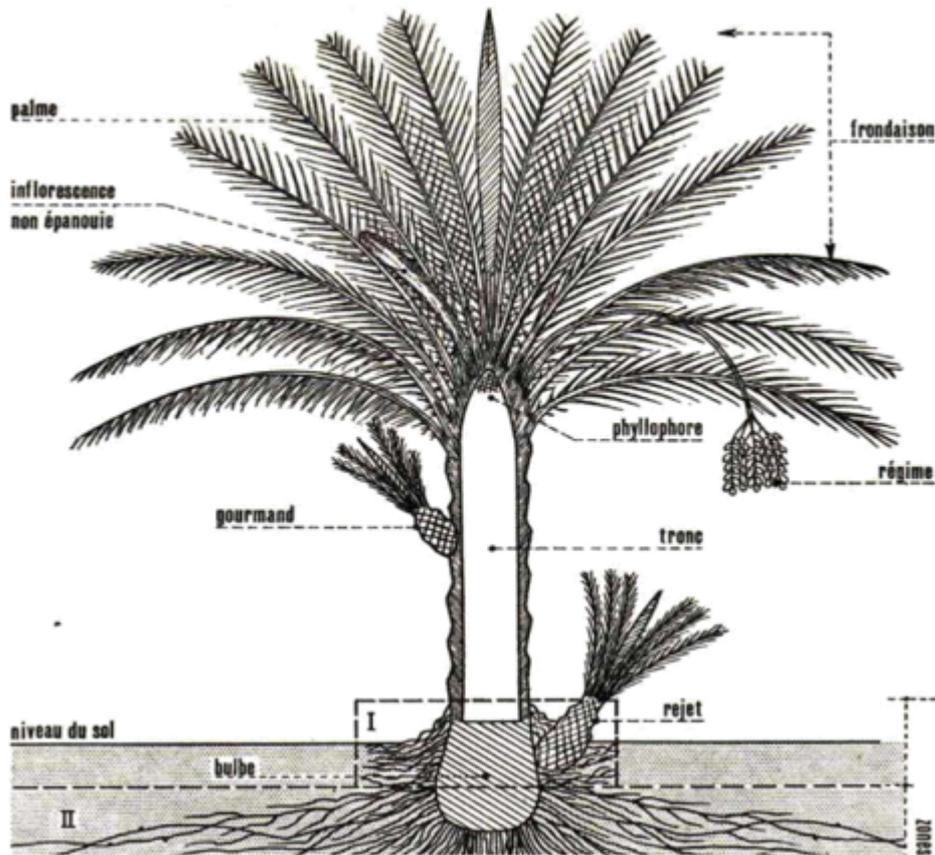


FIGURE 2.1 – Schéma du palmier dattier (MUNIER, 1973)

Nous avons travaillé sur les trois composantes principales du palmier dattier : la tige, les feuilles et Kornav.

1- Tiges ‘Pétioles’ :

Les tiges des feuilles de palmier dattier sont appelées "pétioles" et elles sont très longues et étroites. Elles peuvent atteindre jusqu'à 4 mètres de longueur et ne mesurent que quelques centimètres de largeur. Les pétioles sont également couverts d'épines pointues et résistantes, qui peuvent mesurer jusqu'à 30 centimètres de longueur. Ces épines protègent les palmes contre les herbivores tels que les chameaux et les moutons qui pourraient les endommager en les mangeant. Les pétioles sont également pourvus de fibres qui aident à soutenir la palme et à lui permettre de se déployer dans la couronne. En général, les pétioles des feuilles de palmier dattier sont très solides et résistants, ce qui leur permet de supporter le poids des palmes et des fruits sans se casser.



FIGURE 2.2 – Tiges

2- Feuilles :

Les feuilles de palmier ont également été étudiées pour leur utilisation potentielle dans les composites. Les fibres de palmier dattier sont légères, résistantes et présentent une faible densité, ce qui les rend attractives pour une utilisation dans les matériaux composites. Les fibres de feuilles de palmier ont été utilisées comme renfort dans les composites, tels que les tôles composites et les composites polymères. En outre, les feuilles de palmier peuvent être traitées pour éliminer la résine, augmenter l'adhérence et améliorer les propriétés mécaniques des fibres.



FIGURE 2.3 – Feuilles

3- Kornaf :

La partie pétiolaire du palmier dattier est une composante importante de la feuille du palmier dattier. C'est la partie qui relie la palme (la partie qui ressemble à une grande feuille) au stipe (le tronc du palmier). Elle se compose d'une zone de transition où la palme se joint au stipe, ainsi que de fibres et de tissus qui aident à soutenir la palme.



FIGURE 2.4 – Kornaf

2.2 Méthodes d'extraction des fibres et particules

L'extraction des fibres et particules de palmier dattier est une étape cruciale dans la préparation des matériaux composites. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour extraire les fibres et les particules du palmier dattier, en fonction des besoins spécifiques de l'application. Les méthodes couramment utilisées sont : méthode manuelle, mécanique, chimique et combinée.

Dans notre projet nous avons opté pour la méthode manuelle et la méthode mécanique.

2.2.1 Méthode manuelle

Une méthode manuelle a été employée pour extraire les fibres du palmier dattier. Dans cette méthode, deux brosses métalliques ont été utilisées en parallèle pour détacher les fibres des feuilles. Les brosses ont été frottées vigoureusement le long des feuilles afin d'obtenir les fibres. Ensuite, un couteau a été utilisé pour tailler les chutes présentes à l'extrémité des fibres, per-

mettant ainsi d'obtenir des fibres de longueur uniforme



FIGURE 2.5 – Fibres de palmier dattier avant et après l'extraction manuelle

Cette méthode manuelle a été choisie en raison de sa simplicité et de sa disponibilité. Elle permet de séparer les fibres du palmier dattier des feuilles de manière efficace. Cependant, il est important de noter que cette méthode peut être laborieuse et demande du temps et de l'effort pour obtenir des fibres de qualité.



FIGURE 2.6 – Processus d'extraction manuelle des fibres de palmier dattier à l'aide de brosses métalliques

Il convient de prendre toutes les précautions nécessaires lors de l'utilisation des brosses métalliques et du couteau afin d'éviter tout risque de blessure. De plus, il est recommandé de travailler dans un espace bien ventilé pour minimiser l'inhalation de poussière.

Cette méthode manuelle offre une approche pratique pour l'extraction des fibres du palmier dattier, mais d'autres méthodes plus avancées, telles que l'extraction mécanique ou chimique, peuvent également être explorées pour une extraction plus efficace à grande échelle.

2.2.2 Méthode mécanique

L'extraction mécanique est une méthode couramment utilisée pour extraire les fibres et particules du palmier dattier de manière plus efficace et à plus grande échelle. Cette méthode implique l'utilisation de machines et d'équipements spécifiques pour faciliter le processus d'extraction.

Dans le cadre de notre projet, nous avons opté pour l'utilisation du broyeur et de la machine de tamisage pour l'extraction mécanique des fibres et particules du palmier dattier. Cette décision a été prise en raison de la disponibilité de ces équipements dans notre école et de leur efficacité dans le processus d'extraction.

1- Broyeur :

Nous avons utilisé le broyeur pour réduire la taille des fibres, tiges et des bases pétiolaires du palmier dattier en petits morceaux. Ce broyeur fonctionne en appliquant des forces mécaniques pour écraser les matériaux, les décomposant ainsi en particules de taille désirée. Nous avons choisi cette technique car elle nous permet d'obtenir des particules de taille uniforme, ce qui facilite leur utilisation ultérieure dans la fabrication de composites.

Dans notre projet, nous avons utilisé différents types de broyeurs pour mener à bien le processus d'extraction des fibres et particules du palmier dattier. Voici les différents broyeurs que nous avons choisis et leurs utilisations respectives :

Broyeur de végétaux GHE 150 STIHL :

Le broyeur de végétaux GHE 150 STIHL est un broyeur électrique puissant d'une puissance de 2500 W. Il est spécialement conçu pour couper des branches d'un diamètre d'environ 35mm. Ce broyeur présente plusieurs avantages, tels que sa compacité et sa facilité de déplacement grâce à ses deux roues et son poids réduit.



FIGURE 2.7 – Broyeur de végétaux GHE 150 STIHL

Nous avons utilisé ce broyeur pour broyer les tiges et les bases pétiolaires (kornaf) du palmier dattier. En les introduisant dans le broyeur, nous avons obtenu des petits morceaux de dimensions comprises entre 1 et 2 cm². Cette étape de broyage était essentielle pour préparer les matériaux en vue de l'étape ultérieure d'obtention des fibres et particules.

Le choix du broyeur de végétaux GHE 150 STIHL s'est avéré judicieux pour notre projet en raison de sa puissance, de sa facilité d'utilisation et de sa portabilité. Il nous a permis d'obtenir des morceaux de taille appropriée pour les étapes suivantes du processus d'extraction. En utilisant ce broyeur, nous avons pu transformer les tiges et bases pétiolaires du palmier dattier en particules prêtes à être traitées davantage pour l'obtention des fibres et particules nécessaires à nos expérimentations et fabrications.



FIGURE 2.8 – Tiges et bases pétiolaires (kornaf) de palmier dattier avant et après le broyage avec le broyeur GHE 150 STIHL

Broyeur kitchen grinder :

Après le broyage initial réalisé avec le broyeur GHE 150 STIHL, nous avons utilisé un autre outil essentiel pour affiner davantage les résultats obtenus : le broyeur Kitchen Grinder. Ce broyeur à épices polyvalent s'est avéré extrêmement utile dans notre processus d'extraction des fibres et des particules du palmier dattier.

Le Kitchen Grinder est spécialement conçu pour broyer de manière efficace et précise une variété d'ingrédients, y compris les épices, les grains et les herbes. Sa conception robuste et ses lames tranchantes nous ont permis de réduire les morceaux de palmier dattier obtenus du premier broyeur en particules plus fines et plus homogènes.



FIGURE 2.9 – Broyeur kitcher grinder

De plus, le Kitcher Grinder s'est révélé efficace pour le traitement des feuilles de palmier dattier. Nous avons constaté que les feuilles contenaient des fibres courtes et fines, qui sont très précieuses dans certaines applications. En utilisant le broyeur, nous avons pu extraire ces fibres de manière efficace, permettant ainsi leur utilisation ultérieure dans la fabrication de composites ou d'autres produits nécessitant des fibres de palmier dattier de qualité.

La polyvalence du Kitcher Grinder nous a offert la flexibilité nécessaire pour traiter différents éléments du palmier dattier avec précision. Son fonctionnement simple et sa facilité d'utilisation nous ont permis d'obtenir des résultats cohérents et de contrôler la taille et la texture des particules et des fibres extraites.

2- Machine de tamisage :

Après le processus de broyage avec le broyeur Kitcher Grinder, nous avons utilisé une machine de tamisage pour séparer les particules de tiges et de bases pétiolaires (kornaf) en fonction de leur taille. La machine de tamisage était équipée de tamis de différents diamètres, allant de 1 mm à 6 mm. Les particules broyées ont été introduites dans la machine, qui a ensuite été mise en marche pour effectuer le tamisage.

Le tamisage a permis de trier les particules en fonction de leur taille, créant ainsi différentes fractions de particules avec des diamètres spécifiques. Les tamis de plus petit diamètre ont retenu les particules les plus fines, tandis que les tamis de plus grand diamètre ont laissé passer les particules plus grosses. Cette étape de tamisage a été cruciale pour obtenir des particules de taille uniforme, conformément aux besoins de notre projet.



FIGURE 2.10 – Machine de tamisage

Une fois le tamisage terminé, nous avons obtenu différentes fractions de particules de tiges et de bases pétiolaires (kornaf) avec des diamètres allant de 1 mm à 6 mm. Ces fractions de particules ont ensuite été collectées et stockées pour une utilisation ultérieure dans nos expériences et tests.

Le processus de tamisage a permis d'obtenir des particules de taille contrôlée, ce qui est essentiel pour assurer une distribution homogène des particules dans les matériaux composites à base de fibres de palmier dattier. De plus, cette méthode de tamisage offre la possibilité d'ajuster la composition granulométrique des particules en fonction des exigences spécifiques du matériau composite envisagé.



FIGURE 2.11 – Particules de bases pétiolées (kornaf) de palmier dattier après tamisage



FIGURE 2.12 – Particules tiges de palmier dattier après tamisage

2.3 Préparation des fibres et particules pour les tests

2.3.1 Nettoyage et séchage des fibres et particules

Après l'extraction des fibres et particules de palmier dattier, il est important de procéder à leur nettoyage et séchage afin d'éliminer les impuretés et d'obtenir des matériaux prêts à être utilisés dans la fabrication des composites. Le nettoyage et le séchage sont des étapes essentielles pour assurer la qualité des fibres et particules et minimiser les effets indésirables sur les propriétés des composites finaux. Voici quelques considérations importantes lors du nettoyage et séchage des fibres et particules :

1- Élimination des impuretés :

Les fibres et particules de palmier dattier peuvent contenir des impuretés telles que des résidus de feuilles, des fragments de tige ou d'autres contaminants provenant du processus d'extraction. Il est essentiel de les éliminer afin d'obtenir des fibres et particules de haute qualité. Cela peut être réalisé en effectuant un tri manuel, en utilisant des tamis ou des dispositifs de séparation appropriés pour éliminer les impuretés indésirables.

2- Lavage :

Le processus de nettoyage des fibres et particules de palmier dattier comprend une étape essentielle de lavage des feuilles, les feuilles sont soigneusement lavées pour éliminer les impuretés et les résidus indésirables. Le lavage permet de se débarrasser des saletés, des poussières et des contaminants qui pourraient altérer la qualité des fibres et particules obtenues.



FIGURE 2.13 – Nettoyage des fibres et particules de palmier dattier

Pour ce faire, les feuilles sont plongées dans un bain d'eau propre et agitées délicatement pour assurer une répartition homogène de l'eau. Ce processus permet d'éliminer les particules étrangères qui adhèrent à la surface des feuilles. Après le lavage initial, les feuilles sont rincées à l'eau claire pour éliminer les résidus de savon ou de détergent utilisés lors du lavage.

Le lavage des feuilles peut être répété plusieurs fois pour garantir un nettoyage complet et optimal. Il est important de noter que l'utilisation d'eau propre et de produits de lavage doux et non toxiques est recommandée afin de préserver la qualité des fibres et particules de palmier dattier.



FIGURE 2.14 – Feuilles de palmier dattier nettoyées et prêtes pour la suite du processus

3- Séchage :

Une fois les feuilles lavées, elles sont prêtes pour l'étape suivante du processus, qui consiste au séchage. Le séchage des fibres et particules est crucial pour éliminer l'humidité résiduelle et prévenir la prolifération de micro-organismes. Différentes méthodes de séchage peuvent être utilisées, telles que le séchage à l'air libre, le séchage à l'aide de ventilateurs ou le séchage dans des séchoirs spécifiques. Le choix de la méthode de séchage dépend des ressources disponibles et des contraintes de temps.

Le nettoyage et le séchage appropriés des fibres et particules de palmier dattier contribuent à garantir leur pureté, leur propreté et leur qualité pour les applications ultérieures dans la fabrication de composites.

Nous avons opté pour un temps de séchage de 6 heures, permettant aux fibres et aux particules de se débarrasser complètement de toute humidité. De plus, une température de séchage de 80 degrés Celsius a été maintenue pour assurer un séchage efficace et uniforme des matériaux. Cette combinaison de temps de séchage et de température nous a permis d'obtenir des fibres et des particules prêtes à être utilisées dans la fabrication de nos composites.



FIGURE 2.15 – Processus de séchage des fibres de palmier dattier

4- Stockage :

Une fois les fibres et particules nettoyées et séchées, il est recommandé de les stocker dans des conditions appropriées pour préserver leur qualité. Le stockage doit être effectué dans des environnements secs, propres et à l'abri de la lumière directe du soleil. Des emballages hermétiques ou des sacs étanches peuvent être utilisés pour protéger les fibres et particules de l'humidité et de la contamination pendant le stockage.

2.4 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons examiné en détail le processus d'extraction des fibres et particules du palmier dattier, ainsi que les caractéristiques, les méthodes d'extraction et la préparation des échantillons. Les fibres et particules de palmier dattier présentent des propriétés intéressantes en termes de structure, de composition et de propriétés physiques et mécaniques.

La structure des fibres de palmier dattier se compose de cellules allongées et de parois cellulaires renforcées, ce qui leur confère une grande résistance mécanique. Leur composition chimique est principalement constituée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, avec une faible teneur en impuretés. Ces caractéristiques structurelles et compositionnelles en font des candidats prometteurs pour l'utilisation dans les composites.

Nous avons examiné différentes méthodes d'extraction des fibres et particules, notamment l'extraction mécanique et l'extraction chimique. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients en termes de rendement, de pureté et de coût. Il est important de choisir la méthode d'extraction la plus appropriée en fonction des objectifs de l'étude et des exigences du matériau final.

Enfin, la préparation adéquate des échantillons est essentielle pour garantir des résultats fiables et reproductibles lors des tests. La découpe précise des fibres, la préparation des particules, la mise en forme appropriée des échantillons et leur consolidation éventuelle sont des étapes cruciales pour une caractérisation précise des propriétés des fibres et particules de palmier dattier.

Chapitre 3

Conception et réalisation des moules

3.1 Introduction à la conception et réalisation des moules

L'objectif de ce chapitre est de présenter de manière détaillée la conception et la réalisation du moule de la pale d'éolienne à base de fibres de palmier dattier à l'aide de SolidWorks, en mettant l'accent sur les choix de conception, les considérations de fabrication et les tests de validation associés.

Le but de ce chapitre est de démontrer notre compréhension et notre expertise dans la conception de moules, ainsi que notre capacité à les adapter aux exigences particulières des éoliennes domestiques à base de fibres de palmier dattier. Nous fournirons des explications claires sur les choix de conception que nous avons faits et les raisons qui les sous-tendent, en mettant en évidence les avantages de notre approche par rapport aux pales d'éoliennes traditionnelles. Ce faisant, nous démontrerons notre compétence technique et notre aptitude à utiliser efficacement des outils de conception assistée par ordinateur, tels que SolidWorks, pour soutenir le développement de notre projet.

3.2 Moule en impression 3D pour la pale de 1,20 m

Dans cette section, nous présenterons le processus de conception et de réalisation d'un moule en impression 3D spécifiquement destiné à la fabrication de la pale de 1,20 m. Nous discuterons des étapes de modélisation du moule, de la sélection des matériaux d'impression et des considérations liées à la résistance et à la durabilité du moule. De plus, nous aborderons les défis rencontrés lors de l'impression 3D d'un moule de grande taille et les solutions mises en place pour assurer la qualité et la précision du moule final.

1. L'impression 3D : Une approche révolutionnaire pour la fabrication additive

L'impression 3D, également connue sous le nom de fabrication additive, est une technologie innovante qui permet de créer des objets physiques en superposant des couches successives de matériau. Cette méthode de fabrication offre de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles. Tout d'abord, l'impression 3D permet une grande liberté de conception. Elle offre la possibilité de réaliser des formes complexes, géométries personnalisées et des structures internes optimisées. Cette flexibilité de conception ouvre de nouvelles perspectives dans divers domaines tels que la médecine, l'aérospatiale, l'automobile, et bien d'autres.

Un autre avantage majeur de l'impression 3D est sa capacité à réduire les déchets de production. Contrairement aux méthodes traditionnelles, qui nécessitent souvent une suppression de matière, l'impression 3D ajoute du matériau uniquement là où il est nécessaire. Cela se traduit par une utilisation plus efficace des ressources et une réduction significative des déchets.

De plus, l'impression 3D offre une plus grande rapidité dans le processus de fabrication. Les imprimantes 3D modernes sont capables de produire des objets complexes en un temps relativement court, ce qui accélère la réalisation de prototypes, de pièces personnalisées ou de petites séries de production. Cela permet une meilleure réactivité aux besoins du marché et une optimisation des délais de production.

En somme, l'impression 3D est une approche révolutionnaire de fabrication additive qui présente de nombreux avantages tels que la liberté de conception, la réduction des déchets, la rapidité de production et la diversité des matériaux. Cette technologie ouvre de nouvelles possibilités dans de nombreux secteurs et promet de transformer la façon dont nous concevons et fabriquons des objets physiques.

2. L'utilisation de l'impression 3D pour la fabrication de moules de pales d'éoliennes Une approche novatrice et efficace

L'impression 3D offre une méthode de fabrication novatrice pour la réalisation des moules et des prototypes des pales d'éoliennes à base de fibres de palmier dattier. L'utilisation du PLA, un matériau biodégradable dérivé de ressources renouvelables telles que l'amidon de maïs, présente de nombreux avantages significatifs dans ce contexte. Tout d'abord, le PLA est connu pour sa facilité d'utilisation dans les imprimantes 3D, garantissant une mise en œuvre plus aisée du processus de conception. Sa faible température de fusion permet de réduire les besoins en énergie et d'améliorer l'efficacité globale de l'impression 3D. De plus, le PLA offre une excellente résistance mécanique, ce qui en fait un choix idéal pour la réalisation des moules, car il peut supporter les contraintes liées au moulage des pales d'éoliennes. En outre, le PLA présente des propriétés légères et une bonne stabilité dimensionnelle, ce qui contribue à la fabrication de pales d'éoliennes plus légères et plus efficaces. En utilisant l'impression 3D avec le PLA, il est également possible de réaliser des formes complexes et personnalisées pour les pales, ouvrant ainsi la voie à une conception optimisée et à des performances améliorées. Ces avantages font de l'impression 3D avec le PLA une solution prometteuse pour la fabrication des moules et des prototypes des pales d'éoliennes domestiques à base de fibres de palmier dattier.

3. Utilisation de l'imprimante 3D Creality CR-10 pour la fabrication du moule de la pale d'éolienne : Une approche technologique avancée

Nous mettons en avant l'utilisation spécifique de l'imprimante 3D Creality CR-10 pour la réalisation du moule de la pale d'éolienne. Cette imprimante 3D de type Creality CR-10 est reconnue pour ses fonctionnalités avancées et son impact significatif sur le processus de fabrication du moule.

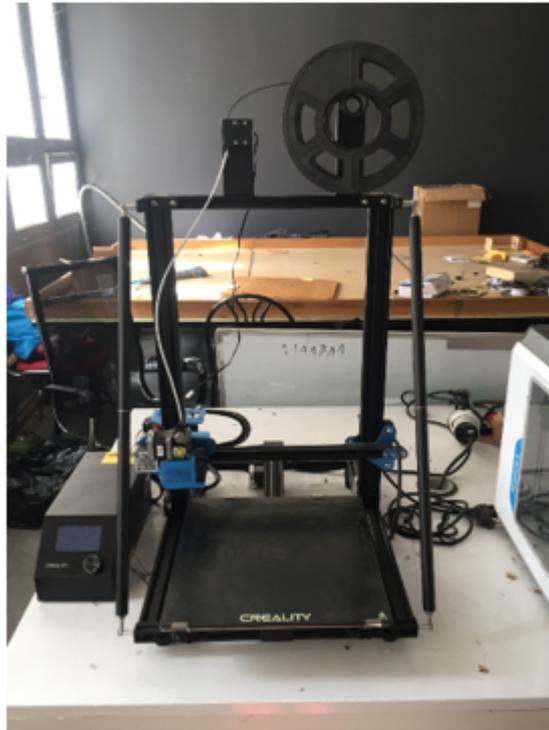


FIGURE 3.1 – Imprimante 3D Creality CR-10

Livrée en kit à monter, la CR-10 dispose d'un châssis ouvert à la structure simplifiée permettant un assemblage rapide. Le plateau chauffant permet l'utilisation de matériaux exotiques (Flex, TPU, Wood, etc.). L'écran LCD couplé à un lecteur de carte SD lui permettent un fonctionnement autonome.

Son plus grand volume d'impression (300 x 300 x 400 mm), la qualité de ses impressions 3D et surtout son prix très attractif, l'imprimante 3D Creality CR-10 a rapidement connu un certain succès sur le forum.



FIGURE 3.2 – Filament PLA "acide polylactique"

4. Conception du moule de la pale

La première étape de la fabrication du moule pour la pale de 1,20 m consiste à concevoir le moule lui-même. À partir des spécifications fournies par Monsieur Bouhelal et de la similitude avec une petite pale éolienne, nous avons réalisé une modélisation en utilisant un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Cette modélisation a pris en compte les dimensions, les formes et les caractéristiques nécessaires pour reproduire fidèlement la pale.

Etape 01 : Conception de la pale

L'éolienne domestique utilisée dans notre projet est basée sur le concept de similitude avec S809, une pale d'éolienne bien connue. S809 présente une distribution de twist et de corde spécifique, que nous avons reproduite dans notre conception. En reproduisant ces caractéristiques clés de S809, nous visons à bénéficier de son expertise et de sa fiabilité tout en adaptant notre conception à nos besoins spécifiques en termes d'éolienne domestique.

La première étape essentielle du processus consiste à obtenir la conception de la pale d'éolienne à partir du logiciel QBlade, largement utilisé pour la modélisation et l'analyse des pales. Une fois la conception achevée dans QBlade, la prochaine étape consiste à convertir le modèle en un format compatible avec SolidWorks, à savoir le format STL (Standard Tessellation Language). Le fichier STL représente une représentation triangulée de la géométrie de la pale, ce qui permet une importation facile dans SolidWorks pour une manipulation et une modélisation ultérieure. La conversion de la conception de la pale en un fichier STL offre une transition fluide entre les deux logiciels, permettant ainsi d'exploiter les fonctionnalités avancées de SolidWorks pour la conception détaillée et la réalisation du moule. Cette intégration harmonieuse entre QBlade et SolidWorks facilite le flux de travail de conception et assure une continuité précise de la conception de la pale jusqu'à la création du moule dans le processus de fabrication,



FIGURE 3.3 – Pale d'éolienne de profil S809 par similitude 'SolidWorks'

La deuxième partie du travail implique la conception d'un bloc rectangulaire dans SolidWorks qui sera fusionné avec la pale d'éolienne préalablement importée. L'objectif de cette

étape est d'éliminer l'intersection entre le bloc et la pale, créant ainsi une surface lisse et continue. Le bloc rectangulaire est soigneusement positionné et dimensionné de manière à couvrir la zone d'intersection de la pale, permettant ainsi de créer une surface harmonieuse sans aucune géométrie indésirable. L'utilisation des fonctionnalités de modélisation avancées de SolidWorks, telles que les opérations de fusion et de suppression, facilite cette étape cruciale du processus de conception du moule. Une fois la fusion réalisée, la pale et le bloc rectangulaire fusionnés se combinent en une seule entité solide, prête à être utilisée pour la création du moule. Cette étape de conception garantit une transition fluide et sans heurts entre la pale d'éolienne et le bloc, éliminant tout problème potentiel lié à l'intersection des surfaces et assurant une géométrie optimale pour la réalisation du moule.



FIGURE 3.4 – Bloc rectangulaire

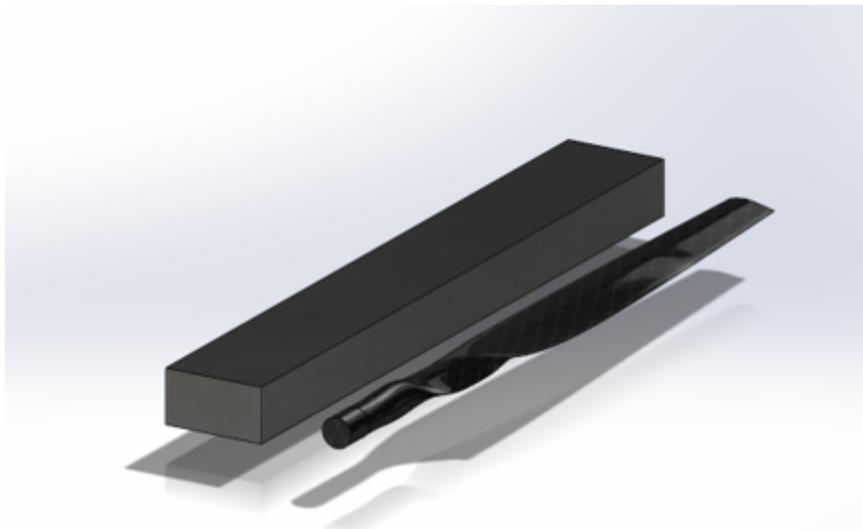


FIGURE 3.5 – La pale et le bloc rectangulaire : Les éléments clés de la conception SolidWorks pour le moule

Le résultat de la dernière étape du processus de conception du moule est présenté dans la figure suivante :

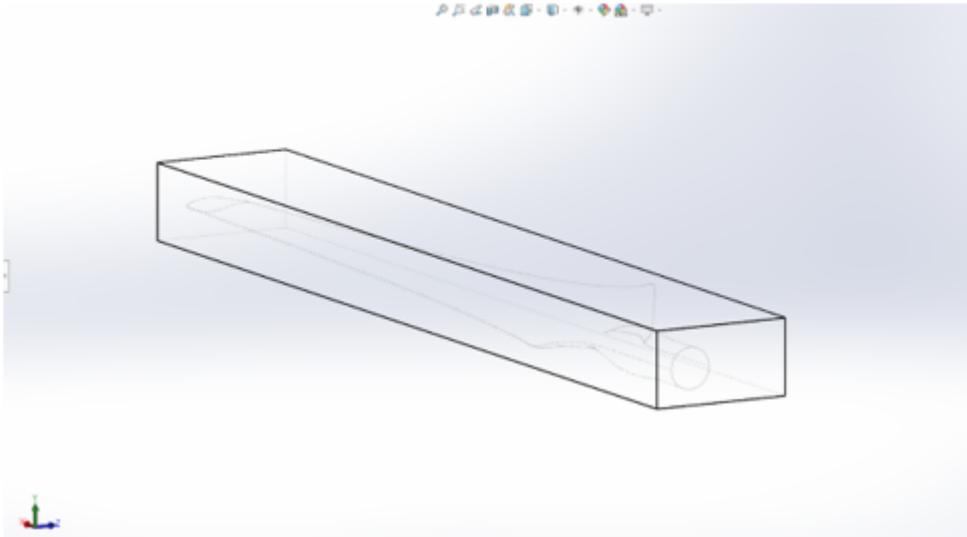


FIGURE 3.6 – Résultat final de la conception du moule

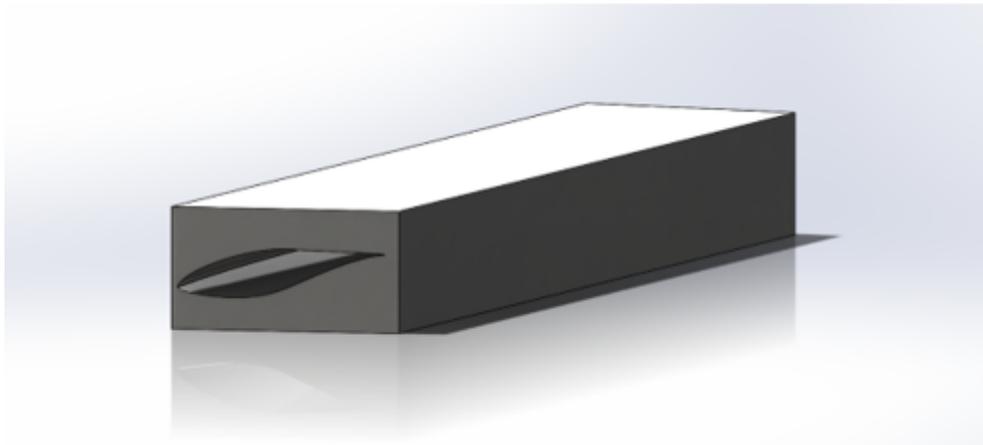


FIGURE 3.7 – Vue en coupe du moule

Cette figure illustre le résultat final de notre travail de conception, mettant en évidence la forme et la configuration du moule qui sera utilisé pour la fabrication des pales d'éoliennes domestiques à base de fibres de palmier dattier. L'attention portée aux détails de conception et à l'élimination des intersections garantit un moule fonctionnel et optimisé, prêt à être utilisé dans le processus de fabrication. Cette figure constitue une représentation visuelle essentielle pour communiquer et démontrer notre travail de conception du moule de la pale d'éolienne dans le cadre de ce projet de fin d'études.

4. Détermination du plan de coupe

Une fois la conception du moule terminée, nous avons déterminé le plan de coupe pour séparer la partie d'extrados (surface supérieure) et la partie d'intrados (surface inférieure) de la pale. Ce plan de coupe permettra de créer les deux moitiés du moule qui seront assemblées par la suite.

Cette étape cruciale de la conception du moule consiste à déterminer le plan de coupe du moule à l'aide du logiciel SolidWorks. Cette étape est essentielle pour garantir le twist de la pale et la corde, qui sont des caractéristiques critiques pour assurer les performances optimales de l'éolienne. Le plan de coupe est soigneusement défini en tenant compte des spécifications de conception et des exigences fonctionnelles de la pale. En ajustant la position du plan de coupe, il est possible de contrôler le twist de la pale, c'est-à-dire la torsion de la pale le long de son axe longitudinal. De plus, en prenant en compte la corde de la pale, qui est la distance entre le bord d'attaque et le bord de fuite, le plan de coupe garantit la forme et les dimensions appropriées du moule pour obtenir la géométrie souhaitée de la pale. Cette étape permet d'optimiser la conception du moule en assurant la précision et la fidélité de reproduction de la forme de la pale, ce qui est essentiel pour la performance et l'efficacité globale de l'éolienne domestique à base de fibres de palmier dattier.

Pour déterminer le plan de coupe du moule, nous avons utilisé les fonctionnalités avancées de SolidWorks, notamment la bibliothèque de surfaces et les outils de moulage. La bibliothèque "Surface" nous a permis d'accéder à des fonctionnalités telles que la surface lissée, qui nous a aidés à créer des surfaces continues et fluides pour définir le plan de coupe. En utilisant des outils de modélisation de surfaces lisses, nous avons pu ajuster avec précision la forme du plan de coupe pour correspondre aux spécifications requises de twist de la pale et de la corde.

En complément, la bibliothèque "Outils de moulage" de SolidWorks s'est avérée essentielle pour notre processus de conception du moule. Nous avons utilisé des fonctionnalités telles que la ligne de joint, qui nous a permis de définir une ligne de séparation claire entre les deux moitiés du moule. De plus, les surfaces d'arrêt nous ont aidés à créer des surfaces de contact appropriées pour assurer une fermeture correcte du moule. Une autre fonctionnalité cruciale que nous avons utilisée est la fonction "Plan de joint". Cette fonction nous a permis de définir un plan de séparation précis pour le moule, garantissant ainsi une démoulabilité efficace de la pale. En utilisant cette fonction, nous avons pu obtenir un plan de coupe optimal pour créer le moule de la pale d'éolienne, tout en prenant en compte les exigences de production et les contraintes techniques.

L'utilisation combinée de la bibliothèque "Surface" de SolidWorks, des outils de moulage et de la fonction "Plan de joint" nous a permis de trouver et de définir avec précision le plan de coupe du moule, en garantissant la conformité aux spécifications de twist de la pale et de la corde. Ces outils avancés ont grandement facilité notre processus de conception, nous permettant d'obtenir un moule fonctionnel et efficace pour la production des pales d'éoliennes domestiques à base de fibres de palmier dattier.

Voici le résultat de la conception obtenue pour le moule de la pale d'éolienne. Le travail de conception a abouti à un moule précis, conforme aux spécifications requises et adapté aux exigences.



FIGURE 3.8 – Plan de coupe : Conception stratégique de la partie inférieure du moule pour la pale d'éolienne

4. Découpage des deux parties en 4 parties

Afin de faciliter le processus d'impression 3D du moule de la pale d'éolienne, nous avons pris en compte les limitations de la taille d'impression de notre imprimante Creality CR-10, qui offre un volume d'impression de 300 x 300 x 400 mm. Étant donné que le moule était de dimensions plus grandes, nous avons divisé chaque partie du moule, à la fois la partie supérieure et la partie inférieure, en quatre pièces distinctes. Cette approche nous a permis de découper le moule en sections plus petites, qui étaient conformes aux capacités d'impression de notre imprimante. Chaque pièce du moule a été conçue de manière à s'ajuster parfaitement lors de leur assemblage ultérieur, assurant ainsi une structure solide et précise du moule dans son ensemble. Cette division en pièces nous a offert la possibilité d'imprimer chaque section séparément, puis de les assembler pour obtenir le moule final complet. Grâce à cette stratégie, nous avons pu surmonter les contraintes de taille de l'imprimante et réaliser avec succès l'impression 3D du moule de la pale d'éolienne.

Voici une image représentant l'une des parties du moule de la pale d'éolienne, avant leur assemblage final. Cette partie du moule a été imprimée en utilisant l'imprimante 3D Creality CR-10, conformément aux dimensions et aux exigences de conception. La figure ci-dessous présente en détail la structure de cette section du moule, mettant en évidence les caractéristiques clés telles que les lignes de joint, les surfaces de contact et les éléments de liaison. Cette image offre un aperçu visuel essentiel de notre travail de conception et d'impression 3D du moule, illustrant la précision et la qualité obtenues dans la fabrication de chaque composant du moule.

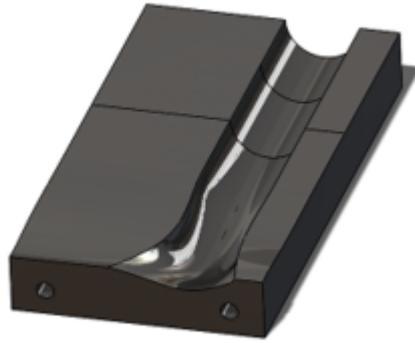


FIGURE 3.9 – Vue détaillée d’une section du moule de la pale d’éolienne avant assemblage

De plus, pour garantir la solidité et la stabilité du moule malgré sa division en plusieurs parties imprimées séparément, des liaisons ont été spécifiquement conçues pour relier les différentes sections du moule. Ces liaisons ont été soigneusement intégrées à la conception, permettant une jonction précise et sécurisée entre les pièces découpées du moule. Dans le prochain paragraphe, nous discuterons en détail de ces liaisons, en mettant en évidence leur rôle dans le maintien de l’intégrité structurelle du moule et leur contribution à la qualité finale des pales d’éolienne produites.



