

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique

المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي بسكيكدة

Département de Physique et Chimie

قسم الفيزياء والكيمياء



Mémoire de fin d'étude

مذكرة التخرج

En vue de l'obtention du diplôme : Professeur d'enseignement moyen

لنيل شهادة: أستاذ التعليم المتوسط

التخصص: فيزياء

Spécialité: Physique

من إعداد:

شرايطي محمد اسلام

جبار محمد رامي

Thème الموضوع

دراسة وتحضير مواد مركبة على أساس مواد بوليميرية معززة بألياف قشور البيض

لجنة المناقشة:

الاسم و اللقب	الرتبة	المؤسسة الجامعية التي ينتمي اليها	الصفة
د- ميروزي غنية	أستاذ محاضر قسم أ	المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي- سكيكدة	رئيسا
أ.د- بابوري العيدي	بروفيسور	المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي- سكيكدة	مشرفا
د- دحاس و داد	أستاذ محاضر قسم أ	المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي- سكيكدة	ممتحنا

Promotion 2025 دفعة

Tables des matières

Dédicace.....	A
Remerciements... ..	B
Résumé.....	C
Liste des figures... ..	D
Liste des tableaux.....	E
Liste des symboles et abréviations... ..	F
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

1 Matériaux composites... ..	3
1.1 Introduction... ..	3
1.1.1 Définition... ..	3
1.1.2 Caractéristiques.....	4
2 La matrice.....	4
2.1 Les matrices organiques... ..	5
2.1.1 Les thermoplastiques.....	5
2.1.2 Les thermodurcissables... ..	6
1.2 Les matrices minérales... ..	8
2.2.1. Les matrices métalliques... ..	8
2.2.2. Les matrices céramiques	8
3 Le renfort.....	10
3.2 Classification... ..	11
3.2.1. Organique... ..	11
3.2.2. Minéraux	11
3.1.2.1Céramique	11
3.1.2.2Métallique.....	11
3.2 Architecture des renforts.	11
3.2.1 Discontinue.....	11

Tables des matières

3.2.2. Continue	12
3.2.2.1 Forme linéique.....	12
3.2.2.2 Forme surfacique.....	12
3.2.2.3 Mats.....	13
3.2.2.4. Tissue et rubans.....	13
3.2.2.4.1 Renforts bidirectionnels....	14
3.2.2.4.2 Renfort multidirectionnels.....	15
3.3 Ensimage.....	16
3.4 Interface renfort-matrice.....	17
4 Classification.....	18
4.1 Selon le renfort.....	18
4.1.1 Composites à particules.....	18
4.1.2 Composites à fibres.....	18
4.2 Selon la matrice.....	19
4.2.1 Composites à matrice métallique	19
4.2.2 Composites à matrice céramique.....	19
4.2.3 Composites à matrice organique....	20
5. Architecture	20
5.1. Monocouche	20
5.2. Stratifiée	21
5.3. Sandwiche	21
6. Procède de fabrication.....	22
6.1. Moulage au contact.....	22
6.2. Moulage par projection simultané.....	23
6.3. Moulage sous vide.....	25
6.4. Moulage par injection basse pression de résine RTM.....	26
6.5. Moulage par injection de compound BMC.....	27
6.6. Moulage par compression de mat pré imprégné SMC.....	27
6.7. Moulage par enroulement filamentaire	28

Tables des matières

6.8.	Moulage par centrifugation...	29
7.	Domaine d'application...	30
8	Résine Polyester	31
8.1	Définition.....	31
8.2	Synthèses des résines polyester.....	31
8.3.	Mécanismes de décrusement	32
8.4.	Propriété physique et mécanique.....	33
8.5.	Avantages et inconvénients.....	33
8.6	Domaines d'application	33
9	Coquilles d'œufs recyclés comme renfort.....	35
9.1	Définition de l'œuf.....	35
9.2	Composition de l'œuf	35
9.3	Bienfaits nutritionnels de l'œuf	36
9.4	Les coquilles d'œufs : Définition, valorisation.....	34
9.4.1	Définition	34
9.4.2	Composition.....	35
10	Utilisation dans les composites : études existantes, avantages et limites.....	38
10.1	Études existantes	38
10.2	Avantages des coquilles d'œufs dans les composites	38
10.3	Limites et défis.....	39
Chapitre 2 : Matériaux et Méthodes		
2.1	Introduction.....	43
2.2	Matériaux.....	43
2.2.2	Le renfort : coquilles d'œufs.....	45
2.2.2.1	Prétraitement des coquilles d'œufs: nettoyage, séchage, découpe	45
2.2.2.2	traitement:des coquilles d'œufs.....	46
2.2.2.3	Fabrication des composites.....	48
2.3	Technique expérimental	51
2.3.1	Essais mécaniques.....	51

Tables des matières

2.3.1.1 Essai de traction : module d'Young, résistance à la traction...	51
2.3.1.2 Essai de dureté.....	52
2.3.2 Analyses physique.....	53
2.3.2.1 Densité.....	53

Chapitre 3 : Résultats et discussions

3.1 Introduction	57
3.2 Résultats des essais mécaniques.....	57
3.3 Résultats des essais physique.....	59
4. Conclusion Générale	61

Dédicace

Je dédie cette proposition à :

À ceux qui ont marqué nos cœurs et soutenu nos pas tout au long de ce parcours...

À nos chers parents, sources d'amour, de force et de patience. Rien ne serait possible sans vos sacrifices silencieux et votre soutien inconditionnel.

À nos pères, piliers solides de nos vies, modèles de persévérance et de courage.

À nos mères, dont les prières ont illuminé notre chemin, dont l'amour fut la lumière dans nos nuits les plus sombres.

À nos frères et sœurs, compagnons de route et de cœur, merci pour votre présence constante.

À nos amis sincères, qui ont partagé avec nous les efforts, les doutes et les joies, merci d'avoir été là, tout simplement.

À nos enseignants, guides précieux de notre savoir, et à tous ceux qui nous ont transmis un mot, un conseil, une valeur.

À toute personne qui nous a tendu la main, soutenus par un geste, un regard, une prière...

Ce travail est le fruit de notre persévérance, mais il porte en lui un peu de chacun de vous. Merci d'avoir été une partie de ce chemin.

Mohamed Rami Djebbar

Dédicace

Je dédie cette proposition à :

J'apprécie leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leurs sacrifices.

J'espère que vous trouverez ici l'expression de ma profonde gratitude pour ma cause.

A mon frère et mes sœurs pour leurs encouragements et leur présence rassurante à chaque étape de ces avions.

À mes amis fidèles qui ont cru en moi et qui ont envoyé ce message anonyme.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail

Cheraiti Mohamed Islem

Remerciment

Ce mémoire est le fruit de notre travail à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Allah le Tout-Puissant, qui nous a guidés sur le bon chemin et nous a donné la force, le courage, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

*C'est avec une profonde gratitude que nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à notre directeur de mémoire, Monsieur **Laidi BABOURI**, professeur à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda. Sa patience inébranlable, ses conseils d'une acuité remarquable et son soutien indéfectible ont constitué des piliers inestimables tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Nous lui sommes particulièrement redevables de nous avoir ouvert les portes de son bureau et d'avoir suivi l'évolution de ce travail avec une rigueur exemplaire, et ce, malgré ses multiples responsabilités administratives.*

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail de recherche.

- *Madame le docteur **Ghania MIROUZI**, présidente du jury.*
- *Madame le docteur **Ouided DEHAS**, membre examinatrice.*

*Nous adressons notre plus profonde reconnaissance au **Dr Ouided DEHAS** et au **Dr Yasmina BISKRI** pour leurs interactions scientifiques enrichissantes qui ont grandement contribué à la compréhension des implications des résultats de notre recherche.*

Nous tenons à remercier le département de Physique et chimie pour nous avoir permis d'y mener une partie des travaux nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également aux personnes suivantes pour leur contribution à ce projet :

- *L'équipe du laboratoire de chimie et thermodynamique d'ENSET Azzaba : Monsieur **Mohamed MESSIKH, Fares DJEBIHA** .*
- *Les techniciens de laboratoire de K-Plast Tube-Sétif*

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.

Mohamed Islem CHERAITI et Mohamed Rami DJEBAR

Résumé

Ce mémoire vise à étudier, élaborer et caractériser des biocomposites innovants à base de résine polyester insaturée, renforcés par la poudre de coquilles d'œuf, qui est un déchet biologique valorisable.

Pour atteindre cet objectif, les coquilles d'œuf ont été traitées par des méthodes physiques et chimiques afin d'améliorer leurs propriétés réactives avant leur incorporation dans le matériau polymère. L'objectif principal était d'étudier l'influence de cette poudre, à différents taux d'intégration (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %), sur les propriétés physiques et mécaniques des composites fabriqués.

Les résultats ont montré que l'ajout de poudre de coquilles d'œuf augmente progressivement la rigidité du matériau (module de Young). Ils ont également révélé une amélioration de la dureté Shore, malgré l'observation d'une phase de stabilisation qui suggère des interactions complexes à certains pourcentages de poudre. De plus, l'incorporation de poudre de coquilles d'œuf a conduit à une augmentation de la densité du matériau jusqu'à atteindre un point de saturation.

Mots-clés : Polyester, coquilles d'œuf, matériaux composites, déchets organiques, essais mécaniques et physiques, recyclage, matrice.

Abstract

This thesis aims to study, elaborate, and characterize innovative biocomposites based on unsaturated polyester resin, reinforced by eggshell powder, which is a valorizable biological waste.

To achieve this objective, the eggshells were treated by physical and chemical methods to improve their reactive properties before their incorporation into the polymeric material. The main goal was to study the influence of this powder, at different incorporation rates, on the physical and mechanical properties of the manufactured composites.

The results showed that the addition of eggshell powder progressively increases the material's stiffness (Young's modulus). They also revealed an improvement in Shore hardness, despite the observation of a stabilization phase which suggests complex interactions at certain powder percentages. Furthermore, the incorporation of eggshell powder led to an increase in the material's density until a saturation point was reached.

Keywords: Polyester, eggshells, composite materials, organic waste, mechanical and physical tests, recycling, matrix.

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتصنيع وتوصيف المركبات الحيوية المبتكرة القائمة على راتنج البوليستر غير المشبع، المدعّمة بمسحوق قشور البيض، والذي يُعد نفايات بيولوجية قابلة لإعادة التدوير.

لتحقيق هذا الهدف، تمت معالجة قشور البيض بطرق فيزيائية وكيميائية لتحسين خصائصها التفاعلية قبل دمجها في المادة البوليمرية. تمثل الهدف الأساسي في دراسة تأثير هذا المسحوق بمعدلات دمج مختلفة على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمركبات المُصنّعة.

أظهرت النتائج أن إضافة مسحوق قشر البيض يزيد تدريجياً من صلابة المادة (معامل يونغ). كما بيّنت تحسناً في صلابة الشور، رغم ملاحظة مرحلة استقرار تشير إلى تفاعلات معقدة عند نسب معينة من المسحوق. بالإضافة إلى ذلك، أدت إضافة مسحوق قشور البيض إلى زيادة كثافة المادة حتى بلوغ نقطة التشبع.

الكلمات المفتاحية: بوليستر، قشور البيض، مواد مركبة، نفايات عضوية، اختبارات ميكانيكية وفيزيائية، إعادة التدوير، مصفوفة.

Liste de figures

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

Figure 1.1 : composition d'un matériau composite.....	3
Figure 1.2 : Classification les différents types de la matrice.....	5
Figure 1.3 : Principales propriétés physiques des thermdurcissables.....	10
Figure 1.4 : Armature unidirectionnelle.....	13
Figure 1.5 : Illustration des tissus et rubans	14
Figure 1.6 : (a)forme toile ou taffetas, (b) forme tissage sergé, (c)forme satin.....	15
Figure 1.7 : illustre un exemple typique de renfort multidirectionnel, dans lequel les fibres sont disposées selon plusieurs orientations, formant ainsi une architecture tridimensionnelle robuste	16
Figure 1.8 : Désignation d'une âme nid d'abeille.....	21
Figure 1.9 : moulage par projection simultanée.....	23
Figure 1.10 : moulage au contact : 1-Moule, 2-Gecolat,3-Résine+renfort, 4-résine, 5-ébulleur, 6-renfort.....	24
Figure 1.11 : : moulage sous vide	25
Figure 1.12 : Moulage par injection basse pression de résine (RTM).....	27
Figure 1.13 : Moulage par compression de mat pré imprégné SMC.....	28
Figure 1.14 : Moulage par enroulement filamentaire	29
Figure 1.15 : Moulage par centrifugation	30
Figure 1.16 : formule chimique de polyester insaturé	31
Figure 1.17 : Synthèse des résines polyesters.....	32
Figure 1.18 : Domaines d'application des résines polyester (exemple)	34.
Figure 1.19 : les composants de l'œuf.....	35

Chapitre 2 : Matériaux, Techniques et conditions expérimentales

Figure 2.1 : Photographie de la résine et le durcisseur... ..	44
Figure 2.2 : Photographie des tapes de prétraitement.....	46
Figure 2.3 : Photographie des tapes de traitement.....	47
Figure 2.4 : Photographie du moule silicone.....	48
Figure 2.5 : Photographie des quantités des renforts et composites élaborées.....	50
Figure 2.6 : Photographie de la machine zwick roell z010... ..	52
Figure 2.7 : Photographie de l'appareil de dureté	53

Liste de figures

Figure 2.8 : Photographie de la balance de densité 55

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Figure 3.1 : Variations du module de Young des bio-composites en fonction du taux de fibres (B)..... 57

Figure 3.2 : Evolution de la duréte en fonction du pourcentage en poids de la poudre de coquilles d'œufs.....58

Figure 3.3 : Variations de la densité des bio-composites UPR /poudre de coquilles d'œufs.....59

Listes des tableaux

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

Tableau 1.1: Avantages et inconvénients des thermoplastiques	6
Tableau 1.2: Propriétés de certains thermoplastiques courants	6
Tableau 1.3 : Principales propriétés physiques des thermodurcissables.....	7
Tableau 1.4 : Avantage et inconvénients des thermodurcissable... ..	7
Tableau 1.5 : Propriétés physiques et mécaniques de Polyester	33
Tableau 1.6 : Avantages et Inconvénients de la résine polyester	33
Tableau 1.7 : Composition de l'œuf	35
Tableau 1.8 : Composants principaux d'œuf	37

Chapitre 2 : Matériaux, Techniques et conditions expérimentales

Tableau 2.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la matrice	44
Tableau 2.2 : Désignation des composites avec le taux PCR Correspondant	50

Listes abrégées des symboles

Symbole et/ou abréviation	Désignation
PP	Polypropylène.
HDPE	HDPE Polyéthylène Haut Densité.
PVC	Polychlorure de vinyle.
PS	Polystyrène.
PET	Polyéthylène téréphtalate
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrene
PMMA	Poly (méthacrylate déméthylé)
CMM	Composite à matrice métallique.
CMC	Composite à matrice céramique
CMO	Composites à matrice organique.
RTM	Moulage par injection basse pression de résine.
BMC	Moulage par injection de compound
SMC	Moulage par compression de mat pré imprégné.
PCR	Pourcentage de charge en renfort (fibres de coquille d'œuf)
MC	Matériaux composites
RP	Résine polyester
MEKP	Méthyl ethyl cétone peroxyde (durcisseur)
ATG / TGA	Analyse thermogravimétrique
DSC	Analyse calorimétrique différentielle
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de fourier
DRX	Diffraction des rayons X
DMA	Analyse dynamique mécanique
MEB	Microscopie électronique à balayage
Micro-CT	Tomographie aux rayons X (en 3D)
NaOH	Hydroxyde de sodium (dégraissage alcalin)

Listes abrégées des symboles

PLA	Acide polylactique (biopolymère biodégradable)
COV	Composés organiques volatils
Tg	Température de transition vitreuse
Tm	Température de fusion
Tc	Température de cristallisation
ΔH	Variation d'enthalpie
ρ (rho)	Densité
E	Module d'Young (module d'élasticité en traction)
σ (sigma)	Contrainte mécanique (en MPa)
ε (epsilon)	Déformation (en %)
Fmax	Force maximale appliquée (en N)
Se	Section initiale de l'éprouvette (en mm ²)
L0, L	Longueur initiale et finale d'un échantillon (en mm)
UV	Ultra-Violet (dans les essais de vieillissement accéléré)
Eq.	Équation (numérotée dans le texte)
Cpc0 à Cpc6	Désignation des composites avec différents taux de PCR
Shore D	Échelle de dureté (essais de dureté sur polymères)

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par une demande croissante en matériaux performants et la nécessité impérieuse de développer des solutions plus respectueuses de l'environnement, l'ingénierie des matériaux se tourne résolument vers la conception de composites innovants. Ces matériaux hybrides, combinant les avantages de plusieurs constituants, offrent des propriétés sur mesure et un potentiel considérable pour diverses applications industrielles. Parmi les matrices polymères largement employées, les résines polyester insaturées (UPR) occupent une place de choix grâce à leur polyvalence, leur coût abordable et leurs bonnes performances mécaniques. Cependant, l'intégration de charges de renfort écologiques demeure un axe de recherche majeur pour réduire leur empreinte environnementale et optimiser leurs caractéristiques.