FIGURE 3.10 – Détail de la liaison

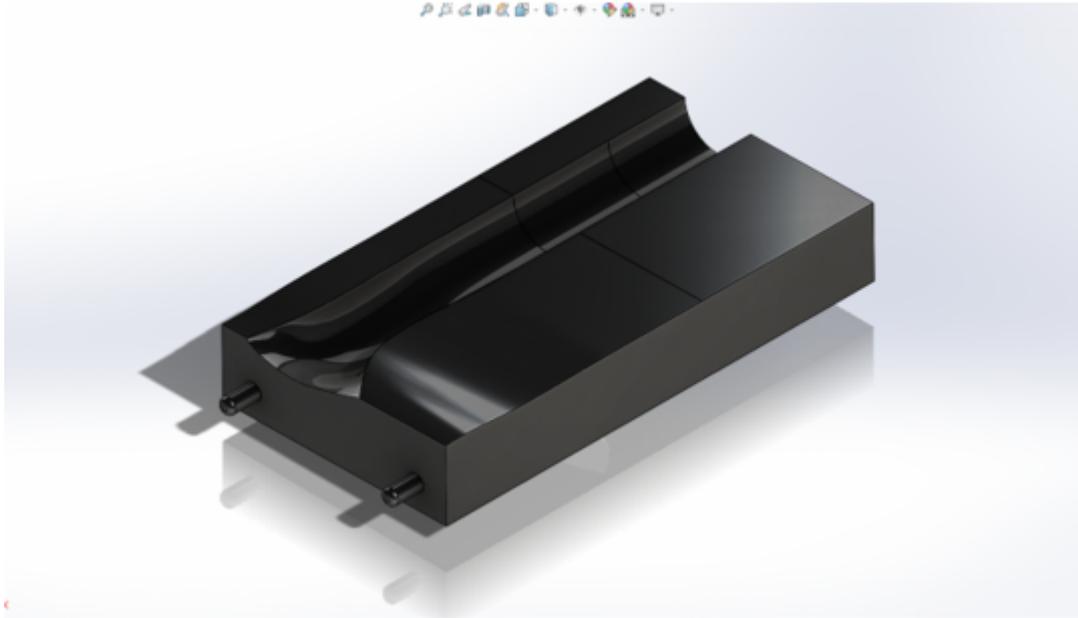


FIGURE 3.11 – Assemblage de la liaison avec une partie du moule de la pale d'éolienne

5. Utilisation d'Ultimaker Cura pour le slicing et l'impression

Nous avons utilisé le logiciel Ultimaker Cura pour préparer les fichiers de chaque partie découpée du moule. Cura nous a permis de configurer les paramètres d'impression, tels que le réglage du flux de filament, la température du lit chauffant et du filament, ainsi que la résolution et la vitesse d'impression. Une fois les paramètres configurés, nous avons téléchargé les fichiers préparés sur l'imprimante 3D disponible au FABLAB de l'ENP.

En utilisant les paramètres appropriés dans Cura, tels que la résolution de la couche, la densité de remplissage et la vitesse d'impression, nous avons optimisé les réglages pour obtenir des résultats de qualité.

Le logiciel Cura nous a également permis de générer le code G, un langage de commande spécifique à l'imprimante 3D, qui indique à l'imprimante comment construire chaque couche du moule. Nous avons pris en compte des facteurs tels que la solidité, la précision et l'efficacité d'impression lors de la configuration des paramètres de slicing. De plus, nous avons effectué des simulations visuelles pour vérifier la cohérence et l'exactitude de la découpe des couches, en garantissant ainsi une impression 3D fluide et réussie du moule.

Grâce à cette étape de slicing réalisée avec le logiciel Cura, nous avons pu préparer efficacement le modèle 3D du moule pour l'impression sur notre imprimante Creality CR-10. Cette approche méthodique et précise a joué un rôle essentiel dans la réussite de l'impression du moule, en assurant une cohérence et une fidélité maximales entre le modèle numérique et le produit final imprimé en 3D.

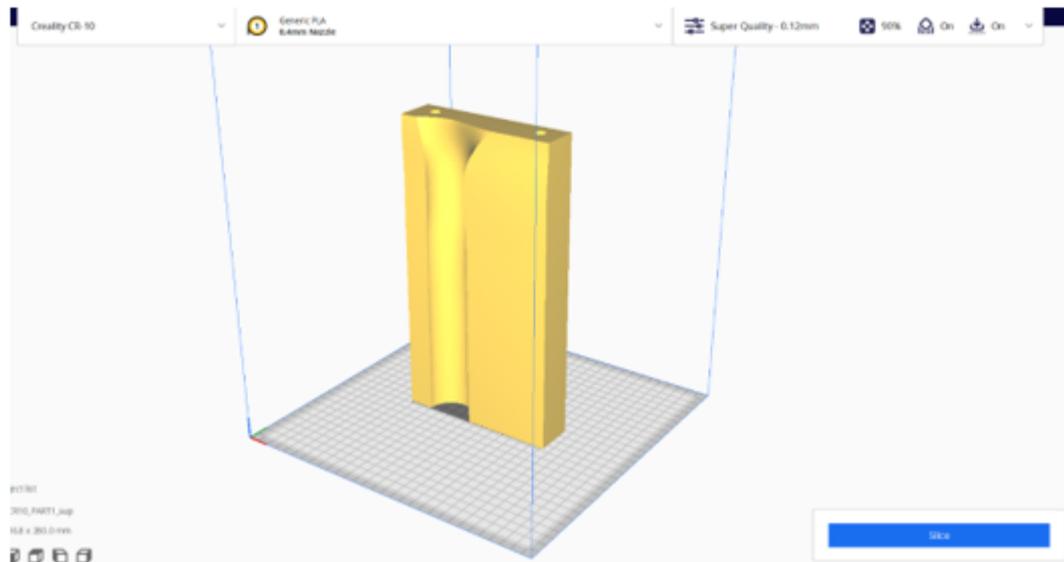


FIGURE 3.12 – Ultimaker CURA

Dans la figure suivante, nous pouvons observer les paramètres de qualité clés qui ont été configurés pour l'impression 3D de chaque partie du moule de la pale d'éolienne. Les principaux paramètres comprennent la résolution des couches et le remplissage (infill) du modèle. Ces paramètres ont été réglés de manière cohérente pour toutes les autres parties à imprimer, garantissant ainsi une homogénéité et une uniformité dans la qualité du moule final.

En ce qui concerne la résolution, nous avons opté pour une valeur élevée afin d'obtenir une finition précise et détaillée des surfaces du moule. Cela permettra de reproduire fidèlement les caractéristiques complexes de la pale d'éolienne et d'assurer une compatibilité parfaite avec la pièce fusionnée.

Quant à l'infill, nous avons sélectionné un pourcentage approprié qui garantit une solidité structurelle suffisante tout en minimisant la consommation excessive de matériau. Cette configuration équilibrée assure la résistance et la durabilité requises pour le moule, tout en optimisant l'efficacité de l'impression.

L'utilisation de ces paramètres de qualité, tels que la résolution et l'infill, a été soigneusement déterminée pour atteindre un équilibre entre la précision des détails et la solidité globale du moule. La figure suivante offre un aperçu visuel de ces paramètres essentiels, démontrant notre engagement à obtenir des résultats optimaux pour chaque partie imprimée du moule de la pale d'éolienne.

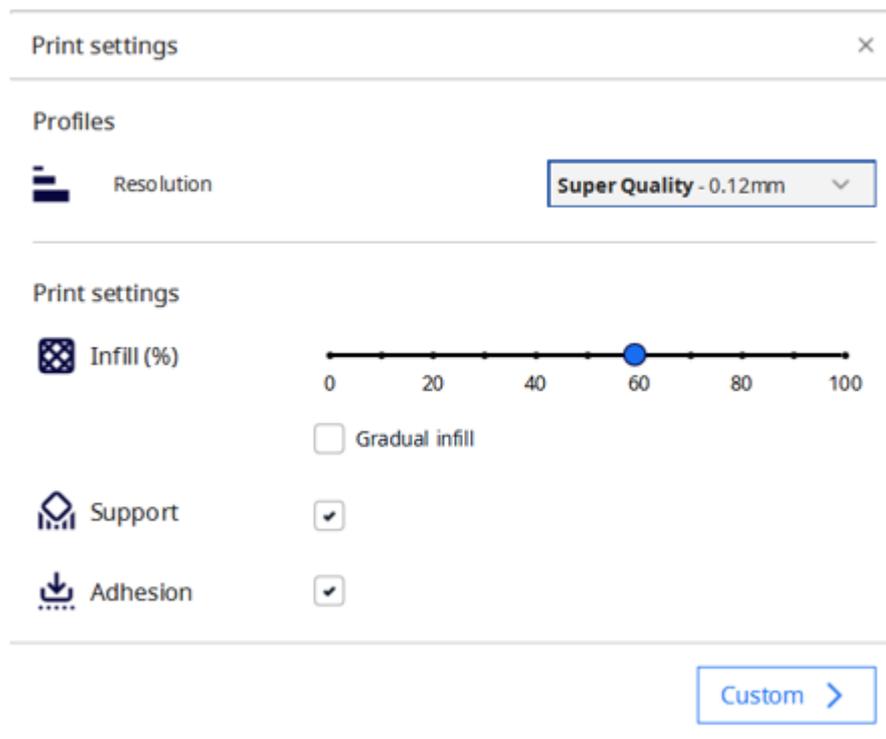


FIGURE 3.13 – Paramètres d'impression



FIGURE 3.14 – Paramètres de qualité

La figure suivante présente en détail les paramètres de qualité essentiels utilisés lors de l'impression 3D du moule de la pale d'éolienne.

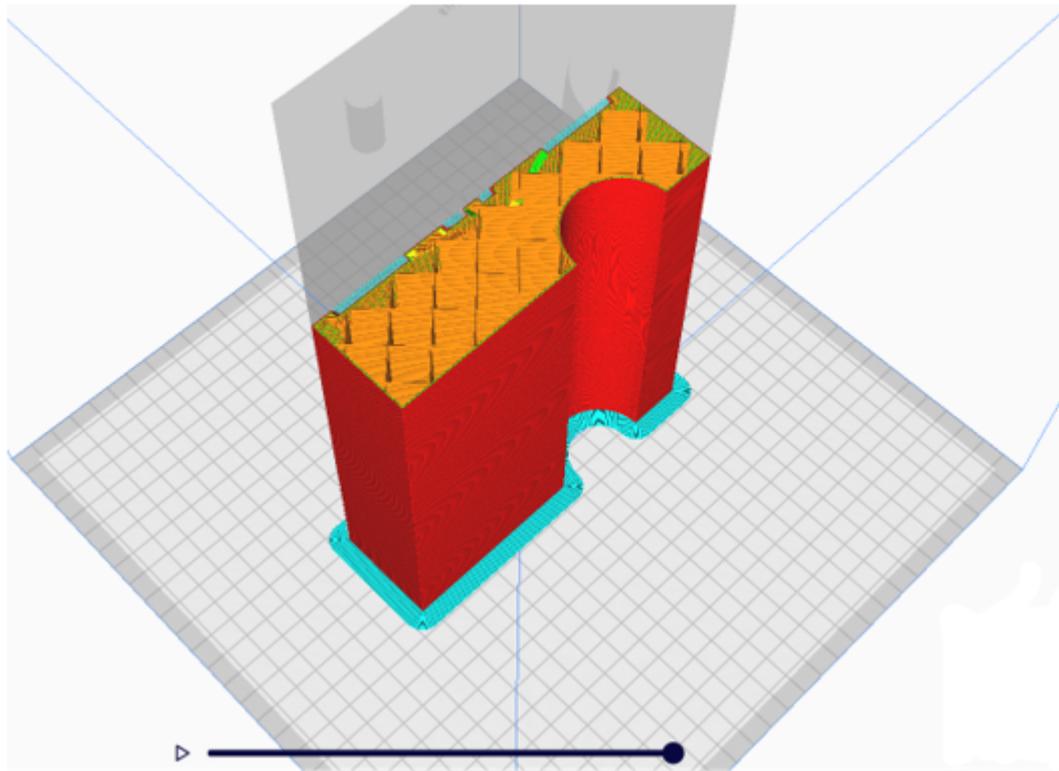


FIGURE 3.15 – Paramètre des couches et remplissage "infill"

Plus spécifiquement, cette image met en évidence la résolution des couches et le remplissage (infill) du modèle. La résolution des couches fait référence à l'épaisseur de chaque couche de matériau déposée lors de l'impression 3D. Cette valeur détermine la finesse des détails et lisse les surfaces du moule. Dans notre cas, une résolution optimale a été sélectionnée pour garantir la précision nécessaire dans la reproduction des formes complexes de la pale d'éolienne.

En ce qui concerne le remplissage, il représente le pourcentage d'espace intérieur du modèle qui est rempli avec du matériau. Cela influe sur la solidité et la stabilité du moule. Dans la figure, vous pourrez observer le motif de remplissage spécifique utilisé, qui a été choisi pour offrir un équilibre optimal entre la robustesse et la consommation de matériau.

Cette figure fournit donc une visualisation claire et concise des paramètres de qualité tels que la résolution des couches et le remplissage. Ces choix ont été déterminés en fonction des exigences spécifiques du moule de la pale d'éolienne, en visant à obtenir des résultats de haute qualité et une performance optimale dans le processus de fabrication.

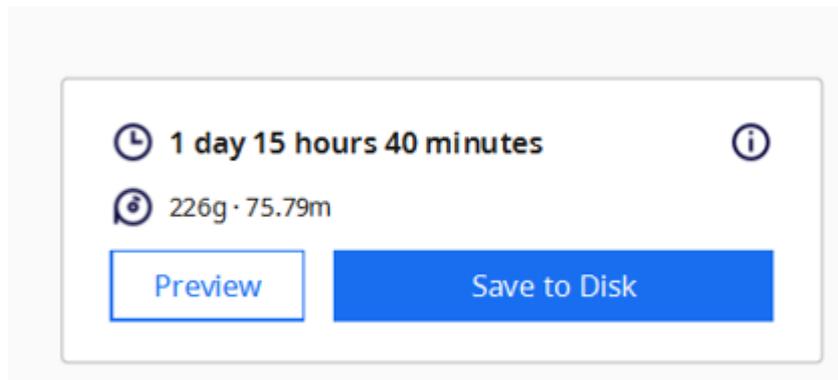


FIGURE 3.16 – Temps d’impression et consommation de PLA

L’impression de chaque partie de moule prend environ 1 journée et 15 heures, et consomme 226 grammes de filament. Ainsi, pour imprimer la partie supérieure du moule qui contient 4 parties, il faudra environ 4 jours et 1 heure d’impression totale (1 jour et 15 heures x 4). En termes de consommation de filament, la partie supérieure du moule nécessitera environ 904 grammes de filament (226 grammes x 4).

Il convient de noter qu’une bobine de filament PLA typique contient généralement 1 kg de filament. Par conséquent, une bobine de filament sera suffisante pour imprimer toute la partie supérieure du moule, avec même une marge supplémentaire disponible. Cela garantit que vous disposez de la quantité nécessaire de filament pour mener à bien votre projet sans interruption due au manque de matériau.

Ces estimations sont basées sur les chiffres précédemment mentionnés concernant le temps d’impression et la consommation de filament par partie de moule. Cependant, il est important de prendre en compte que ces estimations peuvent varier en fonction de divers facteurs, tels que les paramètres d’impression spécifiques et les conditions de fonctionnement de votre imprimante 3D. Il est donc conseillé de surveiller attentivement votre progression d’impression et de disposer d’une quantité suffisante de filament pour garantir le succès de votre projet.

Remarque :

Il est important de noter que si plusieurs imprimantes sont disponibles pour l’impression simultanée des différentes parties du moule, le temps total d’impression peut être considérablement réduit. En utilisant plusieurs imprimantes en parallèle, chaque partie peut être imprimée en même temps, ce qui permet de diviser le temps d’impression total par le nombre d’imprimantes utilisées. Cela peut être particulièrement avantageux lorsque l’on dispose d’une imprimante industrielle, qui est généralement plus rapide que les modèles grand public. Avec une imprimante industrielle, le temps d’impression global pour la partie supérieure du moule pourrait être considérablement réduit, permettant ainsi d’accélérer le processus de fabrication globale.

Les figures suivantes illustrent de manière claire l’assemblage du système, offrant ainsi une visualisation détaillée et compréhensible de la manière dont les différentes parties s’assemblent pour former le moule complet de la pale d’éolienne. Ces illustrations permettront une meilleure compréhension de la structure et des connexions entre les composants, facilitant ainsi la mise en œuvre du processus de fabrication et garantissant un assemblage précis et fonctionnel.

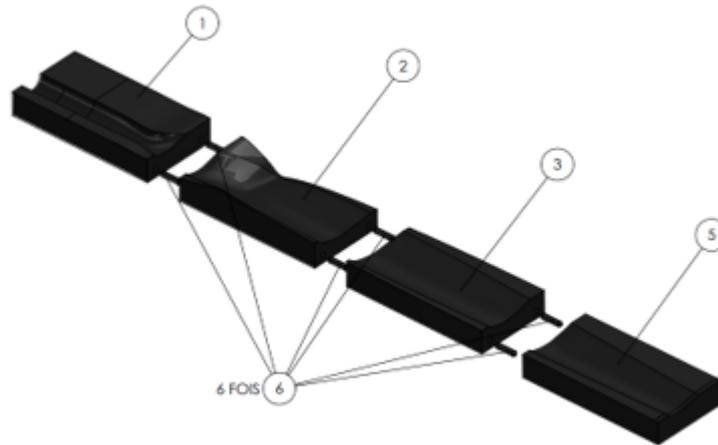


FIGURE 3.17 – Vue éclatée des composants de la partie supérieure du moule

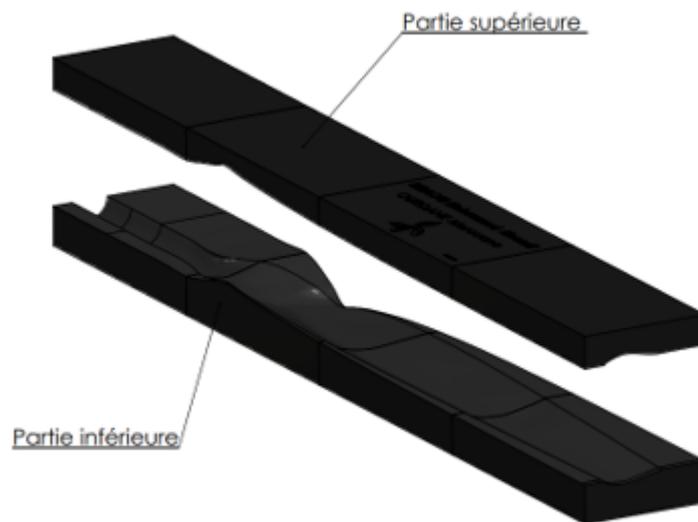


FIGURE 3.18 – Assemblage des deux parties inférieure et supérieure

6. Impression 3D des 8 parties du moule

À l'aide de l'imprimante 3D, nous avons réalisé l'impression des 8 parties découpées du moule. Pendant le processus d'impression, nous avons veillé à ajuster les paramètres tels que l'alimentation du filament, la température du lit chauffant et du filament, pour garantir une impression précise et de haute qualité.

La température du lit d'impression a été fixée à 65 degrés afin de prévenir tout risque de décollage des parties imprimées. En maintenant une température adéquate du lit d'impression,

il est possible d'optimiser l'adhérence du matériau au plateau, réduisant ainsi les chances de déformation ou de décollement pendant le processus d'impression. Cette mesure contribue à garantir la stabilité et la qualité de l'impression, assurant ainsi des résultats satisfaisants pour chaque partie du moule de la pale d'éolienne.



FIGURE 3.19 – Réglage de la température du lit d'impression



FIGURE 3.20 – Impression en cours sur l'imprimante Creality CR-10.

7. Récupération des 8 parties imprimées

Une fois l'impression terminée, nous avons récupéré les 8 parties du moule imprimées. Nous avons procédé à un contrôle visuel pour vérifier la qualité de chaque partie, en nous assurant qu'elles étaient exemptes de défauts ou d'imperfections pouvant affecter le moulage ultérieur de la pale.



FIGURE 3.21 – Moule des pales d'éoliennes

8. Défauts d'impression

Lors du processus d'impression 3D, il est possible de rencontrer certains défauts qui peuvent affecter la qualité finale du moule de la pale d'éolienne. Deux problèmes courants sont les décalages de couches et les problèmes de liaisons. Les décalages de couches se produisent lorsque les couches successives de filament ne s'alignent pas correctement, créant ainsi une texture rugueuse ou des lignes visibles sur la surface de l'impression.

Les problèmes de liaisons, quant à eux, surviennent lorsque les différentes parties du moule ne sont pas correctement assemblées, entraînant des espaces ou des défauts dans la structure. Cela peut être dû à une mauvaise conception des connexions ou à des problèmes d'ajustement entre les pièces. Des liaisons insuffisantes peuvent compromettre l'intégrité du moule et affecter la qualité des pales d'éolienne produites.

Pour remédier à ces problèmes, il est essentiel de vérifier régulièrement l'étalonnage de l'imprimante, de s'assurer que les paramètres d'impression sont correctement configurés, et de prendre des mesures pour optimiser l'adhérence des couches successives. De plus, une conception soignée des liaisons et un ajustement précis entre les pièces contribueront à garantir un assemblage solide et sans défauts.

Remarque :

Il est important de noter qu'au cours du processus d'impression, deux pièces ont été ratées, ce qui a entraîné un léger retard dans la réalisation du moule et une perte de matière. Ces incidents peuvent survenir en raison de divers facteurs tels que des problèmes techniques, une mauvaise adhérence du filament au lit d'impression ou des erreurs de configuration. Lorsque de tels problèmes se produisent, il est essentiel de prendre des mesures correctives appropriées, telles que le recalibrage de l'imprimante, l'inspection des paramètres d'impression et la vérification de la stabilité du lit d'impression. Ces incidents soulignent l'importance de la surveillance continue du processus d'impression et de la mise en œuvre de mesures de contrôle de la qualité pour minimiser les risques de ratés d'impression et d'optimiser l'utilisation du matériau.



FIGURE 3.22 – Moule des pales d'éolienne

10. Conception des bouchons d'extrémité

Nous avons conçu des bouchons pour les deux extrémités du moule de la pale d'éolienne. Ces bouchons revêtent une importance cruciale dans le processus de fabrication, car ils sont responsables de la fermeture du moule. Leur conception doit être précise et soignée afin d'assurer un ajustement parfait et d'éviter toute fuite de matériau lors de l'injection.

précise et soignée afin d'assurer un ajustement parfait et d'éviter toute fuite de matériau lors de l'injection. Pour garantir la fonctionnalité et l'efficacité des bouchons, nous avons accordé une attention particulière à leur conception. Nous avons utilisé le logiciel de modélisation 3D SolidWorks pour créer des modèles précis des bouchons, en tenant compte des dimensions et des tolérances nécessaires pour un ajustement optimal. Nous avons également veillé à ce que les surfaces des bouchons soient bien finies, en éliminant les imperfections qui pourraient compromettre l'étanchéité du moule.

La précision et la qualité des bouchons sont des éléments clés pour garantir la réussite du processus de moulage. Des bouchons bien conçus et bien finis assurent une fermeture étanche du moule, permettant ainsi de maintenir la forme et les caractéristiques souhaitées de la pale d'éolienne pendant la phase de moulage. En consacrant une attention particulière à la conception et à la finition des bouchons, nous nous assurons de la fiabilité et de la performance du moule, contribuant ainsi à la fabrication de pales d'éoliennes de haute qualité.

Les photos ci-dessous illustrent en détail les bouchons conçus pour les extrémités du moule de la pale d'éolienne.

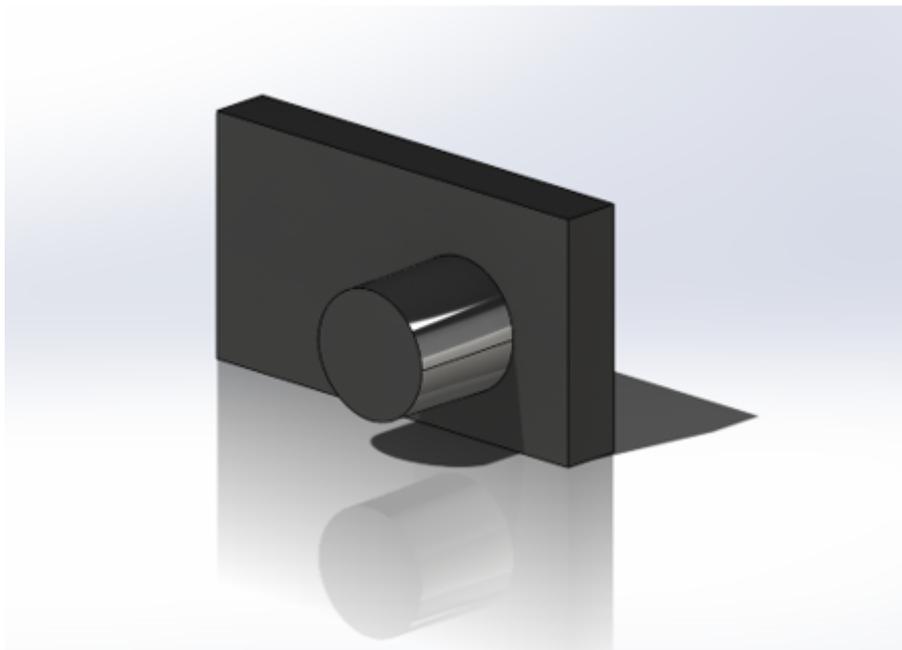


FIGURE 3.23 – Conception détaillée du bouchon 01 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.

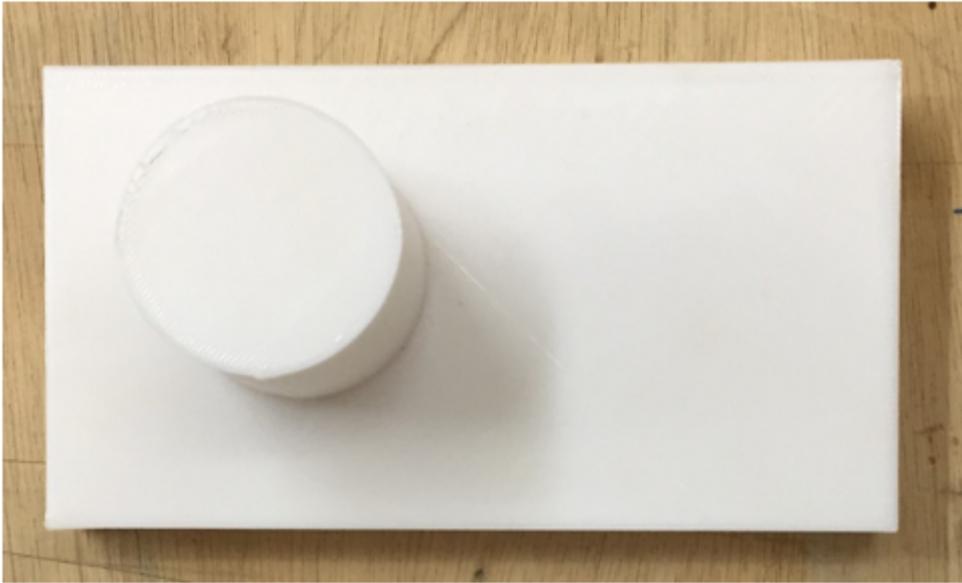


FIGURE 3.24 – Bouchon 01 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.

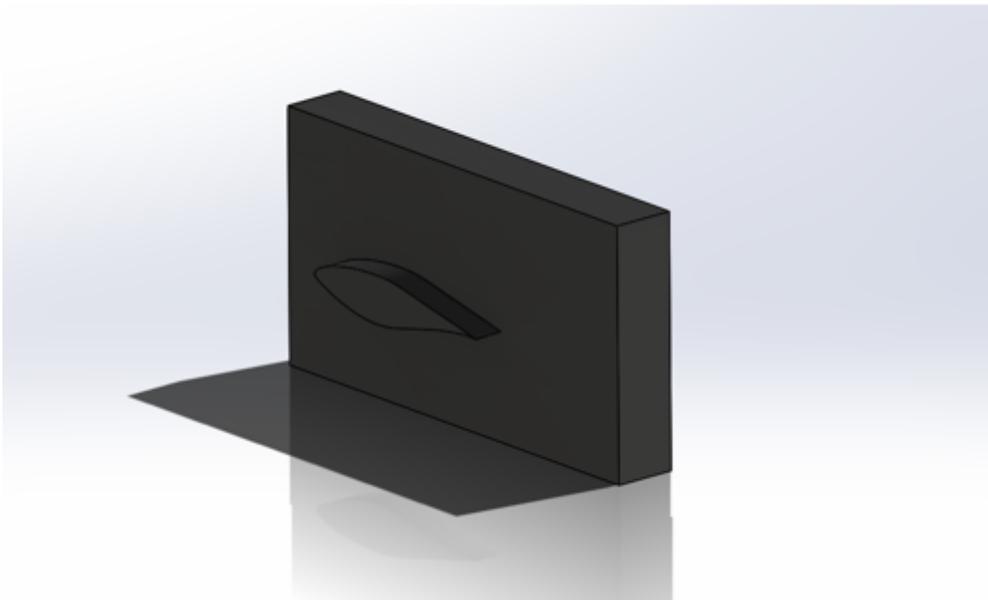


FIGURE 3.25 – Conception détaillée du bouchon 02 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.



FIGURE 3.26 – Bouchon 02 pour l'extrémité du moule de la pale d'éolienne.

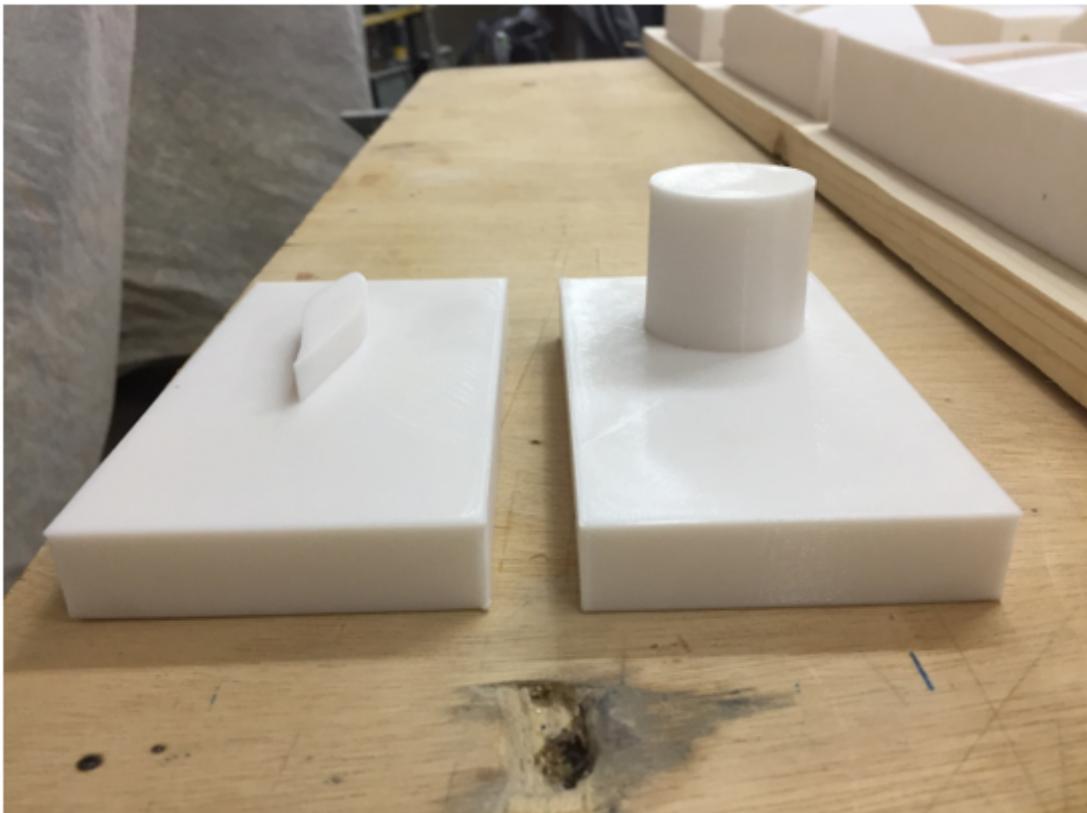


FIGURE 3.27 – Bouchons pour les extrémités du moule

3.3 Conception du système de fixation

La prochaine étape de notre processus de conception concerne la création d'un système de fixation robuste pour assurer la fermeture sécurisée des deux parties du moule supérieur et inférieur. Ce système de fixation est composé de deux tiges en L, deux plaques rectangulaires

en bois et deux tiges filetées.

Les deux tiges en L sont stratégiquement positionnées pour fournir un support solide et stable entre les parties supérieure et inférieure du moule. Elles offrent une résistance structurelle et contribuent à maintenir la forme et l'intégrité du moule pendant le processus de fabrication.



FIGURE 3.28 – Conception détaillée de la tige en L pour le système de fixation du moule de la pale d'éolienne

Les plaques rectangulaires en bois, quant à elles, sont fixées sur le moule et servent de points d'ancrage pour les tiges en L. Elles offrent une surface d'appui solide et garantissent un maintien sécurisé du moule.

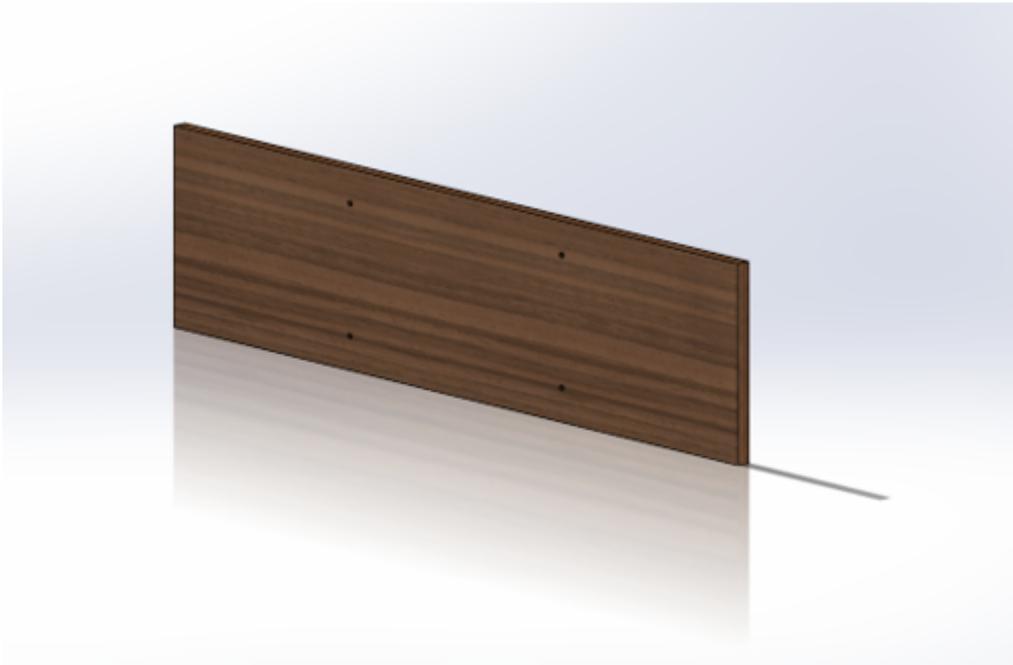


FIGURE 3.29 – Conception détaillée des plaques de fixation en bois

Enfin, les deux tiges filetées sont utilisées pour serrer les parties supérieure et inférieure du moule ensemble. Elles permettent un ajustement précis et une fermeture étanche, assurant ainsi que le moule reste fermement fixé pendant tout le processus de fabrication.



FIGURE 3.30 – Tige filetée

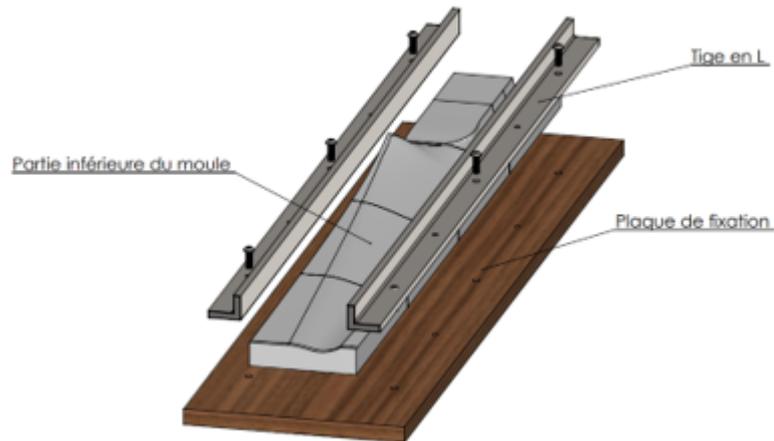
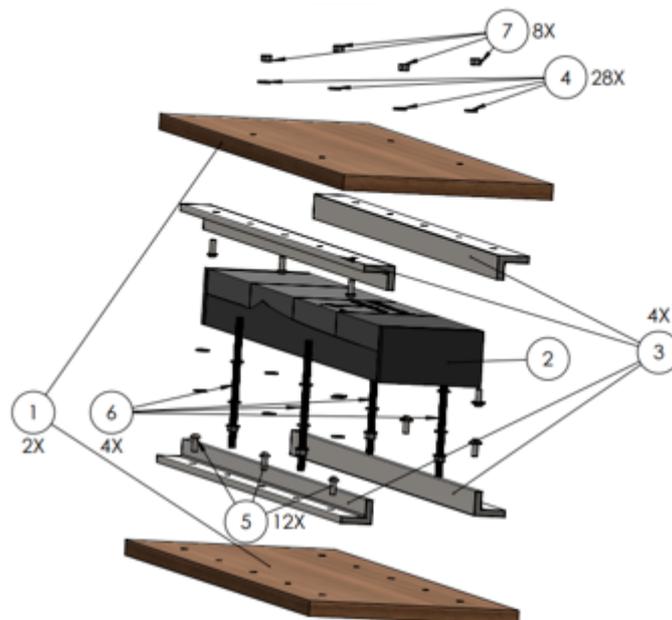


FIGURE 3.31 – Vue éclatée du système de fixation

Les figures ci-dessous présentent la conception finale du système de fixation du moule de la pale d'éolienne, comprenant tous les composants nécessaires pour assurer une fermeture sécurisée et précise.



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	contreplaqué en bois	Bois	2
2	Moule	PLA " acide polylactique	1
3	Support	Acier inoxydable	4
4	ISO 10673-9.3-S	Acier inoxydable	28
5	ISO M8 x 20 - 20C	Acier inoxydable	12
6	Tige fileté	Acier inoxydable	4
7	ISO - 4034 - M8 - N	Acier inoxydable	8

FIGURE 3.32 – Solidité et fiabilité garanties : Vue détaillée du système de fixation assemblé

Cette figure illustre l'aboutissement de notre travail de conception, démontrant notre expertise dans la création d'un système de fixation efficace pour le moule de la pale d'éolienne. Chaque composant a été soigneusement conçu et dimensionné pour garantir une fermeture solide et étanche du moule, assurant ainsi la qualité et la précision des pales fabriquées.

La visualisation de cette conception finale permet de mieux comprendre l'ensemble du système de fixation, ainsi que son intégration avec les parties supérieure et inférieure du moule. Cette représentation visuelle constitue une référence précieuse pour la fabrication et l'assemblage du moule, contribuant ainsi à la réussite globale du projet.

En suivant ces différentes étapes, nous avons réussi à concevoir et réaliser un moule en impression 3D pour la pale de 1,20 m. Ce moule sera utilisé ultérieurement pour le moulage de la pale en utilisant les matériaux appropriés.



FIGURE 3.33 – Moule avec système de fixation réalisé au niveau du laboratoire



FIGURE 3.34 – Moule avec système de fixation réalisé au niveau du laboratoire

Toute la conception du moule de la pale d'éolienne, ainsi que le système de fixation associé, a été réalisée avec succès. Nous sommes fiers de présenter dans la figure suivante une photo réelle du résultat obtenu. Cette image met en évidence le travail méticuleux et l'attention portée aux détails dans la conception et la réalisation de chaque composant du moule, ainsi que du système de fixation qui garantit un assemblage sûr et solide. Cette étape importante marque la finalisation de notre processus de conception, ouvrant la voie à la prochaine étape de fabrication des pales d'éoliennes domestiques à base de fibres de palmier dattier.

3.4 Moule en impression 3D pour les éprouvettes

Dans cette section, nous nous concentrerons sur la conception et la fabrication d'un moule en impression 3D dédié à la production d'éprouvettes. Nous discuterons des spécifications du moule, telles que les dimensions et la géométrie requises pour les éprouvettes, ainsi que des considérations liées à la résistance et à la stabilité du moule pendant le processus de moulage. Nous expliquerons également les avantages de l'impression 3D pour la réalisation de ce type de moule, notamment la rapidité de production et la facilité de modification du design.