C'est dans cette optique que ce travail explore le potentiel prometteur de l'utilisation de la **poudre de coquille d'œuf** comme charge de renfort dans les composites à base de résine polyester insaturée. La coquille d'œuf, un bio-déchet abondant issu de l'industrie agroalimentaire, principalement composée de carbonate de calcium, représente une ressource sous-exploitée offrant une alternative durable aux charges minérales conventionnelles. Sa valorisation s'inscrit parfaitement dans les principes de l'économie circulaire, transformant un déchet en une matière première à haute valeur ajoutée.

L'objectif de ce travail de recherche est d'évaluer l'influence de l'incorporation de la **poudre de coquille d'œuf** sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux obtenus, afin d'en cerner la performance et la faisabilité pour des applications structurelles. Les investigations menées dans le cadre de cette étude contribueront à une meilleure compréhension des interactions matrice-charge et à l'établissement d'une base de connaissances pour le développement futur de matériaux composites plus durables et performants. Pour ce faire, différents taux d'incorporation de poudre de coquille d'œuf, à savoir 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 % seront utilisés afin d'identifier leur effet optimal sur les caractéristiques des composites étudiés.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux, précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion générale :

Chapitre 1 : État de l'art Ce chapitre dressera un panorama des connaissances existantes sur les matériaux composites à matrice polymérique, en mettant l'accent sur l'utilisation de la **poudre de coquille d'œuf** comme renfort. Il abordera également les différentes techniques d'élaboration et de caractérisation de ces matériaux, ainsi que les applications potentielles des **biocomposites**.

Chapitre 2 : Matériaux, méthodes et conditions expérimentales Ce chapitre détaillera les matériaux utilisés (matrice polymérique, **coquilles d'œuf**), les méthodes de préparation et de traitement, ainsi que les protocoles expérimentaux mis en œuvre pour l'élaboration des composites. Il précisera également les conditions opératoires et les équipements utilisés pour la caractérisation des échantillons.

Chapitre 3 : Résultats et discussions Ce chapitre présentera l'ensemble des résultats obtenus lors des caractérisations mécaniques, thermiques et morphologiques des composites élaborés. Une discussion approfondie des résultats sera menée, permettant

d'analyser l'influence de la **poudre de coquille d'œuf** sur les propriétés des composites et de comparer nos observations avec les données de la littérature.

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

Ce chapitre présente la synthèse des recherches bibliographiques réalisées dans le cadre de ce mémoire.

1. Matériaux composites :

1.1 Introduction :

L'évolution historique des matériaux composites s'étend de l'antiquité à nos jours, commençant par l'utilisation de matériaux naturels tels que le bois, et puis se développant vers les fibres de verre et de carbone, et enfin vers les matériaux composites avancés et durables [1]. Devant les enjeux environnementaux et économiques croissants, les ressources naturelles renouvelables gagnent en importance, et tant qu'alternative durable aux matériaux classiques. Le renforcement naturel par des bio fibres a été choisi pour ces propriétés uniques afin d'améliorer l'efficacité de la production et de réduire les coûts.

L'avancement technologique dans les matériaux composites permet l'émergence de nouvelles idées innovantes et découvre les mystères de la nature [2].

1.1.1 Définition :

Les composites, ou matériaux composites sont des matériaux obtenus en combinant deux ou plusieurs matériaux non miscibles de natures différentes, pour créer une nouvelle substance dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément [4].

En générale un matériau composite (MC) est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue appelée renfort, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue appelée la matrice qui assure la cohésion de la structure et le transfert de charges entre les renforts [5,6].

Exemples de matériaux composites courants :

- **Composites en fibre de verre :** fibres de verre dans une matrice polymère.
- **Composites en fibre de Carbone :** fibres de carbone dans une matrice de résine époxy.

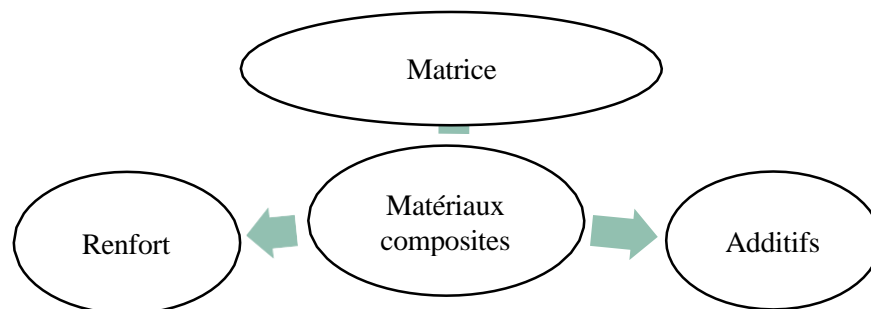


Figure 1.1 : composition d'un matériau composite.

1.1.2 Caractéristiques :

Les propriétés des matériaux composites dépendent de plusieurs facteurs, notamment :

- La nature et la quantité des matériaux constitutifs.
- La géométrie ainsi que la répartition du renfort.
- Les interactions et l'interface entre la matrice et le renfort.

Les principales caractéristiques des matériaux composites sont les suivantes :

- Légèreté (réduction significative de la masse).
- Bonne résistance à la fatigue.
- Excellente tenue aux chocs et aux impacts.
- Grande liberté de conception et de forme.
- Bonne durabilité face au vieillissement, à l'humidité, à la chaleur et à la corrosion.
- Sensibilité variable aux produits chimiques, en fonction de la nature des composants.
- Propriétés d'isolation électrique, selon le type de composite utilisé.
- **Anisotropie**, dont les propriétés mécaniques varient en fonction de la direction des efforts appliqués [4].

2 Matrice :

La matrice est la phase continue d'un MC, est essentiellement pour rôle de lier les renforts (fibres, particules,), de les protéger contre les agressions extérieures, la corrosion, l'usure et de donner la forme finale du matériau. [7]

La matrice est généralement homogène et isotrope [8]. Il existe plusieurs types de matrices qui peuvent être classées en matrices organiques (Thermoplastique, Thermodurcissable) et matrices minérales (Métallique, Céramique). Dans le cas où nous le classifions par la nature on trouve les matrices polymères (Les matrices thermodurcissables, les matrices thermoplastiques ...) et des matrices naturelles composées de polymères d'origine naturelle, sont minérales (chaux, argile, enduit), animales (graisse, os) ou végétales (chimie des sucres ou biochimie) [9]. La classification des types de matrices est présentée sur **la figure 1.2**.

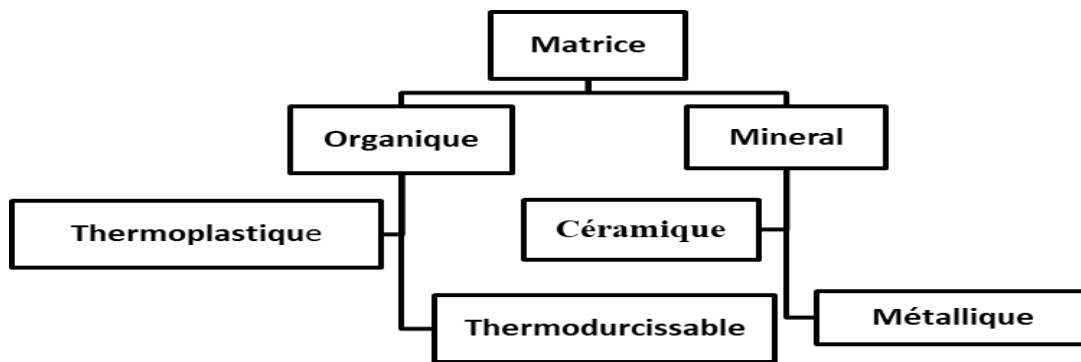


Figure1.2 : Classification les différents types de la matrice.

2.1 Les matrices organiques :

Dans les composites à matrice organique, la matrice souvent appelée résine est un polymère issu d'hydrocarbures saturés.

On distingue deux grandes familles : Les thermoplastiques et les thermodurcissables. Chaque type possède des propriétés mécaniques et comportementales spécifiques.

Le recours à une matrice organique dans les matériaux composites s'explique par les avantages qu'elle offre au produit final :

- **Légèreté** : Grâce à leur faible densité, ces matrices permettent d'obtenir des matériaux très légers, un atout majeur notamment dans les secteurs du transport, de l'aéronautique et du bâtiment.
- **Bonne résistance mécanique** : Malgré leur légèreté, ces composites peuvent atteindre des niveaux de résistance comparables, voire supérieurs, à certains métaux.
- **Isolation électrique et thermique** : Ces matrices présentent une faible conductivité, ce qui les rend idéales pour des utilisations nécessitant une isolation contre la chaleur ou l'électricité.
- **Résistance à la corrosion** : Les matrices organiques possèdent une nature inerte qui leur confère une excellente résistance à la corrosion. Cette propriété est particulièrement utile dans les environnements agressifs ou exposés à l'humidité

Le choix entre une matrice thermoplastique et une thermodurcissable se fait en fonction des besoins spécifiques de l'application ainsi que des propriétés souhaitées pour le matériau composite final.

2.1.1 Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont des polymères formés de longues chaînes linéaires ou ramifiées, issues de réactions de polyaddition.

Ces chaînes peuvent être semi-cristallines ou amorphes. A température ambiante, les thermoplastiques sont généralement rigides et solides.

Lorsqu'ils sont chauffés au-delà de leur température de transition vitreuse (T_g), ils deviennent malléables et peuvent être façonnés selon la forme désirée. En refroidissant, ils retrouvent leur rigidité.

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

Ce qui distingue les thermoplastiques, c'est que leur structure chimique ne se modifie pas pendant ce cycle thermique. Ainsi, le chauffage et le refroidissement peuvent être répétés plusieurs fois, ce qui rend leur usage réversible et leur recyclage plus facile.

Tableau1.1 : Avantages et inconvénients des thermoplastiques [4-5]

Avantages	Inconvénients
Recyclable. Légers. Peu couteux. Facile à manipuler. Bonne résistance à l'impact. Moins polluantes.	Point de fusion bas. Mauvaise résistance aux solvant organique et polaire. Faible résistance mécanique et chimique.

Tableau1.2 : Propriétés de certains thermoplastiques courants [2].

Polymère	Tg(°c)	Tf(°c)	Température de thermof ormage	Densité (g /cm ³)	Module d'élasticité (GPa)	Coefficient de dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°c)
PP	-5	165	150-195	0,92	30	1,2
HDPE	-100	134	130-205	0,95	28	1,1
PVC	75-105	160-220	100-180	1,39	58	2,9
PS	90-100	240	130-155	1,05	55	3,2
PET	70	255-265	120-170	1,30	47	2,6
ABS	90-120	230	130-200	1,05	50	2,5
PMMA	100	270	150-190	1,18	72-80	3,3

2.1.2 Les thermodurcissables :

Les thermodurcissables, ou polymères réticulés, sont des macromolécules rigides à structure tridimensionnelle, obtenues par une réaction chimique irréversible appelée réticulation. Contrairement aux thermoplastiques, qui peuvent être fondus puis remodelés, les thermodurcissables subissent un durcissement définitif qui les rend infusibles et insolubles. Cette structure réticulée dense leur confère d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques, supérieures à celles des thermoplastiques.

Deux voies principales permettent d'obtenir ces matériaux :

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

✓ **La polycondensation ou polymérisation** : au cours de laquelle des monomères réagissent entre eux pour former de longues chaînes polymères. Celles-ci s'entrelacent et se lient pour constituer un réseau tridimensionnel.

- **La réticulation de macromolécules linéaires** : déjà formés sont reliés par des agents réticulant, générant des liaisons permanentes entre les chaînes.

La réticulation, initiée par la chaleur, un catalyseur ou les deux, transforme les matières premières liquides ou en poudre en un matériau rigide et solide. C'est cette transformation irréversible qui distingue fondamentalement les thermodurcissables des thermoplastiques [6].

Tableau 1.3 : Principales propriétés physiques des thermodurcissables.

Résine	Densité (kg/m ³)	Module d'élasticité (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson (ν)	Temp. de déviation thermique (°C)	Cond. Therm. (W/m°C)	Temp. de service (°C)
Epoxy de	1200	4500	1600	0,4	130	0,2	90 – 200
Phénolique	1300	3000	1100	0,4	70	0,3	120 – 200
Polyester	1200	4000	1400	0,4	80	0,2	60 – 200
Polycarbonate	1200	2400	-	0,35	60	-	120
Vinyle ester	1150	3300	-	-	75	-	> 100
Silicone	1100	2200	-	0,5	35	-	100 – 350
Uréthane	1100	700 - 7000	-	-	30	-	100

Tableau 1.4 : Avantages et inconvénients des thermodurcissables.

Avantages	Inconvénients
Résistance chimique, thermique et mécanique élevée. Bonne adhésion aux renforts. Légèreté. Bonne résistance aux solvants et à l'humidité.	Coût plus élevé. Non recyclables.

2.2 Les matrices minérales :

Les matrices minérales sont des matériaux composés essentiellement d'éléments inorganiques tels que : le carbure de silicium (SiC), le carbone ou encore certaines céramiques. Leur principal atout réside dans leur excellente résistance aux températures extrêmes, pouvant dépasser les 1000 °C. Cette caractéristique les rend particulièrement adaptées aux environnements thermiquement contraignants, comme ceux des moteurs, des fours industriels ou encore des systèmes de freinage [7].

2.2.1 Les matrices métalliques :

Les matrices métalliques sont constituées soit de métaux purs, tels que le magnésium ou le titane, soit d'alliages métalliques combinant un métal principal avec d'autres éléments pour en optimiser les propriétés. Parmi les alliages les plus utilisés, on retrouve ceux à base d'aluminium ainsi que l'acier [2].

Ces matrices offrent plusieurs avantages notables :

- **Excellente conductivité thermique et électrique :** Les métaux transmettent efficacement la chaleur et l'électricité, ce qui est essentiel dans des domaines comme l'électronique ou la gestion thermique.
- **Bonne résistance à l'usure, au feu et au vieillissement :** Les alliages métalliques offrent une meilleure durabilité face à la chaleur, aux flammes et aux frottements, ce qui prolonge leur durée de vie.
- **Grande rigidité et solidité mécanique :** Grâce à leur robustesse, ces matrices sont idéales pour les structures soumises à des contraintes mécaniques élevées.

Cependant, leur principal inconvénient est leur densité élevée, ce qui limite leur utilisation dans des applications où la légèreté est un critère essentiel [2-7]

- **Domaines d'application :** Grâce à leurs propriétés physiques et mécaniques, les matrices métalliques sont largement utilisées dans plusieurs secteurs :
- **Aéronautique et aérospatiale :** Les alliages d'aluminium et de titane y sont privilégiés pour leur combinaison de légèreté et de résistance.
- **Industrie automobile :** De nombreuses pièces, allant des carrosseries aux composants moteurs, sont fabriquées à partir de matrices métalliques.

2.2.2 Les matrices céramiques :

Les matrices céramiques sont des matériaux inorganiques à la fois rigides et fragiles, composés de substances cristallines dont la structure et la composition varient. Elles sont généralement constituées d'un ou de plusieurs métaux combinés avec un élément non métallique, l'oxygène étant le plus fréquent. Parmi les exemples les plus répandus, on peut citer l'alumine (Al_2O_3), la silice (SiO_2) et la magnésie (MgO) [8].

Ces matrices se distinguent par un ensemble de propriétés remarquables qui les rendent particulièrement adaptées aux environnements extrêmes et aux applications nécessitant une haute résistance thermique et chimique.

Ces matrices sont particulièrement adaptées à des usages spécifiques :

- ✓ **Excellente résistance chimique** : elles sont peu sensibles à la corrosion et résistent à de nombreux agents chimiques, ce qui les rend efficaces dans des environnements agressifs.
- ✓ **Point de fusion élevé et faible conductivité thermique** : leur capacité à supporter des températures extrêmes sans fondre, associée à une faible conductivité thermique, les rend idéales pour les applications à haute température et nécessitant une bonne isolation thermique.
- ✓ **Bonne résistance à la compression** : elles peuvent supporter des charges élevées sans se déformer, ce qui en fait des matériaux performants pour des applications sous contraintes mécaniques.
- ✓ **Grande rigidité et stabilité thermique** : leur rigidité combinée à une excellente tenue aux hautes températures les rend adaptées aux structures soumises à des conditions sévères. Souvent, les matrices céramiques sont élaborées sous forme de structures multicouches. Cette architecture favorise la formation d'interfaces et de déviations de fissures, ce qui améliore leur ténacité et leur résistance à la rupture, les rendant plus durables face aux chocs [2]. Grâce à ces caractéristiques, les matrices céramiques sont largement utilisées dans des secteurs variés, notamment :
 - ✓ **Aéronautique et aérospatiale** : elles entrent dans la fabrication de pièces de moteurs d'avions, de boucliers thermiques ou encore d'éléments structurels, grâce à leur robustesse face à la chaleur et à l'usure.
 - ✓ **Industrie automobile** : Les matrices céramiques sont largement utilisées dans cette industrie, notamment dans les systèmes de freinage, les pots catalytiques et certains composants du moteur. Leur popularité s'explique par leur excellente résistance à la chaleur, à l'usure et à la corrosion.
 - ✓ **Industrie électronique** : Dans ce domaine, les matrices céramiques interviennent dans la fabrication de circuits imprimés, de substrats pour circuits intégrés ainsi que de boîtiers pour composants électroniques, grâce à leurs propriétés isolantes et leur résistance thermique.
 - ✓ **Industrie médicale** : Les matrices céramiques trouvent également leur place dans les dispositifs médicaux, tels que les implants osseux, les prothèses articulaires et les instruments chirurgicaux, en raison de leur biocompatibilité, leur solidité et leur durabilité.

3 Le renfort :

Le renfort constitue un élément essentiel dans la conception des matériaux composites. Il en forme la structure de base, assurant la robustesse et les propriétés mécaniques élevées du matériau final.

Ce dernier peut être d'origine naturelle ou synthétique, et il est choisi en fonction des caractéristiques spécifiques recherchées dans le composite, comme la résistance à la traction, à la rupture, ou encore la dureté.

Par ailleurs, certains renforts permettent aussi d'améliorer des propriétés physiques supplémentaires telles que la résistance au feu, aux hautes températures, ainsi que certaines propriétés électriques ou chimiques [9].

Pour être performant dans un matériau composite, le renfort doit répondre à plusieurs critères essentiels :

- ✓ **Excellentes propriétés mécaniques** : Il doit offrir une grande résistance à la traction, à la compression et au cisaillement, afin de renforcer le matériau et lui permettre de supporter des charges importantes.
- ✓ **Faible masse volumique** : Un poids réduit est primordial, surtout dans les domaines où la légèreté est cruciale (aéronautique, transport, etc.).
- ✓ **Bonne compatibilité avec la matrice** : L'adhérence entre le renfort et la matrice doit être optimale pour assurer un bon transfert des contraintes et une cohésion globale du composite.
- ✓ **Facilité de mise en œuvre** : Le renfort doit être simple à manipuler et à intégrer au cours du processus de fabrication.
- ✓ **Coût raisonnable** : Un prix accessible est un facteur déterminant pour garantir la viabilité économique du composite [10].

Le choix du type de renfort dépendra donc des besoins spécifiques de l'application visée et des propriétés souhaitées du matériau final. Une classification des différents types de renforts est présentée à la **figure 1.3**.

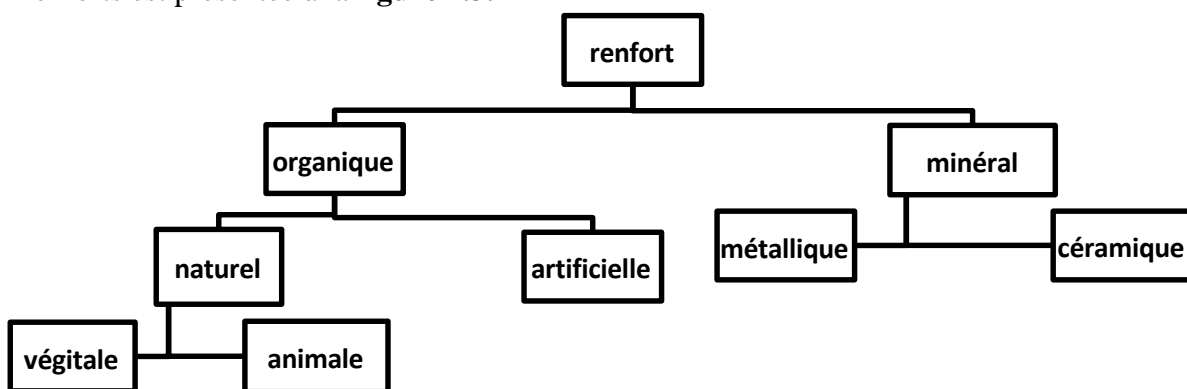


Figure 1.3 : classification de différents types de renfort.

3.1 Classification :

Les renforts jouent un rôle fondamental dans les matériaux composites en leur apportant une structure cohérente et en améliorant leurs propriétés mécaniques. Selon leur nature chimique et leur origine, ils peuvent être classés en plusieurs catégories. Cette section propose une classification claire des types de renforts les plus couramment employés dans les matériaux composites, en les répartissant principalement selon leur origine :

3.1.1 Renforts organiques :

Les renforts d'origine organique sont prisés pour leur légèreté, leur coût réduit et leur grande flexibilité de mise en œuvre. Parmi les exemples notables :

- ✓ **Fibres d'aramide (Kevlar)** : reconnues pour leur excellente résistance aux chocs et leur grande capacité d'absorption d'énergie, elles sont idéales pour les équipements de protection.
- ✓ **Fibres naturelles** : comme le lin, le chanvre ou le bambou, ces fibres sont renouvelables, biodégradables et de plus en plus valorisées pour leur faible impact environnemental.

3.1.2 Renforts minéraux :

Les renforts minéraux se caractérisent par leur résistance mécanique élevée, leur stabilité thermique et leur faible déformation dimensionnelle. On y retrouve notamment :

3.1.2.1 Renforts céramiques :

Fibres de verre : Ce sont des renforts à la fois économiques et polyvalents, offrant une bonne résistance à la corrosion ainsi qu'aux agents chimiques.

Fibres de carbone : Ces fibres sont réputées pour leur légèreté et leur excellente résistance, ce qui les rend idéales pour des applications à haute performance.

3.1.2.2 Renforts métalliques :

- **Acier** : Alliage de fer et de carbone, connu pour sa solidité et sa durabilité.
- **Aluminium** : Métal léger, présentant une bonne résistance à la corrosion. Il est privilégié lorsque la réduction du poids est un critère essentiel.
- **Titane** : Très résistant à la corrosion et léger, ce métal est utilisé dans des domaines où la biocompatibilité et la robustesse sont primordiales.

3.2 Architecture des renforts :

3.2.1 Discontinue :

Ces renforts sont composés de fibres courtes ou de particules (microbilles, fibres broyées, écailles, poudre) dispersées dans une matrice polymère. Ils permettent d'améliorer des propriétés spécifiques du matériau, telles que la résistance à l'usure, les performances thermiques et la légèreté.

La matrice demeure l'élément principal du composite, et l'ensemble forme ce que l'on appelle un « polymère renforcé » [11].

3.2.2 Continue :

Composés de fibres longues, ces renforts sont souvent employés dans les composites à haute performance. Ils confèrent au matériau une résistance à la rupture et un module d'élasticité nettement supérieurs à ceux de la matière massive équivalente.

Dans le cas des fibres de verre, on peut augmenter la longueur d'un facteur 10 000 ou multiplier la surface par 100 pour un même volume. Ces renforts jouent un rôle fondamental dans la tenue mécanique des composites, leur disposition étant adaptée aux propriétés mécaniques recherchées.

3.2.2.1 Forme linéique – Renforts unidirectionnels (UD) :

Les renforts UD sont constitués de fibres longues, fines (de l'ordre de quelques microns de diamètre), qui ne peuvent être utilisées isolément.

Pour des raisons pratiques, elles sont rassemblées sous forme de fils ou de mèches. La classification des différentes formes linéaires n'est pas encore standardisée, et s'inspire généralement de celle des fibres de verre.

A. Types de formes linéaires :

- a. **Fibre continue unitaire** : Également appelée filament ou monofilament, elle désigne la fibre individuelle la plus fine.
- b. **Monofilaments regroupés** : Les monofilaments peuvent être rassemblés sous forme de fils ou de mèches aux configurations variées.
- c. **Fils** : Les fils peuvent être de nature continue ou discontinue. Ils se caractérisent par leur masse linéique, appelée également "titre", qui dépend du diamètre et du nombre de filaments.

B. Unités de masse linéique :

- a. **Tex** : Il s'agit de l'unité traditionnelle, correspondant à la masse d'un fil de 100 mètres de longueur.
- b. **Kilogramme par mètre (kg/m)** : Il s'agit de l'unité recommandée par le Système International (SI).

La conversion entre le tex et le kg/m est donnée par la relation suivante [10] :

$$1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m} \qquad \text{eq1.1}$$

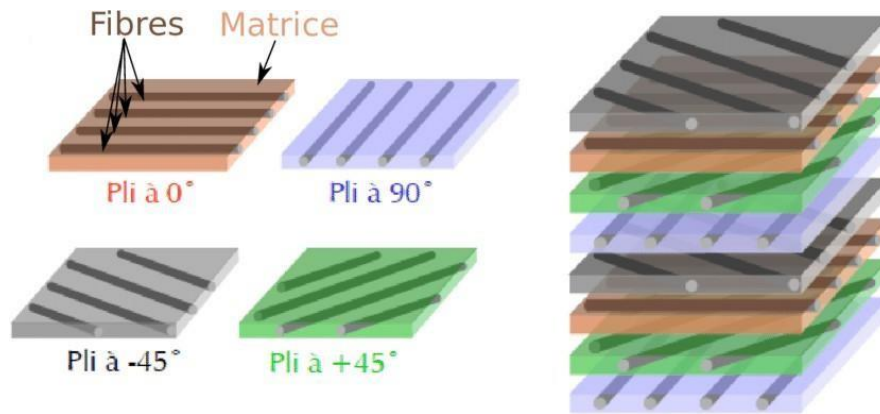


Figure 1.4 : Armature unidirectionnelle.

3.2.2.2 Formes surfaciques :

Les fils peuvent également servir à la fabrication de structures surfaciques telles que les mats, les tissus et les rubans. Ces formes sont principalement développées pour les fibres de verre.

3.2.2.3 Mats :

Les mats sont des nappes constituées de fils, continus ou discontinus, répartis aléatoirement dans un plan, sans orientation particulière.

Ils sont assemblés à l'aide d'un liant (soluble ou non dans la résine, selon le procédé de fabrication).

L'absence d'orientation privilégiée des fibres confère au mat des propriétés mécaniques isotropes dans son plan.

La principale distinction entre les mats de fils coupés et ceux de fils continus réside dans leur aptitude à la déformation :

- Les mats à fils coupés sont moins déformables.
- Les mats à fils continus permettent des déformations plus importantes, ce qui les rend adaptés au formage de pièces profondes.

Ces derniers sont couramment utilisés dans des procédés de moulage par compression, injection ou sous vide, entre un moule et un contre-moule [10].

3.2.2.4 Tissus et rubans :

- **Chaîne** : Ensemble de fils parallèles disposés dans un plan selon la direction longitudinale du tissu.
- **Trame** : Ensemble de fils qui s'entrecroisent perpendiculairement avec les fils de chaîne.

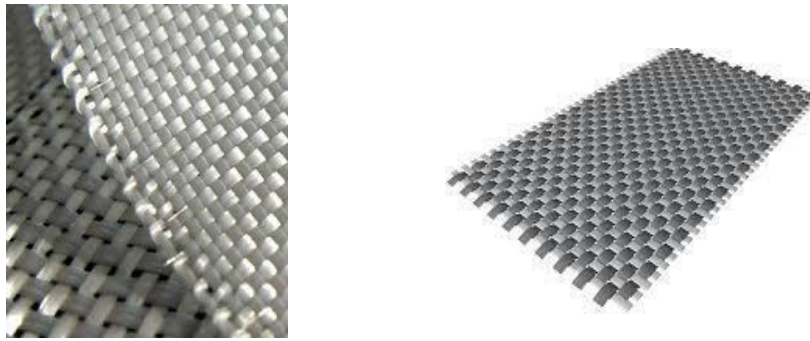


Figure 1.5 : Illustration des tissus et rubans.

3.2.2.4.1 Les renforts bidirectionnels,

également appelés tissus, sont des structures souples formées par l'entrelacement régulier de fils tissés ou torsadés. Ces fils sont disposés selon deux directions perpendiculaires : la chaîne (dans le sens de la longueur) et la trame (dans le sens de la largeur). La manière dont ces fils sont agencés, appelée armure, détermine à la fois la structure du tissu et ses propriétés mécaniques.

- A. **Armure toile (ou taffetas) :** C'est l'armure la plus basique. Chaque fil de chaîne passe alternativement au-dessus et au-dessous de chaque fil de trame, et inversement. Le tissu obtenu est plat, rigide et peu extensible. Il présente un embuvage important, c'est-à-dire une grande capacité à absorber la résine.

- B. **Sergée :** Dans ce type de tissage, chaque fil de chaîne passe au-dessus de plusieurs fils de trame (n), tandis que chaque fil de trame passe au-dessus de plusieurs fils de chaîne (m), où n et m sont des entiers positifs. Le tissu ainsi formé est souple, dense, et reconnaissable à ses diagonales visibles en surface. Les caractéristiques principales sont:
 - ✓ **Souplesse et densité :** Bon compromis entre flexibilité et solidité, convenant à de nombreuses applications.
 - ✓ **Diagonales apparentes :** Motifs diagonaux caractéristiques créés par le décalage des fils.
 - ✓ **Résistance mécanique :** Dépend des paramètres de l'armure (n et m) ainsi que du type de fibre utilisée

- C. **Armure satin :** Dans le tissage satin, chaque fil de chaîne passe au-dessus de $n-1$ fils de trame, et chaque fil de trame passe au-dessus de $n-1$ fils de chaîne, n étant un entier strictement supérieur à 1. Ce tissage permet d'obtenir un tissu dont une face est lisse et brillante, tandis que l'autre est mate. Les caractéristiques du satin sont :

- ✓ **Surface satinée** : Aspect lisse et brillant : Le tissage en satin donne une surface lisse et brillante sur une face du tissu, grâce à la présence de longs fils flottants. Cette face est communément appelée « endroit » du tissu.
- ✓ **Aspect mat** : L'autre face, appelée « envers », présente un aspect mat en raison des fils qui passent sous les flotteurs.
- ✓ **Souplesse** : Le satin est un tissu souple, ce qui le rend particulièrement adapté à la fabrication de vêtements et d'articles décoratifs.
- ✓ **Adapté aux formes complexes** : Sa souplesse permet également une bonne adaptation aux pièces aux formes complexes, car il se drape facilement.
- ✓ **Masse spécifique élevée** : Le satin est en général plus dense et plus lourd que d'autres tissus, en raison de la structure serrée créée par le tissage.

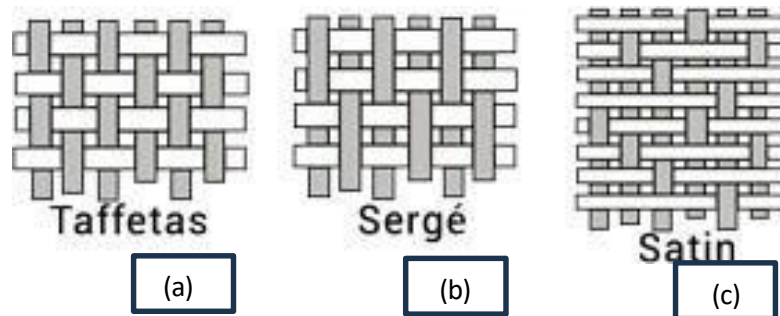


Figure 1.6 : (a)forme toile ou taffetas, (b) forme tissage sergé, (c)forme satin.

3.2.2.4.2 Les renforts multidirectionnels,

ou composites tridimensionnels (3D), sont constitués de fibres orientées selon plusieurs directions spatiales.

Ils se composent généralement de plusieurs couches de fibres entrelacées ou superposées, consolidées par une matrice de résine, dont les principales caractéristiques sont :

- **Excellente résistance mécanique** : Grâce à l'orientation multiple des fibres, ces renforts peuvent supporter des contraintes venant de toutes les directions, ce qui les rend idéaux pour des applications de haute performance, comme l'aéronautique ou l'astronautique.
- **Légèreté** : Malgré leur robustesse, ces structures conservent une faible masse volumique, un avantage crucial dans des secteurs où le poids est un paramètre essentiel (aviation, automobile).
- **Grande rigidité** : Ils conservent une rigidité importante même sous fortes sollicitations, ce qui les rend parfaitement adaptés aux structures nécessitant une stabilité dimensionnelle, comme les composants de machines ou les pales d'éoliennes.

- **Résistance au délaminage** : Leur structure multicouche limite fortement le risque de délaminage (séparation des couches de fibres), ce qui améliore la durabilité et la fiabilité des pièces fabriquées.

Les renforts multidirectionnels trouvent une large utilisation dans de nombreux domaines grâce à leurs propriétés mécaniques optimisées. Ils sont couramment employés dans les secteurs suivants :

- **Aéronautique et aérospatial** : pour la fabrication de composants d'avions, de fusées, de satellites et d'autres structures destinées à l'espace.
- **Industrie automobile** : dans la conception de pièces structurelles pour véhicules tels que les voitures, camions ou motos.
- **Secteur maritime** : pour la construction de navires, yachts et diverses structures marines.
- **Génie civil** : dans le renforcement d'ouvrages tels que les ponts, bâtiments et autres infrastructures.
- **Sports et loisirs** : dans la production d'équipements sportifs comme les skis, les snowboards ou encore les clubs de golf.

La figure 1.7 illustre un exemple typique de renfort multidirectionnel, dans lequel les fibres sont disposées selon plusieurs orientations, formant ainsi une architecture tridimensionnelle robuste [12].