1. Conception des éprouvettes sur SolidWorks

La première étape de la fabrication des moules en impression 3D pour les éprouvettes consiste à concevoir les éprouvettes elles-mêmes. En utilisant le logiciel SolidWorks, nous avons créé des modèles 3D des éprouvettes conformément à la norme ASTM D-638. Ces modèles prennent en compte les dimensions, la forme et les spécifications requises pour les essais de traction.

La norme ASTM D-638, également connue sous le nom de norme ASTM D638, est une norme internationale utilisée pour évaluer les propriétés mécaniques des éprouvettes, telles que la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et la ténacité. Elle fournit des directives précises pour la préparation des éprouvettes, les conditions d'essai et les méthodes de calcul des résultats.

Cette norme définit les dimensions et la géométrie des éprouvettes, ainsi que les paramètres d'essai tels que la vitesse de traction et les conditions environnementales. Elle spécifie également les méthodes de mesure des résultats, y compris la détermination de la charge maximale, de l'allongement à la rupture et d'autres paramètres pertinents.



FIGURE 3.35 – Conception de l'éprouvette conformément à la norme ASTM D-638

- Conception du moule à partir des éprouvettes :

À partir de la conception de l'éprouvette conforme à la norme ASTM D-638, nous avons pu développer le moule correspondant pour sa fabrication. Le moule de l'éprouvette est composé de trois pièces distinctes, chacune remplissant un rôle spécifique dans le processus de moulage. La première pièce, appelée "pièce 01", est conçue pour assurer la forme précise de l'éprouvette selon les spécifications de la norme ASTM. Les deux autres pièces sont des fermetures qui garantissent l'épaisseur uniforme de l'éprouvette lors du moulage.



FIGURE 3.36 – Conception du moule des éprouvettes première partie 'Pièce 01'

La pièce 01 du moule est soigneusement conçue pour correspondre aux dimensions et aux détails géométriques spécifiés par la norme ASTM D-638. Elle assure ainsi que l'éprouvette obtenue respecte les critères de forme requis pour les essais mécaniques.

Les deux pièces de fermeture, quant à elles, sont conçues de manière à maintenir l'épaisseur constante de l'éprouvette pendant le processus de moulage, garantissant ainsi des résultats précis et reproductibles lors des essais.

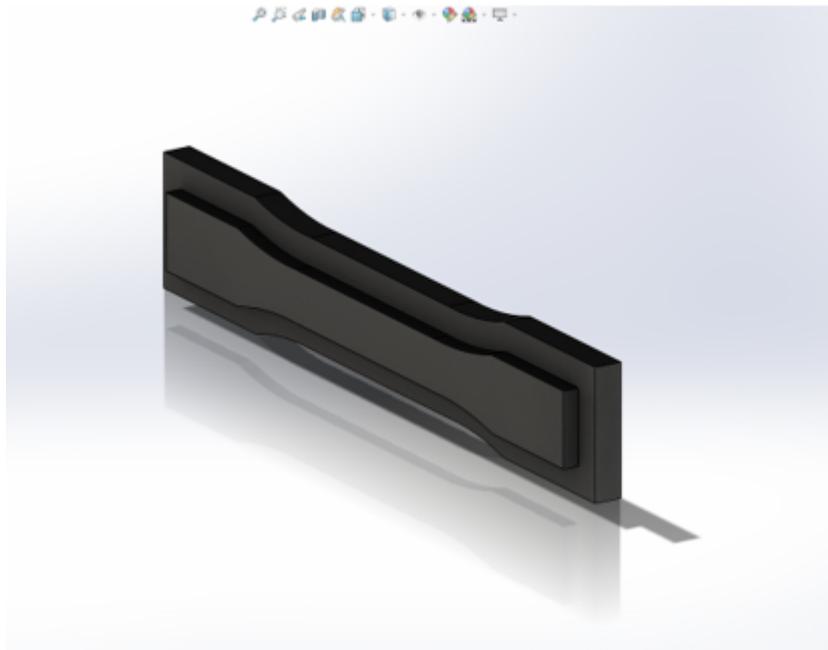


FIGURE 3.37 – Conception de la pièce de fermeture ‘Cache’

En utilisant ce moule spécialement conçu, nous sommes en mesure de produire des éprouvettes conformes à la norme ASTM D-638 de manière efficace et précise. La conception du moule assure la reproductibilité des résultats, permettant des comparaisons fiables entre différents échantillons et évaluations des performances mécaniques des matériaux testés.

Voici dans la figure suivante la conception du système assemblé, mettant en évidence tous les composants interconnectés et leur disposition finale.

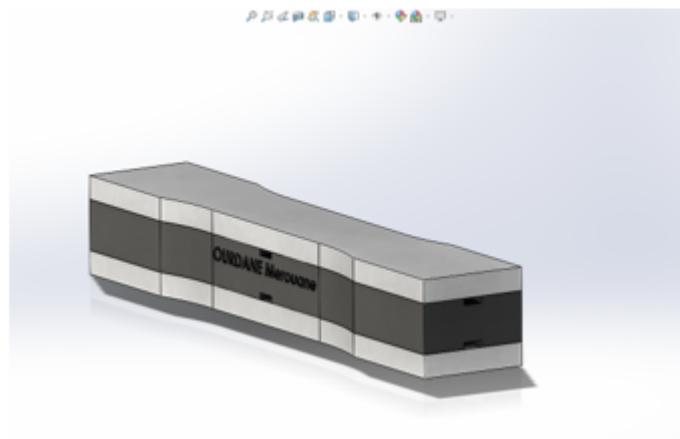


FIGURE 3.38 – Conception de l'éprouvette

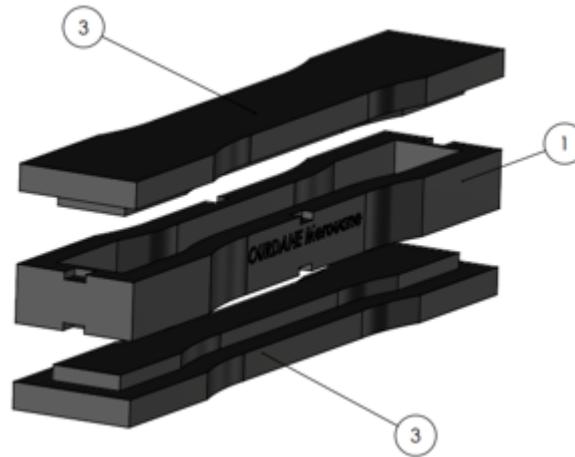


FIGURE 3.39 – Vue éclatée de la conception de l'éprouvette

- Importation dans le logiciel UltiMaker Cura pour le slicing :

Une fois la conception des moules terminée, nous avons importé les fichiers dans le logiciel UltiMaker Cura. Ce logiciel nous a permis de préparer les fichiers pour l'impression 3D en configurant les paramètres de découpe (slicing) appropriés. Nous avons ajusté des paramètres tels que l'épaisseur des couches, la densité de remplissage et la vitesse d'impression pour obtenir des moules adaptés à nos besoins.

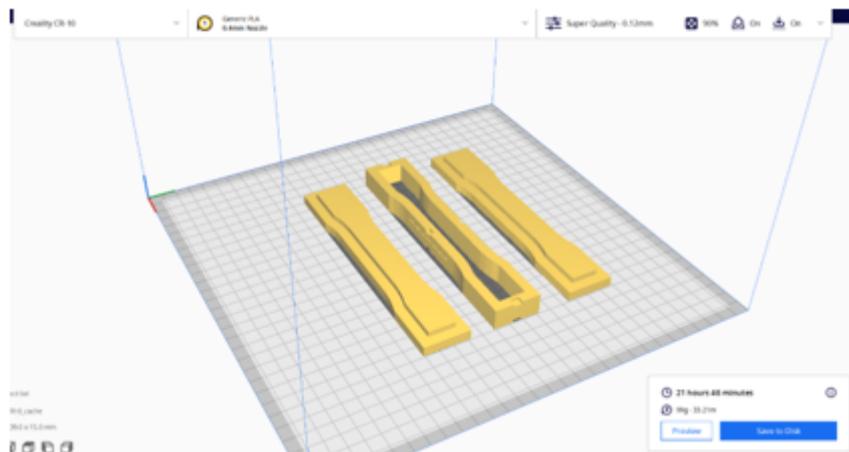


FIGURE 3.40 – Prévisualisation du moule dans UltiMaker Cura avec les paramètres d'impression configurés.

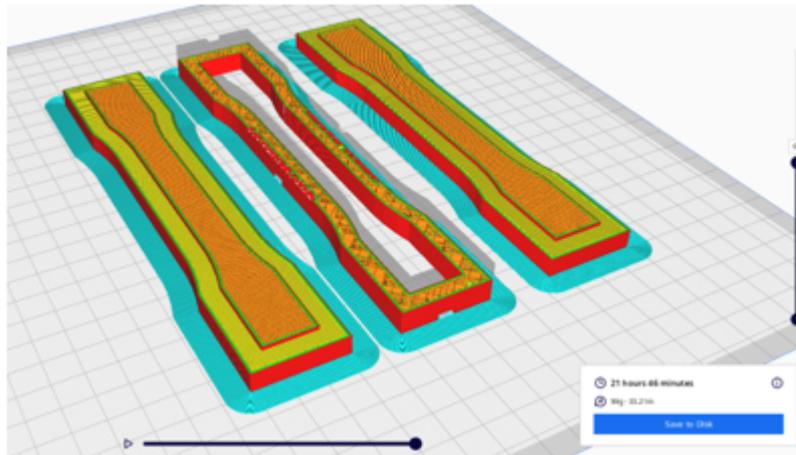


FIGURE 3.41 – Prévisualisation des couches d'impression.

L'impression de l'ensemble du moule nécessitera environ 21 heures et 46 minutes, avec une consommation totale d'environ 99 grammes de filament. Ces chiffres sont basés sur nos paramètres d'impression et peuvent varier en fonction de divers facteurs tels que la vitesse d'impression, la densité de remplissage et les réglages spécifiques de l'imprimante. Il est important de prendre en compte ces informations pour planifier efficacement le processus d'impression et s'assurer que suffisamment de matériau est disponible.

- Impression 3D des moules pour les éprouvettes :

Les fichiers préparés ont été transférés vers l'imprimante 3D pour lancer le processus d'impression. Nous avons veillé à régler les paramètres de l'imprimante tels que la température du lit chauffant, la température du filament et la vitesse d'impression pour obtenir des moules solides et durables. Une fois l'impression terminée, nous avons obtenu les moules prêts à être utilisés.

- Récupération des moules des éprouvettes d'essai de traction :

Une fois les moules imprimés, nous les avons récupérés de l'imprimante 3D. Nous avons effectué un contrôle visuel pour vérifier la qualité des moules, en nous assurant qu'ils étaient exempts de défauts ou d'imperfections susceptibles d'affecter les essais de traction ultérieurs.

En suivant ces étapes, nous avons réussi à concevoir et réaliser des moules en impression 3D pour les éprouvettes d'essai de traction selon la norme ASTM 638. Ces moules nous permettront de mouler les éprouvettes avec précision et cohérence, garantissant ainsi des résultats fiables lors des essais de traction.

Toute la conception du moule des éprouvettes conforme à la norme ASTM D-638, ainsi que le système de fermeture associé, a été réalisée avec succès. Nous sommes ravis de présenter dans la figure suivante une photo réelle du moule des éprouvettes finalisé. Cette image met en évidence le résultat de notre travail minutieux et de notre expertise dans la conception du moule, ainsi que dans la fabrication des pièces de fermeture qui garantissent l'épaisseur précise des éprouvettes. Cette étape cruciale marque l'achèvement de notre processus de conception,

nous permettant de passer à l'étape suivante de fabrication des éprouvettes conformes à la norme ASTM D-638.



FIGURE 3.42 – Moule des éprouvettes conforme à la norme ASTM D-638.



FIGURE 3.43 – Moule des éprouvettes assemblé conforme à la norme ASTM D-638

3.5 Moule en composites pour les pales

En partenariat étroit avec Monsieur Laskri Nourddine de l'atelier HG Craft, nous avons bénéficié d'une précieuse collaboration pour la réalisation de notre projet à plusieurs échelles. L'atelier HG Craft, réputé pour son expertise en matière de fabrication de moules en matériaux composites, s'est avéré être un partenaire idéal.

Dès le début de notre collaboration, Monsieur Laskri Nourddine a démontré un profond intérêt pour notre projet, et il a mis à notre disposition ses vastes connaissances et son expérience approfondie dans la fabrication de moules composites.

Au sein de l'atelier HG Craft, nous avons bénéficié d'un environnement de travail propice à l'innovation et à l'expérimentation. Les installations modernes et les équipements spécialisés,

tels que les outils de découpe, les machines de modelage et les systèmes de fixation, ont grandement facilité la réalisation de notre moule en matériaux composites.

Nous sommes reconnaissants envers Monsieur Laskri Nourddine pour leur contribution précieuse à notre projet. Leur soutien indéfectible et leur expertise ont été des éléments clés dans la réalisation de notre moule en composites, ouvrant ainsi la voie à la fabrication de pales d'éolienne performantes et durables.

Nous tenons à préciser que notre travail sur le moule en composites n'a pas été achevé dans son intégralité avec Monsieur Laskri Nourddine en raison de contraintes de temps. Toutefois, nous sommes résolus à reprendre le travail sur le moule afin de le finaliser selon nos objectifs initiaux. Nous sommes reconnaissants envers Monsieur Laskri pour son soutien précieux jusqu'à présent et nous sommes impatients de poursuivre cette collaboration dans le futur.

De plus, nous sommes ravis d'annoncer que notre camarade, Chouaki Lyes, se joint à notre équipe pour continuer ce projet dans le cadre de leur séminaire. Nous croyons fermement en la valeur de cette collaboration interdisciplinaire et en l'apport unique que chacun de nous peut offrir. En combinant nos connaissances et compétences, nous sommes confiants dans notre capacité à mener à bien ce projet et à réaliser des pales d'éolienne de haute qualité, grâce à l'utilisation de matériaux composites et à la fabrication de moules adéquats.



FIGURE 3.44 – Logo de HG Craft : Symbole de notre Partenariat dans le Projet

3.5.1 - Procédé de Fabrication du Moule en Matériaux Composites :

Le procédé de fabrication du moule en matériaux composites est un processus composé de plusieurs étapes clés. Chaque étape joue un rôle essentiel dans la création d'un moule solide et précis pour la production de pièces en composite. Ces procédés comprennent notamment :

1. Préparation de la plaque en matériaux composites à renfort de fibre de verre :

Cette partie nécessite la mise en place d'une table spéciale. Sur cette table, une pâte déroulante est appliquée pour faciliter le démoulage ultérieur. Ensuite, un gel Coat est appliqué sur les dimensions de la plaque, délimitées par un papier coulant rouge. Une fois tiré, le gel Coat forme une surface lisse et uniforme. Par la suite, trois plaques de tissu de verre de

dimensions identiques à celles de la table sont découpées, puis fixées en les imprégnant de résine polyuréthane. Après un temps de séchage d'environ sept heures, la résine se solidifie et assure une adhérence complète. Cette procédure est répétée pour les deux autres tissus utilisés. Enfin, le démoulage de la plaque est effectué, permettant de la libérer de la table.

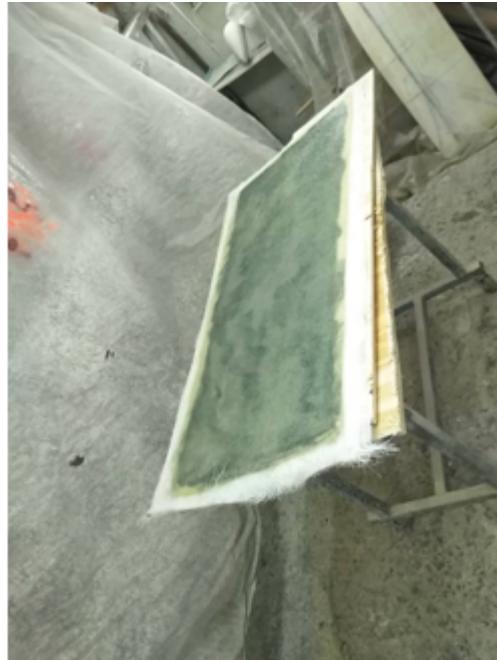


FIGURE 3.45 – Plaque en matériaux composites à renfort de fibre de verre : Résultat après démoulage

2. Découpage Précis : Adapter la Plaque Composite à la Forme de la Pale d'Éolienne :

L'étape suivante dans le processus de fabrication du moule en composite consiste à découper la plaque avec une tronçonneuse en fonction de la forme de la pale d'éolienne. Pour cela, nous avons utilisé une pale provenant de l'éolienne appartenant à Monsieur Smaili, dans le laboratoire LGMD. Grâce à sa généreuse contribution, nous avons pu travailler sur la reproduction de son empreinte et la création du moule en matériau composite. Cette étape cruciale nous permettra d'obtenir un moule précisément adapté à la forme de la pale, garantissant ainsi la qualité et la fidélité du résultat final. En travaillant en étroite collaboration avec Monsieur Smaili, nous avons pu bénéficier de son expertise et de ses conseils tout au long du processus, ce qui a grandement contribué à la réussite de cette étape de création du moule.

Pour obtenir une reproduction fidèle de l'empreinte de la pale, nous avons utilisé des techniques de découpage minutieuses et précises. En nous référant à la pale existante, nous avons tracé les contours de la forme sur la plaque en matériau composite, en veillant à prendre en compte tous les détails et les spécificités de la pale. À l'aide d'outils de découpe spécialisés, nous avons découpé la plaque avec une grande précision, garantissant ainsi un ajustement parfait entre la forme de la pale et celle du moule en composite. Ce processus méticuleux est essentiel pour assurer la qualité et l'efficacité de la fabrication ultérieure des pales d'éolienne.



FIGURE 3.46 – Précision sur Mesure : Découpe de la Plaque Composite pour la Forme de la Pale d'Éolienne



FIGURE 3.47 – La Préparation Précise : Avant la Découpe de la Plaque Composite pour la Forme de la Pale d'Éolienne



FIGURE 3.48 – Une Forme Parfaite : Après la Découpe de la Plaque Composite pour la Forme de la Pale d'Éolienne

3. L'équilibrage Précis : Alignement de la Plaque Coupée pour la Forme de la Pale d'Éolienne :

L'étape suivante dans le processus de fabrication du moule en matériaux composites consiste à équilibrer soigneusement la plaque coupée par rapport à son centre. Cette étape est d'une importance cruciale, car la forme de la pale présente un twist qui doit être respecté pour garantir la performance optimale de l'éolienne. Cependant, elle peut être complexe et exige du temps et de la concentration. Pour réaliser cet équilibrage, des morceaux de bois sont découpés et façonnés en cales qui seront utilisées pour ajuster la position de la plaque coupée. La fixation des cales se fait à l'aide de colle chaude, assurant ainsi une fixation solide et durable. Cette étape permet d'obtenir un alignement précis de la plaque coupée par rapport au milieu, préparant ainsi le terrain pour les étapes suivantes du processus de fabrication du moule.



FIGURE 3.49 – Alignement Précis de la Plaque Coupée : Résultat de l'Équilibrage pour la Forme de la Pale d'Éolienne



FIGURE 3.50 – Empreinte de la Pale d'éolienne et Cales pour l'Alignement Précis

3.6 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence les différentes étapes impliquées dans la fabrication de moules en impression 3D pour la pale de 1,20 m et les éprouvettes d'essai de traction. Ces moules jouent un rôle essentiel dans la production de pièces et d'échantillons de haute qualité pour nos études sur les matériaux composites à base de fibres de palmier dattier.

Nous avons commencé par la conception des moules, en utilisant des logiciels de modélisation 3D tels que SolidWorks pour créer des modèles précis des pièces souhaitées. Ensuite, nous avons divisé les modèles en différentes parties pour permettre l'impression en 3D, en veillant à ce que chaque partie s'assemble parfaitement pour former un moule complet.

Le processus d'impression 3D a nécessité l'utilisation de l'imprimante appropriée et la configuration des paramètres adéquats tels que la température, la vitesse d'impression et la densité de remplissage. Après l'impression, nous avons récupéré les moules et effectué une inspection visuelle pour garantir leur qualité et leur conformité aux spécifications requises.

Nous avons également pris en compte les aspects pratiques, tels que la conception de bouchons d'extrémité pour fermer les moules et assurer une bonne adhérence lors du moulage, ainsi que la conception de liasses pour maintenir les parties du moule ensemble.

En résumé, la conception et la réalisation des moules en impression 3D ont été réalisées avec succès, fournissant des outils essentiels pour la production des pales de 1,20 m et des éprouvettes d'essai de traction. Ces moules nous permettent de reproduire les pièces avec précision, de contrôler la qualité des échantillons et d'obtenir des résultats fiables dans nos études sur les matériaux composites à base de fibres de palmier dattier.

Chapitre 4

Caractérisation des matériaux composites à base de fibres naturelles (palmier dattier)

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons le domaine des matériaux composites à base de fibres naturelles, en mettant l'accent sur les composites fabriqués à partir de fibres de palmier dattier. Ces matériaux présentent des avantages uniques et sont respectueux de l'environnement, ce qui suscite un intérêt croissant dans diverses industries. L'objectif principal de ce chapitre est de caractériser les propriétés des fibres de palmier dattier et des matrices utilisées dans les composites, ainsi que d'évaluer les performances des composites résultants. En réalisant une caractérisation approfondie de ces matériaux, nous cherchons à mieux comprendre leur comportement mécanique, morphologique, ainsi qu'à identifier leurs applications potentielles.

4.2 Propriétés des fibres de palmier dattier

Les fibres de palmier dattier sont des matériaux naturels avec des propriétés uniques pour la fabrication de composites. Elles se distinguent par leur résistance mécanique élevée, en particulier leur résistance à la traction, assurant la stabilité et la durabilité des composites. De plus, elles sont souples et flexibles, offrant une meilleure adaptabilité aux contraintes et une résistance accrue aux chocs. Leur légèreté permet la fabrication de composites légers, bénéfique dans des secteurs tels que l'aérospatiale et l'automobile. Les fibres de palmier dattier présentent également une bonne résistance aux agents chimiques, les rendant adaptées à des environnements corrosifs. Enfin, elles sont renouvelables et biodégradables, offrant une solution écologique pour la fabrication de composites durables. Ainsi, les fibres de palmier dattier sont un matériau attractif pour les composites à haute performance respectueux de l'environnement.



FIGURE 4.1 – Palmier dattier

1. Caractéristiques physiques des fibres ;

Les fibres de palmier dattier présentent plusieurs caractéristiques physiques distinctives. Tout d'abord, elles ont une longueur généralement comprise entre 1 et 5 centimètres, avec un diamètre variant de quelques micromètres à environ 50 micromètres. Les fibres sont généralement de couleur brun clair à brun foncé, avec une texture fibreuse et une apparence structurée. Elles ont une structure cellulaire complexe, avec des parois cellulaires épaisses et des canaux de lumière étroits.

En termes de densité, les fibres de palmier dattier ont une densité relativement faible, ce qui les rend légères et appropriées pour une utilisation dans les composites. Leur densité varie généralement entre 0,80 et 0,82 g/cm³, ce qui les place dans la catégorie des fibres légères.

Enfin, les fibres de palmier dattier présentent une bonne résistance à la dégradation biologique, ce qui les rend adaptées pour des applications à long terme. Leur structure cellulaire et leur composition chimique leur confèrent une résistance naturelle contre les attaques des insectes, des champignons et d'autres organismes décomposeurs.

2. Propriétés mécaniques des fibres :

Les fibres de palmier dattier présentent des propriétés mécaniques intéressantes qui les rendent adaptées à diverses applications. Leur résistance à la traction est l'une de leurs caractéristiques les plus importantes. Les fibres de palmier dattier ont une résistance à la traction élevée, généralement de l'ordre de 300 à 600 MPa. Cette résistance à la traction élevée permet aux fibres de supporter des charges importantes et de contribuer à la résistance globale des composites renforcés de fibres de palmier dattier.

En plus de leur résistance à la traction, les fibres de palmier dattier présentent également une résistance à la flexion significative. Cette résistance à la flexion leur permet de résister à des contraintes de flexion et de pliage, ce qui les rend appropriées pour des applications nécessitant une flexibilité et une résistance.

4.3 Matrices de composites

1. Types de matrices utilisées dans les composites à base de fibres naturelles :

Dans les composites à base de fibres naturelles, différentes matrices sont utilisées pour encapsuler les fibres et fournir une structure solide et cohésive. Voici quelques-uns des types de matrices couramment utilisés :

1. Matrices polymères :

Les matrices polymères sont les plus largement utilisées dans les composites à base de fibres naturelles. Les polymères tels que le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le polyéthylène téréphtalate (PET), le polyamide (PA) et le polyuréthane (PU) sont fréquemment utilisés. Ces matrices offrent une bonne adhérence aux fibres naturelles et peuvent être facilement transformées en diverses formes, telles que des feuilles, des films ou des pièces moulées.

- Matrices thermoplastiques :

Les matrices thermoplastiques, telles que le polypropylène renforcé (PPR), le polycarbonate (PC) et le polyéthylène haute densité (PEHD), sont également utilisées dans les composites à base de fibres naturelles. Les matrices thermoplastiques sont intéressantes car elles peuvent être fondus et remodelés à plusieurs reprises, permettant ainsi une recyclabilité et une réparation facile des composites.

- Matrices thermodurcissables :

Les matrices thermodurcissables, telles que les résines époxy, les résines polyester et les résines phénoliques, sont souvent utilisées dans les composites à base de fibres naturelles. Ces matrices se solidifient lors de la réaction chimique de polymérisation, formant une structure rigide et durable. Les matrices thermodurcissables offrent une excellente résistance chimique et mécanique, ainsi qu'une bonne stabilité dimensionnelle.

2. Matrices minérales :

Certaines matrices minérales, telles que le ciment, la chaux et les argiles, peuvent également être utilisées dans les composites à base de fibres naturelles. Ces matrices sont souvent utilisées dans des applications de construction et de génie civil, offrant une excellente résistance au feu, une résistance aux intempéries et une durabilité élevée.

Dans notre projet portant sur le palmier dattier, nous avons choisi d'utiliser principalement des matrices polymères pour nos composites à base de fibres naturelles. Les matrices polymères offrent plusieurs avantages pour cette application spécifique. Tout d'abord, elles permettent une bonne adhérence avec les fibres de palmier dattier, favorisant ainsi une interaction efficace entre la matrice et les fibres. De plus, les matrices polymères sont flexibles et peuvent être transformées en différentes formes, ce qui nous donne une plus grande liberté de conception et d'application. De plus, les propriétés mécaniques des matrices polymères peuvent être modifiées en ajustant la composition chimique et en ajoutant des charges ou des renforts. Cela nous permet d'optimiser les performances des composites en fonction des exigences spécifiques du projet. Enfin, les matrices polymères sont également connues pour leur résistance à la corrosion, leur légèreté et leur facilité de mise en œuvre. En combinant les fibres de palmier dattier avec des matrices polymères appropriées, nous visons à obtenir des composites durables, résistants et adaptés à une large gamme d'applications.

Mise en oeuvre des matériaux composites

1. Moulages sans pression :

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent

d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.[1]

2. Moulage au contact :

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée "gel coat".

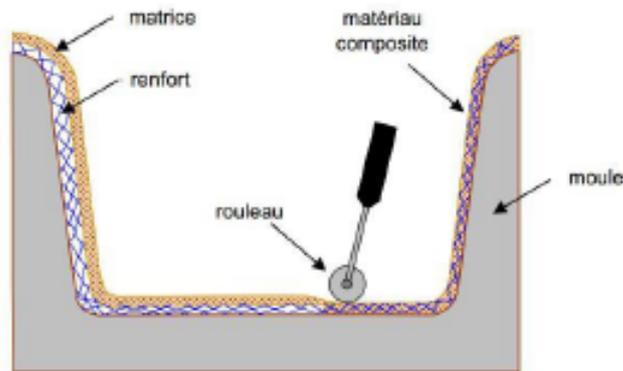


FIGURE 4.2 – Principe du moulage au contact[1].

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

1. Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
2. Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
3. Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un bullage est effectué avec un rouleau cannelé.
4. Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
5. Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
6. La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
7. Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

3. Moulage par projection simultanée :

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

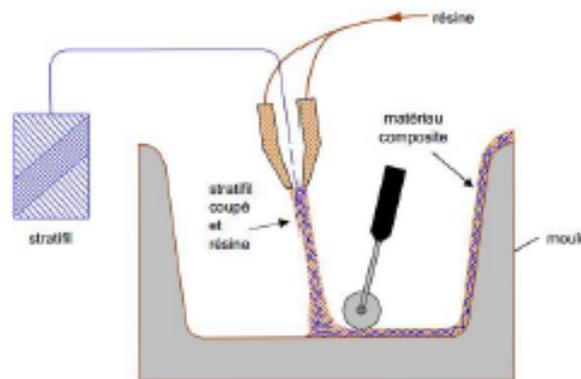


FIGURE 4.3 – Principe du moulage par projection simultanée.[1].

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes. Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques[1].

4. Moulage sous vide :

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et déballe la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

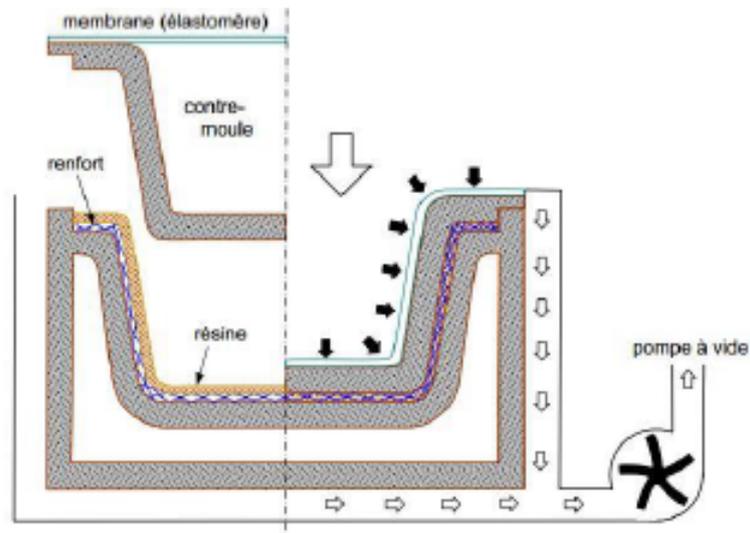


FIGURE 4.4 – Moulage sous vide.[1]

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes[1, 2].

5. Moulage par compression :

5.1. Moulage par injection de résine :

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

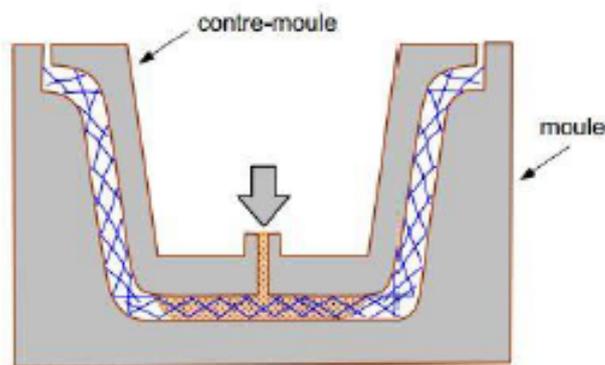


Figure 1.18 : Moulage par injection de résine.

FIGURE 4.5 – Moulage par injection de résine.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

5.2. Moulage par compression à froid :

Le moulage est effectué à basse pression (supérieur à bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique procurée par le moulage Ces tartes sont alors suffisantes pour maintenir la moule aux températures de 50 à 70 °Celsius, en fonctionnement permanent. Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gelcoat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contremoule Il est ferme, pressé. Les temps de polymérisation sont liés au type de résine, au Catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production[1, 2].

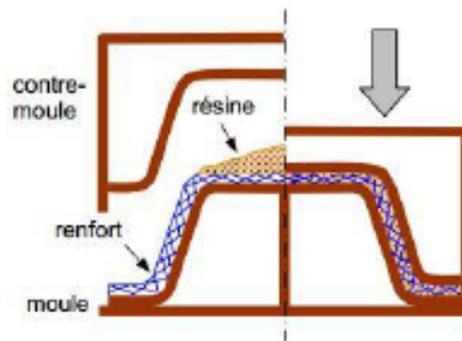


FIGURE 4.6 – Principe du moulage par compression à froid.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud[1, 2].

5.3. Moulage par compression à chaud :

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants. Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre-moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée[1, 2].

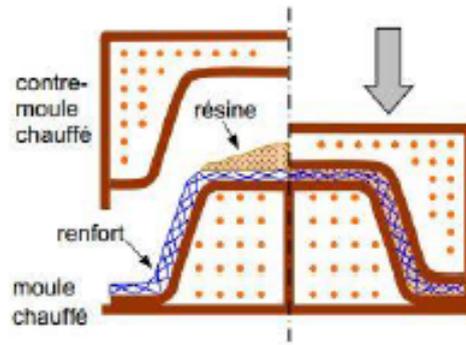


FIGURE 4.7 – Principe du moulage par compression à chaud.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule[1, 2].

5.4. Moulage par injection :

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en oeuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.). Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques. Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.[1, 2].

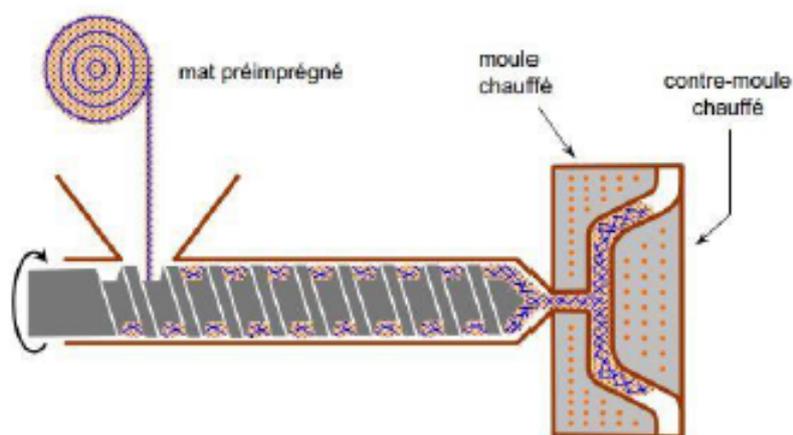


FIGURE 4.8 – Moulage par injection.

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé "plastiques renforcés" que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de

l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries[1, 2].

6. Moulage par centrifugation :

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

-Le renfort : fibres coupées ou stratifié coupé.

-La résine catalysée et accélérée (résines, époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort.

La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve. Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation[1, 2].

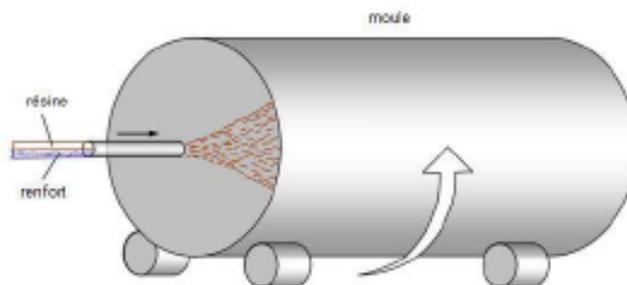


FIGURE 4.9 – Moulage par centrifugation[1, 2].

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule.

7. Moulage par la méthode RTM "Resin Transfer Molding" :

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le principe du Moulage par Transfert de Résine RTM (en anglais Resin Transfert Molding) consiste à injecter le mélange réactif sous basse pression (1 à 10 bars) entre le moule et le contre-moule. Pour encore améliorer la pénétration du mélange réactif dans le moule et le renfort, le vide peut être créé dans le moule.

La préparation du moule est semblable à celle du moulage au contact : agent démoulant et gel-coat pour l'obtention des surfaces lisses. Les renforts fibreux secs sont placés dans le moule construit en résine ou métal. Les moules résine sont choisis pour des petites séries ; environ 500 pièces réalisables pour les polyesters, le double pour les époxydes.

Les moules métalliques aluminium ou acier seront préférés pour de plus grandes séries au-delà de 20000 pièces. Pour les séries intermédiaires on choisira des moules résines avec peau électro formée[3, 4].



FIGURE 4.10 – Machine RTM[3, 4].

(a) : Système de contrôle de pression d'air. (b) : Cuve contenant le mélange. (c) : Moule en acier ouvert couvert d'un contre-moule en Plexiglas. (d) : Évent.

Le renfort utilisé est un mat de fibres de palmier préparé sous presse (entre 2 à 6 tonnes de pression) sous une température allant de 50 à 70°C. Les fibres sont mises dans des gabarits en aluminium avec une orientation aléatoire. La masse des fibres telle que le pourcentage final dans le composite soit de 15% en poids. Les fibres PLD forment sous l'effet de la chaleur et de la pression exercée un mat fin. Il subit un découpage des bords puis mis dans le moule RTM.

Les fibres oxydées par TEMPO sont récupérées du milieu réactionnel puis sont lavées à l'eau et mises dans les gabarits en aluminium sous forme de suspension aqueuse de fibres.

Ces gabarits sont introduits dans l'étuve réglée à 60°C sous un flux d'air chaud pendant une nuit. Les mats sont récupérés directement par cette méthode et mises dans le moule de la machine RTM. Une pression supplémentaire avec la presse peut être appliquée sur ses mats

préformés. Cette technique de séchage n'est pas applicable dans le cas des fibres PLD vierges parce que les fibres ne forment pas une suspension stable dans l'eau. [préformés. Cette technique de séchage n'est pas applicable dans le cas des fibres PLD vierges parce que les fibres ne forment pas une suspension stable dans l'eau[3, 4].

4.4 Procédés de fabrication des échantillons de composites

Dans la fabrication des échantillons de composites à base de fibres de palmier dattier, différents procédés sont utilisés pour assurer une distribution uniforme des fibres dans la matrice et obtenir des composites de qualité. Voici quelques procédés couramment utilisés :

1. Moulage par compression :

Ce procédé consiste à placer les fibres de palmier dattier préalablement préparées dans un moule, puis à appliquer une pression et une chaleur pour solidifier la matrice autour des fibres. Cela permet d'obtenir des composites solides et de forme spécifique.

2. Infusion de résine :

Dans ce procédé, les fibres de palmier dattier sont disposées dans un moule ou un mandrin, puis une résine liquide est infusée dans les fibres à l'aide d'une technique d'infusion sous vide ou de moulage par injection. La résine imprègne les fibres et durcit ensuite pour former le composite.

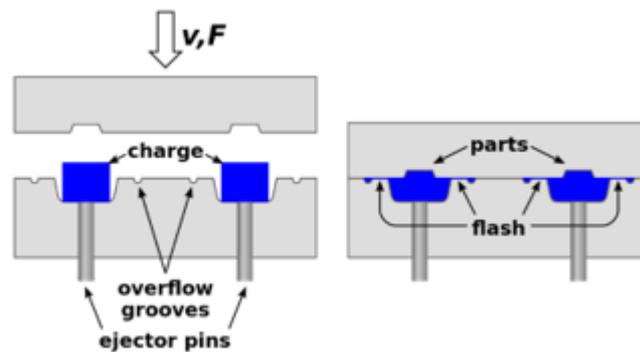


FIGURE 4.11 – Infusion de résine

3. Enroulement filamentaire :

Ce procédé implique l'enroulement continu de fibres de palmier dattier autour d'un mandrin ou d'une forme cylindrique préalablement enduite de résine. Les fibres sont enroulées de manière précise et contrôlée pour créer une structure composite résistante.