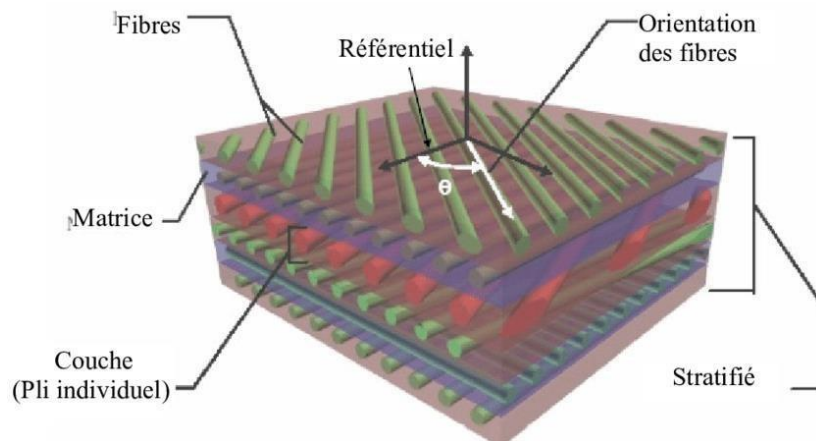


Figure 1.7 : illustre un exemple typique de renfort multidirectionnel.

3.3 L'ensimage :

L'ensimage est un traitement de surface appliqué aux fibres de renfort (telles que les fibres de verre, de carbone ou naturelles) utilisées dans les matériaux composites.

Il s'agit d'une dispersion aqueuse contenant plusieurs agents chimiques qui jouent des rôles essentiels dans la performance du composite final, en particulier en assurant une interface solide entre le renfort et la matrice (résine).

Rôles principaux de l'ensimage :

- **Compatibilité fibre-matrice :** L'ensimage améliore l'adhésion entre les fibres de renfort et la résine, assurant une liaison chimique efficace et durable.
- **Cohésion inter-filamentaire :** Grâce à l'agent pontant, l'ensimage renforce l'union entre les différents filaments d'un même fil, ce qui augmente la rigidité et améliore la dispersion de la résine.
- **Protection contre l'abrasion :** Ce traitement protège les fibres contre l'usure mécanique générée lors des manipulations et de la mise en œuvre, ce qui préserve leur intégrité.
- **Élimination des charges statiques :** Les agents antistatiques contenus dans l'ensimage réduisent les charges électrostatiques causées par les frottements, évitant ainsi les décharges électriques et facilitant la manipulation.
- **Adhésion chimique :** L'agent collant contenu dans la formulation favorise une liaison forte et stable entre le renfort et la matrice polymère.
- **Amélioration du mouillage :** L'ensimage joue un rôle fondamental dans l'amélioration du mouillage des fibres par la résine durant l'imprégnation. Il favorise une répartition homogène de la matrice au sein du composite, ce qui améliore ses propriétés mécaniques finales.

Les caractéristiques de l'ensimage (composition, propriétés) dépendent du type de résine et du procédé de fabrication utilisés. Il est donc primordial de sélectionner un ensimage adapté afin d'assurer une adhésion optimale entre les fibres de renfort et la matrice, condition essentielle pour atteindre les performances attendues du matériau composite [10].

3.4 Interface renfort-matrice :

Dans un matériau composite, l'interface renfort-matrice désigne la zone de contact entre les fibres (éléments de renfort) et la résine (matrice). Cette zone joue un rôle déterminant dans les propriétés mécaniques du composite, car elle conditionne le transfert des charges entre les deux composants. Caractéristiques de l'interface sont :

- **Épaisseur :** L'interface est généralement très fine, variant de quelques nanomètres à quelques micromètres. Dans certains cas spécifiques, elle peut être plus épaisse et est alors parfois appelée interphase.
- **Propriétés :** L'interphase peut présenter des propriétés différentes de celles du renfort ou de la matrice. Elle peut posséder des caractéristiques mécaniques, chimiques ou physiques propres, influençant le comportement global du composite [13].
- **Adhésion renfort-matrice :** L'adhésion entre les fibres de renfort et la matrice est essentielle pour un bon transfert des contraintes. Elle résulte de mécanismes complexes mêlant interactions physiques et chimiques au niveau moléculaire :

- **Liaisons physiques** : Ces liaisons, telles que les forces de Van der Waals ou les liaisons hydrogène, sont relativement faibles, mais peuvent contribuer à l'adhésion.
 - **Liaisons covalentes** : Plus fortes et plus durables, elles se forment parfois entre les atomes du renfort et ceux de la matrice par partage d'électrons.

Les facteurs influençant l'adhésion sont :

- **Mouillabilité** : Capacité de la matrice à s'étaler sur la surface du renfort. Une bonne mouillabilité favorise l'adhésion.
- **Diffusion** : L'infiltration des molécules de la matrice dans le renfort peut renforcer l'interaction.
- **Adsorption** : L'adhésion peut également être renforcée par l'adsorption des molécules de la matrice à la surface du renfort.
- **Réactivité chimique** : La formation de liaisons covalentes dépend de la réactivité chimique des matériaux.
- **Facteurs mécaniques** : La tension superficielle, la rugosité du renfort et les contraintes mécaniques peuvent également jouer un rôle dans l'adhésion [14].

La qualité de l'interface renfort-matrice est un élément clé pour assurer les performances du matériau composite. Une interface bien contrôlée permet d'obtenir une meilleure résistance à la traction et à la compression, ainsi qu'une rigidité et une ténacité accrues.

4 Classification

4.1 Selon le renfort :

Le renfort joue un rôle crucial dans les propriétés mécaniques et le comportement global d'un matériau composite. Selon la forme du renfort, on distingue trois grandes familles de composites :

4.1.1 Composites à particules :

Ces composites intègrent des particules de petite taille, souvent de forme cubique, sphérique ou irrégulière, réparties de manière homogène dans une matrice. Ce type de renforcement améliore la résistance du matériau en exploitant la contrainte hydrostatique générée par les particules au sein de la matrice. Les composites à particules sont principalement utilisés avec des matrices métalliques ou céramiques, où ils permettent d'accroître la rigidité globale du matériau. Certaines mesures. Les propriétés de la matrice et des particules influencent mutuellement leur comportement. A titre d'exemples de renforts particuliers : Oxydes métalliques, carbures, nitrures, argiles, etc... [15].

4.1.2 Composite à fibres :

Les composites à fibres se caractérisent par un rapport élevé entre la longueur et le diamètre des fibres utilisées comme renfort. Les fibres peuvent être organiques ou inorganiques. Les fibres organiques, telles que les fibres de verre et de polyester. Ont généralement une faible densité et une faible élasticité. Les fibres inorganiques, comme

les fibres de carbone, de carbure de silicium et d'alumine, ont un module élevé et peuvent être élastiques. Les fibres augmentent considérablement la résistance à la traction du composite, particulièrement dans la direction d'orientation des fibres.

Les composites à fibres sont largement utilisés dans divers domaines, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la construction et les sports. A titre d'exemples de renforts fibreux : Fibre de verre, fibre de carbone, fibre d'aramide, bore, graphite, etc. [15].

4.2 Selon la matrice :

Les matériaux composites peuvent également être classés en fonction de la nature de la matrice utilisée. Cette classification permet de mettre en évidence les propriétés et les applications spécifiques de chaque type de composite.

4.2.1 Composite à matrice métallique (CMM) :

Potentiel et adoption : Les composites à matrice métallique (CMM) suscitent un grand intérêt de la part des chercheurs en raison de leurs propriétés prometteuses. Cependant, leur adoption dans des applications concrètes n'est pas encore aussi répandue que celle des composites à matrice polymère.

Propriétés : Les CMM peuvent offrir une combinaison remarquable de résistance élevée, de ténacité accrue et de rigidité notable.

Matériaux de matrice : Des métaux tels que le titane, le magnésium et certains alliages d'aluminium sont couramment utilisés comme matrices dans les CMM en raison de leur rapport résistance/poids favorable.

Renforcement : L'incorporation de renforts, comme des fibres en céramique ou en carbone, peut améliorer encore davantage la rigidité et la résistance des matrices métalliques.

Avantages supplémentaires : Les CMM présentent des avantages supplémentaires tels qu'une conductivité thermique et électrique élevée, ainsi qu'une résistance isotrope élevée (résistance similaire dans toutes les directions) [15].

4.2.2 Composite à matrice céramique (CMC) :

Les céramiques sont constituées de composés inorganiques, généralement des oxydes métalliques, liés par des liaisons covalentes et ioniques, la liaison ionique étant prédominante.

Exemples de céramiques : L'alumine, la zircone, le carbure de silicium, le nitrure de bore, etc. sont des exemples courants de matériaux céramiques utilisés dans les composites.

- **Résistance à la chaleur** : Les matrices céramiques peuvent supporter des températures extrêmement élevées, dépassant parfois 1500°C. ce qui les rend idéales pour des applications à haute température.
- **Resistance chimique** : Les céramiques sont généralement résistantes aux attaques chimiques, offrant une excellente protection contre la corrosion et la dégradation.
- **Fragilité** : Un inconvénient majeur des céramiques est leur fragilité inhérente. Elles ont tendance à se fracturer sous des charges de traction, limitant leur application dans certaines conditions.
- **Renforcement** : L'utilisation de renforts tels que des fibres de carbone ou de carbure de silicium peut améliorer la ténacité à la rupture et la résistance aux chocs thermiques des CMC [15]

4.2.3 Composite à matrice organique (CMO) :

Les matrices organiques dans les CMO sont principalement constituées de polymères, qui peuvent être thermodurcissables ou thermoplastiques.

- **Avantages de la transformation** : Les polymères se présentent généralement sous forme Liquide avant de durcir, ce qui les rend faciles à manipuler et à mouler dans des formes complexes.
- **Propriétés après durcissement** : Une fois durcis, les polymères deviennent rigides et présentent une résistance et une rigidité élevées. De plus, ils peuvent offrir une finition de surface esthétique.
- **Types de polymères** : Les résines époxy et polyester sont des exemples courants de thermodurcissables utilisés dans les CMO. Les thermoplastiques, bien que moins répandus, offrent une certaine flexibilité et une recyclabilité.
- **Comportement à haute température** : Les thermodurcissables ont tendance à se déformer à des températures élevées, limitant leur utilisation dans certains environnements.
- **Rôle des renforts** : Les renforts fibreux, tels que les fibres de verre ou de carbone, sont intégrés dans les matrices organiques pour conférer au composite une résistance élevée à la traction et à la compression [15].

5 Architecture des composites :

Les matériaux composites présentent une diversité de structures, chacune offrant des propriétés et des performances spécifiques. Les trois principales architectures de composites sont les Monocouches, les stratifiés et les structures sandwich.

5.1 Les monocouches :

Les monocouches représentent la forme la plus simple de structure composite, constituées d'une seule couche de renfort dispersée dans une matrice. Les monocouches se distinguent par la forme du renfort utilisé :

- **Fibres longues (unidirectionnelles)** : Les fibres sont disposées parallèlement les unes aux autres, offrant une résistance élevée dans la direction d'alignement.

- **Fibres réparties aléatoirement** : Les fibres sont distribuées de manière chaotique dans la matrice, procurant une résistance isotrope (similaire dans toutes les directions).
- **Fibres courtes** : Les fibres courtes sont dispersées dans la matrice, apportant une amélioration de la rigidité et de la ténacité du composite [71].

5.2 Les stratifiés :

Un stratifié est constitué de plusieurs couches de monocouches superposées, chacune ayant une orientation spécifique du renfort. Chaque couche d'un stratifié est appelée strate. La séquence d'empilement définit l'ordre et l'orientation des différentes couches, déterminant les propriétés mécaniques du stratifié.

Les stratifiés permettent de créer des matériaux aux propriétés mécaniques anisotropes (varies selon les directions) optimisées pour répondre aux sollicitations spécifiques de la structure [11, 16].

5.3 Les sandwichs :

Les structures sandwich sont conçues pour des applications soumises à des flexions et des torsions importantes. Elles se composent de trois éléments principaux :

- **Ame** : L'âme est la partie centrale du sandwich, généralement constituée d'un Matériau léger et poreux, comme des structures en nid d'abeilles, des âmes ondulées, ou des mousses. Elle assure la résistance au cisaillement et à la compression hors plan.
- **Peaux** : Les peaux sont les deux couches extérieures du sandwich, généralement Constituées de stratifiés composites. Elles supportent les efforts dans leur plan et contribuent à la rigidité globale de la structure. Les peaux et l'âme sont assemblées par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux utilisés.

Les structures sandwich offrent une combinaison remarquable de rigidité, de légèreté et de résistance à la flexion et à la torsion, les rendant idéales pour des applications dans l'aéronautique, le transport et la construction.

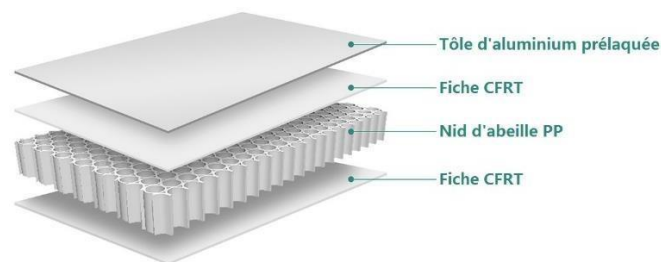


Figure1.8 : Désignation d'une âme nid d'abeille.

6 Procède de fabrication :

La fabrication des matériaux composites implique généralement la construction par couches successives de matrice et de renfort. Ces couches sont ensuite consolidées pour former la pièce finale. Les procédés de fabrication spécifiques varient en fonction de la nature de la matrice et du renfort, ainsi que de la forme et des propriétés souhaitées de la pièce finale [16].

6.1 Moulage au contact :

Le moulage au contact est une technique de fabrication manuelle de pièces en composites à base de résines thermodurcissables. Ce procédé se déroule à température ambiante et sans application de pression. Les renforts sont disposés dans un moule ouvert et imprégnés de résine liquide préalablement accélérée et catalysée. La résine durcit ensuite, donnant forme à la pièce composite.

Une fois durcie, la pièce est démoulée et les finitions nécessaires sont appliquées. Le moulage au contact est couramment utilisé pour la fabrication de petites séries de pièces, généralement entre 1 et 1000 pièces par an. Il est particulièrement adapté à la production de pièces de grandes dimensions, complexes ou de formes non standard.

Les avantages de cette technique sont :

- ✓ **Flexibilité de conception** : Le moulage au contact offre une grande liberté de formes, permettant de réaliser des pièces complexes et géométriquement variées.
- ✓ **Absence de limite dimensionnelle** : La taille des pièces réalisables n'est pas limitée par la technique elle-même, permettant la fabrication de pièces de grandes dimensions.
- ✓ **Surface de qualité** : La surface de la pièce peut être lissée et gelotée pour obtenir un aspect esthétique et une meilleure résistance à la corrosion.
- ✓ **Propriétés mécaniques correctes** : Les pièces en composite obtenues par moulage au contact présentent des propriétés mécaniques moyennes à bonnes, suffisantes pour de nombreuses applications.
- ✓ **Investissement initial faible** : Le moulage au contact nécessite un investissement initial relativement faible en outillage, comparé à d'autres techniques de fabrication de composites.
- ✓ **Simplicité du moule** : Le moule utilisé dans le moulage au contact est généralement simple et peu coûteux, et peut être réalisé en interne. Cette technique peut avoir quelques limites.
- ✓ **Finition nécessaire** : La pièce obtenue par moulage au contact nécessite généralement des opérations de finition, telles que le détournage, le perçage et le ponçage, pour obtenir la forme et l'aspect final souhaités.
- ✓ **Variabilité de la qualité** : La qualité de la pièce peut dépendre du savoir-faire de l'opérateur, ce qui peut engendrer une certaine variabilité dans les propriétés et l'aspect des pièces.

- ✓ **Cadence de production modérée** : La cadence de production par moule est relativement faible, limitant la production de grandes séries.
- ✓ **Espace de travail important** : Le moulage au contact nécessite un espace de travail important pour la manipulation des pièces et des moules.
- ✓ **Conditions de travail** : Le moulage au contact peut impliquer l'utilisation de produits chimiques et de résines, nécessitant des mesures de protection adéquates pour les opérateurs.

La figure 1.9 illustre le principe du moulage au contact. On voit un moule ouvert dans lequel des renforts sont disposés, puis imprégnés de résine liquide. La résine durcit ensuite, donnant forme à la pièce composite.

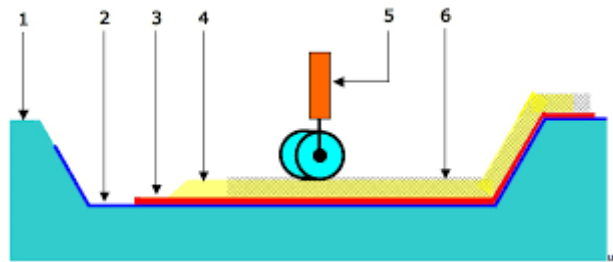


Figure 1.9 : moulage au contact : 1-Moule, 2-Gécolat, 3-Résine+renfort, 4-résine, 5-écouleur, 6-renfort.