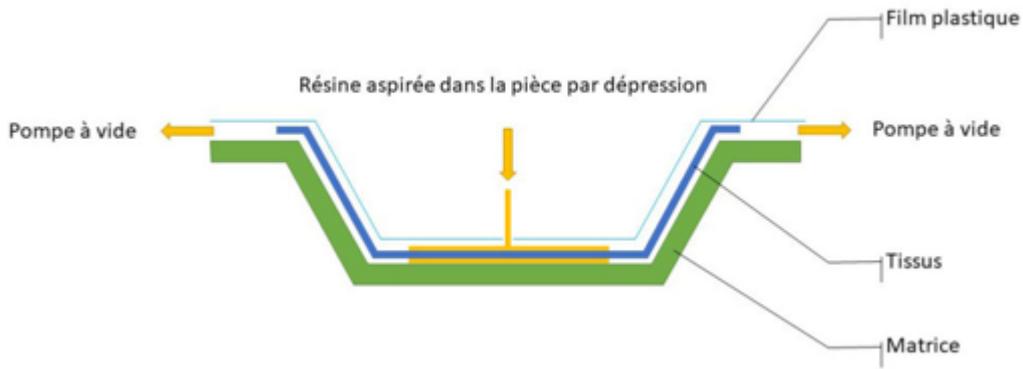


FIGURE 4.12 – Enroulement filamentaire

4. Pultrusion :

La pultrusion est un procédé continu dans lequel les fibres de palmier dattier sont tirées à travers une matrice de résine thermoplastique ou thermodurcissable. Les fibres sont imprégnées de résine et durcies à mesure qu'elles passent à travers un moule chauffé. Ce procédé permet d'obtenir des composites à haute résistance et à haute performance.

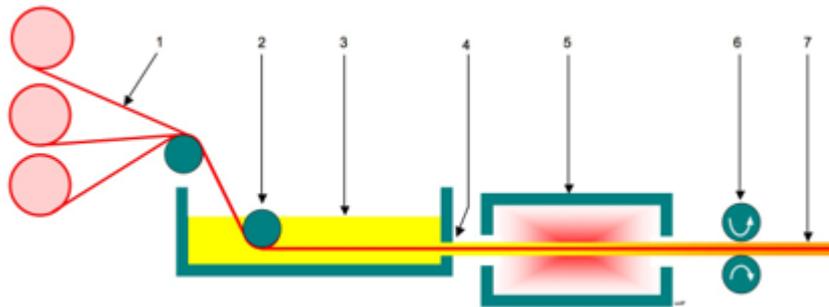


FIGURE 4.13 – Schéma simplifié du procédé de pultrusion : 1 rouleau continu de fibres, 2 rouleau de mise sous tension, 3 résine, 4 fibre imbibée, 5 cuisson, 6 étirage, 7 produit fini.

4.5 Choix des proportions de fibres et de matrices

Le choix des proportions de fibres de palmier dattier et de matrices dans la fabrication des composites est un aspect crucial pour obtenir les performances désirées du matériau final. Il est essentiel de trouver un équilibre approprié entre la quantité de fibres et la quantité de matrice pour optimiser les propriétés mécaniques, thermiques et morphologiques du composite.

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors du choix des proportions de fibres et de matrices, tels que la résistance requise, la flexibilité, la comptabilité entre les fibres et la matrice ainsi que le coût final.

4.6 Préparation des échantillons pour les tests

La préparation des échantillons pour les tests est une étape cruciale dans la caractérisation des composites à base de fibres de palmier dattier. Cette étape vise à obtenir des échantillons représentatifs et homogènes, qui seront ensuite soumis à des essais pour évaluer leurs propriétés mécaniques, thermiques et morphologiques.

La préparation des échantillons implique généralement les étapes suivantes :

1. Découpe des fibres :

Les fibres de palmier dattier doivent être découpées à des dimensions spécifiques pour les incorporer dans la matrice. Cela peut être fait à l'aide d'un équipement de découpe approprié, en veillant à obtenir des fibres de longueurs uniformes. Nous distinguons quatre familles principales des fibres utilisées : (1) pour les fibres courtes des tiges, (2) pour les fibres courtes du Kornaf, (4) pour les fibres courtes des feuilles et (5) pour les fibres longues de feuilles mélangées avec les particules des tiges et du Kornaf.



FIGURE 4.14 – Découpe des fibres

2. Mélange des fibres et de la matrice :

Les fibres de palmier dattier sont ensuite mélangées avec la matrice choisie, généralement sous forme de résine ou de polymère. Le mélange doit être effectué de manière homogène pour assurer une répartition uniforme des fibres dans la matrice. La matrice choisie est une résine epoxy STR ayant les caractéristiques suivantes :

Propriétés

- Très bonne tenue aux produits chimiques (nous consulter)
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre

Caractéristiques

- Rapport pondéral :
 Élément A : 1kg
 Élément B : 0,666 kg
- Densité (ISO758) :1,1 ± 0,05
- Viscosité (NF T76-102) :11000 Mpa.S à 25 °C
- DPU (NFP18 810) :1h 15mn à 20 °C et 65% HR
- Temps de durcissement à 20 ° C et 65% HR
 Hors poisse : 6 h
 Dur : 16 h
- Rc (NA 427)>70 MPA
- Rf (NA 234) :··· >25 MPA
- Adhérence sur béton (NFP18 858) :···>3 MPA
- Durée de mise en service10 j 20° C

FIGURE 4.15 – Les caractéristiques et propriétés de la résine époxy STR : Une résine exceptionnelle pour notre projet

3. Moulage des échantillons :

Le mélange fibre-résine est ensuite moulé dans les moules des éprouvettes déjà présentés au chapitre précédent. Nous rappelons que les éprouvettes de traction ont été faites selon la norme ASTM D638. Les dimensions ont été déjà données et le moulage se fait par compression sans apport de la chaleur, dans un moule déjà confectionné par impression 3D.

Pour les éprouvettes de compression, les éprouvettes ont été faites sur un moule métallique. En ce qui concerne les proportions de résine et fibre utilisés dans les éprouvettes, nous les résumons dans le tableau ci-après pour les quatre catégories de renfort utilisé.



FIGURE 4.16 – Le moule métallique pour les tests de compression



FIGURE 4.17 – Le moule des éprouvettes pour les tests de traction selon la norme ASTM D638

TABLE 4.1 – Éprouvette de traction ASTM D638

	1ère Variante		2ème Variante	
	Masse des fibres (en g)	Masse de la matrice (A+B) (en g)	Masse des fibres (en g)	Masse de la matrice (A+B) (en g)
(1) Particule de tiges /Epoxy	4	18	7	18
(2) Particule de Kornaf/Epoxy	6	20	7	18
(4) Fibre courtes feuilles/ Epoxy	4	18	7	18
(5) Fibres longues de feuilles et particule tige/ Epoxy	4	18	7	18

TABLE 4.2 – Éprouvette de compression cubique (15x15x15 mm³)

	Masse des fibres (en g)	Masse de la matrice (A+B) (en g)
(1) Particule de tiges /Epoxy	20.45	30.04
(2) Particule de Kornaf/Epoxy	26.39	33.93
(4) Fibre courtes feuilles/ Epoxy	50.5	32.46
(5) Fibres longues de feuilles et particule tige/ Epoxy	30.24	31.22

4. Durcissement :

Les échantillons moulés sont ensuite soumis à un processus de durcissement. Dans notre cas, le durcissement a eu lieu à l'air libre sans chauffage tout en respectant la durée de durcissement recommandé pour la résine Epoxy STR dans le catalogue.

Il faut noter que ces étapes sont les mêmes pour la réalisation des éprouvettes de tractions ainsi que pour les éprouvettes de compression. La norme pour la dernière impose que les échantillons doivent être d'une forme cubique.

5. Forme finale des éprouvettes après moulage :

Il faut noter que ces étapes sont les mêmes pour la réalisation des éprouvettes de tractions ainsi que pour les éprouvettes de compression. La norme pour la dernière impose que les échantillons doivent être d'une forme cubique.



FIGURE 4.18 – Forme finale des éprouvettes de compression après moulage



FIGURE 4.19 – Forme finale des éprouvettes de traction de compression après moulage

4.7 Caractérisation mécanique des composites

1. Tests de résistance en traction des composites

Les tests de résistance en traction des composites à base de fibres de palmier dattier sont cruciaux pour évaluer leurs performances mécaniques. Des échantillons rectangulaires sont préparés selon des normes spécifiques et fixés dans une machine d'essai universelle. En appliquant une force de traction progressive, on mesure la résistance du matériau et enregistre la relation entre la force appliquée et l'allongement, formant ainsi une courbe de traction. Les paramètres clés mesurés sont la résistance à la traction maximale et l'allongement à la rupture. Ces tests permettent d'évaluer la résistance, la ductilité et la capacité des composites à supporter les charges de traction, fournissant des données cruciales pour caractériser leurs performances et déterminer leur utilisation dans divers secteurs tels que l'automobile, la construction et l'aérospatiale.

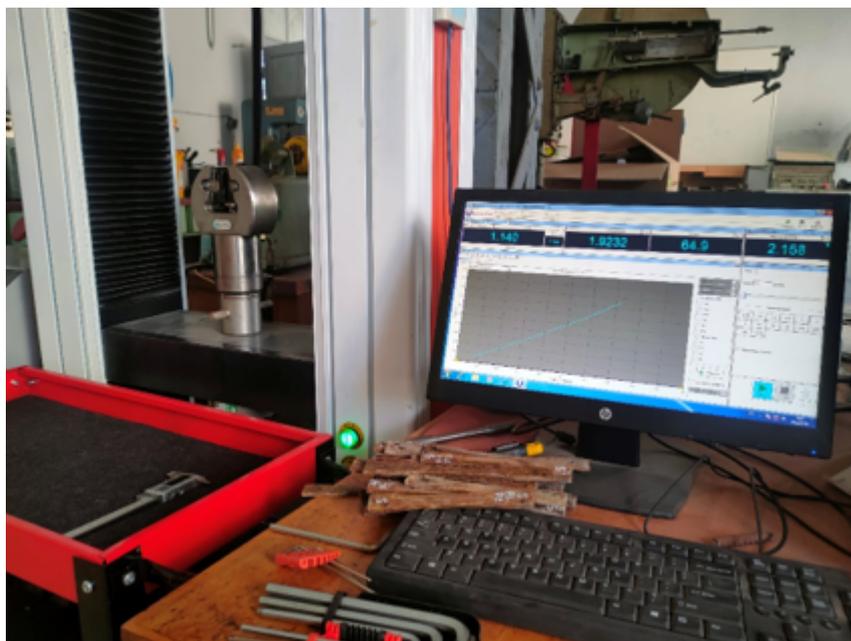


FIGURE 4.20 – La machine d’essai de compression et de traction : un outil essentiel pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux composites.

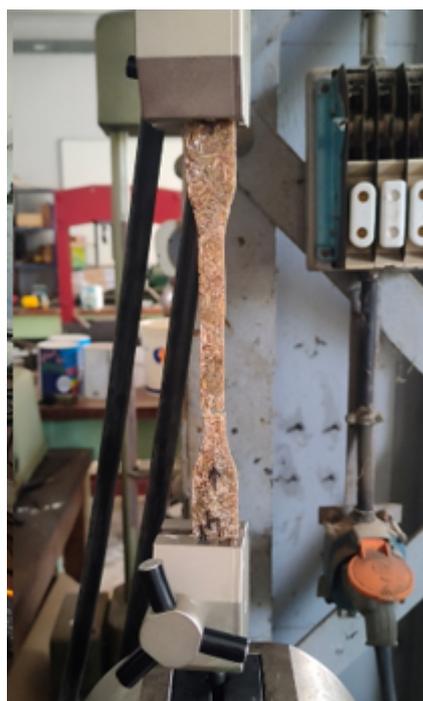


FIGURE 4.21 – Positionnement de l’éprouvette de traction dans la machine d’essai

2. Tests de compression des composites

Les tests de compression sont utilisés pour évaluer la résistance des composites à base de fibres de palmier dattier à la compression. Des échantillons cylindriques ou rectangulaires sont préparés selon des normes spécifiques et fixés dans une machine d’essai universelle équipée de mâchoires de compression. En appliquant une force de compression progressive, on mesure la résistance du matériau et enregistre la relation entre la force appliquée et la déformation, formant ainsi une courbe de compression. Les paramètres clés mesurés sont la résistance à la compression maximale et la déformation à la rupture. Ces tests permettent d’évaluer la résistance à

la compression, la stabilité structurelle et le comportement en termes de déformation des composites, fournissant des données cruciales pour caractériser leurs performances dans des domaines tels que les applications structurales et les emballages, où la compression est une charge critique.



FIGURE 4.22 – Positionnement de l'éprouvette de compression dans la machine d'essai

4.8 Résultats des tests mécaniques

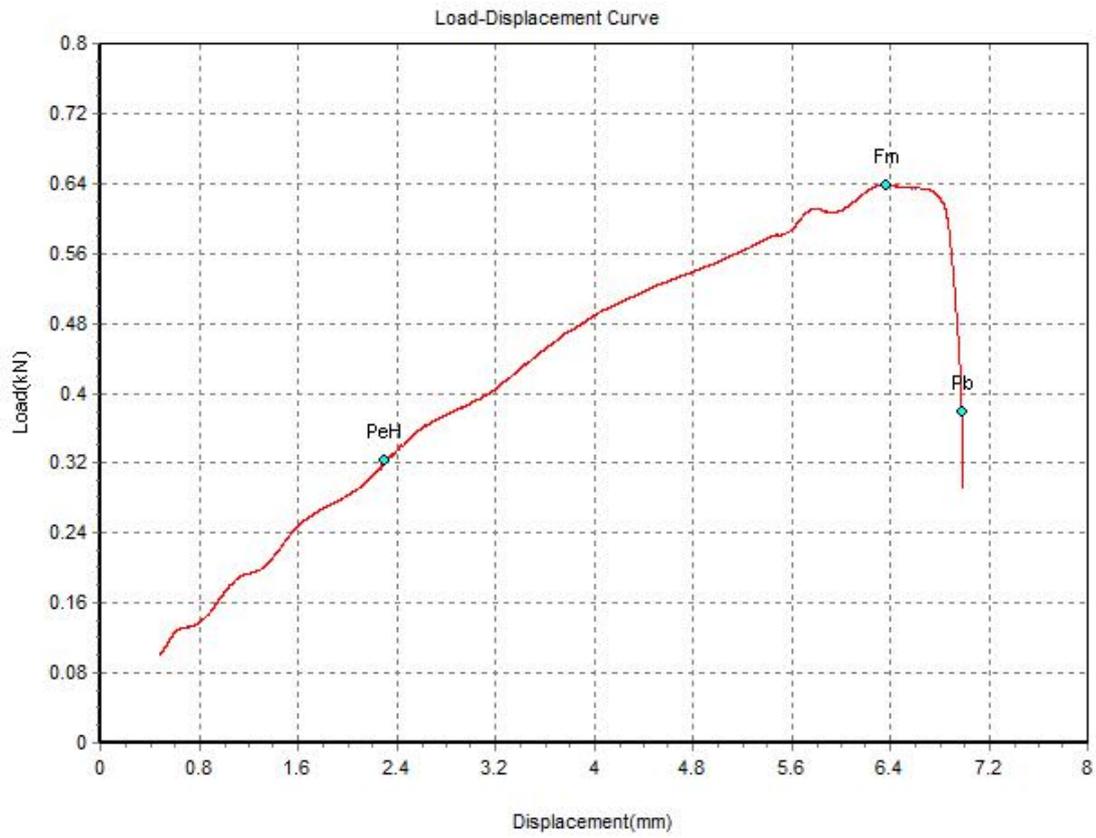


FIGURE 4.23 – Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)

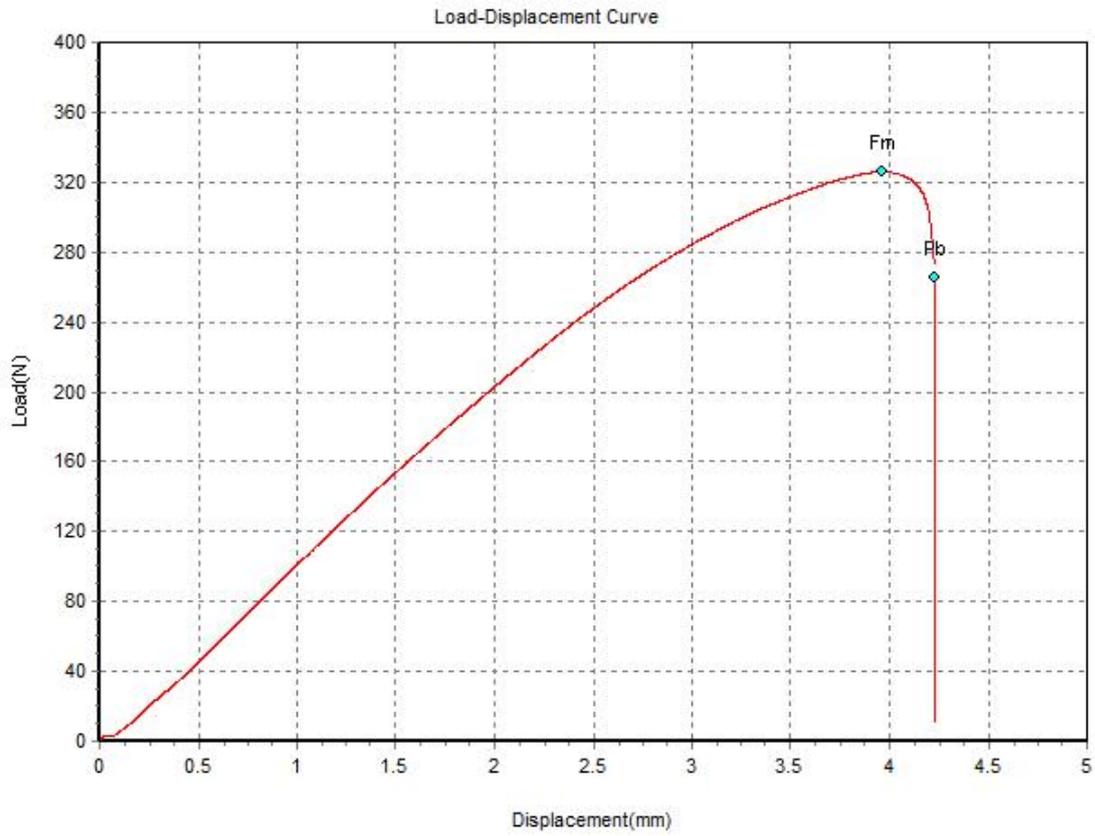


FIGURE 4.24 – Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)

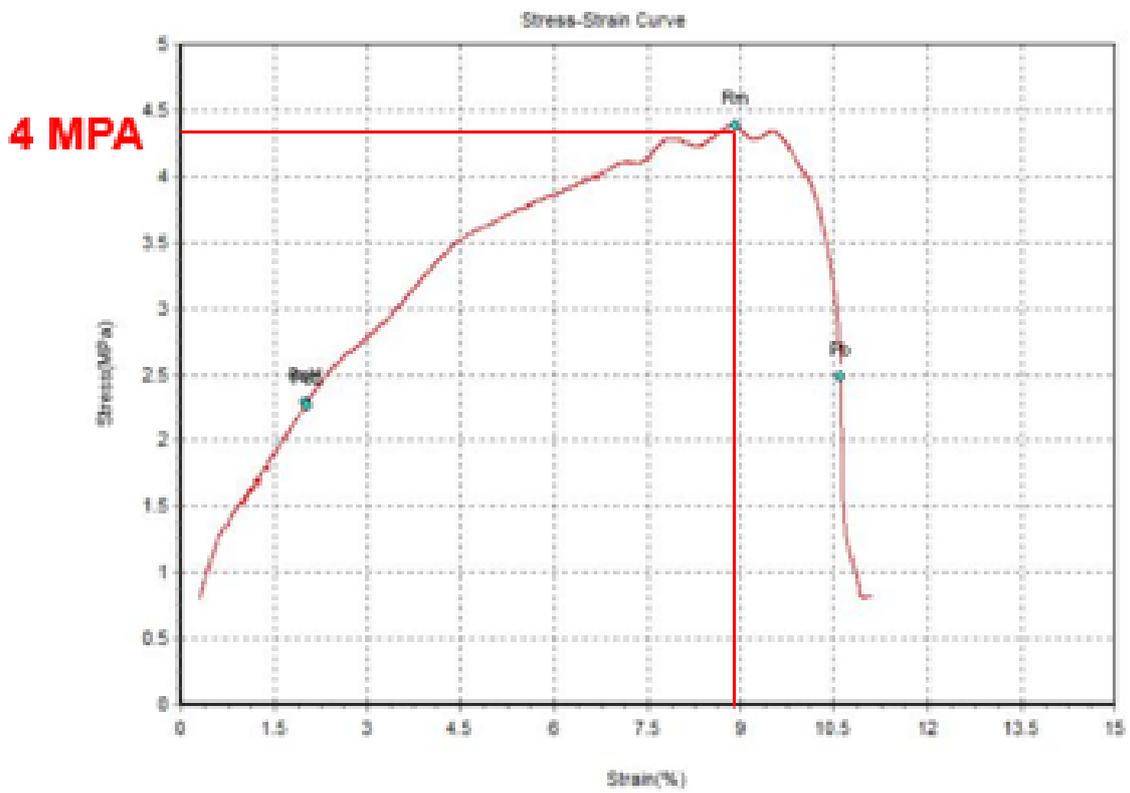


FIGURE 4.25 – Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)

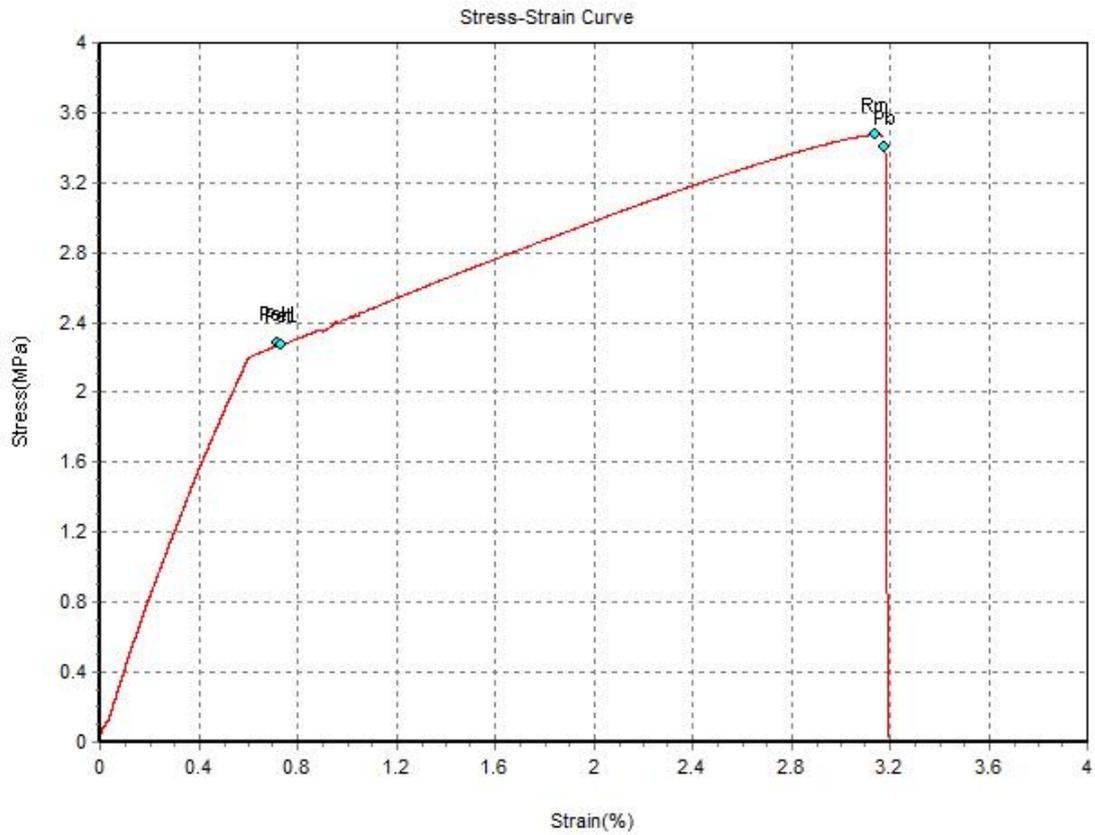


FIGURE 4.26 – Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes des tiges (1)

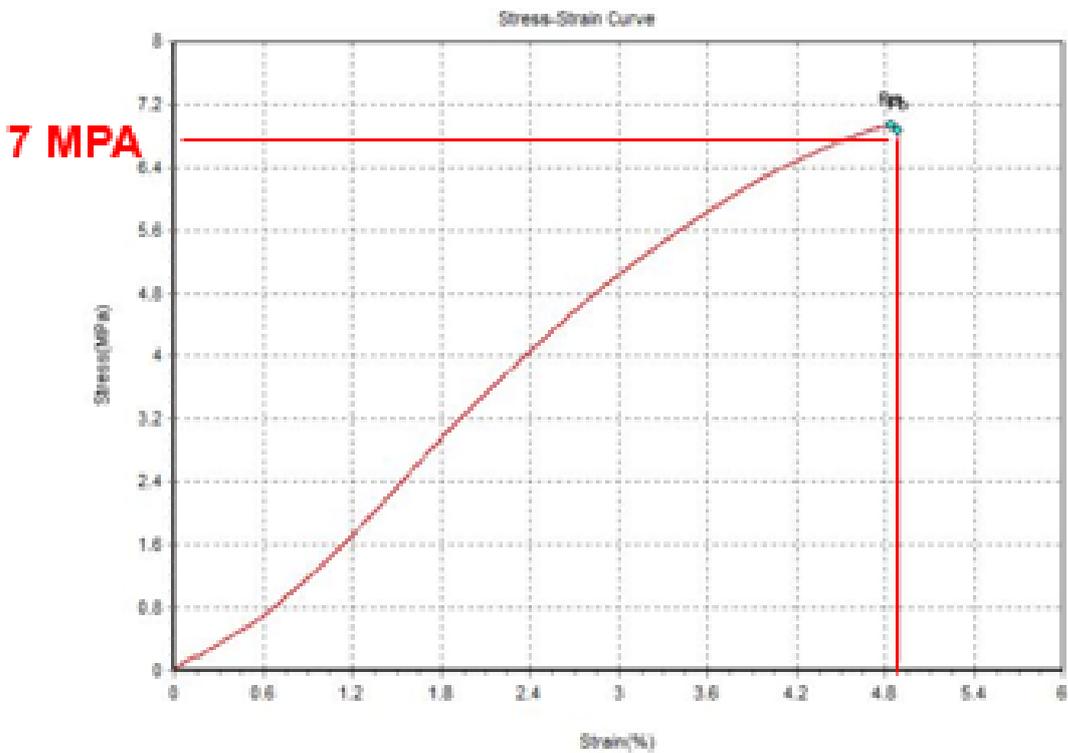


FIGURE 4.27 – Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)

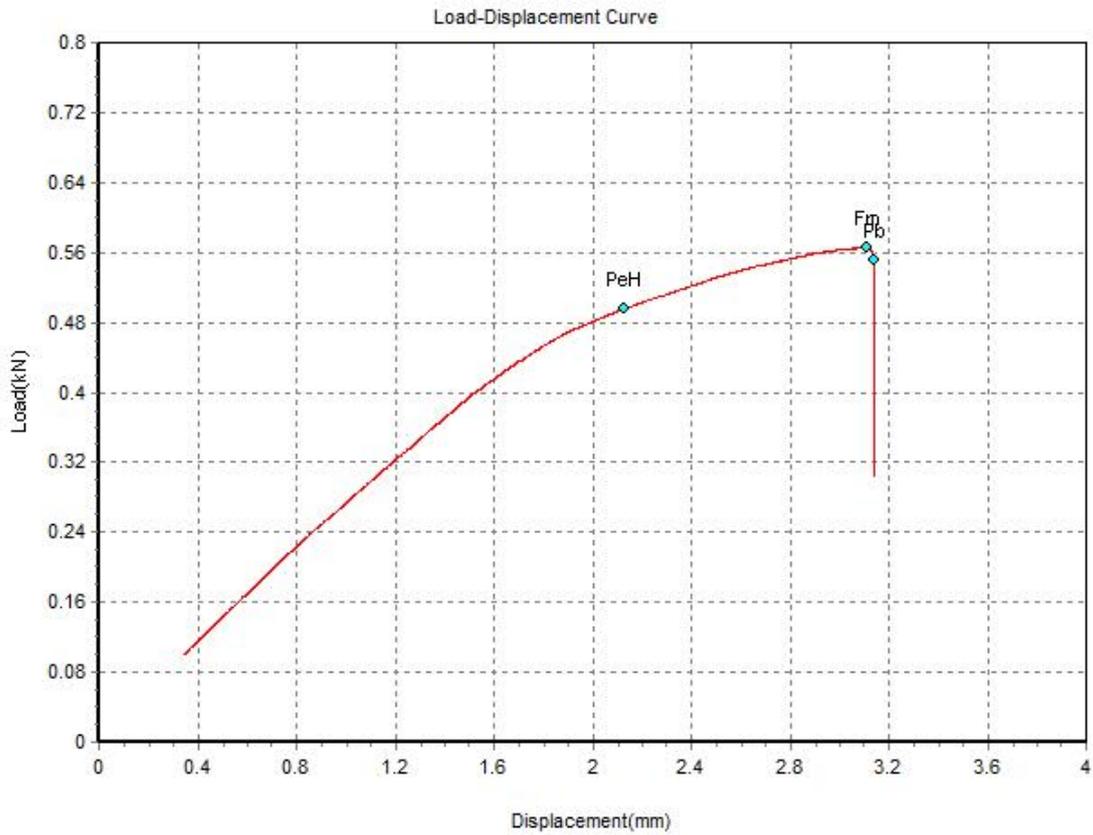


FIGURE 4.28 – Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)

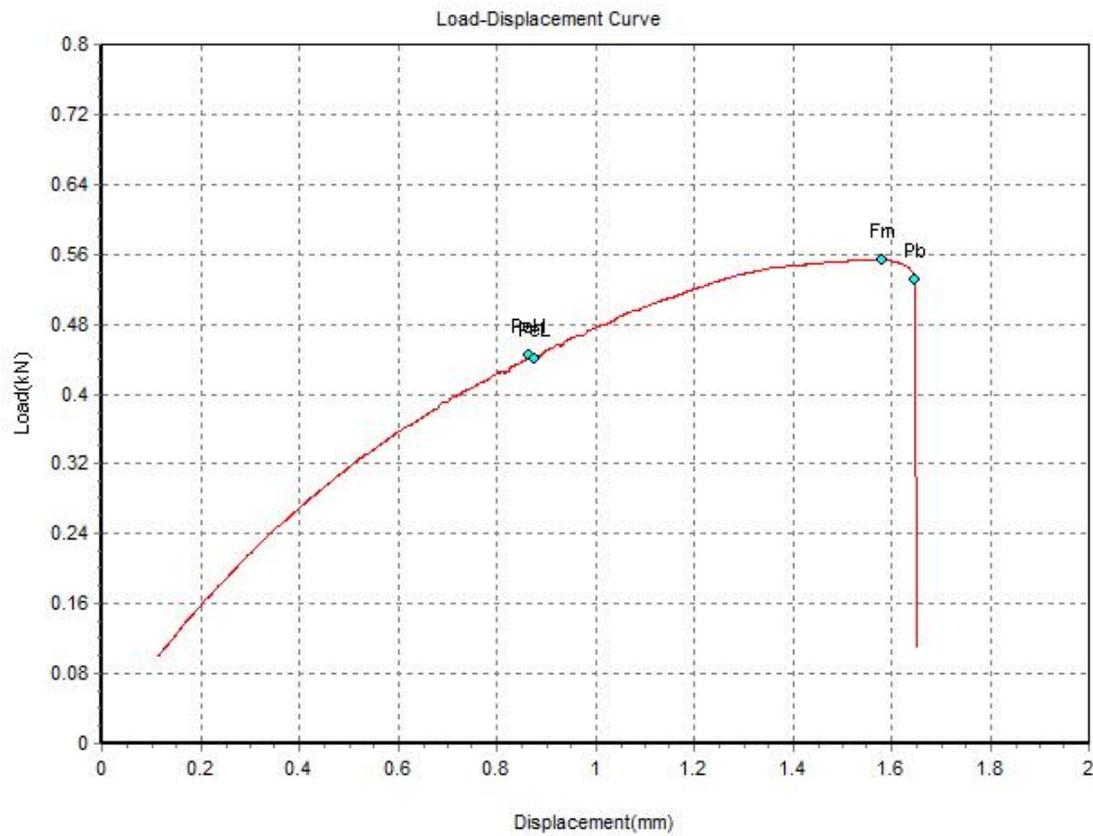


FIGURE 4.29 – Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)

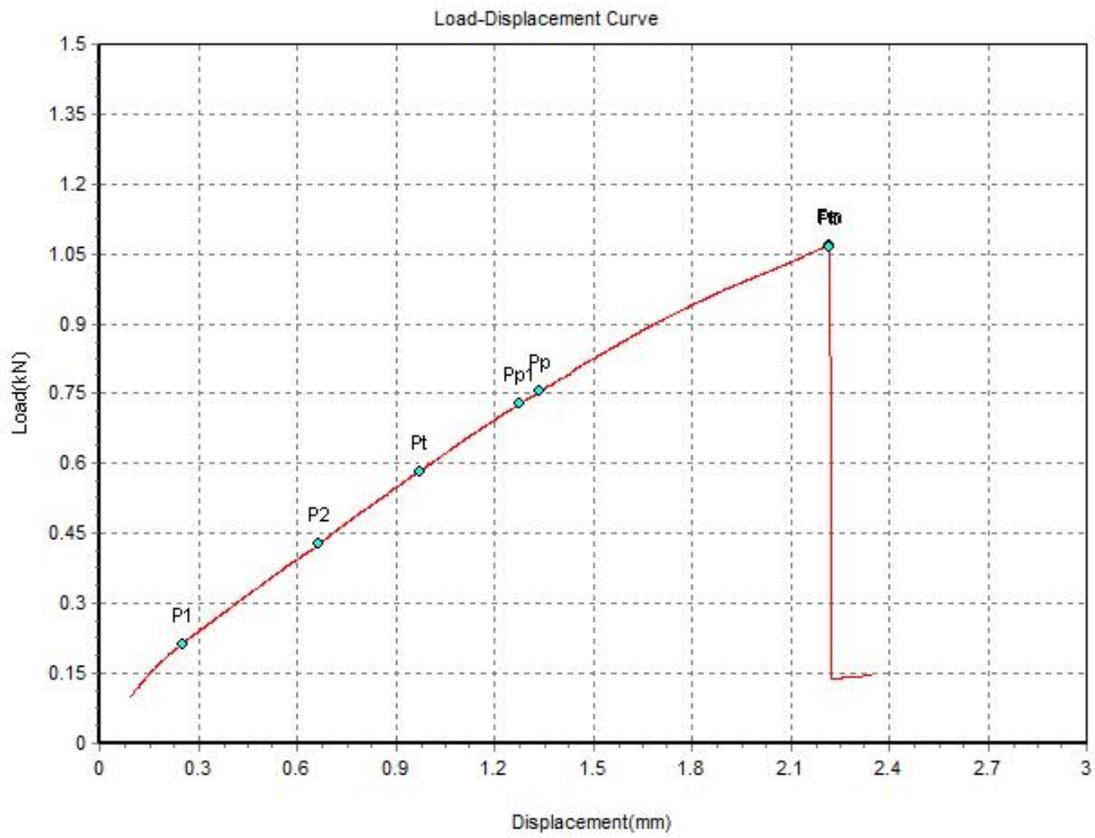


FIGURE 4.30 – Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes du Kornaf (2)

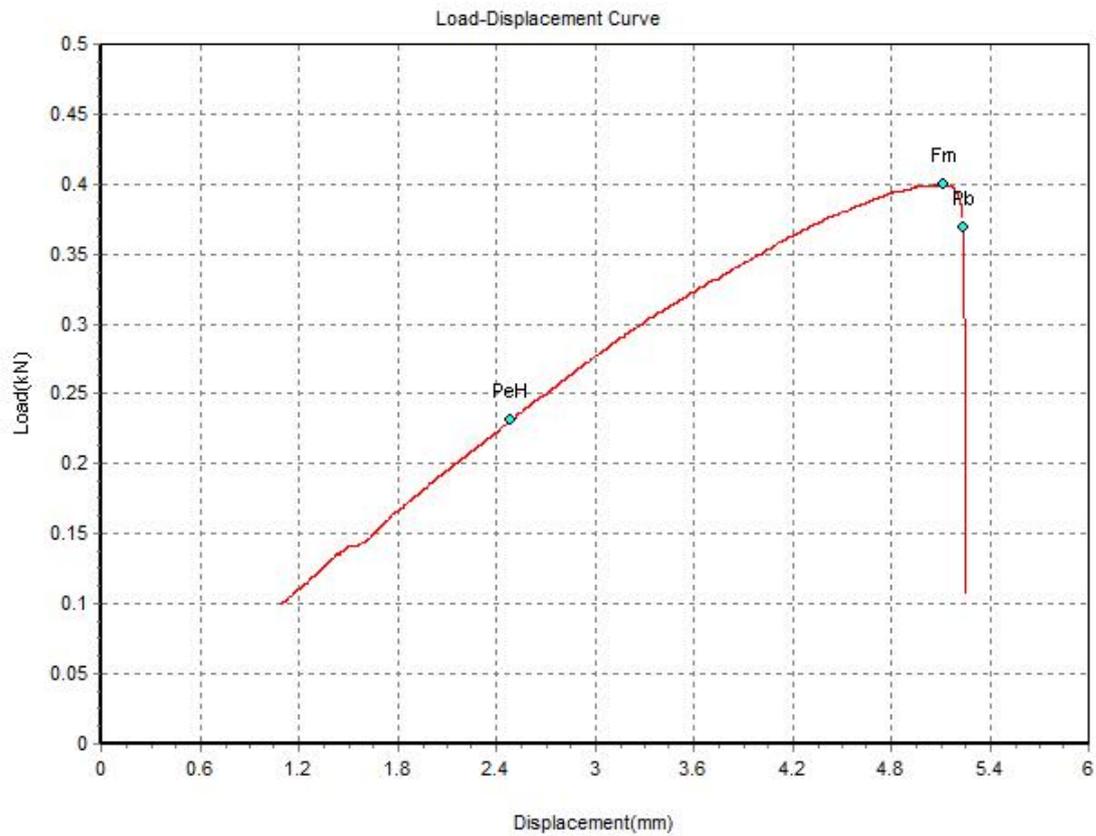


FIGURE 4.31 – Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des feuilles (4)