6.2 Moulage par projection simultanée :

Le moulage par projection simultanée est une technique de fabrication de pièces en composites à base de résines thermodurcissables. Ce procédé peut être mis en œuvre manuellement ou de manière robotisée. La projection simultanée du renfort et de la résine à température ambiante et sans application de pression permet de créer des pièces de formes variées. Une machine de projection spécifique est utilisée pour projeter simultanément les éléments constitutifs du composite :

- **Dispositif de coupe** : Des fibres de renfort, généralement sous forme de ring (mèches continues), sont coupées à la longueur souhaitée.
- **Projection du renfort** : Les fibres coupées sont projetées sur la surface du moule.
- **Projection de la résine** : Un ou deux pistolets projettent simultanément la résine thermodurcissable pré-accélérée sur le moule et les fibres [11,16].

La figure 1.9 illustre le principe du moulage par projection simultanée. On y voit une machine de projetant simultanément les fibres de renfort et la résine sur la surface d'un moule des rouleaux permettant de compacter le mélange et des ébulleurs accélèrent le durcissement de la résine.

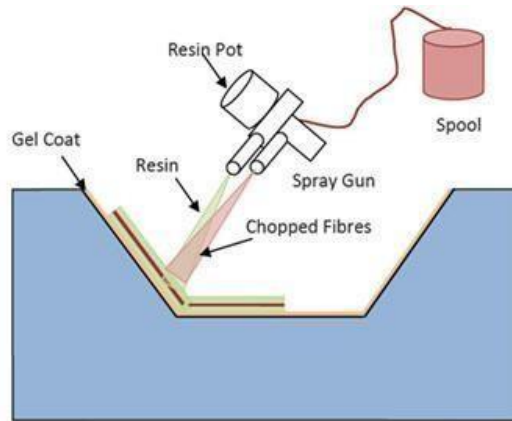


Figure 1.10 : moulage par projection simultanée.

Le moulage par projection simultanée présente plusieurs avantages :

- **Grande liberté de formes :** La projection permet de réaliser des pièces de géométries complexes et variées.
- **Simplicité du processus :** La mise en Ouvre est relativement simple et ne requiert pas de compétences particulières.
- **Investissement modéré :** Le coût des machines et des moules est relativement faible par rapport à d'autres techniques de fabrication de composites.
- **Flexibilité de production :** Le procédé peut être adapté à la production de pièces uniques ou de petites séries.

Malgré ses avantages, le moulage par projection simultanée présente certaines limites :

- ✓ **Propriétés mécaniques moyennes :** Les pièces obtenues par cette technique présentent généralement des propriétés mécaniques moyennes, inférieures à celles des composites obtenus par d'autres techniques.
- ✓ **Limites de finition :** La surface des pièces peut présenter des imperfections nécessitant des opérations de finition ultérieures.
- ✓ **Cadence de production :** La cadence de production est modérée, limitant la fabrication de grandes séries.
- ✓ **Risques liés à la projection :** La projection de fibres et de résine peut présenter des risques pour la santé des opérateurs, nécessitant des mesures de protection adéquates [11].

6.3 Moulage sous vide :

Le moulage sous vide est une technique de fabrication de pièces en composites. Ce procédé se déroule dans un moule fermé, généralement constitué d'UN moule et d'un contre-moule, semi-rigide sous souples selon les caractéristiques des pièces à réaliser [71]. Le déroulement du processus est :

- 1) **Mise en place du renfort** : Le renfort, sous forme de fibres ou de tissus, est disposé dans le moule.
- 2) **Versement de la résine** : La résine catalysée est versée sur le renfort, recouvrant l'ensemble de la surface.
- 3) **Mise en place du film plastique** : Un film plastique souple est placé sur le dessus du moule et de la résine, assurant une étanchéité parfaite à l'air.
- 4) **Création du vide** : Le vide est créé sous le film plastique à l'aide d'une pompe. Cette opération permet d'éliminer les bulles d'air présentes dans la résine et entre le renfort et le moule, favorisant une imprégnation optimale du renfort et une meilleure qualité de surface.
- 5) **Evacuation de l'excédent de résine** : Le vide créé permet également d'évacuer l'excédent de résine, qui est absorbé par un tissu de pompage placé sous le film plastique.
- 6) **Polymérisation** : La résine durcit ensuite par polymérisation, soit à température ambiante, soit dans une étuve ou un autoclave selon la nature de la résine et les propriétés souhaitées pour la pièce [11].

Le moulage sous vide est couramment utilisé pour la fabrication de pièces en composites de petite et moyenne série, nécessitant une finition de surface de qualité des deux côtés. Cette technique est particulièrement adaptée à la production de pièces complexes ou de grandes dimensions.

La figure 1.11 : illustre le principe du moulage sous vide. On y voit un moule fermé contenant le renfort et la résine recouverts d'un film plastique. Une pompe crée le vide sous le film, permettant d'éliminer les bulles d'air et l'excédent de résine.

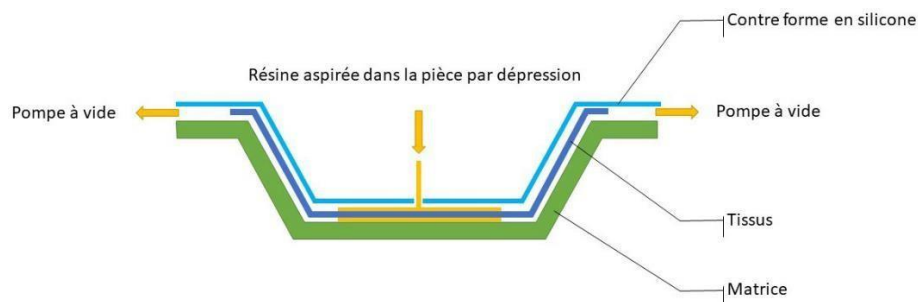


Figure 1.11 : moulage sous vide.

Le moulage sous vide présente plusieurs avantages :

- ✓ **Haute qualité de surface :** Le vide permet d'obtenir une surface lisse et homogène des deux côtés de la pièce, sans bulles d'air ni imperfections.
- ✓ **Bonne imprégnation du renfort :** Le vide favorise une imprégnation optimale du renfort par la résine, améliorant les propriétés mécaniques de la pièce composite.
- ✓ **Polyvalence :** Le moulage sous vide peut être utilisé avec une large gamme de résines et de renforts.
- ✓ **Adaptabilité :** Cette technique s'adapte à la production de pièces de formes variées et de dimensions diverses.

Malgré ses avantages, le moulage sous vide présente quelques limites à savoir :

- **Investissement initial :** Le coût des moules et de l'équipement de vide peut être élevé.
- **Temps de cycle :** Le processus de moulage sous vide peut être relativement long, limitant la cadence de production.
- **Complexité du processus :** La mise en œuvre du moulage sous vide nécessite un certain savoir-faire et une expertise technique [16].

6.4 Moulage par injection basse pression de résine (RTM) :

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfer Molding) est une technique de fabrication de pièces en composites. Ce procédé se déroule dans un moule fermé rigide composé d'un moule et d'un contre-moule.

Déroulement du processus :

- 1) **Mise en place du renfort :** Le renfort., sous forme de mats, préformes ou éventuellement de tissus, est disposé dans le moule selon la forme souhaitée de la pièce.
- 2) **Injection de la résine :** La résine thermodurcissable, préalablement accélérée et catalysée, est injectée sous une pression relativement basse (généralement entre 1,5 et 4 bars) à travers le renfort. L'injection se poursuit jusqu'à ce que le moule soit complètement rempli de résine.
- 3) **Durcissement de la résine :** La résine durcit ensuite par polymérisation, soit à température ambiante, soit sous l'apport d'une chaleur douce, selon la nature de la résine et les propriétés souhaitées pour la pièce [11].

La figure 1.12 illustre le principe du moulage par injection basse pression de résine (RTM). On y voit un moule fermé contenant le renfort et la résine injectée sous pression.

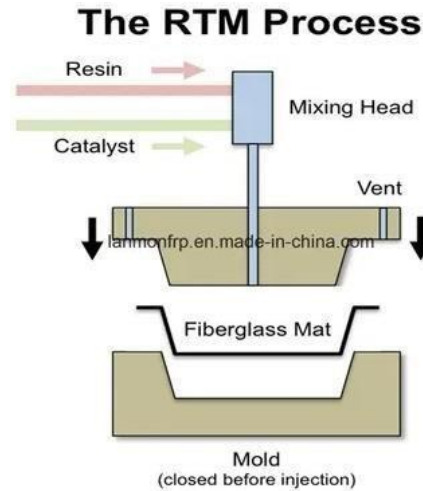


Figure1.12 : Moulage par injection basse pression de résine (RTM)

6.5 Moulage par injection de compound BMC :

Le moulage par injection de compound BMC (Bulk Molding Compound) est une technique de fabrication de pièces en composites. Le compound BMC est une masse à mouler prémélange composée de résine, de charges, d'adjuvants et de fibres de verre coupées. Le déroulement du processus :

- 1) **Préparation du compound BMC** : Le compound BMC est préparé dans un malaxeur pour obtenir une masse homogène.
- 2) **Chauffage du compound BMC** : Le compound BMC est chauffé à une température généralement comprise entre 130 et 150 °C pour le rendre fluide et faciliter son injection.
- 3) **Injection du compound BMC** : Le compound BMC chauffé est injecté sous pression (entre 50 et 100 bars) dans un moule fermé en acier usiné.
- 4) **Remplissage du moule** : La pression d'injection force le compound BMC à s'écouler dans l'empreinte du moule, remplissant complètement la cavité.

6.6 Moulage par compression de mat pré imprégné SMC :

Le moulage par compression de mat préimprégné SMC (Sheet Molding Compound) est une technique de fabrication de pièces en composites. Le mat pré-imprégné SMC est une nappe de fibres coupées ou continues imprégnée d'un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques. Le déroulement du processus est présenté comme suit :

- 1) **Découpe du mat pré-imprégné** : Le mat pré-imprégné est découpé en flans de dimensions adaptées à la forme de la pièce souhaitée.
- 2) **Mise en place du flan** : Le flan de mat pré-imprégné est placé dans un moule fermé en acier usiné.

- 3) **Chauffage du moule** : Le moule est chauffé à une température généralement comprise entre 140 et 160 °C pour ramollir la résine et faciliter la compression du matériau.
- 4) **Fermeture du moule** : Le contre-moule est pressé contre le flan de mat pré- imprégné sous une pression élevée (jusqu'à 1000 bars) pour compacter le matériau et éliminer les bulles d'air.
- 5) **Durcissement de la résine** : La résine thermodurcissable contenue dans le mat pré- imprégné durcit par polymérisation sous la pression et la chaleur, formant la pièce composite.
- 6) **Démoulage** : Une fois la résine durcie, le moule est ouvert et la pièce composite est démoulée [11].

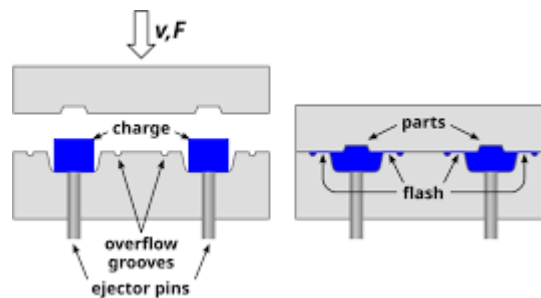


Figure 1.13 : Moulage par compression de mat pré imprégné SMC.

6.7 Moulage par enroulement filamentaire :

Le moulage par enroulement filamentaire est une technique de fabrication de pièces composites à base de fibres continues imprégnées de résine. Le renfort, généralement sous forme de ruban ou de mèche de fibres, est imprégné de résine catalysée et enroulé avec une tension contrôlée

Sur un mandrin rotatif. La résine polymérisée ensuite, soit dans un four, soit dans un autoclave, pour former une pièce composite solide et rigide [7, 11] Le déroulement du processus est présenté comme suit :

- 1) **Préparation du renfort** : Le renfort, généralement sous forme de ruban ou de mèche de Dé fibres, est débobiné et imprégné de résine catalysée.
- 2) **Mise en place du mandrin** : Le mandrin, généralement cylindrique ou circulaire, est fixé sur un tour rotatif,
- 3) **Enroulement du renfort** : Le renfort imprégné est enroulé sur le mandrin rotatif avec une tension contrôlée, en suivant un schéma de stratification défini.
- 4) **Polymérisation de la résine** : La résine catalysée polymérise par exotherme, soit dans un four à une température contrôlée, soit dans un autoclave sous pression.

5) **Démoulage** : Une fois la résine durcie. Le mandrin est retiré, laissant la pièce composite verre.

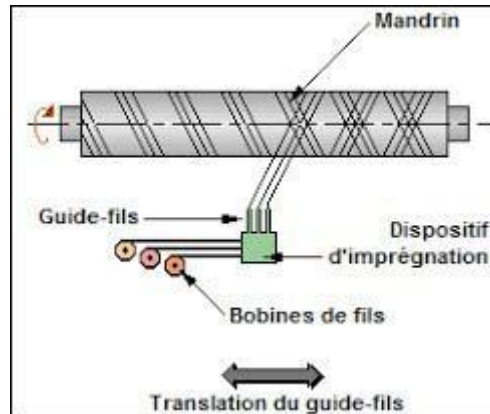


Figure 1.14 : Moulage par enroulement filamentaire.

6.8 Moulage par centrifugation :

Le moulage par centrifugation est une technique de fabrication de pièces composites à base de fibres longues coupées et de résine. Le procédé est particulièrement adapté à la production de pièces cylindriques, mais peut également être utilisé pour des formes plus complexes avec des surfaces courbes [16]. Le déroulement du processus est présenté comme suit :

- 1) **Préparation du mélange** : Le renfort, sous forme de fibres longues coupés, est mélangé à la résine dans un état liquide ou pâteux.
- 2) **Versement dans le moule** : Le mélange de résine et de fibres est versé dans un moule cylindrique en rotation à grande vitesse.
- 3) **Force centrifuge** : La force centrifuge générée par la rotation du moule répartit Uniformément le mélange de résine et de fibres le long des parois du moule.
- 4) **Durcissement de la résine** : La résine polymérise par exo thermie, durcissant et formant la pièce composite.
- 5) **Démoulage** : Une fois la résine durcie, le moule est arrêté et la pièce composite est Démoulée.

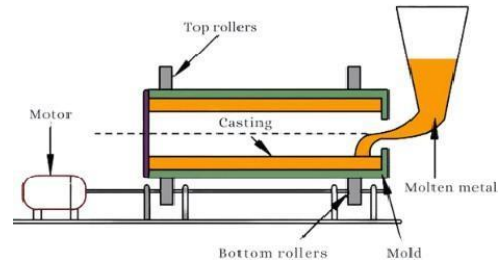


Figure1.15 : Moulage par centrifugation.

7. Domaine d'application :

Les matériaux composites, grâce à leurs propriétés remarquables, ont conquis une place Prépondérante dans de nombreux secteurs d'activités. Leur polyvalence les rend incontournables dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'énergie, le transport, la construction et les loisirs.

- **Aéronautique et spatial** : La légèreté, la résistance et la durabilité des composites sont des atouts majeurs pour la construction d'avions et de satellites. On les retrouve dans les structures, les panneaux de fuselage, les pales d'hélices et les pièces de moteurs.
- **Electricité** : Les composites sont utilisés dans la fabrication de pales d'éoliennes, de nacelles et de composants de transformateurs électriques, profitant de leur excellente résistance mécanique et de leurs propriétés isolantes.
- **Transport** : Dans le domaine des transports, les composites optimisent les performances des véhicules terrestres, ferroviaires et maritimes, On les retrouve dans les carrosseries automobiles, les châssis de trains, les coques de bateaux et les composants de camions.
- **Domaine militaire** : Les composites renforcent les structures des hélicoptères, des fusées et des avions militaires. Leur conférant une résistance accrue aux impacts et aux extrêmes.
- **Canalisations** : Les canalisations en matériaux composites offrent une alternative durable et résistante aux canalisations en acier et en béton traditionnelles. Elles sont notamment utilisées pour le transport d'eau, de gaz et de produits chimiques.
- **Construction navale** : Dans le domaine de la construction navale, les composites allègent les coques et les superstructures des bateaux, améliorant ainsi leurs performances et leur efficacité énergétique. On les retrouve également dans les planches de surf et autres équipements nautiques.

- **Bâtiment** : Les matériaux composites trouvent leur place dans le BTP pour des applications telles que les renforcements de structures, les panneaux de façade, les menuiseries et les canalisations.

8 résine polyester

8.1 Définition :

Les résines polyester (RP) sont des polymères thermodurcissables issus de la réaction de polycondensation entre des diacides (ou anhydrides d'acides) et des dialcools (glycols). Elles se distinguent par la présence de groupes esters répétés dans leur chaîne macromoléculaire.

La résine polyester insaturée (la plus utilisée) contient des doubles liaisons carbone-carbone (C=C) qui permettent sa réticulation en présence d'un monomère réactif (généralement le styrène).

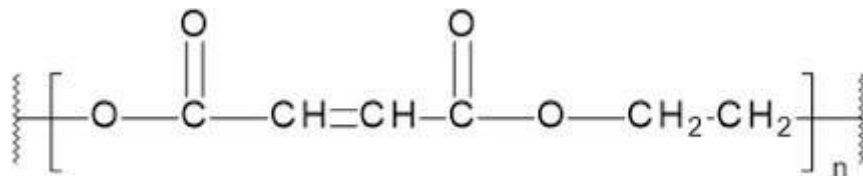


Figure 1.16 : formule chimique de polyester insaturé.