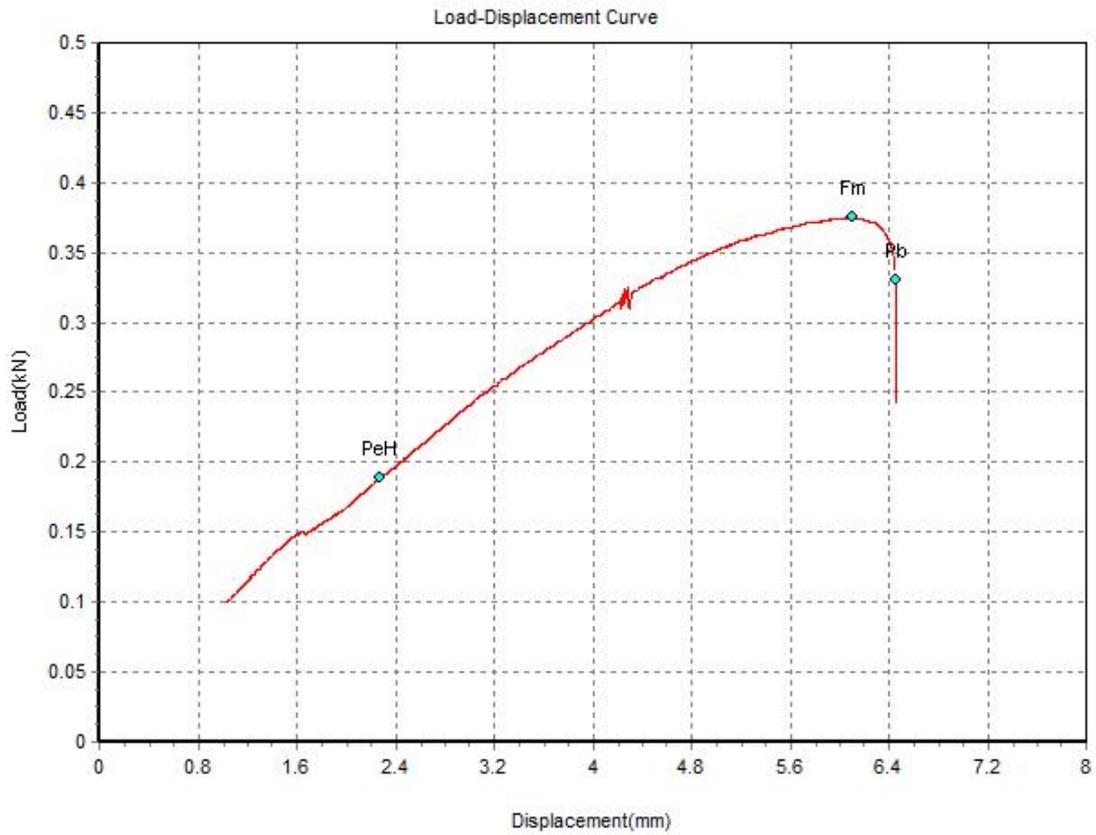


FIGURE 4.32 – Force déplacement des éprouvettes en fibres courtes des feuilles (4)

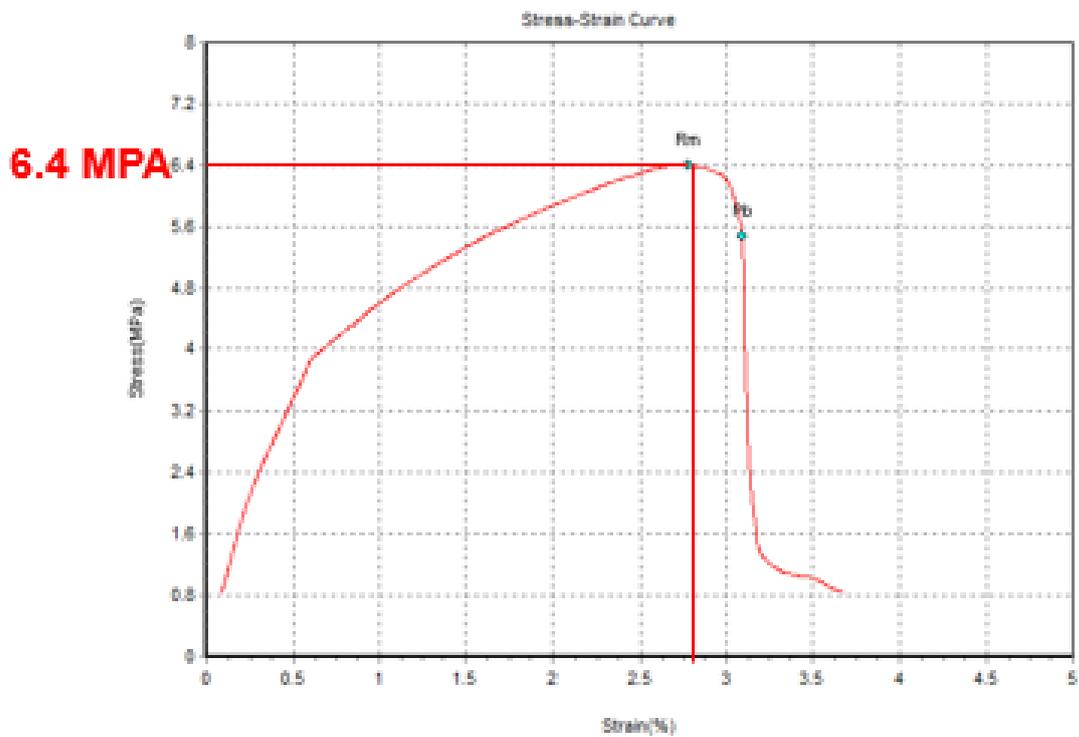


FIGURE 4.33 – Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres courtes des feuilles (4)

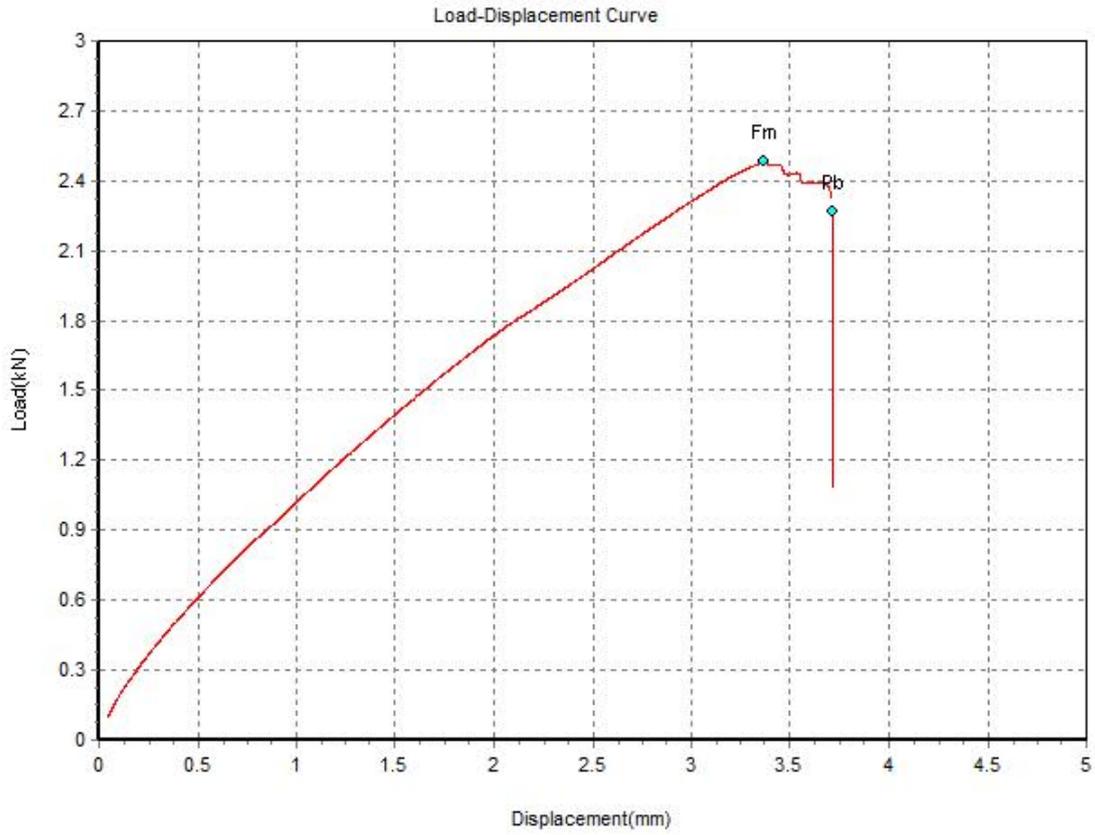


FIGURE 4.34 – Force déplacement des éprouvettes en fibres longues des feuilles (5)

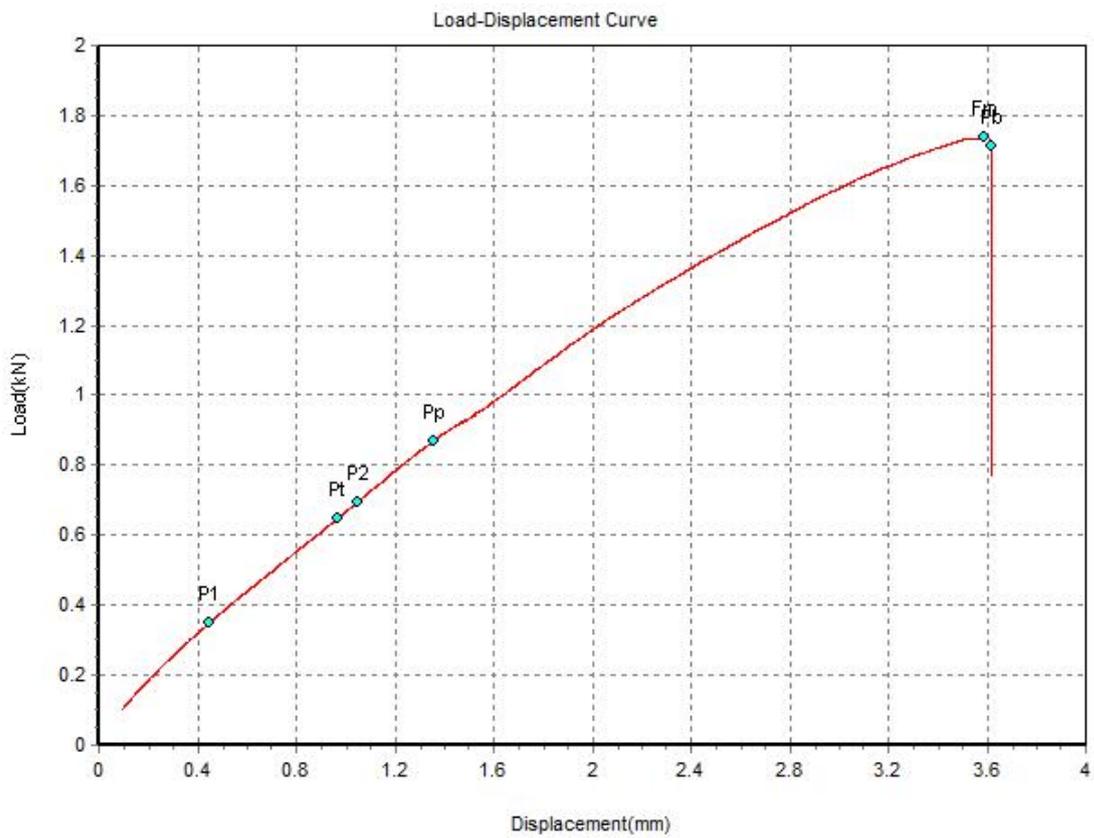


FIGURE 4.35 – Force déplacement des éprouvettes en fibres longues des feuilles (5)

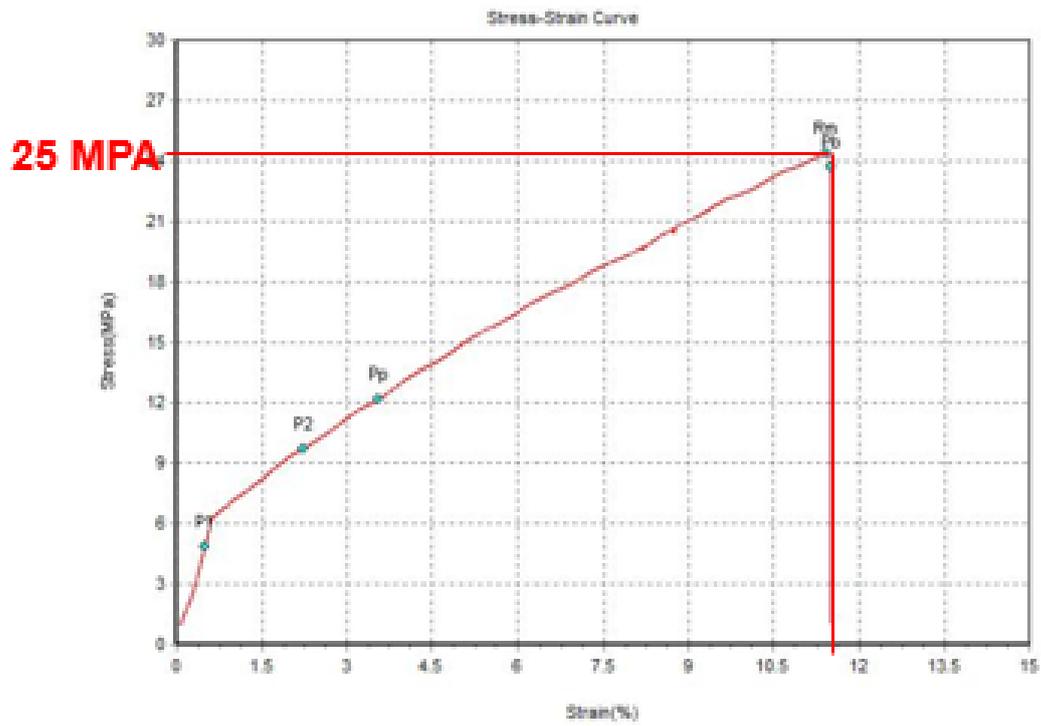


FIGURE 4.36 – Courbe contrainte-déformation des éprouvettes en fibres longues des feuilles (5)

4.9 Discussion des résultats

En analysant les résultats précédents, on peut clairement voir que :

1. Limite de rupture :

Nous remarquons que les éprouvettes en fibres longues (5) ont la limite de rupture la plus importante comparant aux autres compositions étudiées. Pour les composites en fibres longues de feuilles renforcées par une résine époxy (5), cette limite est autour de **25 MPa**. Contrairement aux composites en particule de tiges (1) qui aux alentours de **4 MPa**. Pour les fibres courtes de feuilles (4), elle est située entre **6.4 MPa** alors que pour les particules du Kornaf, elle est autour de **7MPa**.

Ceci peut se justifier par l'apport des fibres longues en traction, il est connu que les fibres ont pour but de supporter les charges qui lui sont été transmises par la matrice. Il résiste beaucoup plus à la traction si les fibres sont alignées dans la direction du chargement et c'est le cas.

Deuxièmement, nous remarquons que les feuilles sont classées deuxième par rapport à la limite à la traction. Des études précédentes ont déjà démontré que les feuilles ont les propriétés mécaniques les plus intéressantes dans le palmier dattier.

4.10 Limitations et améliorations potentielles

Les composites à base de fibres de palmier dattier présentent certaines limitations qu'il convient de prendre en compte. Ces limitations peuvent affecter leur utilisation dans certaines applications spécifiques. Parmi les principales limitations, on peut citer :

1.Faible résistance à l'humidité :

Les fibres de palmier dattier ont une affinité naturelle pour l'eau, ce qui peut entraîner une réduction des propriétés mécaniques des composites en présence d'humidité. Il est donc nécessaire de prendre des mesures appropriées pour améliorer la résistance à l'humidité des composites à base de fibres de palmier dattier.

2.Sensibilité aux variations de température :

Les composites à base de fibres de palmier dattier peuvent présenter une certaine sensibilité aux variations de température, ce qui peut influencer leurs propriétés mécaniques et leur stabilité dimensionnelle. Des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre et améliorer la résistance thermique des composites à base de ces fibres.

3.Limitation de la disponibilité des fibres :

La disponibilité des fibres de palmier dattier peut être limitée dans certaines régions, ce qui peut restreindre leur utilisation à grande échelle. Il est important de développer des stratégies de collecte, de traitement et de production de fibres efficaces pour garantir un approvisionnement adéquat.

Malgré ces limitations, il existe des opportunités d'amélioration pour les composites à base de fibres de palmier dattier. Voici quelques améliorations potentielles à considérer :

1. Traitements de surface des fibres :

L'application de traitements de surface sur les fibres de palmier dattier peut améliorer leur adhérence avec la matrice et renforcer les propriétés mécaniques des composites. Des études sur les techniques de modification de surface peuvent permettre d'améliorer les performances des composites à base de ces fibres.

2. Optimisation des proportions de fibres et de matrices :

Une meilleure compréhension de la relation entre les proportions de fibres de palmier dattier et de matrices peut conduire à une optimisation des propriétés des composites. Il est important de trouver le bon équilibre pour maximiser les performances mécaniques et thermiques des composites.

2. Optimisation des proportions de fibres et de matrices :

Une meilleure compréhension de la relation entre les proportions de fibres de palmier dattier et de matrices peut conduire à une optimisation des propriétés des composites. Il est important de trouver le bon équilibre pour maximiser les performances mécaniques et thermiques des composites.

3. Développement de matrices composites innovantes :

L'utilisation de matrices composites innovantes, telles que des résines biodégradables ou des polymères renforcés de fibres naturelles, peut améliorer les performances et l'impact environnemental des composites à base de fibres de palmier dattier. Le développement de nouvelles matrices compatibles avec les fibres de palmier dattier peut ouvrir de nouvelles opportunités pour leur utilisation.

4. Études sur la durabilité et la recyclabilité :

Des recherches supplémentaires sur la durabilité des composites à base de fibres de palmier dattier, ainsi que sur leur recyclabilité, peuvent contribuer à leur adoption à long terme. L'analyse de leur cycle de vie, y compris l'impact environnemental global, est essentielle pour évaluer leur viabilité à long terme.

En conclusion, bien que les composites à base de fibres de palmier dattier présentent certaines limitations, des améliorations potentielles peuvent être réalisées pour surmonter ces obstacles. Les progrès dans les traitements de surface, l'optimisation des proportions de fibres et de matrices, le développement de matrices composites innovantes et la recherche sur la durabilité et la recyclabilité contribueront à renforcer les performances et l'applicabilité de ces composites.

4.11 Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer en détail les différentes propriétés des fibres de palmier dattier, les types de matrices utilisées dans les composites, les procédés de fabrication des échantillons, ainsi que les tests mécaniques et thermiques effectués pour caractériser ces matériaux.

Les fibres de palmier dattier ont démontré des caractéristiques physiques intéressantes, telles qu'une longueur adaptée, une résistance à la traction et une faible densité. Cependant, certaines limitations ont été identifiées, notamment leur sensibilité à l'humidité et aux variations de température.

Les matrices utilisées dans les composites à base de fibres de palmier dattier peuvent être choisies en fonction des propriétés recherchées, et une attention particulière doit être accordée à la compatibilité entre les fibres et la matrice pour assurer une adhérence et des performances optimales.

Les procédés de fabrication des échantillons ont été décrits, mettant en évidence l'importance de la préparation soignée des matériaux et des techniques appropriées pour obtenir des composites homogènes et de qualité.

Les tests mécaniques, tels que les tests de résistance en traction et de compression, ont permis d'évaluer les performances des composites à base de fibres de palmier dattier. Les résultats ont montré des propriétés mécaniques prometteuses, indiquant le potentiel de ces composites dans diverses applications.

L'analyse comparative avec les composites traditionnels a révélé les avantages et les défis des composites à base de fibres de palmier dattier. Leur légèreté et leur disponibilité renouvelable en font des alternatives attrayantes. Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour améliorer leur résistance à l'humidité, leur stabilité thermique et leur durabilité à long terme.

Chapitre 5

Élaboration des pales pour la réalisation

5.1 Élaboration des pales pour la réalisation

Procédés d'élaboration des pales à partir de matériaux composites à base de fibres de palmier dattier

Plusieurs procédés peuvent être utilisés pour élaborer les pales à partir de matériaux composites à base de fibres de palmier dattier. Ces procédés comprennent notamment :

1. Enroulement filamentaire :

Ce procédé consiste à enrouler les fibres de palmier dattier préalablement imprégnées de résine autour d'un mandrin en suivant un motif prédéfini. Cette méthode permet de contrôler précisément l'orientation et la disposition des fibres, ce qui contribue à renforcer la structure de la pale.

2. Infusion sous vide :

Dans ce procédé, les fibres de palmier dattier sont placées dans un moule et un vide est appliqué pour évacuer l'air. Ensuite, la résine est injectée dans le moule, ce qui permet une imprégnation uniforme des fibres. Une fois la résine durcie, la pale est démoulée.

3. Moulage par compression :

Ce procédé implique l'utilisation d'un moule fermé dans lequel les fibres de palmier dattier sont placées. Ensuite, la résine est injectée dans le moule, suivi d'une application de pression pour assurer une distribution uniforme de la résine et une consolidation des fibres. La pale est ensuite démoulée après durcissement.

4. Pultrusion :

La pultrusion est un procédé continu dans lequel les fibres de palmier dattier sont imprégnées de résine et ensuite tirées à travers une filière chauffée. Ce processus permet d'obtenir des pales avec une orientation des fibres précise et une résistance mécanique élevée.

Il est essentiel de sélectionner le procédé d'élaboration approprié en fonction des spécifications techniques requises pour les pales, ainsi que des ressources disponibles. De plus, des études approfondies sur les propriétés des matériaux composites à base de fibres de palmier dattier et sur la performance des pales doivent être menées pour garantir la fiabilité et la durabilité des structures éoliennes.

5.1.1 Les processus de fabrication des pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort de fibres de palmier dattier

La fabrication des pales est un processus complexe qui nécessite une planification minutieuse, des compétences techniques et l'utilisation de diverses techniques et outils spécialisés.

Dans le processus de fabrication des pales d'éoliennes domestiques, deux types de pales sont réalisés : la première utilise des matériaux composites renforcés de fibres de palmier dattier, tandis que la deuxième utilise un renfort hybride combinant des fibres de palmier dattier et du tissu de fibre de verre (roving). Les étapes de fabrication se répètent pour chaque pale, avec quelques différences selon le renfort utilisé.

Nous allons maintenant commencer à détailler les processus de fabrication de la première pale, qui utilise des matériaux composites renforcés de fibres de palmier dattier :

1.Préparation de moule :

Avant d'entamer le processus de fabrication des pièces, une préparation minutieuse du moule est nécessaire. La préparation du moule comprend plusieurs étapes essentielles visant à garantir la qualité et la fiabilité des pièces produites. Ces étapes comprennent l'assemblage des différentes parties du moule, le masticage des séparations, le ponçage pour obtenir une surface lisse, le nettoyage approfondi et le séchage du moule, ainsi que l'application des couches la pâte démoulant. Chaque étape est réalisée avec précision et soin, assurant ainsi la préparation optimale du moule pour la fabrication des pièces désirées.

Étape 1 : Assemblage des huit parties du moule

Les différentes parties du moule, à la fois l'extrados (partie extérieure) et l'intrados (partie intérieure), sont assemblées en utilisant des liaisons entre elles. Cela garantit la solidité et la stabilité du moule lors du processus de fabrication.



FIGURE 5.1 – Assemblage des huit parties du moule : Préparation essentielle pour la fabrication précise des pièces.

Étape 2 : Masticage des séparations

Une fois les parties du moule assemblées, il est important de masticage les séparations entre ces parties. Pour éviter tout dépassement de mastic, des limites sont créées à l'aide de papier coulant. Ces limites assurent que le mastic est appliqué de manière précise et contrôlée.

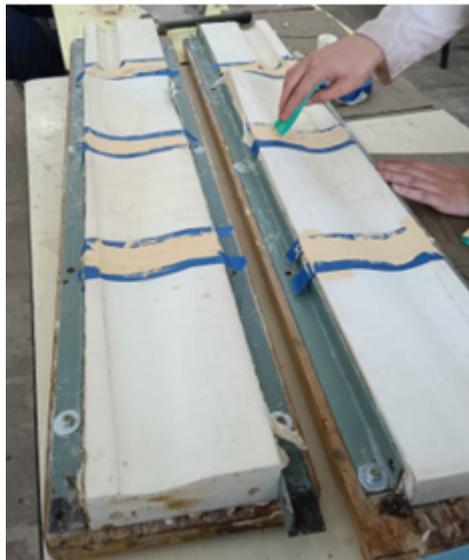


FIGURE 5.2 – Masticage des séparations

Étape 3 : Ponçage du moule

Après le masticage, l'étape de ponçage est essentielle pour obtenir une surface lisse et uniforme du moule. On utilise du papier verre de différents numéros, généralement en commençant par un numéro plus bas comme 60 et en progressant vers des numéros plus élevés comme 1500. À chaque session de ponçage, il est recommandé de suivre une démarche de ponçage minutieuse, en accordant entre 5 et 10 minutes à chaque partie du moule pour obtenir un résultat optimal.

Étape 4 : Nettoyage et séchage

Une fois que le moule est prêt et a été poncé de manière adéquate, il est important de le nettoyer soigneusement pour éliminer toute poussière ou résidu de ponçage. Le nettoyage peut être effectué en utilisant de l'eau et un compresseur d'air pour assurer un séchage complet du moule.

Étape 5 : Application de la pâte démoulant

Une fois que le moule est sec, on passe à l'application de la pâte démoulant. Cette pâte permet de faciliter le démoulage ultérieur des pièces fabriquées. Ensuite, la résine est appliquée en plusieurs couches successives. Généralement, 12 couches de résine sont appliquées, avec un temps de séchage de 2 heures entre chaque couche. Cette étape assure la solidité et la durabilité du moule, prêt à être utilisé dans le processus de fabrication souhaité.



FIGURE 5.3 – Application de la pâte démoulant

2.Préparation de système de fixation :

L'étape suivante est le système de fixation. Une fois que nous avons les deux parties de l'extrados et de l'intrados des moules, nous les plaçons dans le système de fixation. Nous fixons fermement les deux parties ensemble en utilisant un bouchon à une extrémité du système, puis nous le fermons hermétiquement. Ensuite, nous positionnons le système de fixation de manière verticale, prêt pour l'injection par gravité. Cette configuration garantit que le moule est solidement fixé et prêt à recevoir l'injection du matériau composite, assurant ainsi une répartition uniforme et précise de la résine époxy et des particules tiges dans tout le moule.



FIGURE 5.4 – Système de fixation



FIGURE 5.5 – Position verticale du système de fixation pour l'injection par gravité

3. Préparation des matériaux composites et de la résine :

La préparation des matériaux composites une étape essentielle consiste à fabriquer les pales à partir de particules de tiges. Pour ce faire, les particules de tiges sont obtenues à partir de méthodes d'extraction, de broyage, de tamisage et de stockage appropriées. Les particules obtenues sont ensuite pesées avec précision à l'aide d'une balance, et des gobelets de 47 g sont préparés. Ainsi, pour chaque pale, 470 g de particules de tiges sont nécessaires, réparties dans 10 gobelets. Cette préparation minutieuse des matériaux composites constitue une étape cruciale pour garantir la qualité et les propriétés des pales utilisées dans le processus de fabrication.

Dans l'étape "Préparation de la résine", nous nous concentrons sur la préparation de la résine époxy utilisée dans le processus de fabrication. Pour ce faire, nous préparons des gobelets de résine A et de durcisseur (résine B) avec précision. Nous utilisons des gobelets de 90 g pour la résine A et de 45 g pour la résine B, avec un total de 11 gobelets utilisés. Cela nous donne une masse totale de résine de 1485 g (990 g de résine A et 495 g de résine B). Cette étape de préparation méticuleuse de la résine époxy est essentielle pour assurer les bonnes proportions et la qualité du mélange, garantissant ainsi des propriétés optimales du matériau composite lors de la fabrication des pales.



FIGURE 5.6 – Préparation des matériaux composites et de la résine.

4. Préparation du mélange composite-résine :

Dans cette étape cruciale, nous mélangeons soigneusement la résine époxy A et B, préparée préalablement lors de l'étape de préparation de la résine. Le mélange doit être effectué de manière minutieuse afin d'éliminer les éventuelles bulles d'air présentes. Ensuite, nous ajoutons progressivement les particules tiges, goutte par goutte, en veillant à bien les incorporer dans le mélange. Tout au long de ce processus, nous continuons à mélanger jusqu'à obtenir un mélange homogène et final. Nous laissons ensuite reposer le mélange pendant quelques instants afin de permettre la libération des éventuelles bulles d'air et de déclencher la réaction chimique. Au toucher, nous pouvons constater une augmentation de la température de la solution, ce qui indique que notre solution est prête à être injectée dans le moule.



FIGURE 5.7 – Injection de la résine A : Remplissage initial avec la résine époxy A.

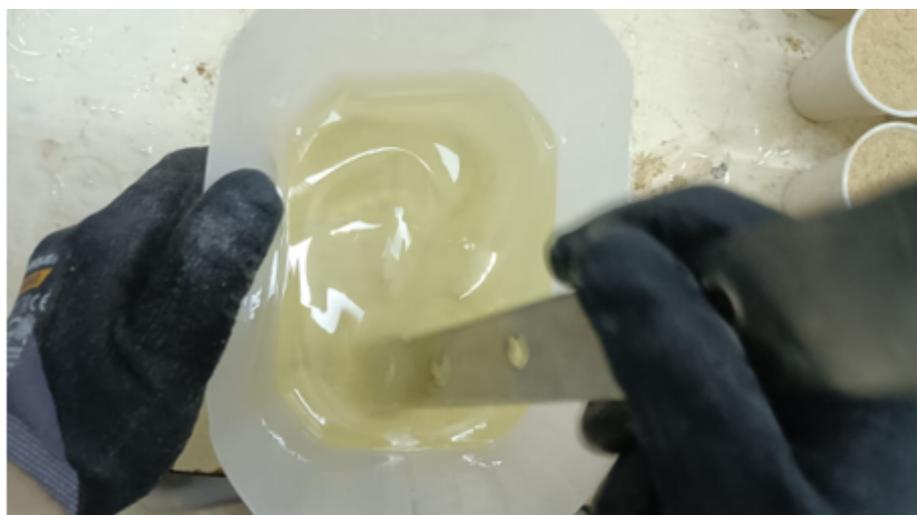


FIGURE 5.8 – Mélange des résines A et B : Combinaison des résines époxy A et B.



FIGURE 5.9 – Ajout des particules tiges : Intégration des particules tiges dans le mélange de résine époxy.

5.Injection de la solution dans le moule :

Dans cette étape cruciale, la solution préparée est injectée dans le moule, assurant ainsi le remplissage complet du profil. Une tige est utilisée pour guider la solution le long de tout le profil, permettant de vérifier que la solution circule de manière fluide et uniforme. Pour garantir une répartition homogène, un Marteau à dalles est utilisé pour frapper légèrement le système de fixation, favorisant ainsi la prise et la répartition homogène de la solution sur toute la surface du moule. Cette technique permet d'éliminer les éventuels vides et d'assurer une qualité optimale de la pièce fabriquée.



FIGURE 5.10 – Le moule avant l'injection de la solution préparée.



FIGURE 5.11 – Le moule après l'injection du mélange préparé

6. Le démoulage de la pale :

Dans cette étape cruciale du processus, on procède au démoulage de la pale. Tout d'abord, on ouvre le système de fixation à l'aide d'un cutter, permettant ainsi de libérer le moule. Ensuite, en passant délicatement le cutter le long de la hauteur du moule, on parvient à dégager la résine collée entre les deux parties, l'extrados et l'intrados du moule. Une fois les parties séparées, on tire la pale avec précaution, obtenant ainsi la pièce finale prête à être utilisée dans

le cadre de l'éolienne domestique.

Cette étape demande précision et attention pour éviter d'endommager la pale et assurer son intégrité structurelle.



FIGURE 5.12 – Le démoulage de la pale : libérer la pièce finale.

7.Finition de la pale :

Dans l'étape finale de la fabrication de la pale, appelée la finition, nous apportons les touches finales pour parfaire le produit. Nous commençons par le ponçage, en utilisant différents grains de papier abrasif pour lisser la surface et éliminer les défauts. Ensuite, nous appliquons du mastic pour combler les imperfections et réaliser les ajustements nécessaires. Un dernier ponçage est effectué pour obtenir une surface lisse et uniforme. Ensuite, nous appliquons plusieurs couches de résine pour renforcer la pale et lui donner la résistance requise. Chaque couche est appliquée avec soin, en laissant suffisamment de temps pour le durcissement entre les couches. Cette étape de finition garantit que la pale est prête à faire face aux conditions réelles et à contribuer efficacement à la production d'énergie éolienne.



FIGURE 5.13 – Finition de la pale : l'ultime étape pour la perfection.

5.1.2 Les processus de fabrication des Pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort hybride : fibres de palmier dattier et fibre de verre tissé (roving)

La fabrication des Pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort hybride, combinant des fibres de palmier dattier et des fibres de verre tissé (roving), suit initialement les mêmes étapes que la fabrication des pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort de fibres de palmier dattier. Cela comprend la préparation du moule, l'assemblage des parties du moule, le masticage, le ponçage et l'application de la résine. Cependant, une fois ces étapes initiales terminées, nous passons à la suite du processus spécifique à la fabrication des pales hybrides.

On va passer maintenant à détailler les processus de fabrication de la pale, qui utilise des matériaux composites à renfort hybride : fibres de palmier dattier et fibre de verre tissé (roving) :

1. Applications du tissu de roving (pour les pales hybride) :

Dans cette étape d'application du tissu de roving, nous avons soigneusement positionné le tissu sur les parties de l'extrados et de l'intrados du moule. Ensuite, nous avons tiré des longues mèches de fibre de verre à partir d'un autre tissu et les avons imprégnées de résine. Ces mèches ont été placées en forme de U pour renforcer les pales. Cette technique de renforcement avec le tissu de roving permet d'obtenir une distribution uniforme des fibres de verre dans la résine, ce qui améliore la résistance et la durabilité des pales hybrides. Cela garantit également une performance optimale lorsqu'elles sont utilisées dans des applications industrielles exigeantes et contribue à la production d'énergie renouvelable de manière efficace.



FIGURE 5.14 – Application précise du tissu de roving sur les parties extrados et intrados



FIGURE 5.15 – Renforcement de la structure avec le tissu de roving et les mâches

Maintenant les parties de Préparation de système de fixation, Préparation des matériaux composites et de la résine, Préparation du mélange composite-résine sont identiques à celles utilisées dans la fabrication des pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort de fibres de palmier dattier. Les procédures restent les mêmes, du choix des matériaux composites à la préparation du mélange composite-résine. L'objectif est d'obtenir un mélange homogène et sans bulles d'air pour assurer la solidité et la durabilité de la pale hybride. Ainsi, ces étapes déjà maîtrisées dans le processus précédent peuvent être appliquées de la même manière pour garantir une préparation optimale des matériaux et de la résine, ainsi qu'un

mélange composite-résine de qualité pour la fabrication des pales hybrides.

2. Le démoulage de la pale :

Dans cette étape cruciale du processus, on procède au démoulage de la pale. Tout d'abord, on ouvre le système de fixation à l'aide d'un cutter, permettant ainsi de libérer le moule. Ensuite, en passant délicatement le cutter le long de la hauteur du moule, on parvient à dégager la résine collée entre les deux parties, l'extrados et l'intrados du moule. Une fois les parties séparées, on tire la pale avec précaution, obtenant ainsi la pièce finale prête à être utilisée dans le cadre de l'éolienne domestique. Cette étape demande précision et attention pour éviter d'endommager la pale et assurer son intégrité structurelle.



FIGURE 5.16 – Le démoulage de la pale : libérer la pièce finale

3. Finition de la pale :

Dans la partie finale de la fabrication des pales d'éolienne domestique en matériaux composites à renfort hybride, on procède à la finition de la pale. Pour commencer, on utilise une machine de sculpture et de polissage, telle que la marque Louxor LX134MO, pour couper les parties du roving qui ne sont pas nécessaires. Ensuite, on applique du mastic sur les zones présentant de petites imperfections, afin d'obtenir une surface lisse et uniforme. Par la suite, on effectue un ponçage final pour affiner la forme de la pale. Ce processus de ponçage est suivi de l'application de plusieurs couches de résine, avec des phases de ponçage intermédiaires entre chaque couche. Cette approche permet d'obtenir un produit final de haute qualité, avec une surface parfaitement finie et prête à être utilisée dans la construction d'éoliennes domestiques.



FIGURE 5.17 – Utilisation de la machine de sculpture et de polissage pour ajuster les pales hybrides



FIGURE 5.18 – La pale hybride parfaitement finie : combinaison de force et d'élégance

5.1.3 Conclusion

En conclusion, le processus d'élaboration des pales à partir de matériaux composites à base de fibres de palmier dattier est une étape cruciale dans la réalisation d'éoliennes durables et performantes. À travers une combinaison de conception précise, de sélection de matériaux adéquats et de techniques de fabrication avancées, il est possible de produire des pales qui offrent une résistance mécanique élevée, une légèreté, une stabilité dimensionnelle et une résistance aux intempéries.

L'utilisation des fibres de palmier dattier comme renfort dans les composites offre une alternative prometteuse aux matériaux traditionnels, en raison de leur disponibilité, de leur durabilité et de leur faible impact environnemental. Les pales fabriquées à partir de ces matériaux composites présentent également d'excellentes performances mécaniques, ce qui contribue à l'efficacité globale des éoliennes.

Cependant, il est important de noter que l'élaboration des pales à partir de ces matériaux composites nécessite une expertise approfondie, des équipements spécialisés et une maîtrise des procédés de fabrication. Des études supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les méthodes de fabrication, améliorer la résistance aux contraintes environnementales et réduire les coûts de production.

En outre, la réalisation de pales éoliennes en matériaux composites à base de fibres de palmier dattier contribue à la promotion du développement durable en utilisant des ressources naturelles renouvelables et en réduisant les émissions de carbone. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour l'industrie éolienne en favorisant une transition vers de propres énergies renouvelables.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, ce projet de fin d'études a été axé sur la valorisation des fibres de palmier dattier dans la fabrication de matériaux composites pour des applications spécifiques telles que les pales d'éoliennes. À travers une approche méthodique et rigoureuse, différentes étapes ont été entreprises pour atteindre les objectifs fixés.

Tout d'abord, une étude approfondie des propriétés des fibres de palmier dattier a été réalisée, mettant en évidence leurs caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. Cela a permis de mieux comprendre le potentiel de ces fibres en tant que renfort dans les composites.

Ensuite, une analyse des matrices de composites a été effectuée, en examinant les différents types de matrices utilisées dans les composites à base de fibres naturelles. Les propriétés des matrices ont été étudiées pour garantir une compatibilité optimale avec les fibres de palmier dattier.

La conception et la réalisation des moules ont également joué un rôle crucial dans ce projet. L'utilisation de technologies telles que l'impression 3D et la commande numérique a permis de produire des moules précis et adaptés aux différentes pièces à fabriquer, que ce soit les pales d'éoliennes ou les éprouvettes pour les tests.

Les étapes de fabrication des pales ont été soigneusement planifiées et mises en œuvre, en tenant compte des caractéristiques des matériaux composites utilisés. Des techniques de fabrication avancées ont été utilisées pour assurer la qualité, la résistance et la durabilité des pales finales.

La caractérisation des matériaux composites a joué un rôle essentiel dans l'évaluation des performances des pales et des éprouvettes. Des tests mécaniques, thermiques et morphologiques ont été réalisés pour analyser les propriétés et les comportements des composites à base de fibres de palmier dattier.

Enfin, une conclusion globale a été formulée, mettant en évidence les résultats obtenus, les enseignements tirés et les perspectives d'amélioration. Ce projet a démontré que les fibres de palmier dattier peuvent être valorisées avec succès dans la fabrication de matériaux composites durables et performants.

Le travail réalisé dans ce projet de fin d'études ouvre des perspectives intéressantes pour l'industrie éolienne et la recherche en matériaux composites. Il offre des alternatives écologiques et durables pour la production d'énergies renouvelables, tout en valorisant les ressources naturelles locales.