8.2 Synthèse des résines polyesters :

La synthèse des résines polyesters insaturées se déroule en deux étapes principales :

- 1) **Polycondensation** : Réaction entre un anhydride (ex. : anhydride maléique) et un glycol (ex. : propylène glycol) pour former un prépolymère linéaire.
- 2) **Modification** : Incorporation de styrène (\approx 30-40 % en poids) comme agent de réticulation. La synthèse des résines polyester repose sur une réaction de polycondensation entre : Des diacides (tels que l'acide phtalique, l'acide iso phtalique ou leurs anhydrides), Des diols (tels que l'éthylène glycol, le propylène glycol).

La réaction conduit à la formation d'unités ester et à une chaîne polymère linéaire. Pour obtenir une résine insaturée, on introduit un acide insaturé tel que l'acide maléique ou l'anhydride maléique, qui apporte les doubles liaisons nécessaires à la future réticulation. Une fois la polymérisation terminée, le produit est dissous dans un monomère réactif (typiquement le styrène) qui agit comme diluant actif, réduisant la viscosité et facilitant la mise en œuvre, tout en participant à la réaction de réticulation finale.

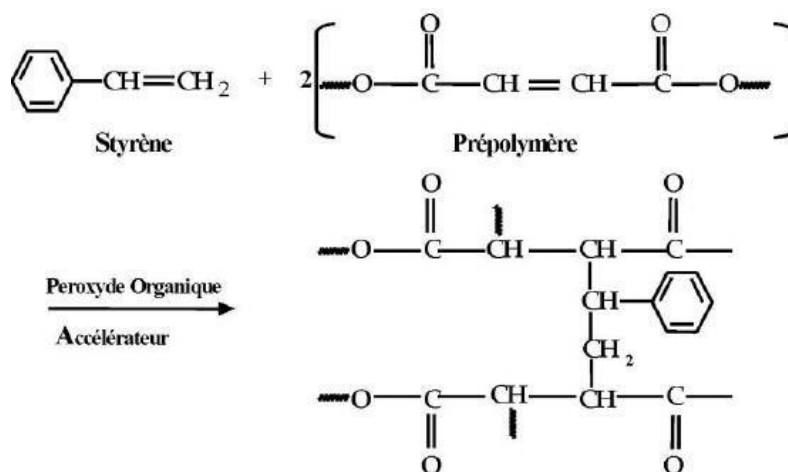


Figure1.17 : Synthèse des résines polyesters.

Remarque :

- Le styrène joue un double rôle : solvant et agent de réticulation.
- La réaction est catalysée par des peroxydes (MEKP).

8.3 Mécanisme de durcissement :

Le durcissement des résines polyesters est une réaction radicalaire initiée par un catalyseur (peroxyde) et accélérée par la chaleur ou des promoteurs (cobalt).

Étapes clés :

- ✓ Décomposition du peroxyde (ex. : MEKP) en radicaux libres.
- ✓ Attaque des doubles liaisons C=C du polyester et du styrène.
- ✓ Formation d'un réseau 3D rigide.

Le système de durcissement est basé sur l'utilisation de :

- **Un initiateur :**(souvent un peroxyde organique, tel que le peroxyde de méthyléthylcétone – MEKP),
- **Un accélérateur :** (souvent un sel de cobalt comme le naphtène de cobalt),
- **Parfois un inhibiteur :** (comme l'hydroquinone) pour prolonger la durée de vie en pot.

La polymérisation radicalaire se déclenche sous l'effet de la chaleur ou par simple mélange à température ambiante, selon le système utilisé. Le styrène copolymérise avec les doubles liaisons insaturées de la chaîne polyester, formant un réseau polymère rigide.

8.4 Propriétés physiques et mécaniques :

Tableau 1.5 : Propriétés physiques et mécaniques de Polyester.

Propriété	Valeur typique
Masse volumique (ρ)	1,1 – 1,4 g/cm ³
Module d'élasticité (E)	2 – 4 GPa
Résistance à la traction (σ)	40 – 90 Mpa
Allongement à la rupture (ϵ)	1 – 5 %
Température de distorsion (HDT)	60 – 120 °C
Retrait au durcissement	6 – 8 %

Remarques :

- Les propriétés varient selon la formulation (type de glycol, taux de styrène, additifs).
- Sensibilité aux UV et aux milieux basiques.

8.5 Avantages et Inconvénients :

Tableau 1.6: Avantages et Inconvénients de la résine polyester.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Coût réduit par rapport aux époxy. - Temps de durcissement rapide. - Bonne résistance aux acides et solvants. - Facilité de mise en œuvre (moulage). - Excellente adhérence sur fibre de verre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fort retrait lors du durcissement. - Émissions de styrène (toxicité/odeur). - Sensibilité aux chocs et fissurations. - Durée de vie limitée (vieillessement UV). <ul style="list-style-type: none"> - Résistance mécanique inférieure à l'époxy.

8.6 Domaines d'application :

Les résines polyesters sont largement utilisées dans :

- **Construction navale :** Coques de bateaux, kayaks.
- **Automobile :** Carrosseries, pièces composites.
- **Bâtiment :** Panneaux sandwich, réservoirs.
- **Énergie :** Pales d'éoliennes.

- **Art et design** : Statues, mobilier.

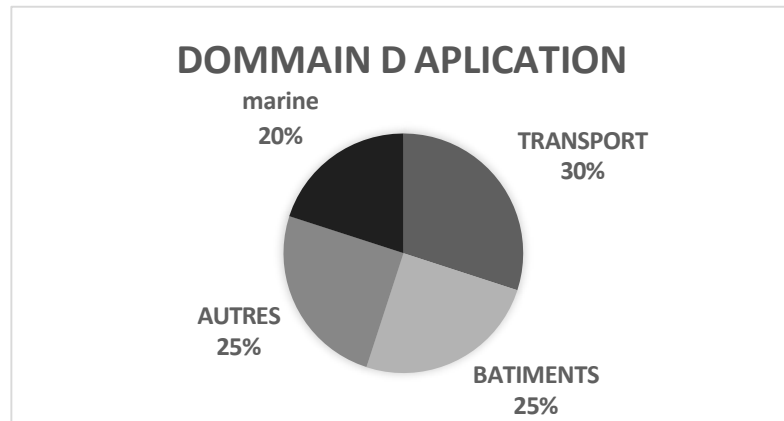


Figure 1.18: Domaines d'application des résines polyester (exemple).

9 Coquilles d'œufs recyclés comme renfort :

9.1 Définition de l'œuf :

L'œuf est une cellule reproductrice produite par les oiseaux, les reptiles et certains autres animaux. En alimentation humaine, il désigne principalement l'œuf de poule, largement consommé pour sa valeur nutritionnelle élevée, sa richesse en protéines, et sa polyvalence culinaire [24].

Tableau 1.7: Composition de l'œuf[25].

Partie de l'œuf	Composition principale	Détails
Coquille	Carbonate de calcium (95 %)	Structure rigide protectrice
Blanc d'œuf	Eau (90 %), protéines (10 %)	Ovalbumine, conalbumine
Jaune d'œuf	Lipides, cholestérol, vitamines A, D, E, K, B12	Riche en lécithine et en acides gras essentiels

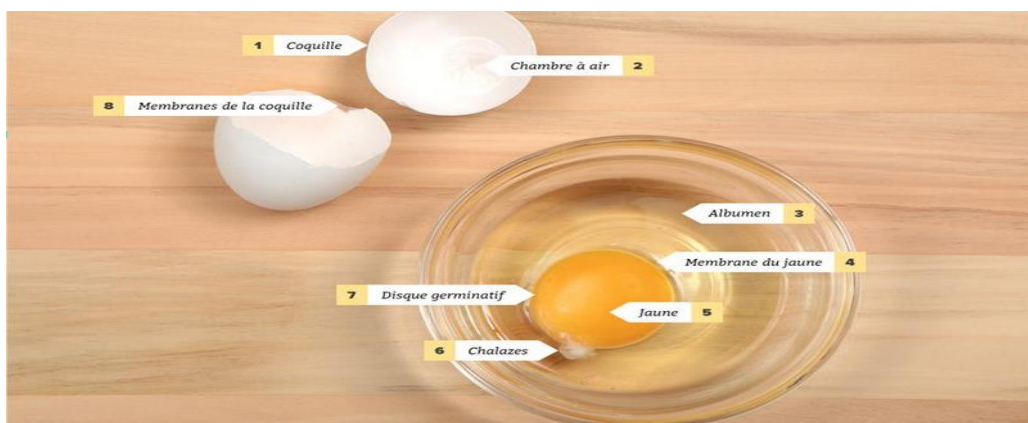


Figure 1.19 : les composants de l'œuf

9.3 Bienfaits nutritionnels de l'œuf :

- Protéines complètes

L'œuf contient tous les acides aminés essentiels nécessaires à l'organisme, ce qui en fait une référence en matière de qualité protéique [26].

- Riche en vitamines [27].
 - Vitamine A : essentielle pour la vision
 - Vitamine D : régule le calcium et la santé osseuse
 - Vitamine B12 : soutient le système nerveux
 - Vitamine E : antioxydant naturel
- Pouvoir rassasiant élevé : Les œufs favorisent la satiété, utile dans les régimes de contrôle de poids [29].
- Bonne santé du cerveau et des cellules : Grâce à la choline (nutriment présent dans le jaune), les œufs soutiennent le développement cérébral et la mémoire [30].

9.4 Les coquilles d'œufs : Définition, valorisation

9.4.1 Définition :

La coquille d'œuf est l'enveloppe externe rigide de l'œuf, composée principalement de carbonate de calcium (CaCO_3). Elle a pour fonction de protéger le contenu interne (blanc et jaune) contre les chocs et les contaminations extérieures. C'est un déchet agroalimentaire courant, produit à grande échelle dans les industries alimentaires, les cuisines domestiques, et les restaurants [31].

- Propriétés intéressantes [32].

Riche en calcium bio disponible (utilisable en compléments alimentaires ou engrais)

- Structure poreuse utile pour certaines applications chimiques :

1) Biocompatible et biodégradable

2) Légère et facile à broyer

- Valorisation et usages possibles :

a) Agriculture / jardinage : Engrais naturel (apport de calcium au sol) Amendement pour corriger l'acidité du sol

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

- b) Matériaux composites Renfort dans des polymères (PLA, polypropylène) Ajout dans le béton ou les briques écologiques Charge minérale dans les bioplastiques
- c) Compléments alimentaires Source naturelle de calcium pour les humains ou les animaux
- d) Filtres ou adsorbants Utilisés dans le traitement de l'eau (adsorption de métaux lourds ou colorants)

Intérêt environnemental

- 1) Réduction des déchets organiques
- 2) Substitution aux charges minérales non renouvelables
- 3) Valorisation circulaire dans une logique de développement durable

9.4.2 Composition :

La coquille d'œuf est principalement composée de carbonate de calcium, mais elle contient aussi d'autres éléments. Voici la composition typique :

Tableau 1.8: Composants principaux d'œuf

Composant	Percentage approximatif
Carbonate de calcium (Ca CO_3)	94–97 %
Proteins (matrices organique)	2–4 %
Phosphate de calcium ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)	<1 %
Magnésium (Mg)	<1 %
Autres oligoéléments	Traces

- Structure de la coquille :

La coquille se compose de plusieurs couches :

- Cuticule (couche externe) : barrière contre les bactéries.
- Couche palissadique (calcaire cristallin) : principalement du carbonate de calcium.
- Membranes coquillières internes : protéines fibreuses.

- Utilisations possibles grâce à sa composition :

- Engrais naturel (riche en calcium).
- Complément alimentaire (calcium bio disponible après traitement).
- Nettoyant abrasif doux (en poudre).
- Matériau de bio-remédiation ou en bioplastique (dans la recherche)

10. Utilisation dans les composites : études existantes, avantages et limites

10.1 Études existantes :

Composites polymères : Une étude a montré que l'ajout de poudre de coquilles d'œufs à des polymères comme le polypropylène (PP) ou le polylactide (PLA) améliore la rigidité et la résistance à la traction, bien que la ductilité puisse diminuer.

- Composites céramiques :

Les coquilles d'œufs ont été utilisées comme charge dans des céramiques pour améliorer leur résistance mécanique et leur durabilité.

- Bioplastiques :

Des recherches ont exploré l'utilisation de coquilles d'œufs dans des bioplastiques à base d'amidon ou de PLA, montrant

10.2 Avantages des coquilles d'œufs dans les composites :

- Renforcement mécanique :
 - Les coquilles d'œufs sont riches en carbonate de calcium (CaCO_3), un matériau rigide qui peut améliorer la résistance à la traction et à la compression des composites.
 - Elles peuvent agir comme une charge minérale, renforçant les polymères ou les matrices céramiques.
- Économique et écologique :
 - Les coquilles d'œufs sont un déchet abondant et peu coûteux, ce qui en fait une alternative durable aux charges minérales traditionnelles. Leur utilisation contribue à réduire les déchets et à promouvoir l'économie circulaire.
- Compatibilité avec les matériaux biodégradables :
 - Elles sont souvent utilisées dans des composites biodégradables, comme les bioplastiques, pour améliorer leurs propriétés mécaniques tout en restant écologiques.

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

- Légèreté :
 - Comparées à d'autres charges minérales, les coquilles d'œufs sont relativement légères, ce qui peut réduire le poids final du composite [33].

10.3 Limites et défis :

- Adhésion à la matrice :
 - La surface lisse des particules de coquilles d'œufs peut limiter leur adhésion à la matrice polymère, ce qui peut réduire l'efficacité du renforcement.
 - Des traitements de surface (comme l'utilisation de silane ou d'autres agents de couplage) sont souvent nécessaires pour améliorer l'adhésion.
- Taille et distribution des particules :
 - Une mauvaise distribution ou des particules trop grosses peuvent créer des points de faiblesse dans le composite.
 - Un broyage fin et un tamisage sont essentiels pour obtenir des particules homogènes.
- Propriétés limitées à haute température :
 - Le carbonate de calcium se décompose à des températures élevées (environ 800°C), ce qui limite son utilisation dans des applications nécessitant une résistance thermique élevée.
- Disponibilité et qualité variable :
 - La composition des coquilles d'œufs peut varier en fonction de l'alimentation des poules, ce qui peut affecter les propriétés du composite [34].

- [1] Devi, S., Kumari, M., & Kumar, P. (2019). Mechanical properties of reinforced polyester and epoxy composites of corn stalk fibre. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(5), 873–876. <https://doi.org/10.56093/ijas.v89i5.89674>
- [2] Kuru, D., & Akpınar Borazan, A. (2016). Production of polyester composite material using pine cone powder as reinforcement. *Production of Polyester Composite Material Using Pine Cone Powder as Reinforcement*.
- [3] Thomason, J. L., & Vlugg, M. A. (2002). Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene. *Composites Part A*, 33(11), 1641–1652. <https://strathprints.strath.ac.uk/6434/1/strathprints006434.pdf> Chapitre 1 : Revue bibliographique 46
- [4] Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274. https://kompozit.org.tr/wpcontent/uploads/2021/06/Composites_reinforced_with_cellulose_bas.pdf
- [5] Facca, A. G., Kortschot, M. T., & Yan, N. (2007). Predicting the tensile strength of natural fibre reinforced thermoplastics. *Composites Science and Technology*, 67(11–12), 2454–2466. <https://www.researchgate.net/publication/248407283>
- [6] George, J., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2001). Interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering & Science*, 41(9), 1471–1485. <https://doi.org/10.1002/pen.10846>
- [7] Oksman, K., Skrifvars, M., & Selin, J. F. (2003). Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1317–1324. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:973408>
- [8] John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364. <https://daneshyari.com/article/preview/1379668.pdf>
- [9] Soutis, C. (2005). Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(2), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.004>
- [10] Nishino, T., Hirao, K., Kotera, M., Nakamae, K., & Inagaki, H. (2003). Kenaf reinforced biodegradable composite. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1281–1286. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00099-1)

- [11] Mallick, P. K. (2007). Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design <https://www.routledge.com/Fiber-ReinforcedComposites/Mallick/p/book/9780849392885>
- [12] Nicolais, L., & Carotenuto, G. (2005). Metal-polymer nanocomposites. Wiley-Interscience. <https://www.wiley.com/en-us/Metal+Polymer+Nanocomposites-p-9780471707842>
- [13] Cox, B. N., & Daniel, I. M. (1999). Characterization and design of composite materials. *Composites Science and Technology*, 59(6), 887–896. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00105-7)
- [14] Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/books/an-introduction-to-composite-materials/1915747584ED273D945C2723F188EF5D> Chapitre 1 : Revue bibliographique 47
- [15] Thomason, J. L. (1996). The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene. *Composites Part A, Volumes 27–33*. <https://strathprints.strath.ac.uk/6434/>
- [16] Dufresne, A. (2013). Nanocellulose: From nature to high performance tailored materials. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110254600>
- [17] Source : FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture), « Eggs – Nutritional profile », 2021
- [18] USDA, National Nutrient Database
- [19] Source : WHO/FAO/UNU, Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition, 2007.
- [20] ANSES, Ciqual – Table de composition nutritionnelle des aliments, 2022
- [21] Vander Wal et al., Egg breakfast enhances weight loss, *International Journal of Obesity*, 2008.
- [22] Zeisel et da Costa, Choline: an essential nutrient, *The Journal of the American College of Nutrition*, 2009.
- [23]: Stadelman, W.J., & Cotterill, O.J. (1995). *Egg Science and Technology*
- [24] : Shadmehri, M. et al., Application of eggshell waste in environmental and material science: A review, *Journal of Cleaner Production*, 2021.