Il met en évidence l'importance de poursuivre l'exploration de nouvelles voies afin d'optimiser les processus de fabrication, d'améliorer les performances des composites et de réduire l'impact environnemental de l'industrie.

En résumé, ce projet de fin d'études a permis d'approfondir les connaissances sur l'utilisation des fibres de palmier dattier dans les composites, de développer des méthodologies de fabrication adaptées et de mettre en évidence les avantages et les limites de ces matériaux. Il constitue une contribution significative dans le domaine de la recherche sur les matériaux composites et offre des perspectives prometteuses pour l'industrie éolienne et le développement durable.

Récapitulation des résultats

L'étape finale de ce projet consiste à récapituler les résultats obtenus à travers les différentes phases de recherche et de développement. Les résultats obtenus fournissent une vue d'ensemble des performances et des caractéristiques des matériaux composites à base de fibres de palmier dattier, ainsi que des pales élaborées à partir de ces matériaux. Voici les principales conclusions tirées de cette étude :

1. Propriétés des fibres de palmier dattier : Les fibres de palmier dattier présentent des caractéristiques physiques intéressantes, telles qu'une bonne résistance mécanique, une faible densité et une grande disponibilité. Leur composition chimique et leur structure microscopique ont été analysées, ce qui a permis de mieux comprendre leurs propriétés et leur potentiel d'utilisation dans les composites.

2. Matrices de composites : Différents types de matrices ont été étudiés pour leur compatibilité avec les fibres de palmier dattier. Des matrices polymériques, telles que les résines époxy et les composites thermoplastiques, ont été utilisées avec succès pour former des composites résistants et durables.

3. Fabrication des échantillons et des pales : Des procédés de fabrication avancés, tels que l'impression 3D et l'usinage à commande numérique, ont été utilisés pour produire les échantillons de composites et les pales d'éoliennes. Les moules spécifiques ont été conçus et réalisés pour garantir la forme et les dimensions précises des pièces finales.

4. Caractérisation des composites : Les composites à base de fibres de palmier dattier ont été soumis à des tests mécaniques, thermiques et morphologiques. Les résultats ont démontré des propriétés mécaniques satisfaisantes, telles qu'une bonne résistance à la traction, à la flexion et à la compression. Les analyses thermiques ont montré une stabilité thermique élevée, tandis que les observations morphologiques ont révélé une bonne adhésion entre les fibres et la matrice.

En résumé, les résultats obtenus tout au long de ce projet de recherche ont confirmé le potentiel des fibres de palmier dattier dans la fabrication de composites performants. Les propriétés mécaniques, thermiques et morphologiques des composites ont été évaluées et ont révélé des performances satisfaisantes.

Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation des fibres de palmier dattier dans d'autres applications, notamment dans le domaine de la construction, de l'automobile et de l'aérospatiale. Des efforts supplémentaires de recherche et de développement sont nécessaires pour optimiser davantage les propriétés des composites à base de fibres de palmier dattier et les adapter à des applications spécifiques.

Ce projet de fin d'études a permis d'approfondir les connaissances sur les matériaux composites à base de fibres naturelles et de contribuer à l'avancement des techniques de fabrication et de caractérisation. Les résultats obtenus constituent une base solide pour des études futures et des applications industrielles des composites à base de fibres de palmier dattier, offrant ainsi des solutions durables et respectueuses de l'environnement.

Contributions de l'étude

Cette étude a apporté plusieurs contributions significatives dans le domaine de l'élaboration des matériaux composites à base de fibres de palmier dattier et de la conception des pales d'éoliennes. Voici les principales contributions de cette étude :

1. Connaissance approfondie des fibres de palmier dattier : Cette étude a permis d'approfondir notre compréhension des propriétés physiques, mécaniques et chimiques des fibres de palmier dattier. Les caractéristiques des fibres ont été analysées en détail, ce qui a contribué à identifier leur potentiel d'utilisation dans les composites et à mieux comprendre leur comportement.

2. Développement de composites performants : En combinant les fibres de palmier dattier avec des matrices appropriées, cette étude a abouti à la fabrication de composites performants. Les propriétés mécaniques des composites ont été évaluées, montrant ainsi leur résistance, leur stabilité et leur adhésion. Ces résultats ont ouvert de nouvelles perspectives pour le développement de composites durables et respectueux de l'environnement.

3. Conception de moules innovants : L'étude a également contribué à la conception et à la réalisation de moules innovants, tels que des moules en impression 3D et des moules en composites. Ces moules ont permis une fabrication précise et reproductible des échantillons et des pales, offrant ainsi une meilleure maîtrise du processus de fabrication.

4. Élaboration de pales d'éoliennes efficaces : Les pales d'éoliennes élaborées à partir des composites à base de fibres de palmier dattier ont démontré des performances prometteuses. Cela ouvre la voie à l'utilisation de ces matériaux dans l'industrie éolienne, contribuant ainsi au développement de sources d'énergie renouvelable et durable.

5. Perspectives pour des applications diverses : Les résultats de cette étude ouvrent de nombreuses perspectives pour l'utilisation des composites à base de fibres de palmier dattier dans d'autres secteurs, tels que la construction, l'automobile et l'aérospatiale. Ces composites offrent des avantages en termes de légèreté, de résistance et de durabilité, ce qui en fait une alternative intéressante aux matériaux traditionnels.

En résumé, cette étude a contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine des composites à base de fibres de palmier dattier et de la conception des pales d'éoliennes. Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles opportunités pour l'utilisation de ces matériaux dans différentes applications industrielles, offrant ainsi des solutions durables et innovantes. Ces contributions constituent une base solide pour des études futures et des développements technologiques dans ce domaine.

Limitations et perspectives futures

Malgré les avancées réalisées dans cette étude, certaines limitations ont été identifiées. Voici les principales limitations rencontrées :

1. Échelle de laboratoire : Cette étude a été réalisée à l'échelle du laboratoire, ce qui limite la possibilité de reproduire exactement les conditions réelles d'utilisation des composites à base de fibres de palmier dattier. Des études supplémentaires à plus grande échelle, y compris des essais sur des structures de plus grande taille, sont nécessaires pour évaluer la viabilité et les performances à long terme de ces composites.

2. Durabilité à long terme : Bien que des tests de résistance mécanique et thermique aient été réalisés, l'évaluation de la durabilité à long terme des composites à base de fibres de palmier dattier reste un défi. Il est important de mener des études approfondies sur la résistance à la dégradation chimique, à l'humidité, aux cycles de charge et aux conditions environnementales variées pour mieux comprendre la stabilité et la durabilité de ces composites.

3. Coût de production : La disponibilité et le coût des fibres de palmier dattier peuvent varier en fonction des régions géographiques. Leur production à grande échelle et à un coût abordable peuvent constituer un défi. Des recherches supplémentaires sur l'optimisation des procédés de collecte, de traitement et de production des fibres de palmier dattier sont nécessaires pour rendre ces composites plus économiquement viables.

En ce qui concerne les perspectives futures, voici quelques axes de recherche à explorer :

1. Optimisation des propriétés des composites : Il est essentiel de poursuivre les recherches visant à optimiser les propriétés des composites à base de fibres de palmier dattier. Cela peut être réalisé en explorant de nouvelles techniques de traitement des fibres, de formulation des matrices et de renforts hybrides pour améliorer les performances des composites.

2. Études sur la durabilité et la vie en service : Des études approfondies sur la durabilité et la vie en service des composites à base de fibres de palmier dattier sont nécessaires pour évaluer leur résistance à la dégradation et leur performance à long terme. Cela comprend l'évaluation de la résistance à la corrosion, à l'humidité, aux rayonnements UV et aux conditions environnementales spécifiques.

3. Applications industrielles : L'exploration de nouvelles applications industrielles pour les composites à base de fibres de palmier dattier est un domaine prometteur. Cela pourrait inclure la fabrication de pièces structurales, de composants automobiles, d'emballages écologiques, de meubles durables, etc. Des collaborations avec l'industrie et la recherche interdisciplinaire peuvent aider à identifier de nouvelles opportunités d'utilisation de ces composites.

4. Développement de normes et de réglementations : Étant donné que les composites à base de fibres de palmier dattier sont encore relativement nouveaux, il est nécessaire de développer des normes et des réglementations spécifiques pour garantir leur utilisation en toute sécurité et conformément aux exigences industrielles.

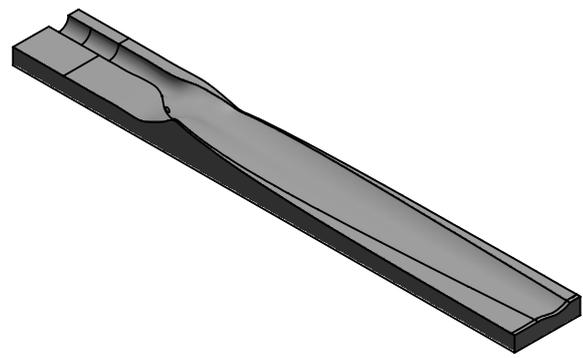
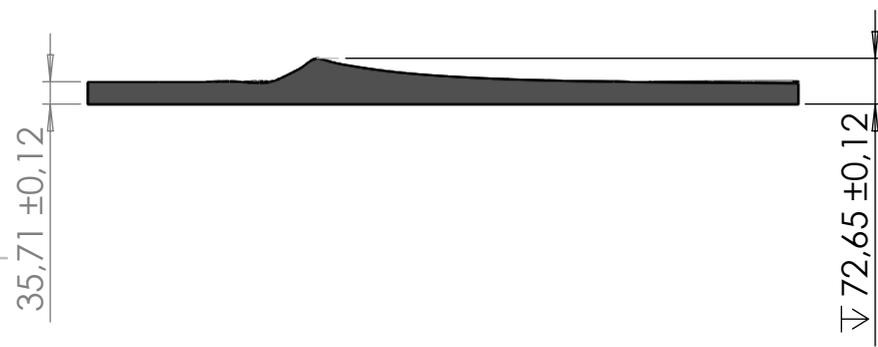
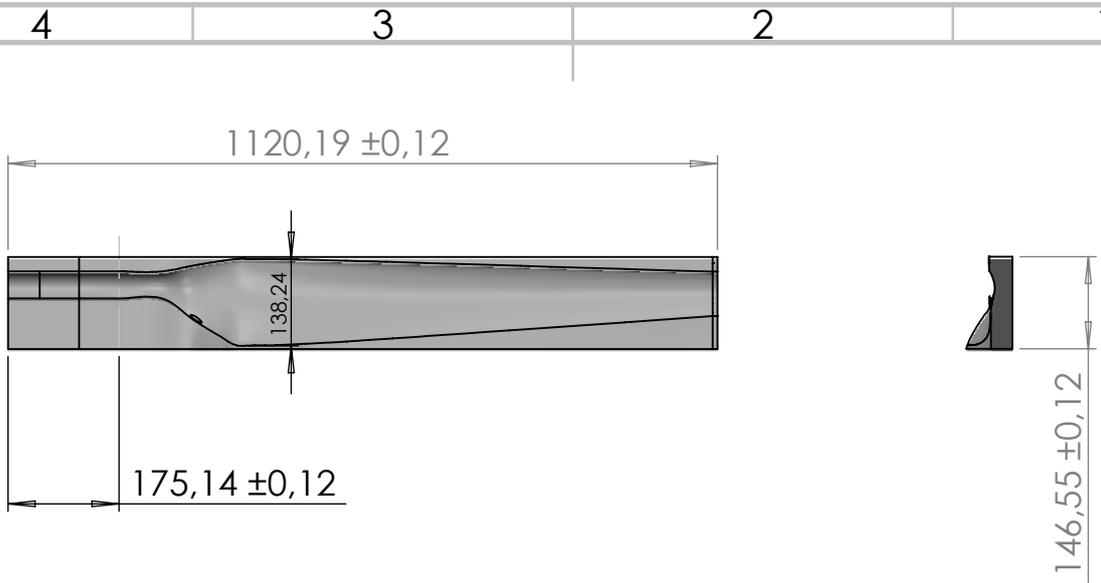
5. Test aérodynamique : Les essais aéro permettent d'évaluer les performances des éoliennes dans des conditions réelles de vent, ce qui est crucial pour optimiser leur efficacité et leur fiabilité. Ces tests impliquent la mesure des forces exercées sur les pales du rotor, la détection des éventuelles vibrations ou instabilités, ainsi que l'analyse des flux d'air autour de la structure. Grâce à ces tests, il est possible d'ajuster la conception des pales et des composants pour maximiser la production d'énergie tout en minimisant les contraintes mécaniques. De plus, les résultats des tests aéro fournissent des données précieuses pour valider les modèles de simulation et affiner les prévisions de performance. En intégrant le test aérodynamique dans notre projet, nous pourrions améliorer la compréhension et l'optimisation des éoliennes, contribuant ainsi à la progression de l'énergie éolienne en tant que source d'énergie durable et renouvelable .

En conclusion, bien que cette étude ait apporté des avancées significatives dans la caractérisation des composites à base de fibres de palmier dattier et dans la conception des pales d'éoliennes, il reste encore des défis à relever. Les limitations identifiées et les perspectives futures énumérées fournissent une base solide pour de futures recherches visant à améliorer les performances, la durabilité et l'applicabilité industrielle de ces composites.

Bibliographie

- [1] B. Jean-Marie, *Matériaux composites (5e éd.)*. Lavoisier, 2012.
- [2] D. Gay, *Matériaux composites*. Lavoisier, 2015.
- [3] A. Sbiai, *Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation sur les fibres*. Theses, INSA de Lyon, June 2011.
- [4] S. Laurenzi and M. Marchetti, "Advanced composite materials by resin transfer molding for aerospace applications," in *Composites and Their Properties* (N. Hu, ed.), ch. 10, Rijeka : IntechOpen, 2012.
- [5] V. D. T. Do Thi, "Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non." Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00652477>, July 2011.
- [6] A. Kriker, *Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec*. Theses, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [7] D. Jones, *Palms Throughout the World*. Smithsonian, 1995.
- [8] D. J., "Palmier pour le climat méditerranéen vibroscope." Disponible sur : <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/656>, year = 1995,.
- [9] D. K., "Analyse des systèmes agronomiques dans les oasis algériennes", etude technico-economique." Disponible sur : <https://journals.openedition.org/vertigo/40171>, 1997.

Annexes



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB. IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL. MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23	
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:
IDENTIFIANT DU PROJET		PLA "acide polylactique"		
2023-05-21	1/2	MASSE: 1600 g		

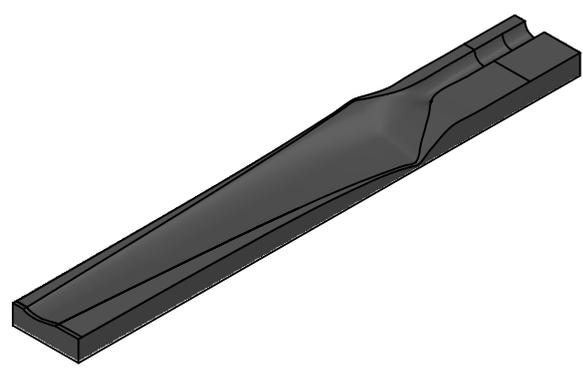
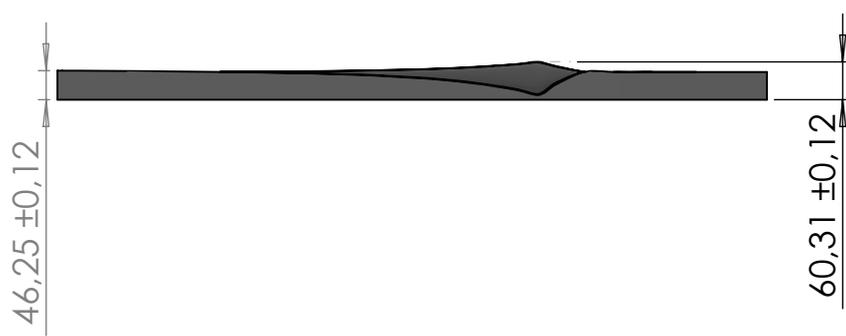
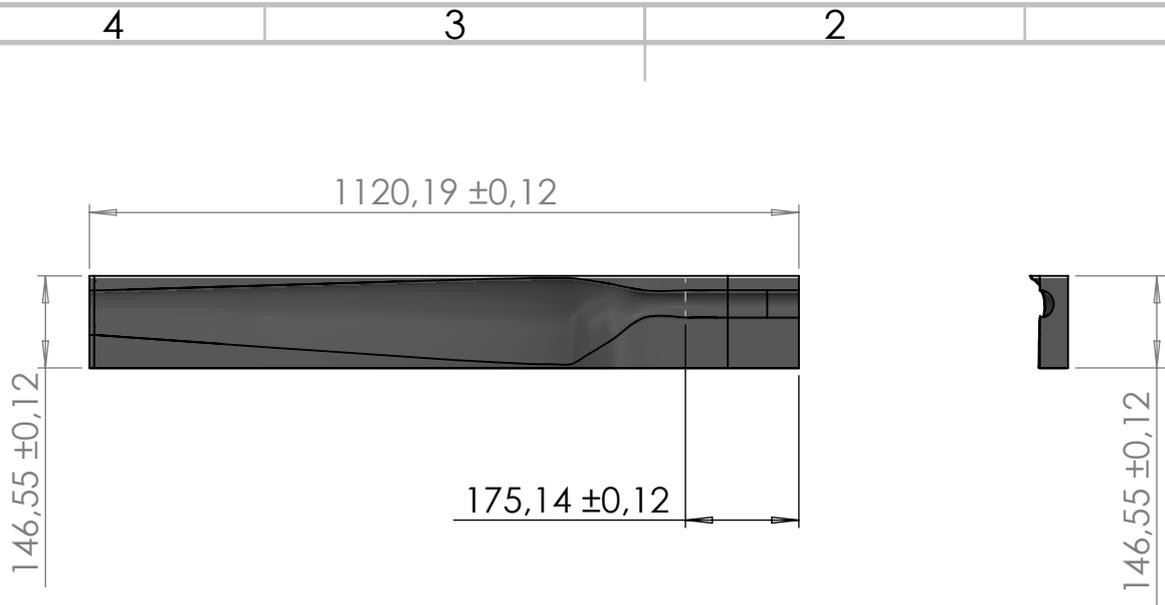


TITRE:
**MOULE PARTIE
SUPÉRIEUR**



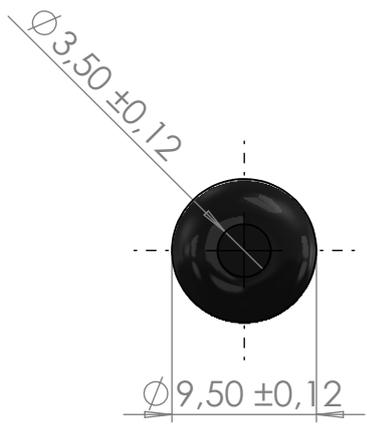
No. DE PLAN
Mise en plan 01
A4
Echelle: 1:12
FEUILLE 1 SUR 1



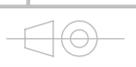


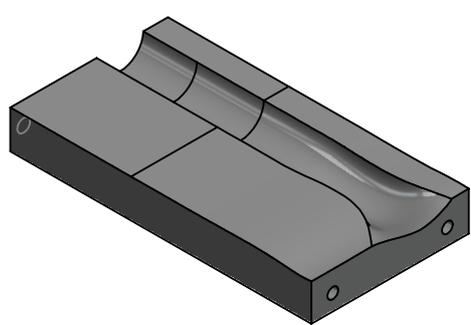
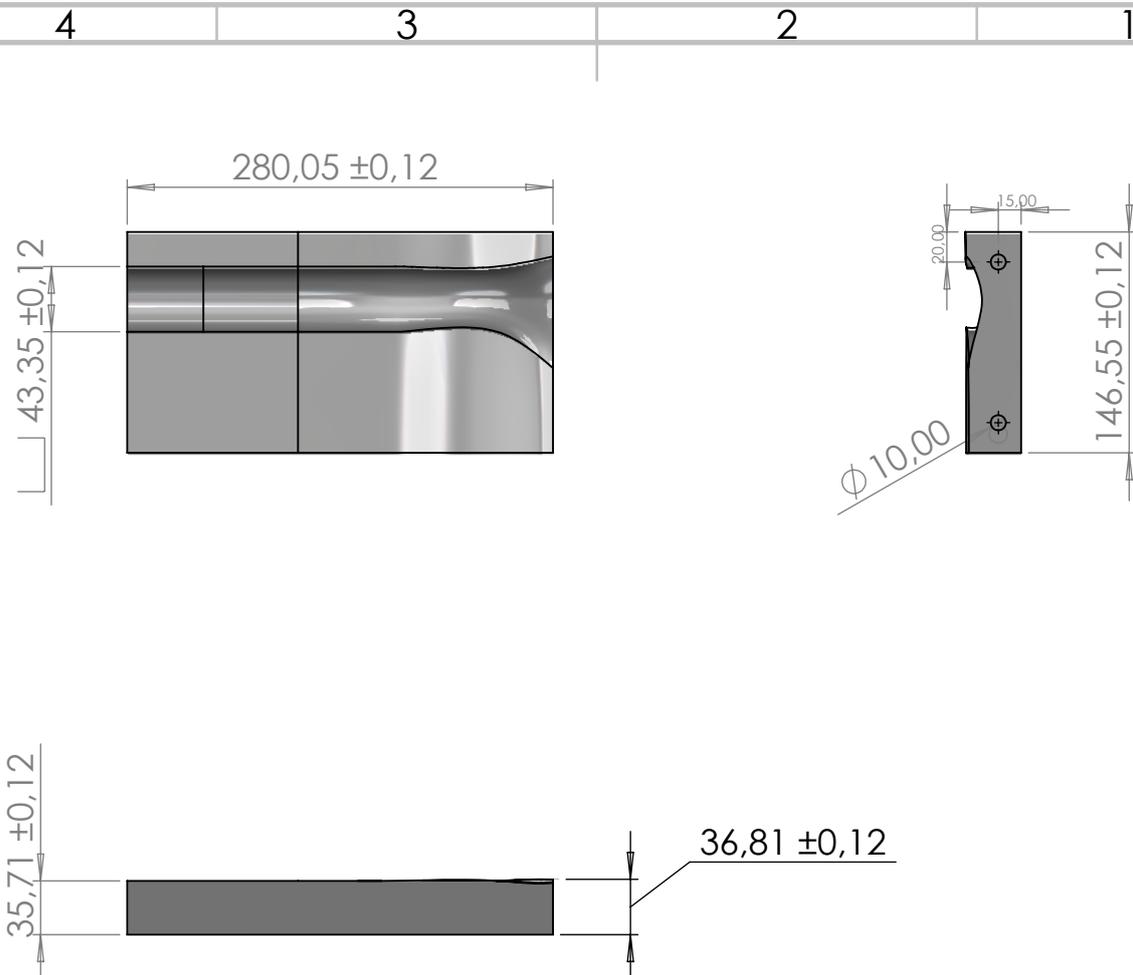
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm LINEAIRES: +/- 0,12 mm ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ		FINITION: STANDARD/NATURELLE FINITION PONCÉE		CASSER LES ANGLES VIFS CHANFREINER LES ANGLES ET LES ARÊTES VIVES		CONSERVER L'ÉCHELLE	Langue : fr
						ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	
NOM		PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM	TITRE:	
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D	MOULE PARTIE INFÉRIEURE	
AUTEUR	SERAQUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE		
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23				
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE		No. DE PLAN	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU: PLA "acide polylactique"		Mise en plan 02	
IDENTIFIANT DU PROJET 2023-05-21		2/2	MASSE: 1600 g	ECHELLE: 1:12		FEUILLE 1 SUR 1	





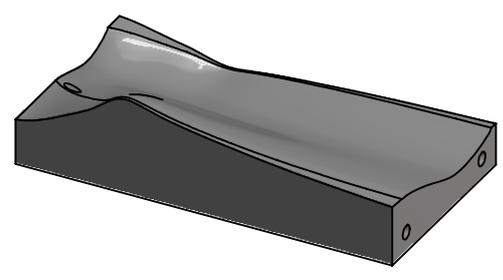
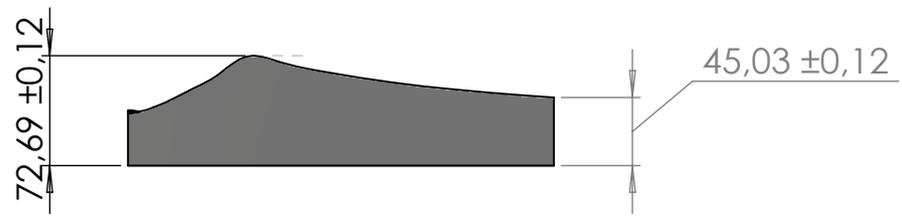
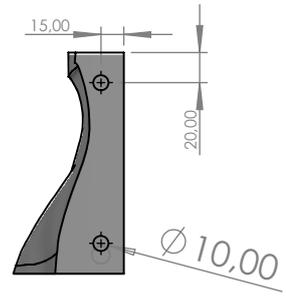
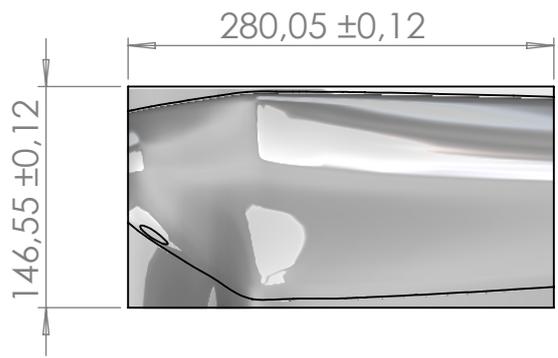
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm LINEAIRES: +/- 0,12 mm ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ		FINITION: STANDARD/NATURELLE FINITION PONCÉE		CASSER LES ANGLES VIFS CHANFREINER LES ANGLES ET LES ARÊTES VIVES		CONSERVER L'ÉCHELLE	Langue : fr
						ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	
NOM		PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM	TITRE:	
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D	LIAISON	
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE		
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23				
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE			
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:		No. DE PLAN	
IDENTIFIANT DU PROJET		: PFE-2023-01-2		PLA "acide polylactique"		Mise en plan 03	
2023-05-21		1/1		MASSE: 2.67 g		A4	
						NBR : 08	
ECHELLE:2:1						FEUILLE 1 SUR 1	





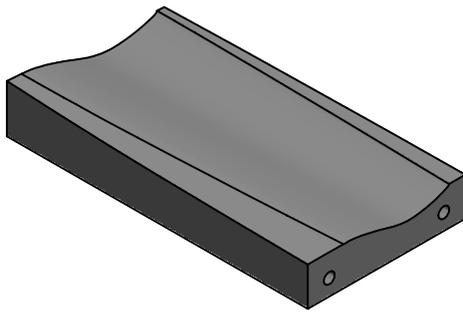
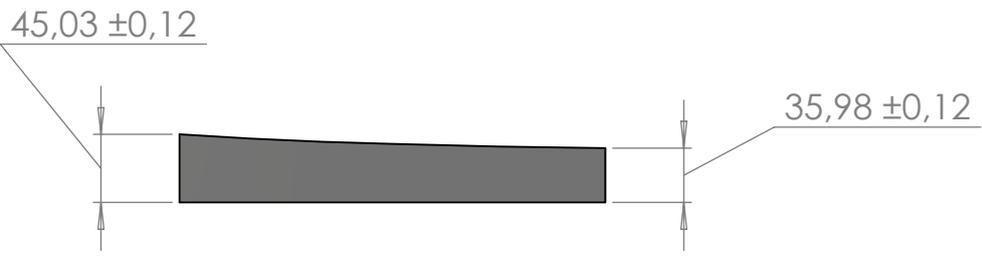
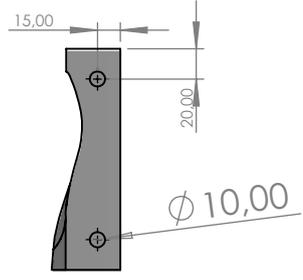
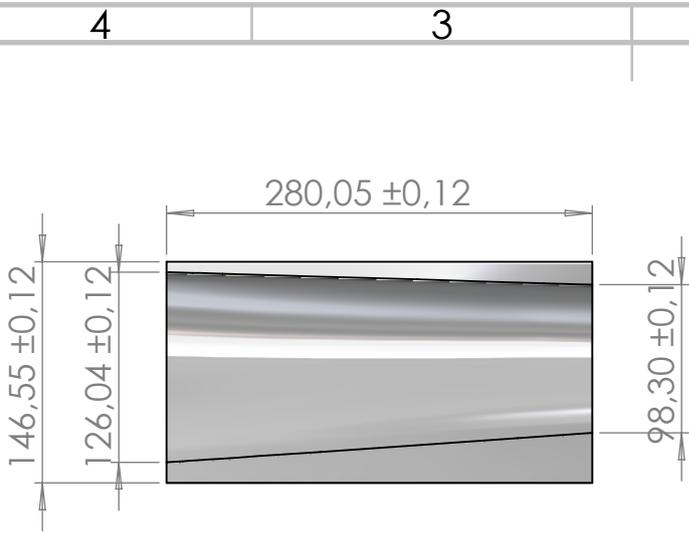
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm LINEAIRES: +/- 0,12 mm ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ		FINITION: STANDARD/NATURELLE FINITION PONCÉE		CASSER LES ANGLES VIFS CHANFREINER LES ANGLES ET LES ARÊTES VIVES		CONSERVER L'ÉCHELLE	Langue : fr
						ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	
NOM		PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM	TITRE:	
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D	PARTIE SUPÉRIEUR SUP 01	
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE		
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23				
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE		No. DE PLAN	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU: PLA "acide polylactique"		Mise en plan 04	
IDENTIFIANT DU PROJET		2023-05-21		1/4	MASSE: 400 g	ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1
							A4 NBR : 4





SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm LINEAIRES: +/- 0,12 mm ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ		FINITION: STANDARD/NATURELLE FINITION PONCÉE		CASSER LES ANGLES VIFS CHANFREINER LES ANGLES ET LES ARÊTES VIVES		CONSERVER L'ÉCHELLE	Langue : fr
						ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	
NOM		PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM	TITRE:	
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D	PARTIE SUPÉRIEUR SUP 02	
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE		
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23				
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE		No. DE PLAN	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU: PLA "acide polylactique"		Mise en plan 05	
IDENTIFIANT DU PROJET		2023-05-21		2/4	MASSE: 400 g	ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1
						A4 NBR : 4	





SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



TITRE:
**PARTIE SUPÉRIEUR
SUP 03**



No. DE PLAN

Mise en plan 06

A4

NBR : 4



IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-01-3

PLA "acide polylactique"

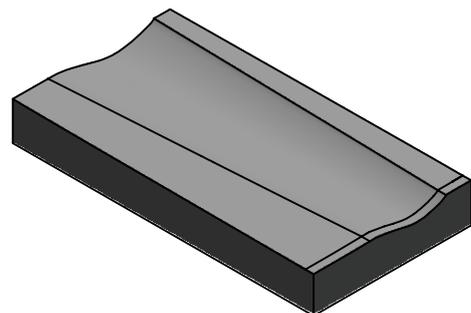
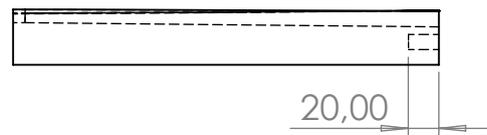
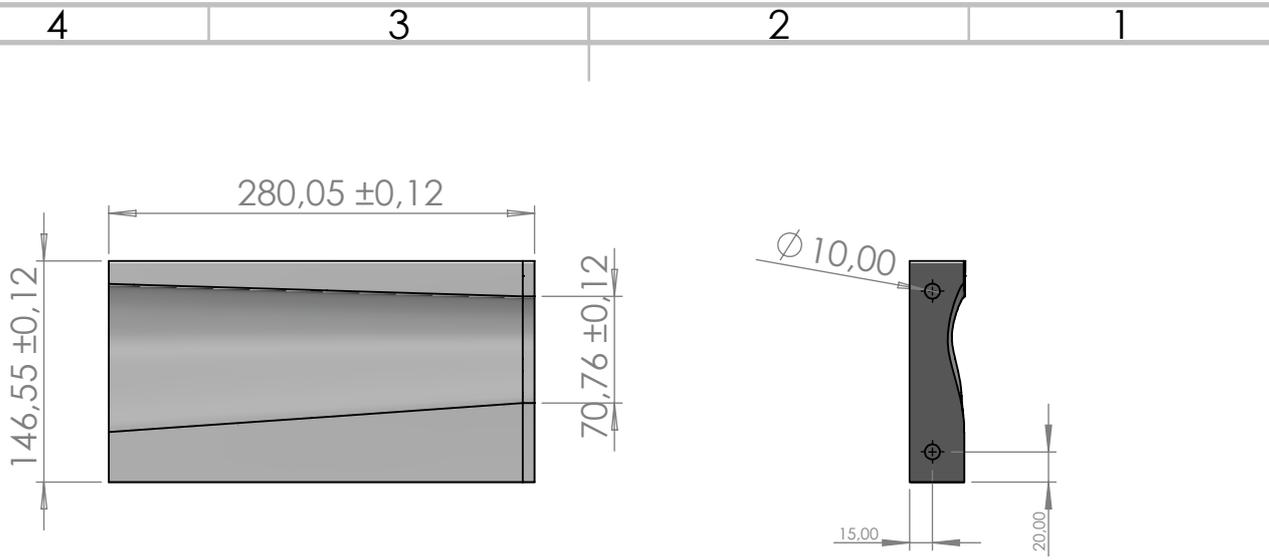
2023-05-21

3/4

MASSE: 400 g

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



TITRE:
**PARTIE SUPÉRIEUR
SUP 04**



IDENTIFIANT DU PROJET	2023-05-21	4/4	MASSE: 400 g
-----------------------	------------	-----	--------------

PLA "acide polylactique"

No. DE PLAN
Mise en plan 07

A4
NBR : 4



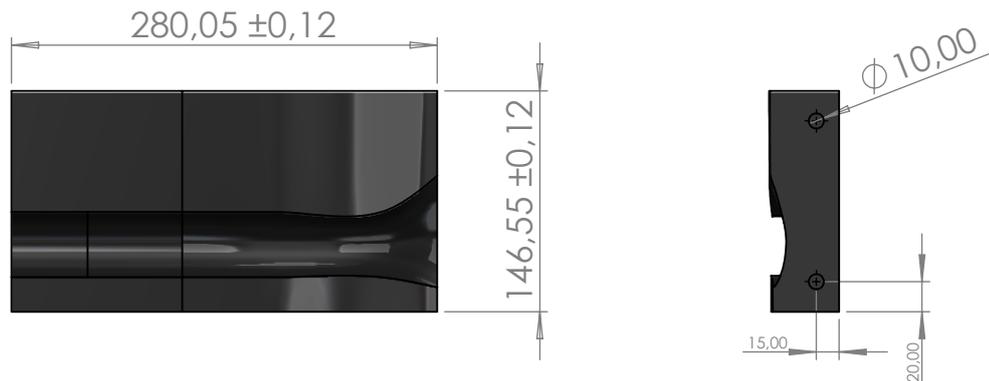
ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

F

F



E

E



D

D



C

C

B

B

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:	



TITRE:
**PARTIE INFÉRIEURE
INF 01**



No. DE PLAN
Mise en plan 08

A4
NBR : 4



IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-01-3
2023-05-21 1/4

PLA "acide polylactique"
MASSE: 400 g

ECHELLE: 1:5

FEUILLE 1 SUR 1

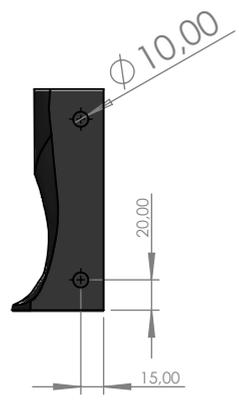
4 3 2 1

A

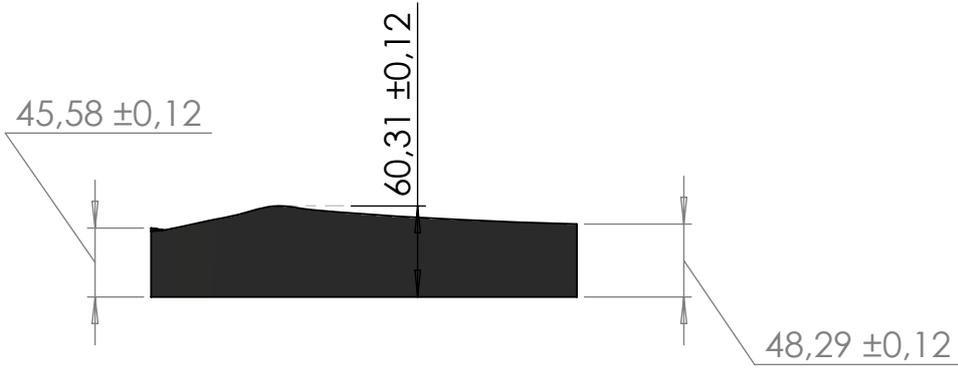
A

4 3 2 1

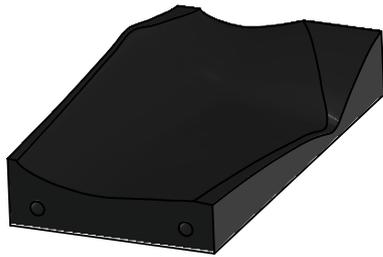
F



E



D



C

B

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



TITRE:
**PARTIE INFÉRIEURE
INF 02**



IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-01-3		PLA "acide polylactique"	
2023-05-21	2/4	MASSE: 400 g	

No. DE PLAN
Mise en plan 09

A4
NBR : 4



ECHELLE: 1:5

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

F

E

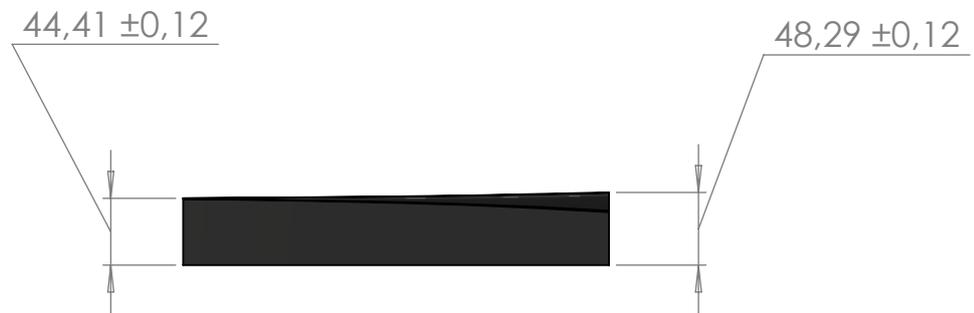
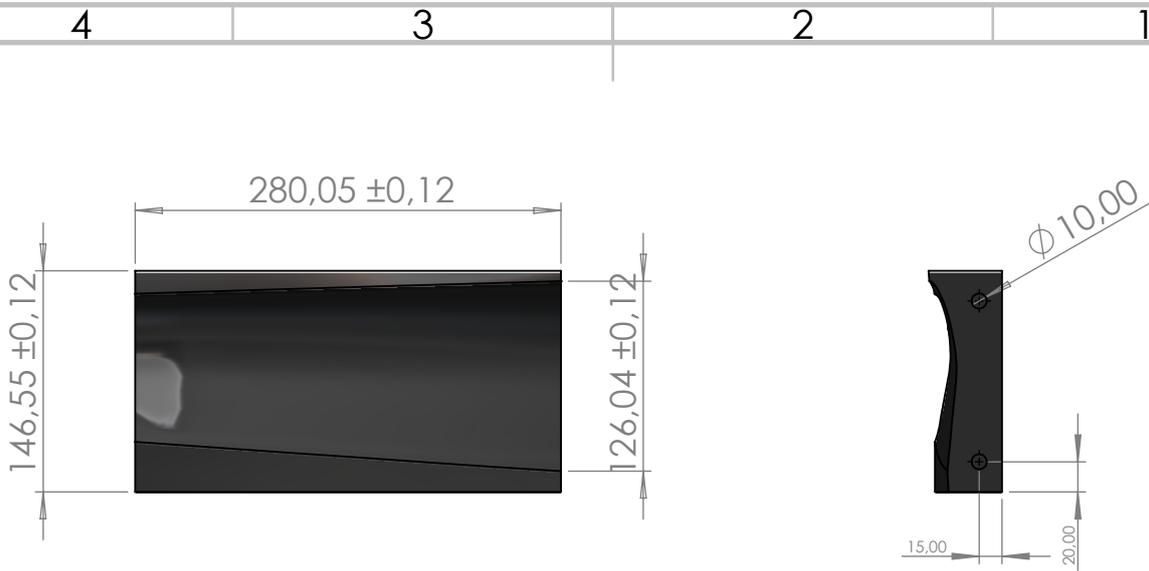
D

C

B

A

A



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	
	IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-01-3		PLA "acide polylactique"		
	2023-05-21	3/4	MASSE: 400 g		

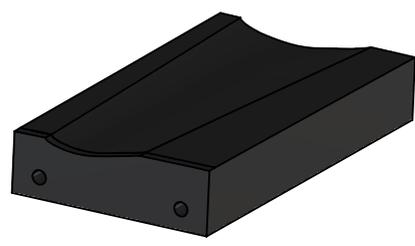
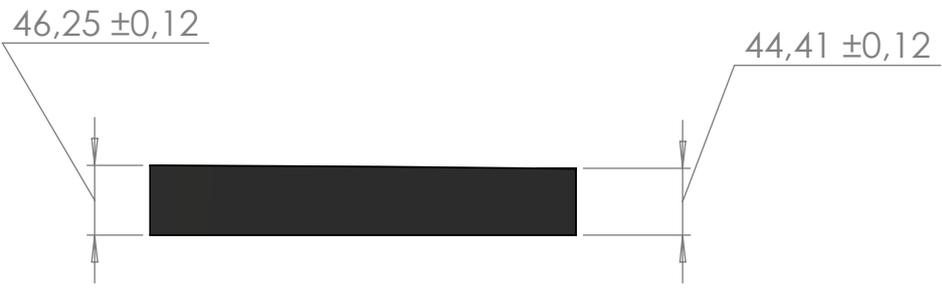
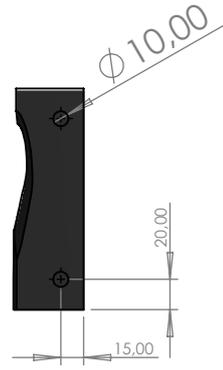
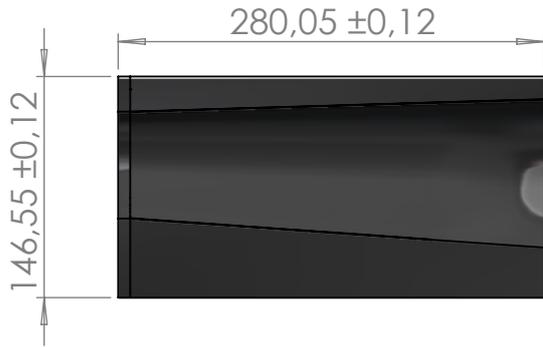


TITRE:
**PARTIE INFÉRIEURE
INF 03**



No. DE PLAN
Mise en plan 10
A4
NBR : 4
ECHELLE: 1:5
FEUILLE 1 SUR 1





SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAQUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



TITRE:

**PARTIE INFÉRIURE
INF 04**



No. DE PLAN

Mise en plan 11

A4

NBR : 4



IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-01-3

PLA "acide polylactique"

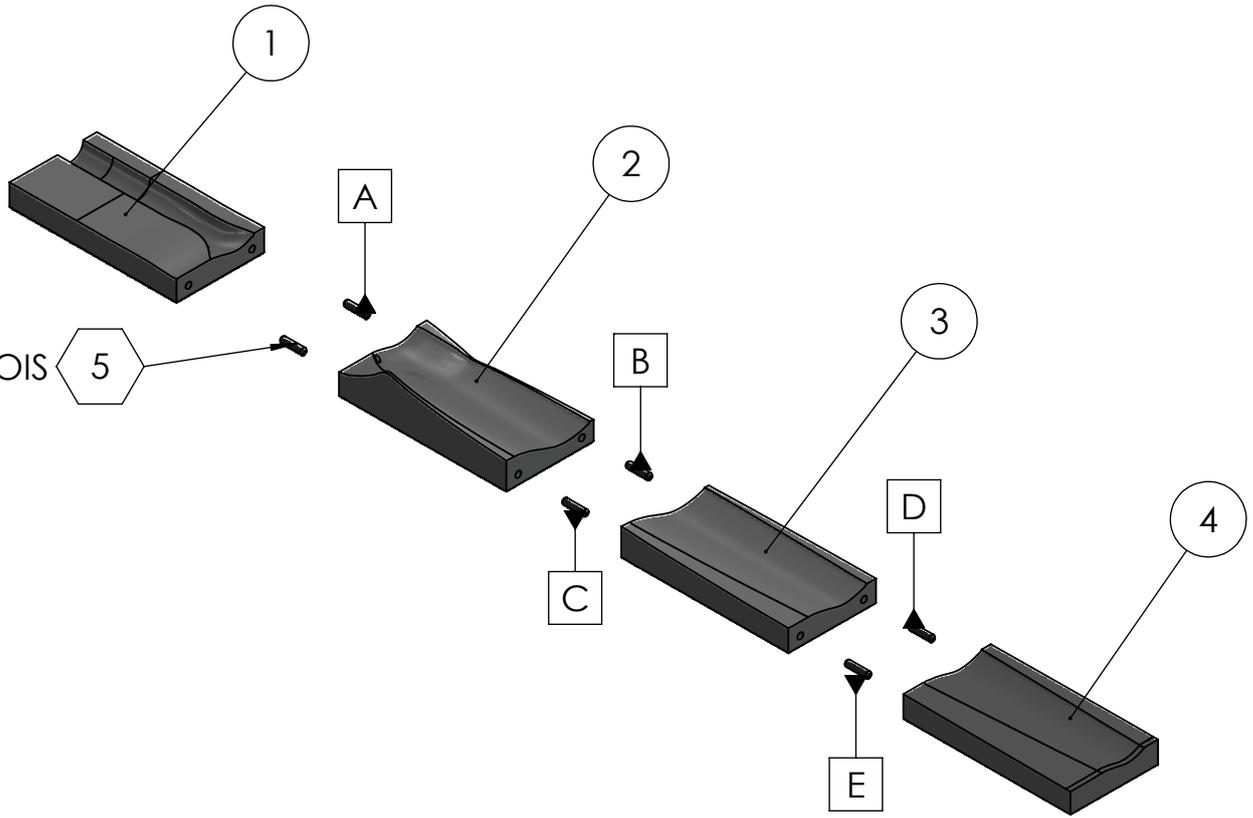
2023-05-21

4/4

MASSE: 400 g

ECHELLE: 1:5

FEUILLE 1 SUR 1



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	SUP 01	PLA "acide polylactique"	1
2	SUP 02	PLA "acide polylactique"	1
3	SUP 03	PLA "acide polylactique"	1
4	SUP 04	PLA "acide polylactique"	1
5	Liaison	PLA "acide polylactique"	6

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAQUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:	



TITRE:

**ASSEMBLAGE MOULE
PARTIE SUPÉRIEUR**



No. DE PLAN

Mise en plan 12

A4

IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-01-4

PLA "acide polylactique"



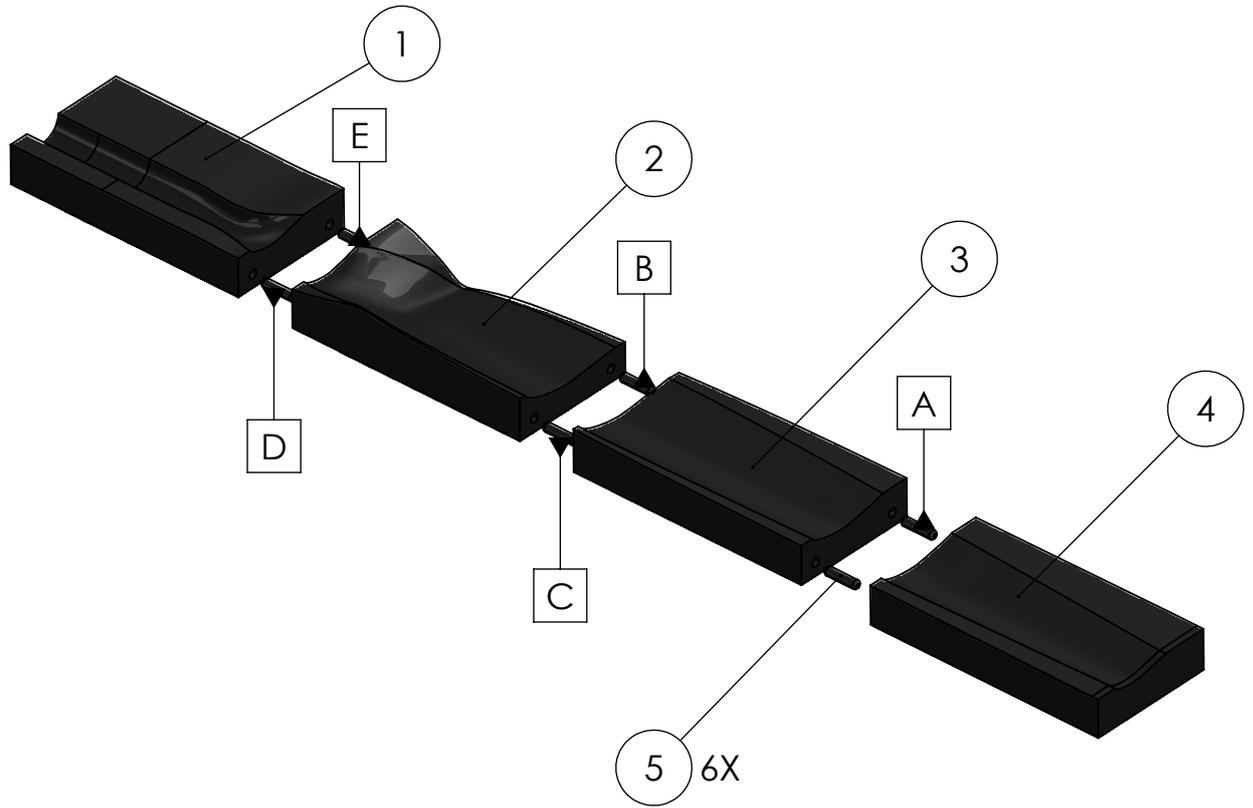
2023-05-21

1/1

MASSE: 1616.02 g

ÉCHELLE : 1:9

FEUILLE 1 SUR 1



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	Partie inférieure inf 01	PLA "acide polylactique"	1
2	Partie inférieure inf 02	PLA "acide polylactique"	1
3	Partie inférieure inf 03	PLA "acide polylactique"	1
4	Partie inférieure inf 04	PLA "acide polylactique"	1
5	Liaison	PLA "acide polylactique"	6

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB. IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL. MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23	
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:



TITRE:
**ASSEMBLAGE MOULE
PARTIE INFÉRIEURE**



No. DE PLAN

Mise en plan 13

A4



IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-01-5

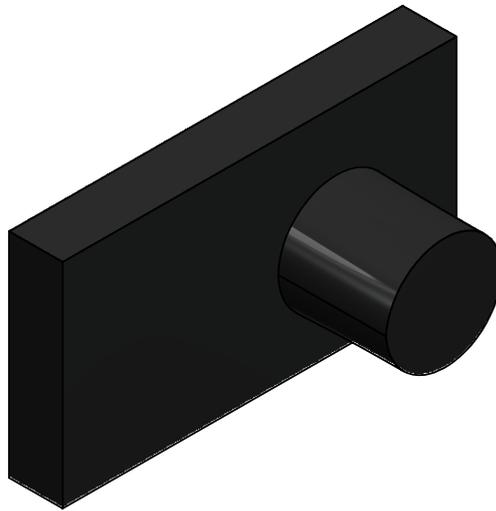
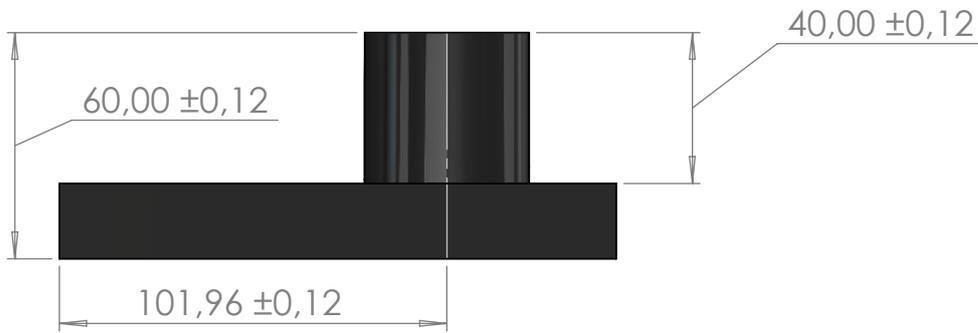
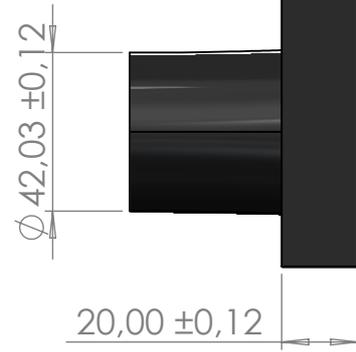
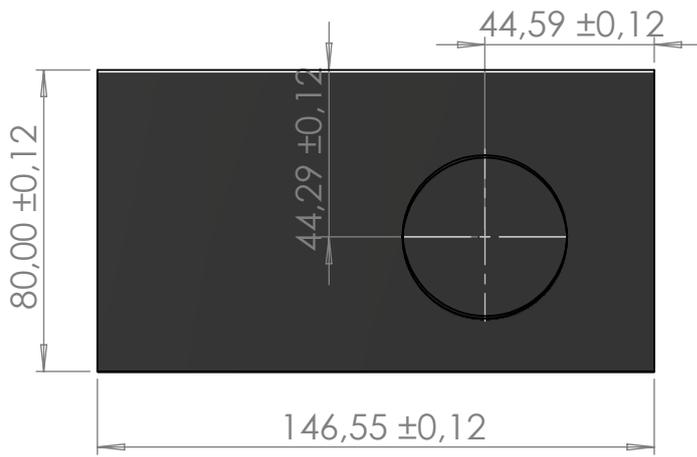
PLA "acide polylactique"

2023-05-21 1/1

MASSE: 1616.02 g

ECHELLE: 1:7

FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:	



TITRE:
BOUCHON 01



No. DE PLAN

Mise en plan 14

A4

IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-01-6

PLA "acide polylactique"

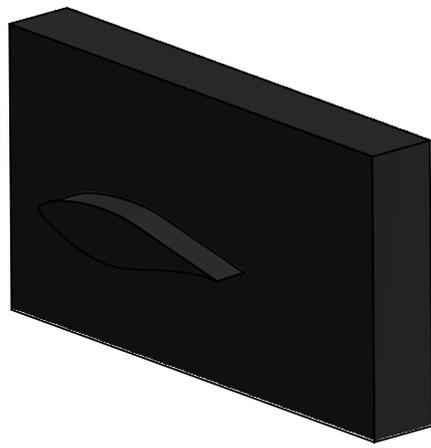
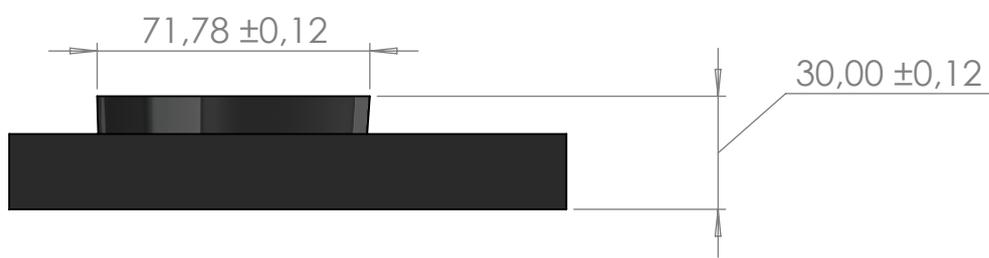
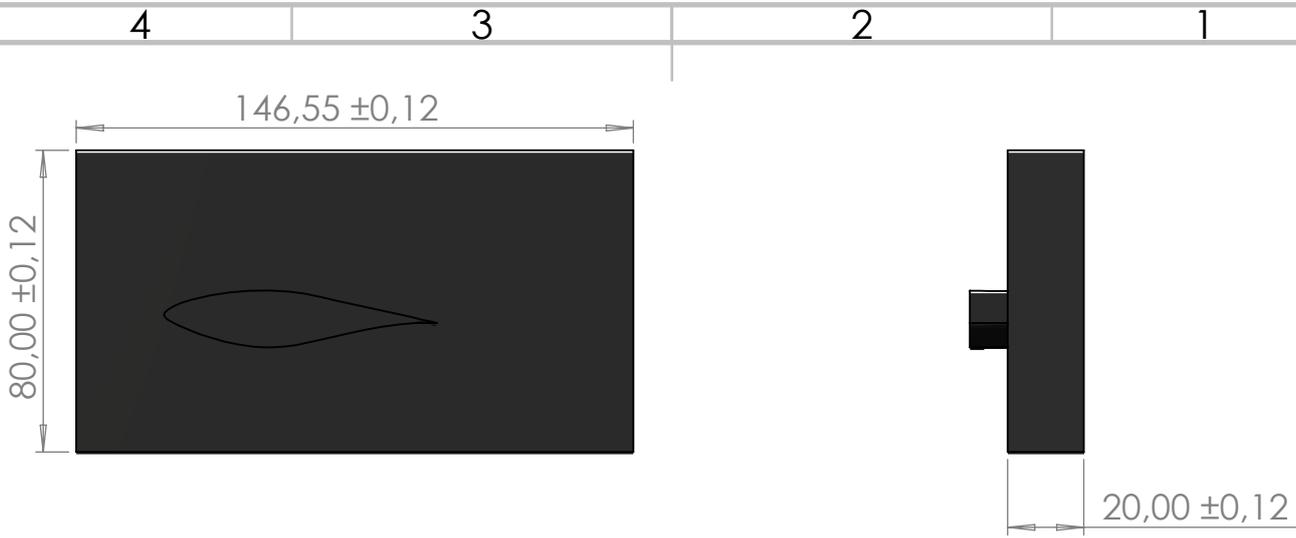


2023-05-21 1/1

MASSE: 76 g

ECHELLE:1:2

FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
 LES COTES SONT EN MILLIMETRES
 ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
 TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
 LINEAIRES: +/- 0,12 mm
 ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
 FINITION PONCÉE**

CASSER LES
 ANGLES VIFS
 CHANFREINER LES
 ANGLES ET LES
 ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
 Langue : fr
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	
	IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-01-7		PLA "acide polylactique"		
	2023-05-21	1/1	MASSE: 53 g		

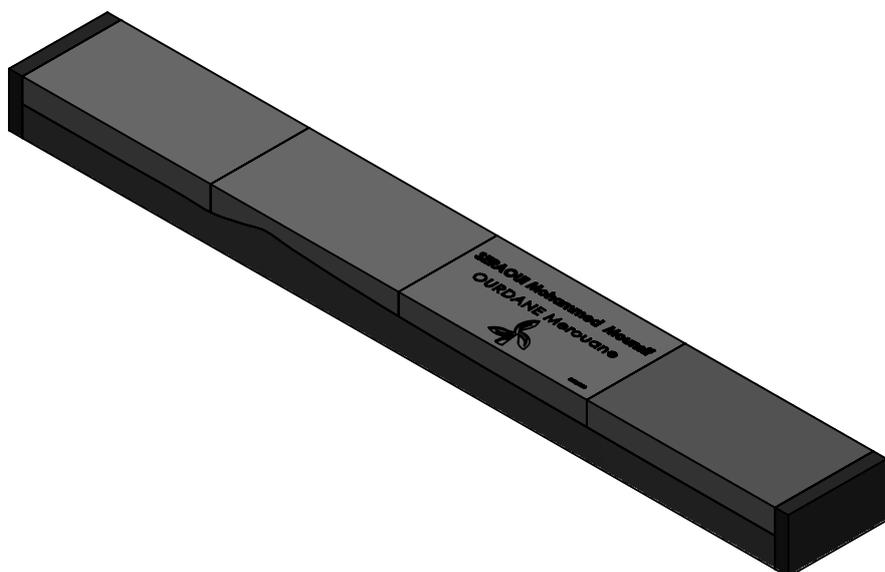
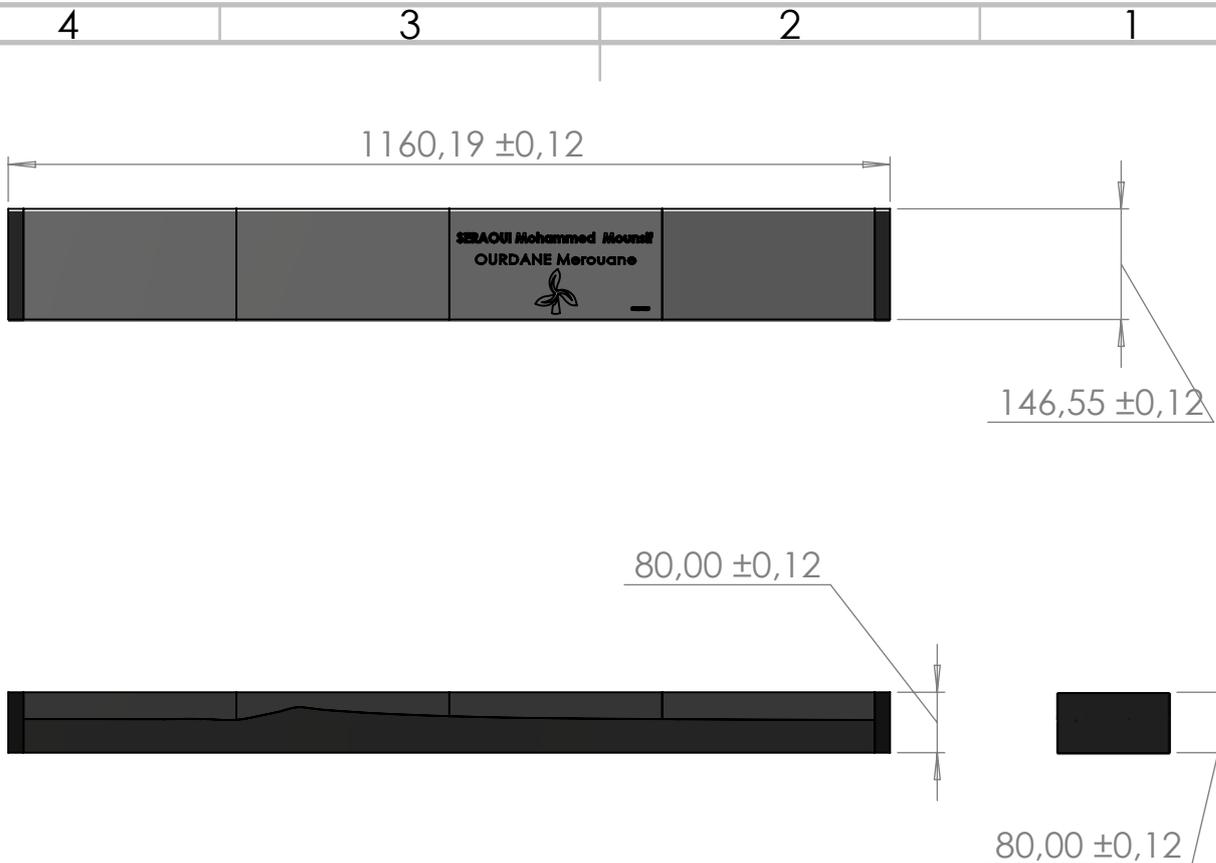


TITRE:
BOUCHON 02

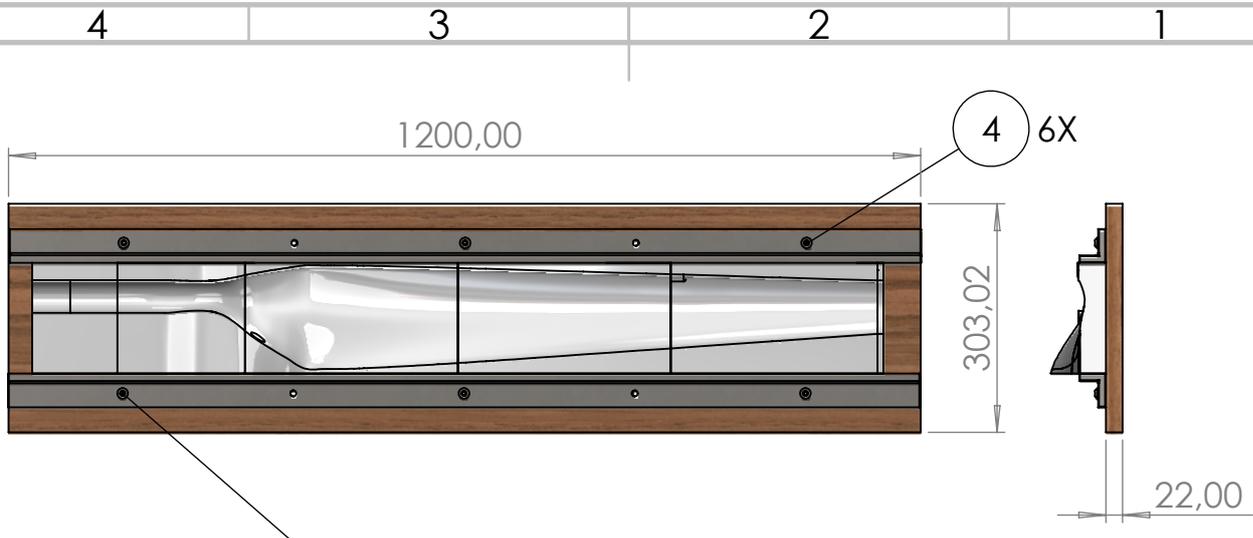


No. DE PLAN
Mise en plan 15
 A4
 ECHELLE:1:2
 FEUILLE 1 SUR 1

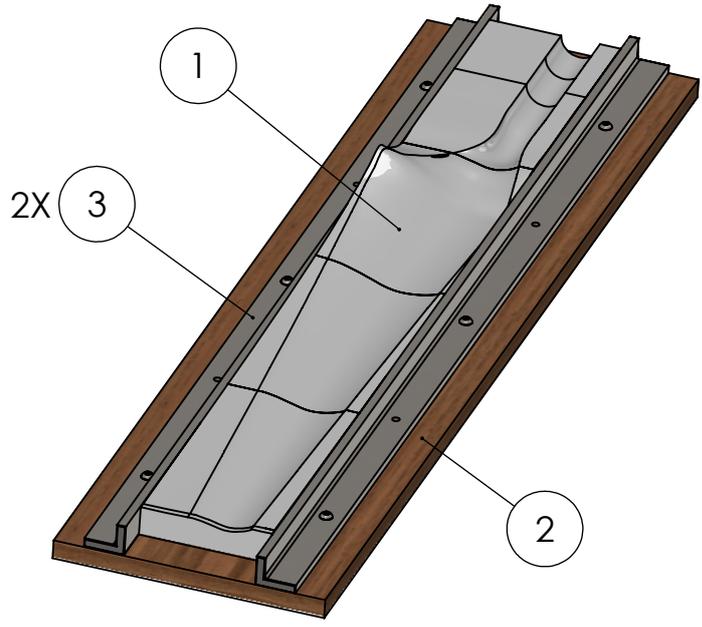
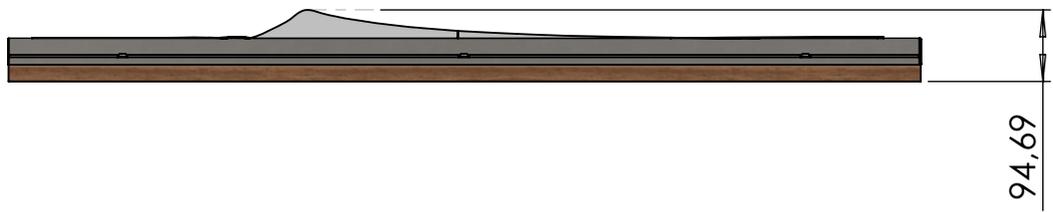




SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm LINEAIRES: +/- 0,12 mm ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ		FINITION: STANDARD/NATURELLE FINITION PONCÉE		CASSER LES ANGLES VIFS CHANFREINER LES ANGLES ET LES ARÊTES VIVES		CONSERVER L'ÉCHELLE	Langue : fr
						ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	
NOM		PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM	TITRE:	
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D	ASSEMBLAGE 01 MOULE	
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE	 الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية Ecole Nationale Polytechnique	
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23				
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE		No. DE PLAN	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:		Mise en plan 16	
IDENTIFIANT DU PROJET		: PFE-2023-01-8		PLA "acide polylactique"		A4	
2023-05-21		1/1		MASSE: 3361.04 g		Echelle: 1:10	
						FEUILLE 1 SUR 1	



ISO 7380 - M8 x 10 - 10N



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	QTE
1	Moule partie supérieure	1
2	contreplaqué bois	1
3	Support de fixation	2
4	ISO 7380 - M8 x 10 - 10N	6

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB. IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL. MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23	
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:



TITRE:
**FIXATION DU MOULE
PARTIE SUPÉRIEUR**



IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-01-9
2023-05-21 1/2

PLA "acide polylactique"

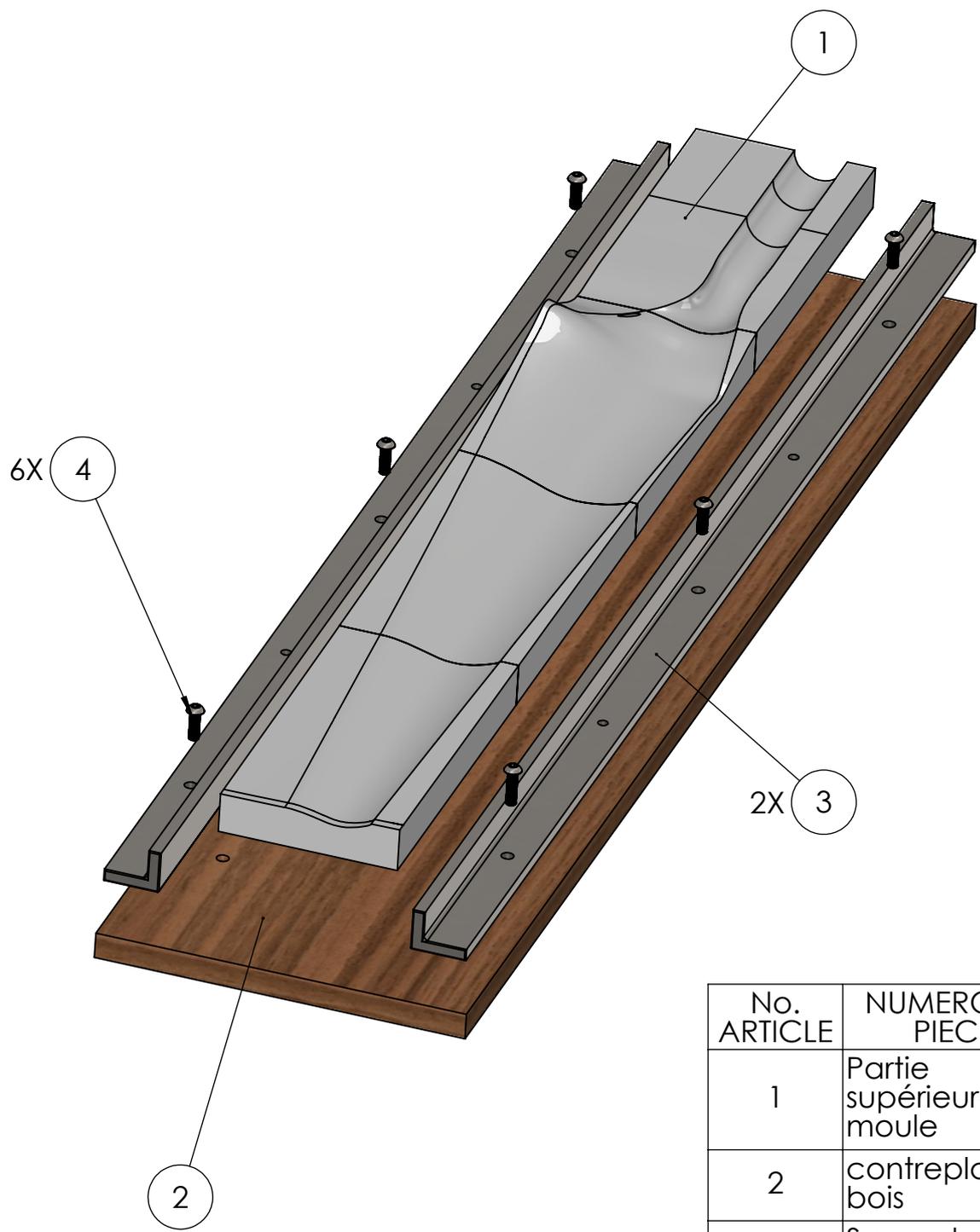
MASSE: 3500 g

No. DE PLAN
Mise en plan 17

A4

ECHELLE: 1:10

FEUILLE 1 SUR 1



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	QTE
1	Partie supérieure du moule	1
2	contreplaqué bois	1
3	Support de fixation	2
4	ISO 7380 - M8 x 25 - 25S	6

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES ANGES VIFS
CHANFREINER LES ANGES ET LES ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAQUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:	



TITRE:
**FIXATION DU MOULE
PARTIE SUPÉRIEUR**

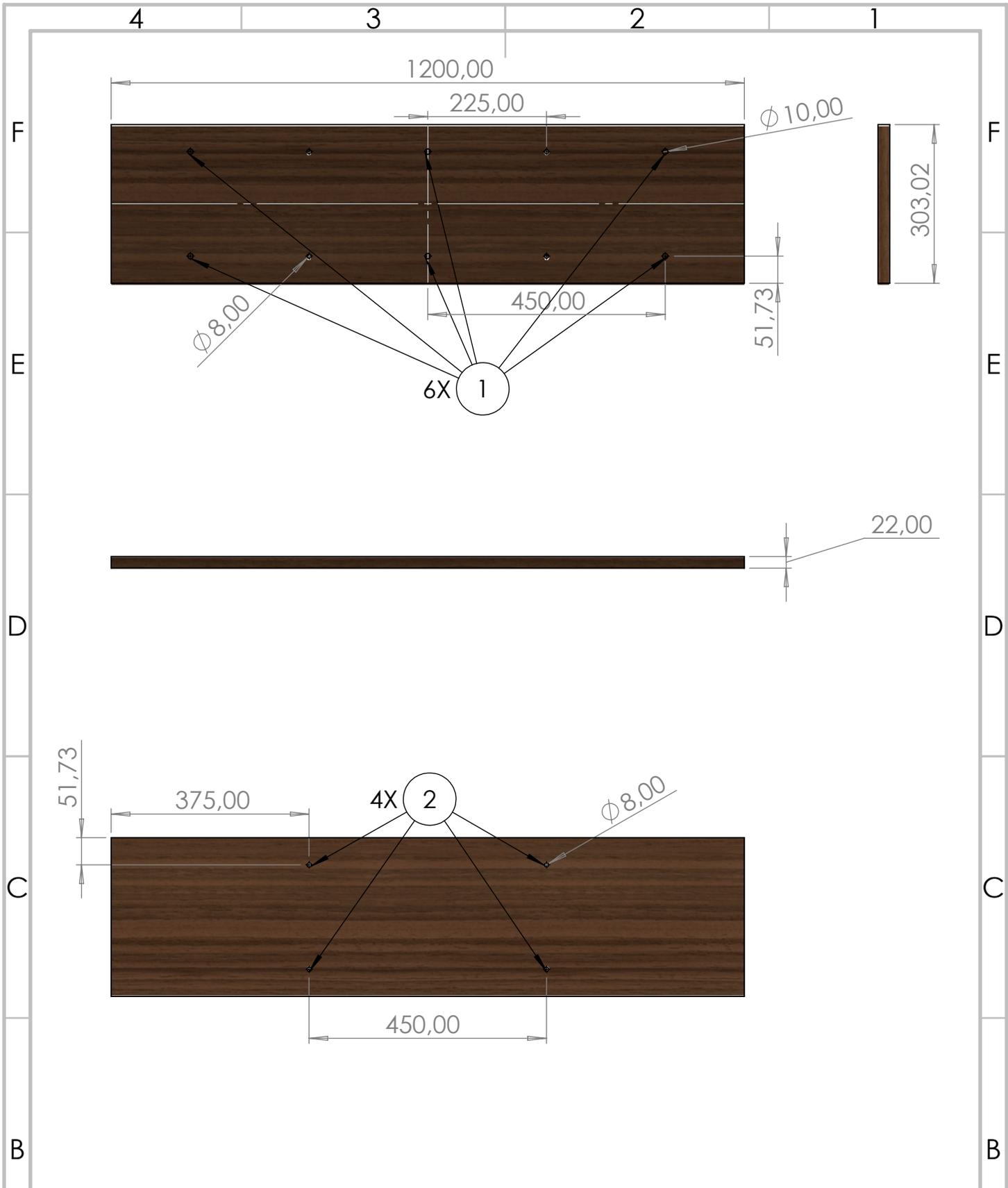


IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-01-9
2023-05-21 1/1

PLA "acide polylactique"
MASSE: 3500 g

No. DE PLAN
Mise en plan 18

A4



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
 LES COTES SONT EN MILLIMETRES
 ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
 TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
 LINEAIRES: +/- 0,12 mm
 ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
 FINITION PONCÉE**

CASSER LES
 ANGLES VIFS
 CHANFREINER LES
 ANGLES ET LES
 ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU: BOIS	
	IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-01-9				
	2023-05-21	1/1	MASSE: 7985.88 g		