[25]Nnaji, C., et al. (2021) – "Utilization of Waste Eggshells in Polymer Composites: A Review", Journal of Materials Research and Technology

[26]<https://doi.org/10.1007/s10853-015-9186-3>

Chapitre 2: Matériaux et techniques et conditions expérimentales

2.1 Introduction :

Ce chapitre présente de manière détaillée les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, ainsi que les techniques expérimentales mises en œuvre pour leur caractérisation. Il décrit également la méthodologie adoptée pour la fabrication des matériaux composites, en précisant les différentes étapes de mise en forme. Enfin, ce chapitre expose les conditions expérimentales appliquées lors des essais physico-mécaniques afin d'évaluer les performances et la durabilité des composites élaborés.

2.2 Matériaux :

2.2.1 Matrice polyester :

Dans le cadre de cette étude, la matrice adoptée est une résine polyester insaturée, fabriquée par la société allemande Reichhold GmbH et commercialisée sous le nom PolyLite 440-M850.

Cette résine est utilisée en combinaison avec un durcisseur de type peroxyde de méthyle éthyle cétoné (MEKP), selon un rapport de mélange de 2:1 (résine/durcisseur). Elle se distingue par un temps de séchage relativement court, compris entre 8 et 12 heures à température ambiante, ce qui la rend particulièrement adaptée aux procédés de moulage manuel et de stratification.

Matériaux et techniques et conditions expérimentales

Afin de pleinement comprendre les performances des composites, une caractérisation préliminaire de la résine pure a été réalisée. Les propriétés intrinsèques de cette matrice, correspondant aux données figurant sur l'étiquette du produit et obtenues auprès du vendeur, sont récapitulées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la matrice

Caractéristique	Valeur indicative	Unité
Couleur	Bleu	—
Forme	Liquide visqueux	—
Densité	1,1 – 1,3	g/cm ³
Viscosité à 25°C	400 – 600	mPa·s
Méthode d'application	Stratification / moulage manuel	—
Module de traction	2500 – 3500	MPa
Résistance à la traction	50 – 70	MPa
Allongement à la rupture (Élongation)	1 – 2	%
Module de flexion	2500 – 4000	MPa
Résistance à la flexion	80 – 120	MPa
Résistance à la compression	90 – 130	MPa
Température de transition vitreuse (Tg ultime)	60 – 70	°C
Dureté Shore D	80 – 85	—
Rapport de mélange résine/durcisseur	2:1	—
Teneur en carbone d'origine biologique	< 1	%
Teneur en composés organiques volatils (COV)	< 35	% en masse

Remarques :

- ✓ La résine est catalysée avec du peroxyde de méthyle éthyle cétoné (MEKP) à 1,5 %.



Figure 2.1: Photographie de la résine et le durcisseur

2.2.2 Le renfort :

Le renfort utilisé pour l'élaboration de notre composite est constitué de poudre issue de coquilles d'œufs de poule."

2.2.2.1 Prétraitement:

Dans cette phase, les coquilles d'œuf sont purifiées de leurs impuretés en suivant les étapes détaillées ci-après :

- **Étape 1 : Collecte**

Les coquilles d'œuf ont été collectées auprès d'un pâtissier et à domicile. Cette opération a duré environ cinq jours.

- **Étape 2 : Trempage**

Les coquilles ont été immergées dans de l'eau pendant deux jours afin de faciliter l'élimination des saletés superficielles et des résidus organiques.

- **Étape 3 : Lavage**

Les coquilles d'œuf sont soigneusement lavées pour éliminer les impuretés restantes, notamment les résidus de blanc d'œuf et la membrane interne (**Figure 2.2-a**).

- **Étape 4 : Séchage**

Les coquilles sont ensuite séchées à l'air libre, sous les rayons du soleil, jusqu'à évaporation complète de l'humidité (**Figure 2.2-b**).

- **Étape 5 : Concassage**

Les coquilles d'œuf sont concassées manuellement afin de les préparer pour l'étape suivante, le broyage, facilitant ainsi le traitement ultérieur. Le diamètre des particules obtenues est d'environ 212 μm ; La somme 1282 g (**Figure 2.2-c**).

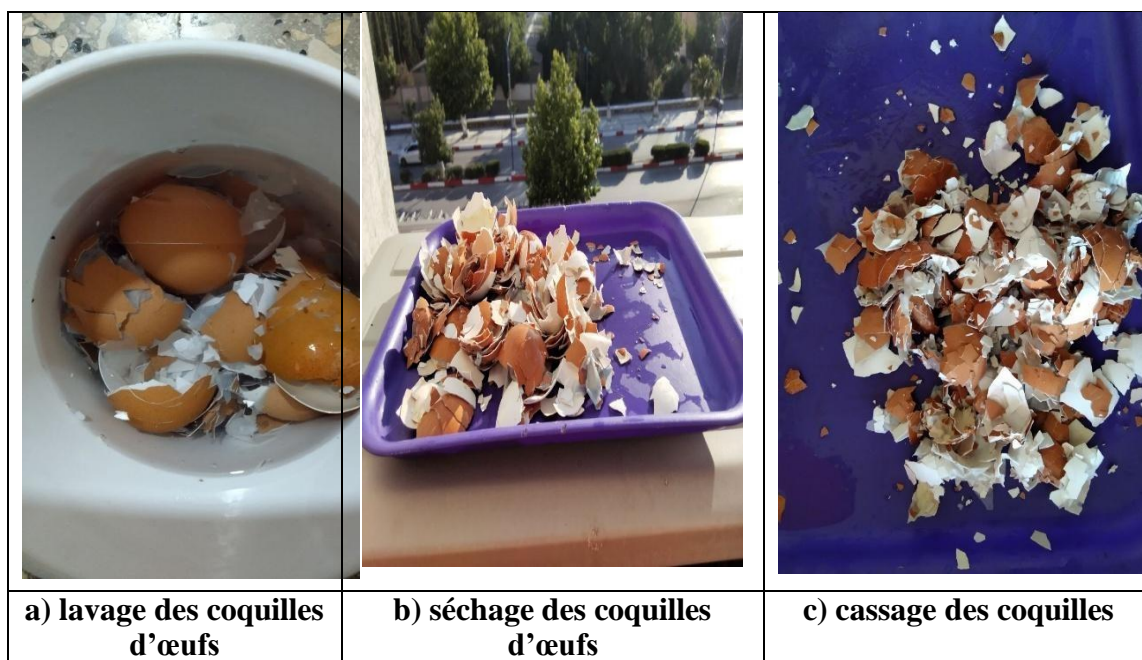


Figure 2.2 : Photographies des étapes de prétraitement des coquilles d'œufs

2.2.2.2 Traitement :

Après le traitement initial des coquilles d'œuf, celles-ci sont soumises à un traitement complémentaire en plusieurs étapes, dans le but d'améliorer leurs propriétés et de les rendre adaptées à une utilisation dans les matériaux composites.

- **Etape 1 : Dégraissage alcalin :**

Le dégraissage alcalin consiste à immerger les échantillons dans une solution basique, généralement une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). Les coquilles d'œuf, préalablement concassées, sont placées dans une solution de NaOH à une concentration de 1 % pendant deux heures. Ce traitement a pour objectifs : a) **d'éliminer** les matières organiques et les graisses résiduelles. b) **d'augmenter** la surface spécifique et l'activité chimique des particules. c) **d'améliorer** l'adhérence entre les coquilles d'œuf et la matrice polymère lorsqu'elles sont utilisées dans les matériaux composites (**Figure 2.3-a**).

- **Etape 2 : Lavage à l'eau distillée :**

Après le traitement à la soude, les **particules** sont soigneusement lavées à l'eau distillée afin d'éliminer les résidus de soude (**Figure 2.3-b**).

- **Etape 3 : Séchage :**

Après le lavage, les **particules** sont placées dans une étuve et séchées à 70 °C jusqu'à élimination complète de l'humidité. Ce séchage permet d'éliminer l'excès d'eau et de préparer les **particules** pour le broyage.

- **Etape 4 : Broyage :**

Suite au séchage, les coquilles d'œuf sont réduites en poudre fine à l'aide d'un broyeur électrique **équipé** de deux disques de broyage métalliques, fonctionnant à une vitesse de 300 à 500 tours par minute. Ce broyage augmente la surface spécifique des **particules** et facilite leur **dispersion** dans les matériaux composites.

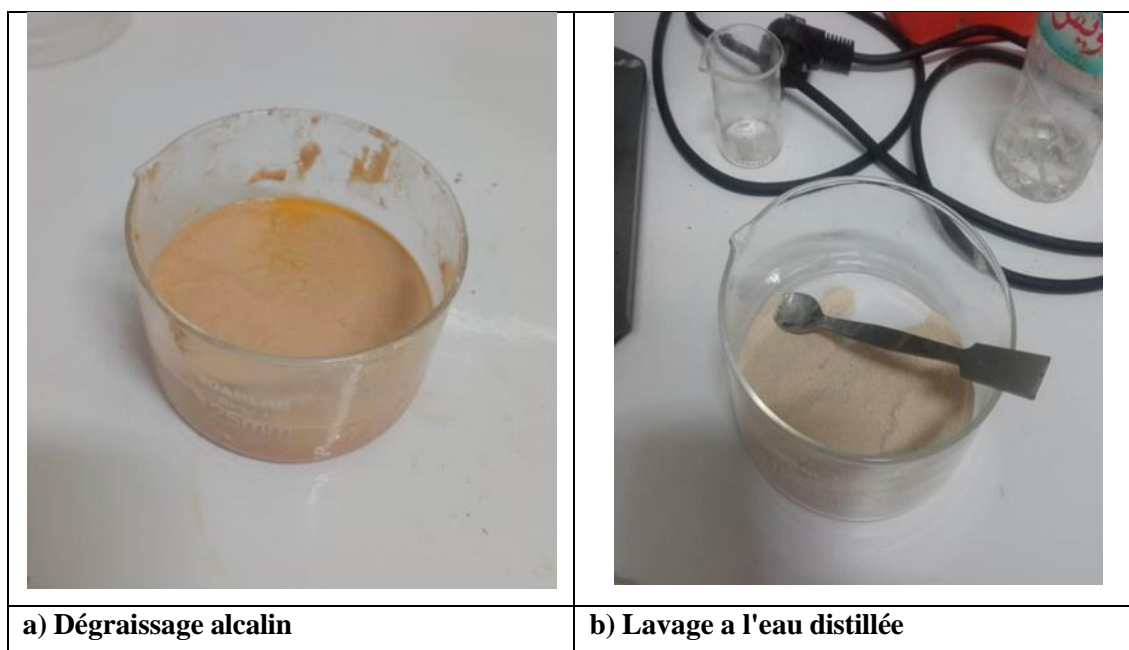


Figure 2.3 : Photographie des tapes de traitement des coquilles d'œufs

2.2.2.3 Fabrication des composites :

Afin de garantir la composition souhaitée et les propriétés attendues, la formulation des composites élaborés dans un moule en silicone a nécessité des calculs précis des proportions de chaque constituant. Ces calculs sont détaillés ci-après :

A) Calcul du volume de la résine :

Le volume de résine nécessaire à la fabrication du composite peut-être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V=L \times d \times h \quad \text{Eq.2.1}$$

Où:

- V: Est le volume de résine en millimètres cubes (mm³)
- L: Est les longueurs du moule en millimètres (mm)
- d: Est la largeur du moule en millimètres (mm)
- h: Est l'épaisseur du composite en millimètres (mm)

En substituant les valeurs données dans la formule, on obtient :

$$V=3150\text{mm} \times 200\text{mm} \times 4\text{mm} = 280000 \text{ mm}^3$$

Par conséquent 280000 mm de résine sont nécessaires pour fabriquer le composite.



Figure 2.4: Photographie du moule silicone.

La masse de résine nécessaire à la fabrication du composite peut-être calculée à l'aide de la formule suivante:

$$m=\rho \times V \quad \text{Eq.2.2}$$

Où:

- **V**: Est le volume de résine en millimètres cubes (mm³)
- **ρ** : Est la densité de la résine (g/cm³)

En substituant les valeurs données dans la formule, on obtient

$$m=1,092 \times (\text{g/cm}^3) \times 280000 \text{ mm}^3 \times 0.001 \text{ cm}^3/\text{mm}^3 = 305,76 \text{ g}$$

La résine est un mélange de polyester et de son durcisseur dans un rapport 1:2 par conséquent on pèse :

- 4.58 g de **durcisseur**
- 305,76 g **d'polyester**

B) Protocole de Fabrication des Composites par Moulage au Contact :

La fabrication des composites par moulage au contact s'effectue en suivant les étapes clés ci-après :

1. **Pesée de la résine :** Peser avec précision 305,76 grammes de résine polyester.
2. **Préparation du mélangeur :** Transférer la quantité pesée de résine dans un mélangeur électronique, puis le mettre en marche à la vitesse la plus basse.
3. **Homogénéisation de la résine :** Mélanger la résine jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et la disparition complète des bulles d'air.
4. **Incorporation du renfort :** Ajouter progressivement le renfort à la résine, en maintenant l'agitation jusqu'à l'homogénéisation complète du mélange.
5. **Ajout du durcisseur et repos :** Incorporer progressivement 4,58 g de durcisseur au mélange résine-renfort, puis laisser reposer la préparation pendant 30 minutes.
6. **Moulage :** Couler le mélange homogène (résine, renfort, durcisseur) dans un moule en silicone.
7. **Séchage initial / Polymérisation primaire :** Laisser le mélange polymériser à l'air libre, dans un endroit sec et ventilé, pendant 24 heures.
8. **Post-durcissement :** Placer ensuite les plaques obtenues dans une étuve à 70 °C pendant 24 heures pour finaliser le durcissement et assurer une polymérisation complète.

Suite aux calculs de formulation, le Tableau 2.2 récapitule la désignation de chaque échantillon de biocomposite, en précisant son taux de charge en poudre de coquilles d'œuf (PCR) et la quantité massique de renfort correspondante."

Tableau 2.2 : Désignation et composition massique des biocomposites préparés

Designation	Taux de charge (PCR)	Masse de Renfort (g)
Cpc0	-	-
Cpc1	5%	15,22
Cpc2	10%	30,17
Cpc3	15%	45,86
Cpc4	20%	61,17
Cpc5	25%	76,44
Cpc6	30%	91,72

Note : CPC : Composite polyester/ Coquilles d'œufs

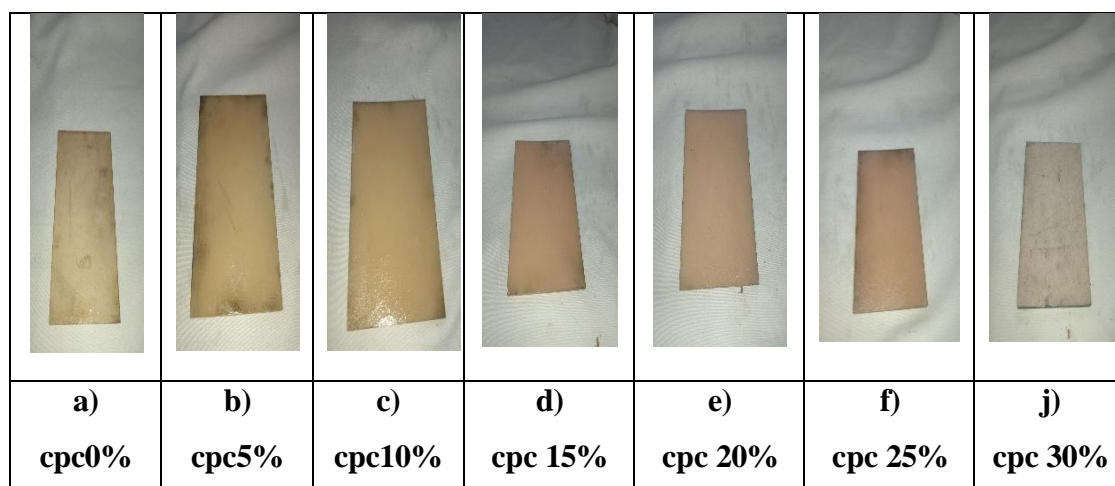


Figure 2.5 : Photographie des échantillons en composites élaborées

2.3 Techniques et conditions expérimentales :

2.3.1 Essais mécaniques

2.3.1.1 Essais de traction :

Afin de caractériser les propriétés mécaniques des **biocomposites** élaborés, notamment le **module de Young** et les contraintes à la rupture, des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes rectangulaires de dimensions normalisées (11,5 cm de longueur et 1,5 cm de largeur). Ces éprouvettes ont été fixées entre les mors supérieur et inférieur d'une **machine de traction (où : machine d'essais universelle)** à une vitesse de déplacement de 2 mm/min.