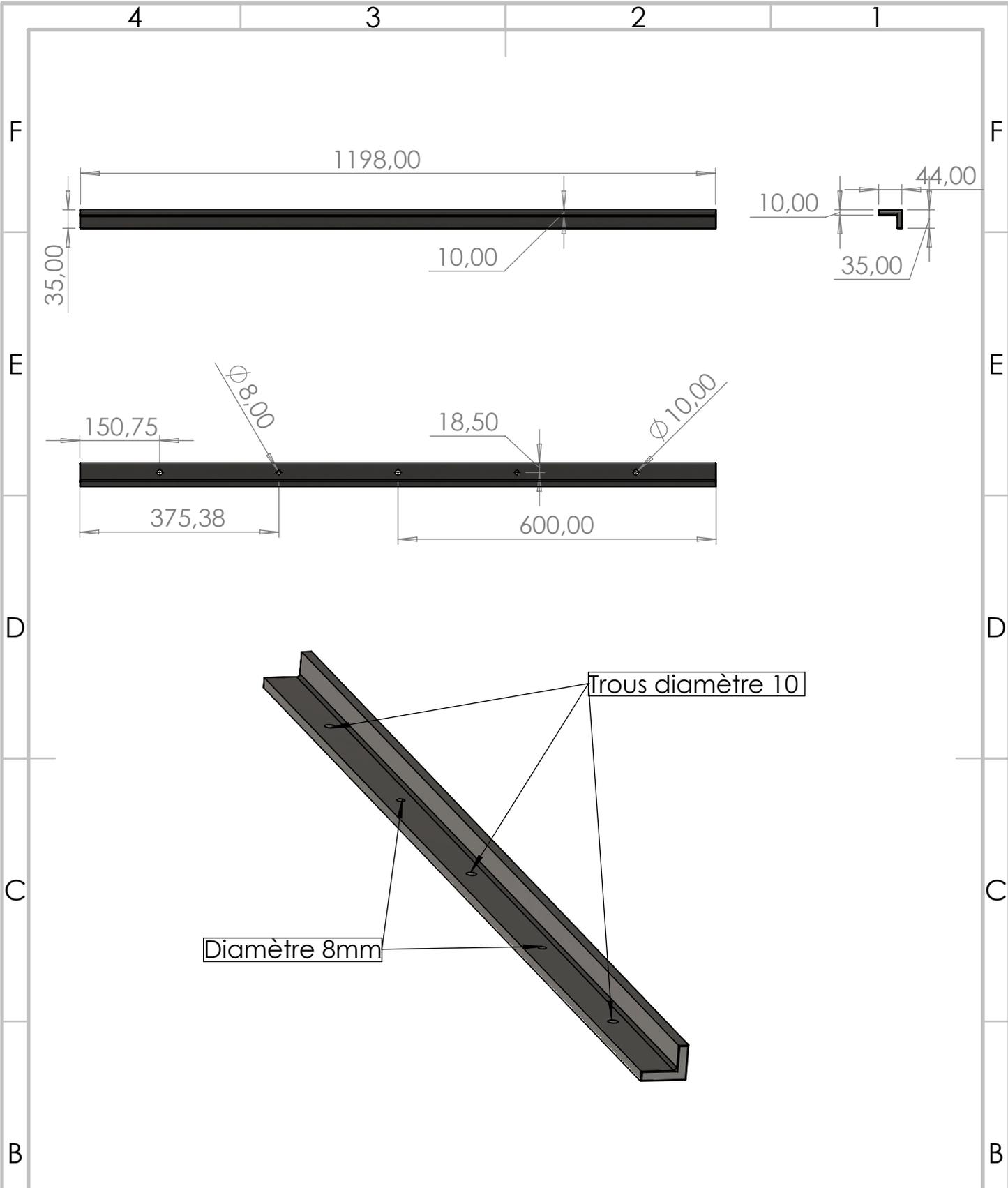


TITRE:
**CONTREPLAQUÉ
 EN BOIS**



No. DE PLAN
Mise en plan 19
 Echelle: 1:10
 FEUILLE 1 SUR 1
 A4
 QT : 02





SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB. IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAQUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL. MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23	
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU: ACIER
IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-01-10				
2023-05-21	1/1	MASSE: 838.63 g		

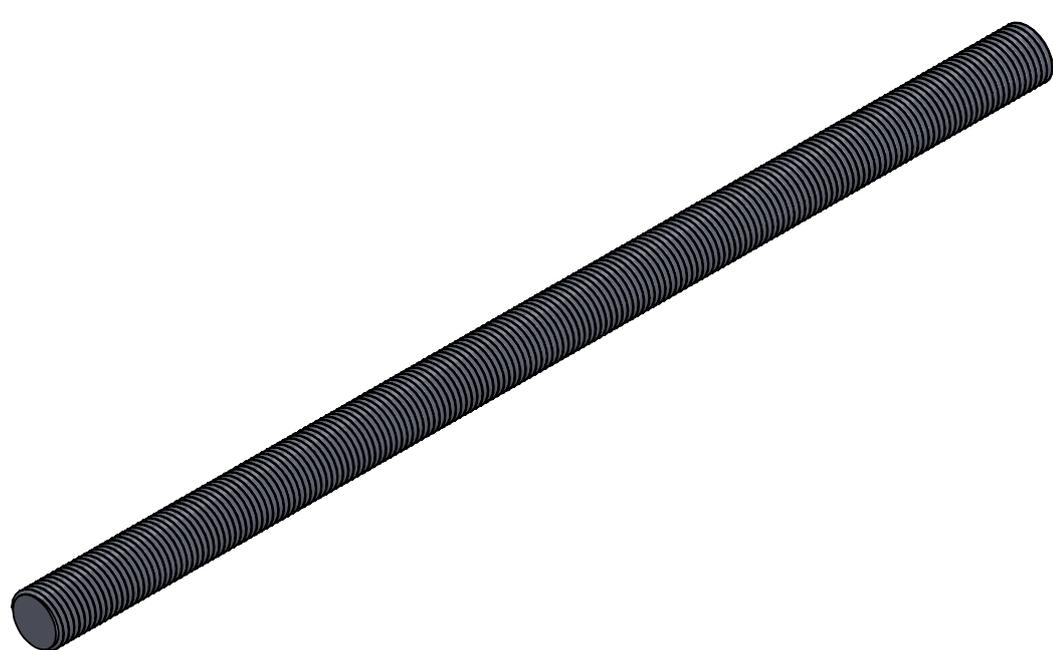
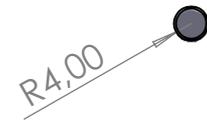
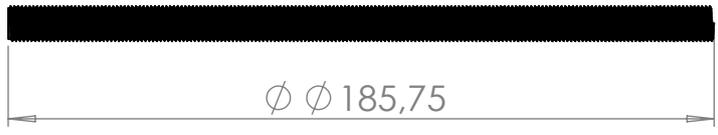


TITRE:
SUPPORT

No. DE PLAN
Mise en plan 20

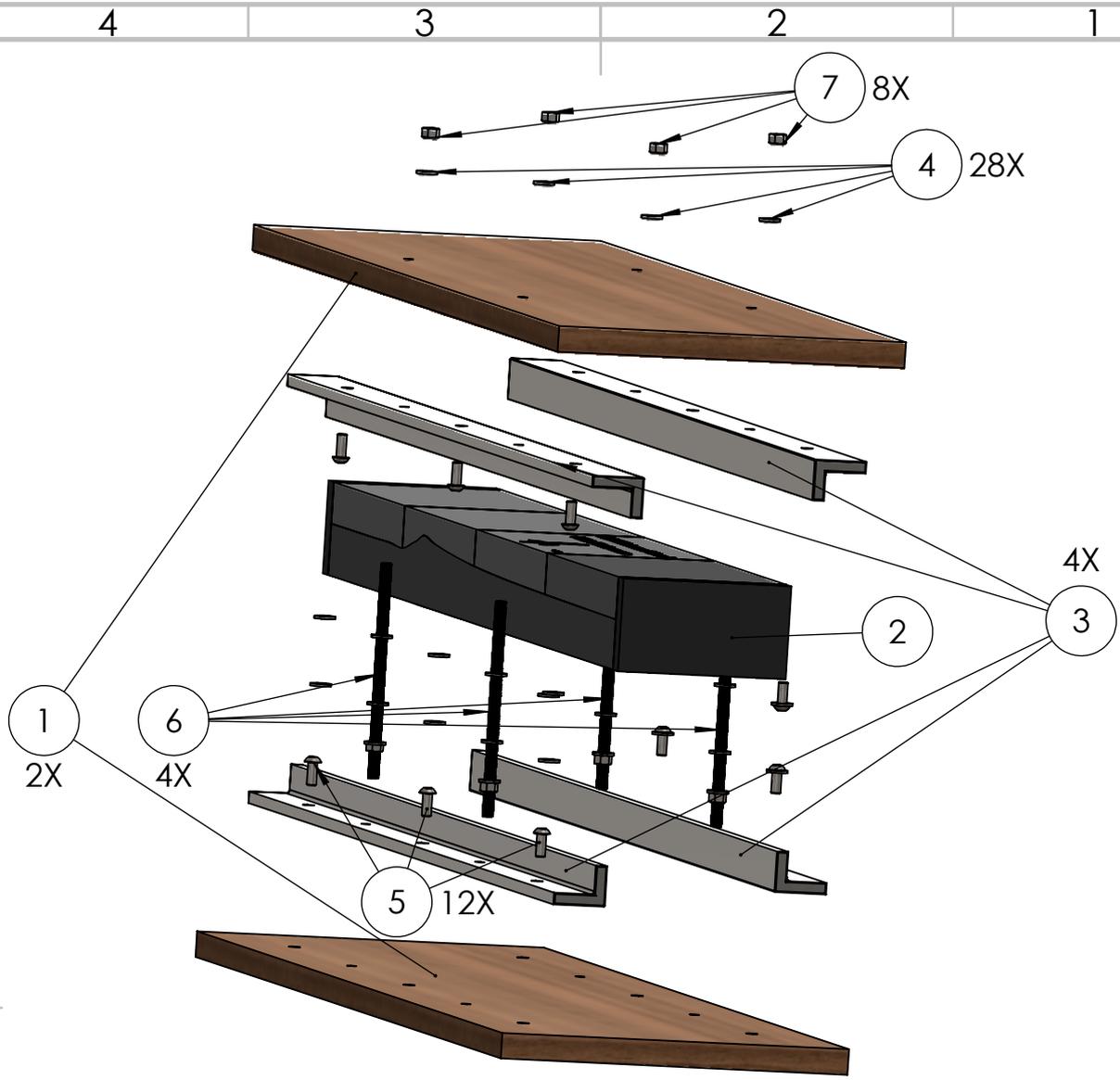
A4

ECHELLE:1:20
FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm LINEAIRES: +/- 0,12 mm ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ		FINITION: STANDARD/NATURELLE FINITION PONCÉE		CASSER LES ANGLES VIFS CHANFREINER LES ANGLES ET LES ARÊTES VIVES		CONSERVER L'ÉCHELLE	Langue : fr
						ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	
NOM		PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM	TITRE:	
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D	TIGE FILETÉE	
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE		
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23				
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE			
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:		No. DE PLAN	
IDENTIFIANT DU PROJET		2023-05-21		1/4	MASSE: 10.46 g	Mise en plan 21	
2023-05-21		1/4		MASSE: 10.46 g		ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1





No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	contreplaqué en bois	Bois	2
2	Moule	PLA "acide polylactique"	1
3	Support	Acier inoxydable	4
4	ISO 10673-9.3-S	Acier inoxydable	28
5	ISO M8 x 20 - 20C	Acier inoxydable	12
6	Tige filetée	Acier inoxydable	4
7	ISO - 4034 - M8 - N	Acier inoxydable	8

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES ANGES VIFS
CHANFREINER LES ANGES ET LES ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB. IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAQUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL. MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23	
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	



TITRE:
ASSEMBLAGE FINALE



MATERIAUX:
PLA "acide polylactique"
BOIS
ACIER INOXYDABLE

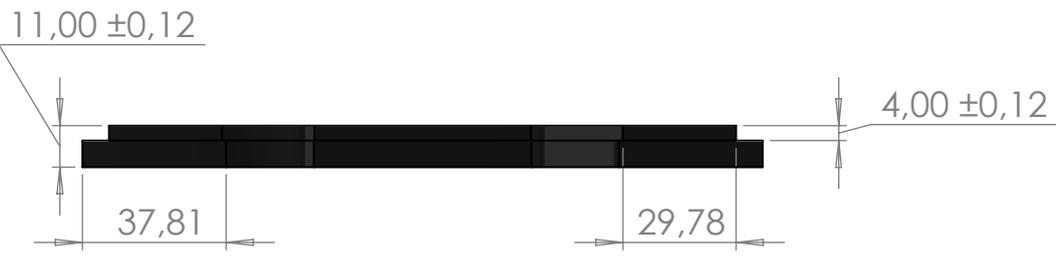
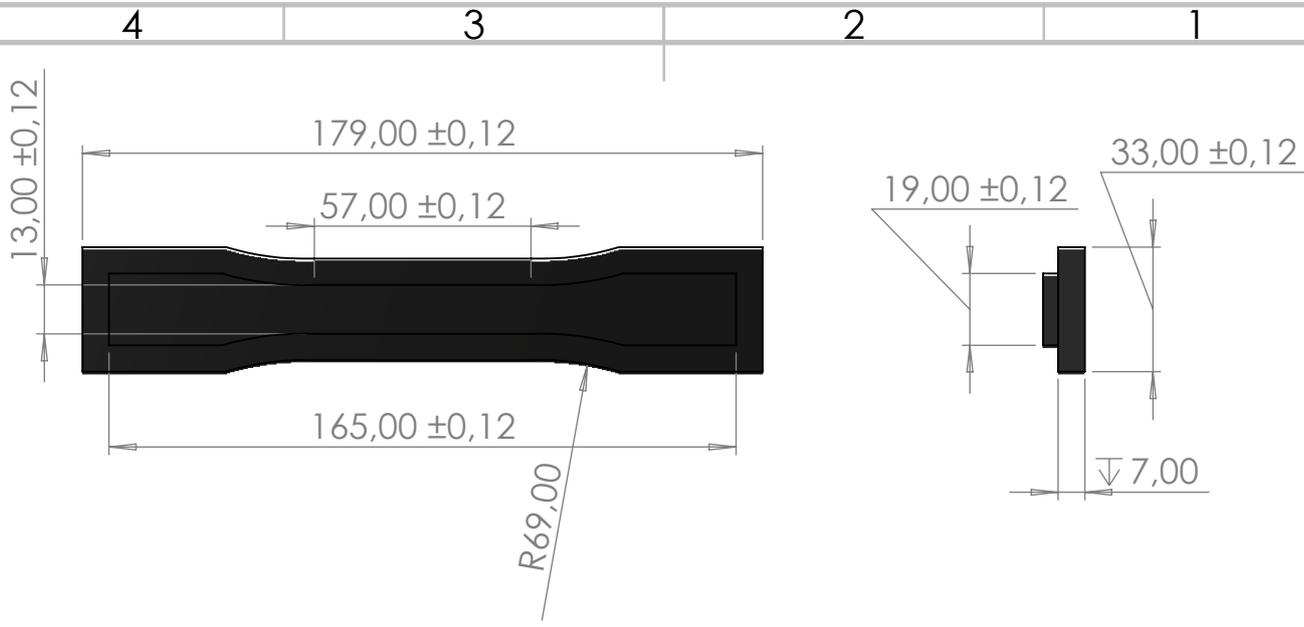
IDENTIFIANT : PFE-2023-01-12
DU PROJET

2023-05-21 1/1 MASSE: 7000 g

No. DE PLAN
Mise en plan 22

A4

ÉCHELLE: 1:6 FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



TITRE:
**PARTIE 01
MOULE ÉPROUVETTES
ASTM D638**

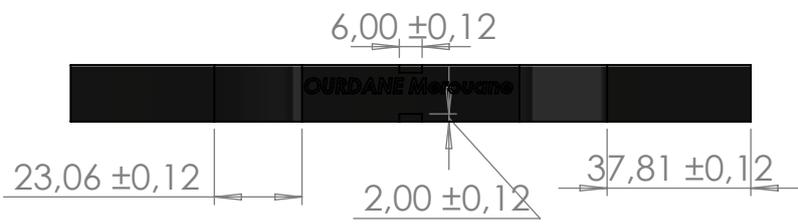
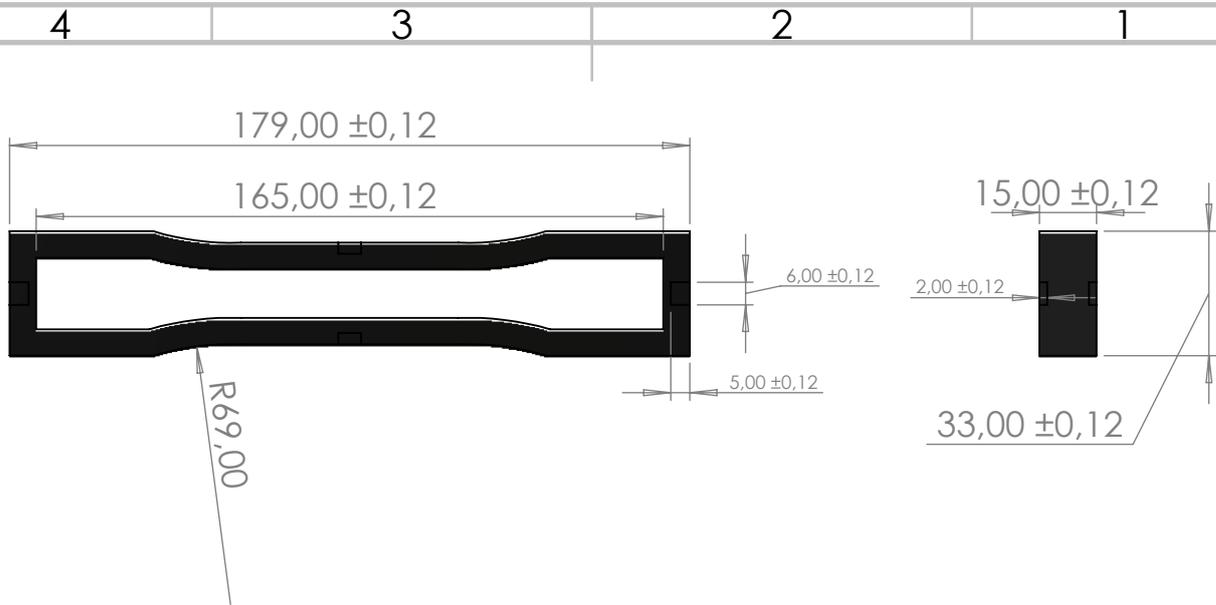


IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-02-1
2023-05-21 1/2

PLA "acide polylactique"
MASSE: 20 g

No. DE PLAN
Mise en plan 23

A4



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB. IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAQUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL. MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23	
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:



TITRE:
**PARTIE 02
MOULE ÉPROUVETTES
ASTM D638**



IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-02-2
2023-05-21 1/1

PLA "acide polylactique"
MASSE: 22 g

No. DE PLAN
Mise en plan 24
A4
Echelle: 1:2
FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

F

F

E

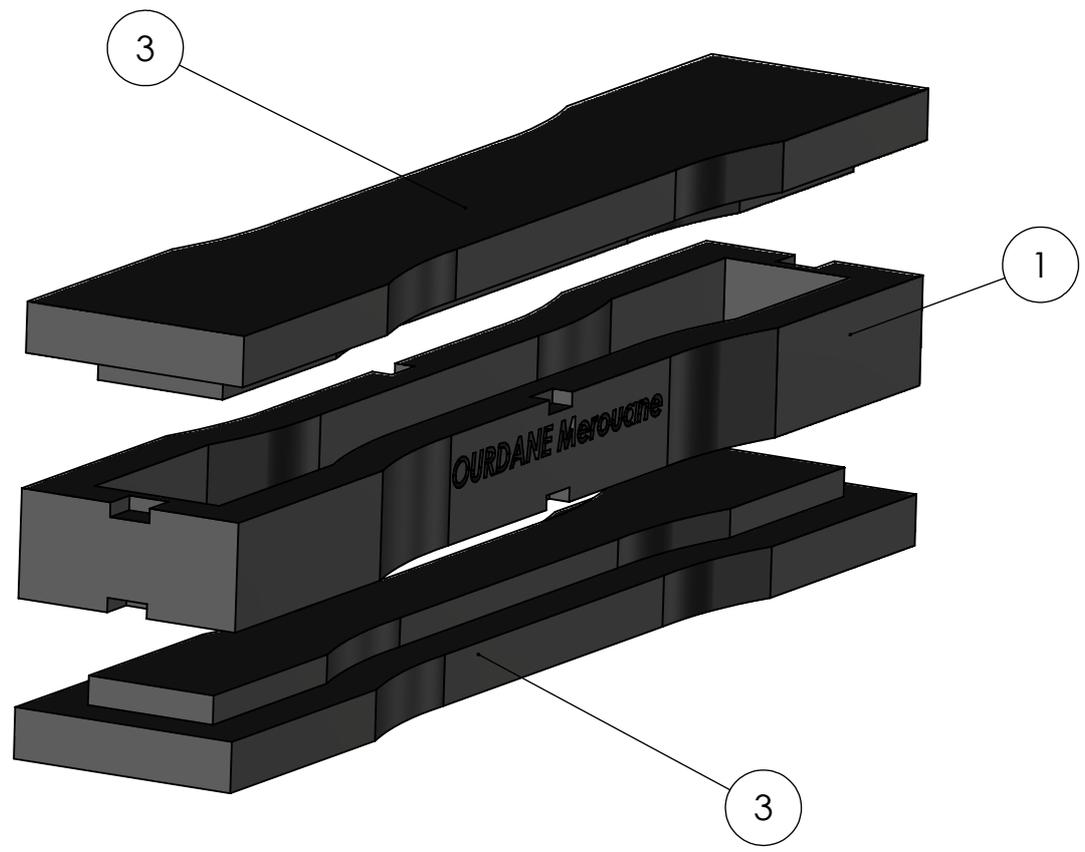
E

D

D

C

C



B

B

A

A

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	EPROUVETTE CORPS	PLA " ACIDE POLYLACTIQUE	1
3	CACHE 01	PLA " ACIDE POLYLACTIQUE	1
3	CACHE 02	PLA " ACIDE POLYLACTIQUE	1

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB. IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL. MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23	
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATÉRIAU:



TITRE:
**MOULE ÉPROUVETTES
ASTM D638**



No. DE PLAN

Mise en plan 25

A4



IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-02-3

PLA "acide polylactique"

2023-05-21

1/1

MASSE: 62 g

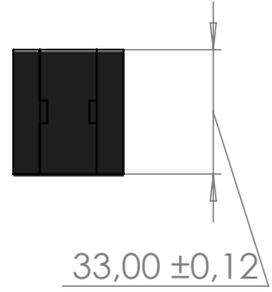
ECHELLE: 1:2

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F

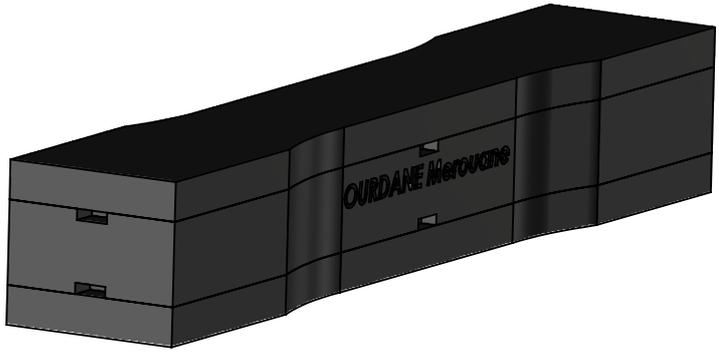


E

D



C



B

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



TITRE:
**MOULE ÉPROUVETTES
ASTM D638**



IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-02-4	PLA "acide polylactique"
2023-05-21	1/1
MASSE: 62 g	

No. DE PLAN
Mise en plan 26

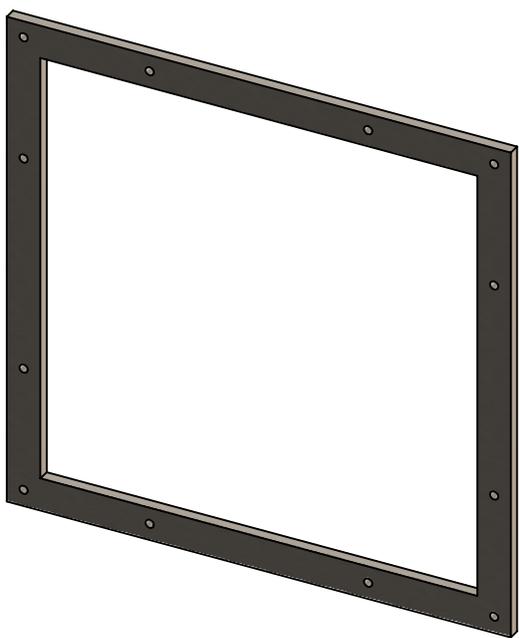
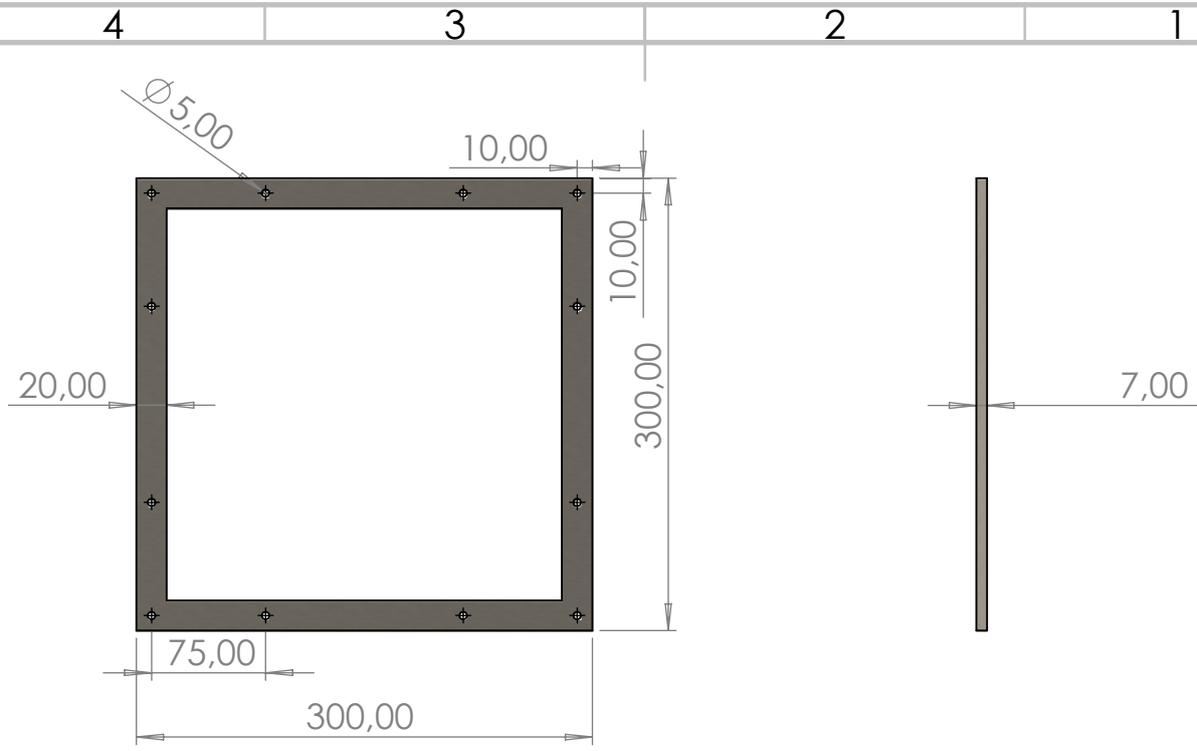
A4



ÉCHELLE: 1:2

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSI	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



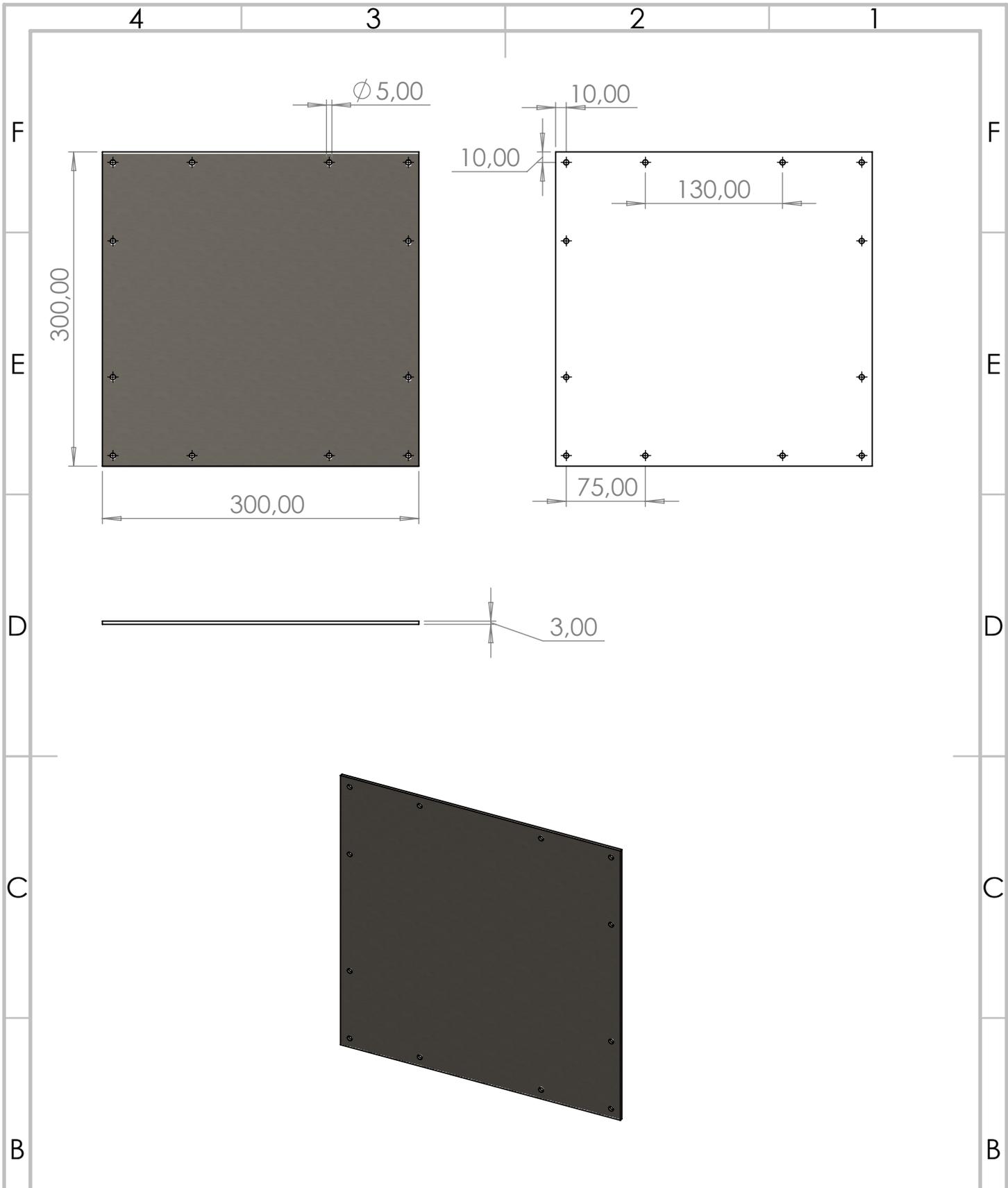
TITRE:
CADRE
Logo of Ecole Nationale Polytechnique

IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-03-1
2023-05-21 1/1

ACIER INOXYDABLE
MASSE: 200 g

No. DE PLAN
Mise en plan 27
A4
Echelle: 1:5
FEUILLE 1 SUR 1





SAUF INDICATION CONTRAIRE:
 LES COTES SONT EN MILLIMETRES
 ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
 TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
 LINEAIRES: +/- 0,12 mm
 ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
 FINITION PONCÉE**

CASSER LES
 ANGLES VIFS
 CHANFREINER LES
 ANGLES ET LES
 ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
 Langue : fr
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU: ACIER INOXYDABLE	
IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-03-2			MASSE: 269,29 g		
2023-05-21			1/1		



TITRE:
PLAQUE INFÉRIEURE



No. DE PLAN
Mise en plan 28
 A4
 ECHELLE:1:5
 FEUILLE 1 SUR 1





SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU:	



TITRE:
PLAQUE SUPÉRIEUR

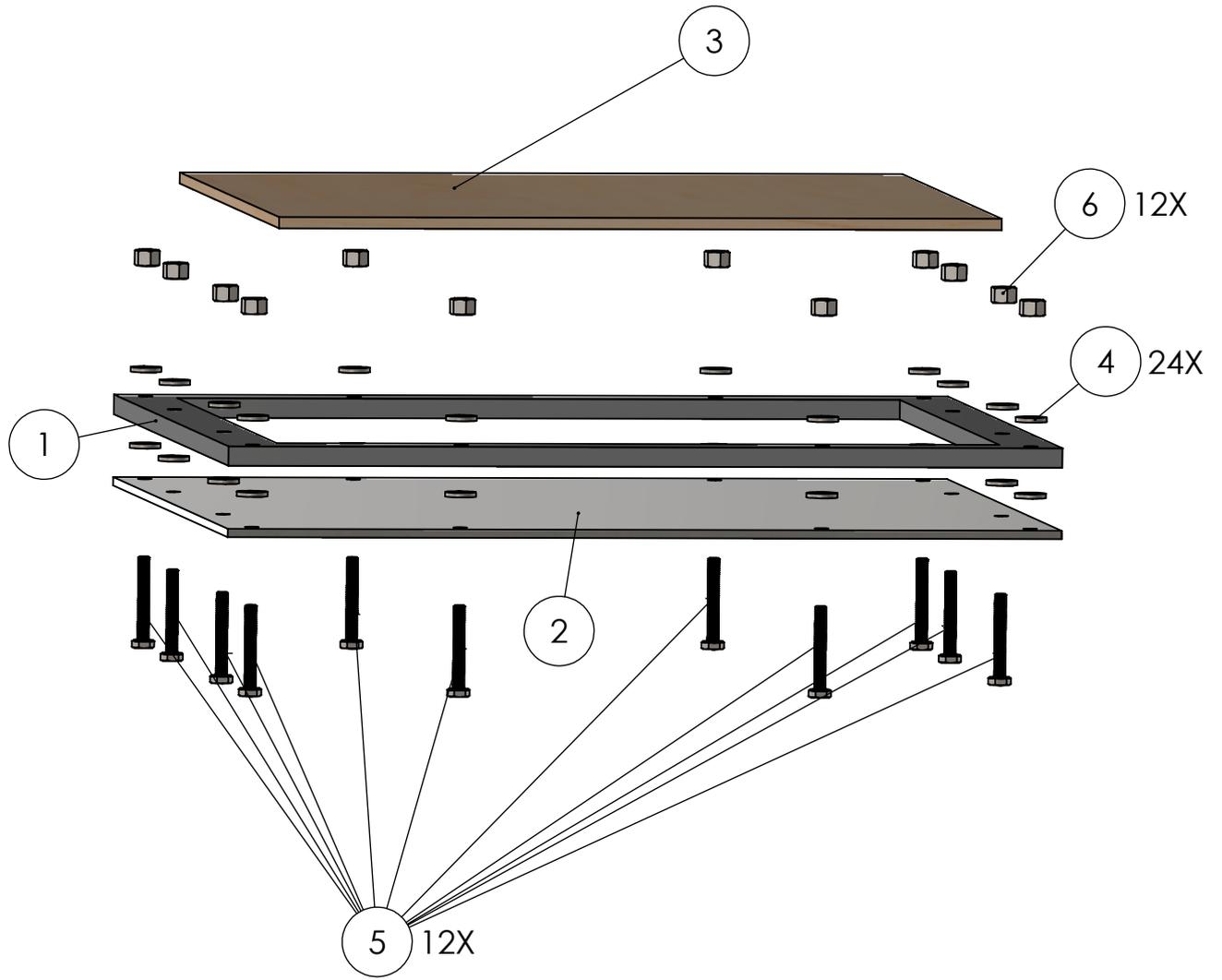


IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-03-3
2023-05-21 1/1

BOIS ERABLE
MASSE: 132.5 g

No. DE PLAN
Mise en plan 29

A4



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	Cadre	ACIER INOXYDABLE	1
2	Plaque inférieure	ACIER INOXYDABLE	1
3	Plaque supérieure	BOIS	1
4	ISO 10673-5.5-S	ACIER INOXYDABLE	24
5	ISO 4014 - M4 x 30 x 30-S	ACIER INOXYDABLE	12
6	ISO - 4034 - M5 - N	ACIER INOXYDABLE	12

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES ANGES VIFS
CHANFREINER LES ANGES ET LES ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE
Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOU	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23		



TITRE:
MOULE 2



MATÉRIAU:
**ACIER INOXYDABLE
BOIS**

No. DE PLAN
Mise en plan 30

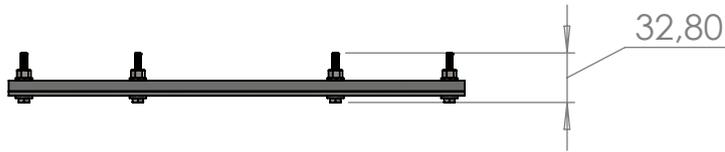
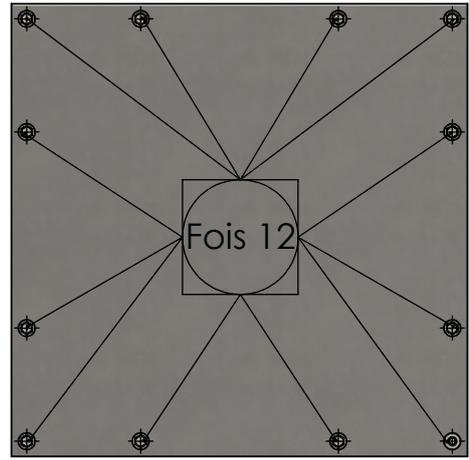
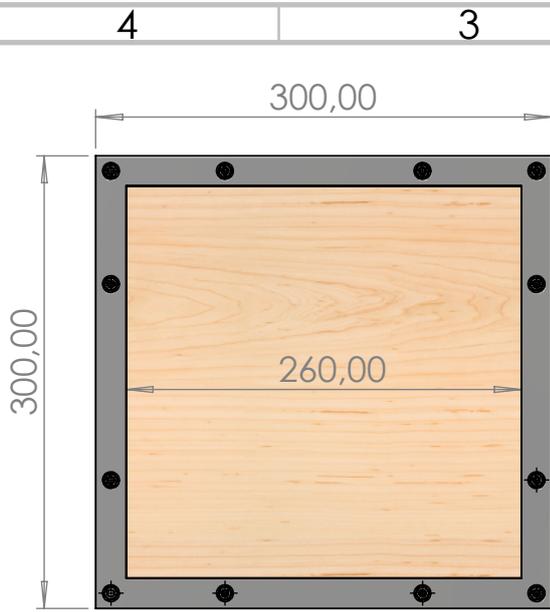
A4



IDENTIFIANT DU PROJET : PFE-2023-03-4
2023-05-21 1/1 MASSE: 862 g

ECHELLE: 1:2

FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE: FINITION PONCÉE
TOLERANCES: DE +/- 0,12 mm
LINEAIRES: +/- 0,12 mm
ANGULAIRES: +/- 1 DEGRÉ

FINITION:
**STANDARD/NATURELLE
FINITION PONCÉE**

CASSER LES
ANGLES VIFS
CHANFREINER LES
ANGLES ET LES
ARÊTES VIVES

CONSERVER L'ÉCHELLE

Langue : fr

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

	NOM	PRÉNOM	DATE	VERIF.	MESURE DIM
AUTEUR	OURDANE	MEROUANE	22/05/23	FAB.	IMPRESSION 3D
AUTEUR	SERAOUI	MOUNSIF	22/05/23	QUAL.	MICROMÈTRE
ENCDR	Pr.RECHAK	SAID	22/05/23		
ENCDR	Pr.SMAILI	AREZKI	22/05/23	ÉTAT DE LA PIÈCE : TERMINÉE	
ENCDR	Dr.BOUHELAL	ABDELHAMID	22/05/23	MATERIAU: ACIER INOXYDABLE BOIS	



TITRE:

**MOULE 02
ASSEMBLAGE**



No. DE PLAN

Mise en plan 31

A4



IDENTIFIANT
DU PROJET : PFE-2023-03-5

2023-05-21 1/1

MASSE: 863 g

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1