Les essais de traction ont été effectués à température ambiante sur une machine pilotée par ordinateur, **laquelle est représentée sur la Figure 2.6.**

Calcul des propriétés mécaniques

Suite aux essais expérimentaux réalisés, l'évaluation des propriétés mécaniques des biocomposites s'effectue par des calculs spécifiques, dont le détail commence par le Module de Young (E).

Le **module de Young**, ou module de traction, représente la rigidité du matériau en traction. Il est défini comme la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation (généralement la zone élastique). Le **module de Young** (E) est calculé à partir de la loi de Hooke [27].

$$E = \sigma / \varepsilon \quad \text{Eq.2.3}$$

Où :

- **E**: Est le module d'Young (en MPa)
- **σ** : Est la contrainte (en MPa)
- **ε** : Est la déformation (%)
- **Contrainte à la rupture (σ_r)**

La contrainte à la rupture représente la charge maximale par unité de surface que l'éprouvette peut supporter avant de rompre. Elle est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_r = F_{\max} / S_e \quad \text{Eq.2.4}$$

Où :

- **σ_r** : est la contrainte à la rupture (en MPa).

- **F max** : est la force maximale appliquée avant rupture (en N)
- **S e**:est la section initiale de l'éprouvette (en mm²)

- **La déformation à la rupture représente:**

L'allongement maximal que l'éprouvette peut subir avant de rompre. Elle est exprimée en pourcentage (%) et calculée à partir de l'équation suivante :

$$\sigma r = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Eq.2.4}$$

Ou :

- **σr** : est la déformation à la rupture (%)
- **ΔL** :est l'allongement final de l'éprouvette (en mm)
- **L_0** :est la longueur initiale de l'éprouvette (en mm)



Figure 2.6 : Photographie de la machine zwick roell z010

2.3.1.2 Dureté Shore :

Dans le cadre de la caractérisation des propriétés mécaniques de nos biocomposites, le test de dureté Shore a été réalisé afin d'évaluer leur rigidité superficielle.

Ce test mesure la résistance d'un matériau à la pénétration d'un indenteur. Plus un matériau est dur, moins la profondeur de pénétration est importante. La lecture s'effectue

sur une échelle de 0 à 100, où 0 représente les matériaux très souples et 100 les matériaux très durs.

Le test de dureté Shore s'effectue à l'aide d'un appareil spécifique appelé duromètre, dont les principaux composants sont les suivants :

- **Composants du duromètre :**
 - L'aiguille (Indenter) : pénètre le matériau.
 - Le ressort (Spring) : applique une force.
 - L'échelle de lecture (Cadran ou affichage digital).
 - La base de support (Base).

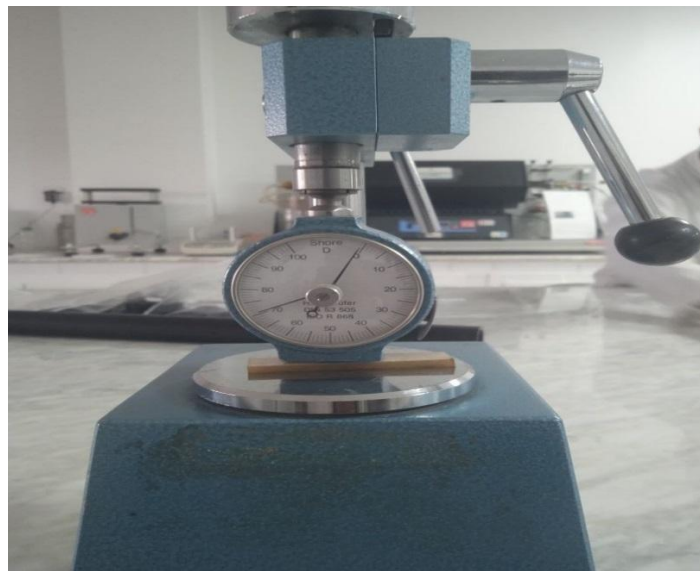


Figure 2.7 : Photographies de l'appareil de dureté

2.3.2 Essais physiques :

Outre les caractérisations mécaniques, une série d'essais physiques a été menée pour déterminer les propriétés fondamentales des matériaux élaborés, en commençant par la mesure de la densité.

2.3.2.1 Densité (ρ) :

- **Principe :** La densité des fragments de résine ou de composites est mesurée par pycnométrie (méthode de déplacement de liquide). Cette méthode, conforme à la norme ISO 1183 [28], s'applique aux matériaux non poreux.
- **Procédure :**

1. **Préparation du pycnomètre et du liquide** : Nettoyer le pycnomètre et le remplir avec un liquide de densité connue (généralement de l'eau distillée).
2. **Préparation de l'échantillon** : Préparer un fragment de résine ou de composite dont la masse doit être déterminée.
3. **Pesée de l'échantillon à l'air** : Peser l'échantillon à l'air (W) à l'aide d'une balance de précision.
4. **Pesée du liquide seul** : Peser le pycnomètre rempli uniquement de liquide (W_0).
5. **Immersion de l'échantillon et nouvelle pesée** : Immerger l'échantillon dans le liquide en veillant à l'absence de bulles, puis peser à nouveau (W_1).
6. **Enregistrement de la masse volumique du liquide** : Enregistrer la masse volumique du liquide utilisé (ρ_0), généralement $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$ pour l'eau distillée.

À partir des mesures obtenues selon la procédure décrite précédemment, la densité (ρ) des matériaux est calculée en utilisant la formule suivante, basée sur le principe de la pycnométrie :

Formule de calcul de la densité (ρ) :

$$\rho = \frac{W + W_0 - W_1}{W} \times \rho_0 \quad \text{Eq.2.5}$$

Où :

- ρ : Densité du matériau (g/cm^3)
- W : Masse de l'échantillon à l'air (g)
- W_0 : Masse du pycnomètre rempli de liquide uniquement (g)
- W_1 : Masse du pycnomètre avec l'échantillon immergé et rempli de liquide (g)
- ρ_0 : Masse volumique du liquide utilisé (g/cm^3)



Figure 2.8 : Photographie de la balance de densité

Conclusion :

Ce chapitre présente en détail les étapes d'élaboration de la poudre de coquilles d'œuf, incluant les méthodes de préparation et de purification. Il décrit ensuite les techniques d'analyse physico-chimique et mécanique appliquées à ce matériau de renfort, détaillant les appareils, les protocoles d'essais et les calculs employés pour évaluer ses propriétés spécifiques. La seconde partie du chapitre est consacrée à la fabrication de plaques composites, ainsi qu'à la préparation des éprouvettes destinées aux essais statiques et dynamiques, dont les dispositifs expérimentaux mis en œuvre sont également décrits avec précision.

[27]-An Introduction to Properties, Applications, and Design, 4th Ed., Elsevier, 2012.

<https://www.sciencedirect.com/book/9780080966656/engineering-materials-1>

[28]- Densité – Méthode du pycnomètre : ASTM D792 – Standard Test Methods for Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement <https://www.astm.org/d0792-20.html>

Chapitre 3: Résultats et discussions

3.1 Introduction :

Ce chapitre présente les résultats des techniques expérimentales mises en œuvre et leur interprétation.

3.2 Essais mécaniques :

Les propriétés mécaniques (traction, dureté) des composites UPR /poudre de la coquilles d'œufs ont été déterminées en fonction du taux.

3.2.1. Propriétés en Traction : Module de Young des Biocomposites UPR/poudre de la Coquille d'œuf

La Figure 3.1 illustre l'évolution du module de Young (E), qui représente la rigidité du matériau, en fonction de la concentration de poudre de coquille d'œuf incorporée dans les biocomposites.

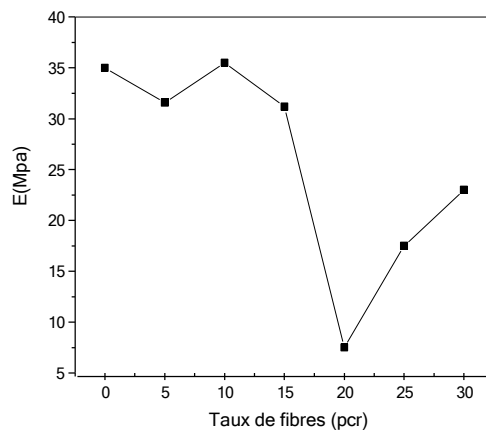


Figure 3.1 : Variations du module de Young des biocomposites en fonction du taux de poudre de coquille d'œuf.

Les données révèlent une progression constante du module de Young, passant de 3,2 MPa pour la matrice pure à près de 4,6 MPa avec 20 pcr de poudre de coquille d'œuf. Cette tendance ascendante démontre clairement l'efficacité du renfort en poudre de coquille d'œuf pour rigidifier les biocomposites et améliorer leur résistance à la déformation élastique. L'absence de phénomènes de plateau ou de déclin observés habituellement dans d'autres composites (dus à l'agglomération ou à une mauvaise imprégnation) suggère une qualité de dispersion et d'interaction fibre-matrice particulièrement favorable jusqu'à un taux de 20 pcr.

3.2.2. Dureté :

L'impact de l'incorporation de la poudre de coquilles d'œuf sur la dureté des biocomposites est visualisé dans la Figure 3.2 ci-dessous.

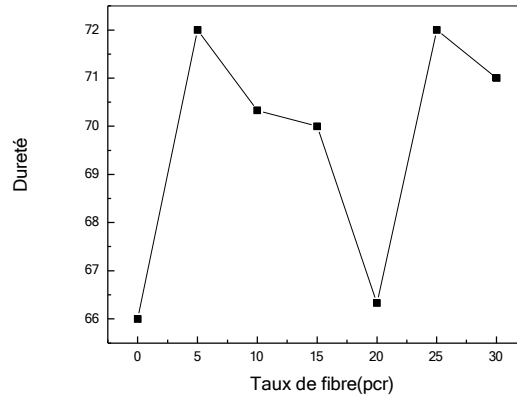


Figure 3.2 : Évolution de la dureté en fonction du pourcentage en poids de la poudre de coquilles d'œuf

Le graphique de la Figure 3.2 présente l'évolution de la dureté Shore des biocomposites en fonction du pourcentage en poids (PCR) de poudre de coquilles d'œufs. La dureté Shore, qui caractérise la résistance d'un matériau à la pénétration d'un indenteur, sert d'indicateur de sa rigidité superficielle.

La matrice pure, sans ajout de poudre, affiche une dureté Shore d'environ 69,3. L'intégration de 5% de poudre de coquilles d'œufs se traduit par une hausse significative de cette dureté, atteignant approximativement 71,5. Ce premier accroissement suggère qu'une faible quantité de cette charge renforçante suffit à améliorer efficacement la rigidité de surface du composite.

Au-delà de 5% et jusqu'à 10% de poudre de coquilles d'œufs, la dureté Shore se stabilise aux environs de 71,5. Ce palier indique que l'incorporation additionnelle de poudre dans cette fourchette de concentration n'induit pas d'amélioration notable de la dureté superficielle. Ce phénomène pourrait être attribué à l'agglomération des particules de poudre ou à une imprégnation insuffisante de la matrice, ce qui entraverait un transfert de contrainte efficace.

Au-delà de 10% de poudre de coquilles d'œufs, la dureté Shore retrouve une trajectoire ascendante. Elle s'élève à environ 73 pour un taux de 15% et culmine à

approximativement 74,5 à 20% de poudre dans la plage étudiée. Cette reprise du gain de dureté suggère qu'à des concentrations plus élevées, la fraction volumique totale de la poudre de renfort devient suffisamment prépondérante pour compenser les limitations antérieures et contribuer plus efficacement à la résistance du matériau à l'indentation.

3.3 Essais physiques :

Les propriétés physiques (densité) des composites UPR/poudre de **coquilles d'œuf** ont été déterminées en fonction **du taux de charge**.

3.3.1. Densité :

Les variations de la densité des biocomposites UPR/poudre de coquilles d'œuf en fonction du taux de poudre sont reportées dans la Figure 3.3.

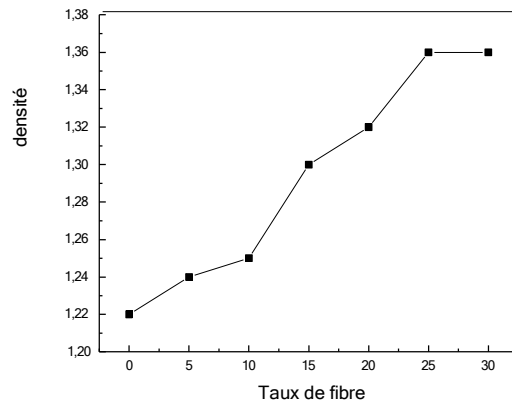


Figure 3.3 : variations de la densité des bio-composites UPR/poudre de coquilles d'œufs

Le graphique de la Figure 3.3. révèle une augmentation progressive de la densité du biocomposite avec l'incorporation de la poudre de coquilles d'œufs. La densité passe ainsi d'environ 1,22 g/cm³ pour la matrice pure (0 % de fibres) à une valeur maximale de 1,35 g/cm³ à 25 % de fibres, avant d'observer une légère stabilisation à 30 %. Cette évolution témoigne d'une amélioration de la compacité du matériau suite à l'ajout de poudre .

Cette augmentation de la densité s'explique par l'intégration de la poudre de coquille d'œufs dans la matrice. Ce processus réduit les vides internes et favorise un meilleur agencement des constituants, rendant la structure plus dense et moins poreuse. Une telle compacité est généralement bénéfique pour certaines propriétés mécaniques, notamment la résistance.

Cependant, la stabilisation de la densité au-delà de 25 % de la poudre de coquilles d'œufs pourrait indiquer une saturation du matériau. À ce stade, la matrice ne parvient plus à enrober efficacement la poudre supplémentaire, ce qui limite l'accroissement de la densité. Un excès de taux de la poudre de coquilles d'œufs peut même entraîner la formation d'agglomérations ou de défauts de dispersion, compromettant potentiellement les performances.

3.4 Conclusion :

- L'ajout de poudre de coquilles d'œufs accroît progressivement la rigidité (module de Young) des biocomposites.
- La poudre de coquilles d'œufs améliore la dureté Shore des biocomposites, bien que cette augmentation ne soit pas linéaire et puisse présenter une phase de stabilisation.
- L'incorporation de fibres (ou de poudre de coquilles d'œufs) augmente la densité des biocomposites jusqu'à atteindre un niveau de saturation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a exploré le potentiel prometteur des composites à base de résine polyester insaturée et de la **poudre de coquilles d'œuf** comme matériaux innovants pour des applications structurelles.

L'étude a permis de dégager les conclusions majeures suivantes :

1. **Maîtrise approfondie des concepts fondamentaux :** Une revue bibliographique exhaustive a permis de cerner les concepts clés liés aux composites, à la résine polyester insaturée et à la **poudre de coquilles d'œuf**, constituant ainsi une base solide pour l'investigation menée.
2. **Expertise des outils et techniques d'analyse :** La procédure expérimentale détaillée et le matériel utilisé ont été pleinement maîtrisés, permettant une identification précise des matériaux constitutifs, une élaboration rigoureuse des composites et une caractérisation approfondie de leurs propriétés **physico-mécaniques**.
3. **Performances physico-mécaniques des composites à base de résine polyester insaturée et de poudre de coquilles d'œuf :**
 - L'ajout de **poudre de coquilles d'œuf** accroît progressivement la rigidité (module de Young) des biocomposites.
 - La **poudre de coquilles d'œuf** améliore la dureté Shore des biocomposites, bien que cette augmentation ne soit pas linéaire et puisse présenter une phase de stabilisation.
 - L'incorporation de la **poudre de coquilles d'œuf** augmente la densité des biocomposites jusqu'à atteindre un niveau de saturation.

En somme, cette étude valide le potentiel de la poudre de coquilles d'œuf comme charge écologique efficace, ouvrant des perspectives pour le développement de matériaux durables et la valorisation des déchets.

Conclusion générale

Cependant, en raison des contraintes de temps et du manque de moyens, cette investigation n'a pu être approfondie autant que souhaité. Il est donc préconisé aux futurs étudiants de poursuivre et de développer davantage cette étude, afin d'explorer de nouvelles pistes et d'optimiser davantage ces biocomposites.

Annexe 1 : Données du Test de traction du composite UPR /poudre de coquilles d'œuf

Taux	σ(Mpa)	ε (%)	E(Mpa)
0 pcr	35.23	18	35
5 pcr	32.20	12.3	31.6
10 pcr	32.13	12.2	35.5
15 pcr	32.26	14.33	31.2
20 pcr	18.05	9.95	7.5
25 pcr	18.16	8.36	17.5
30 pcr	22.7	15.66	23

Annexe 2 : Données de la densité du composite UPR /poudre de coquilles d'œuf

Taux	La moyenne : d(g/cm 3)
0 pcr	1.22
5 pcr	1.24
10 pcr	1.25
15 pcr	1.30
20 pcr	1.32
25 pcr	1.36
30 pcr	1.36

Annexe 3 : Données de la dureté du composite UPR /poudre de coquilles d'œuf

Taux	Dureté
0 pcr	70.33
5 pcr	66.33
10 pcr	66
15 pcr	70
20 pcr	72
25 pcr	72
30 pcr	71