

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ -BOUIRA



Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

SAFIA Thinhinane

AHMANACHE Thelelli

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en

Filière : **Génie civil**

Option : **Matériaux en génie civil**

Thème

**Elaboration et caractérisation d'une matrice polymère à base
des sédiments de dragage**

Devant le jury composé de

- Mr		UAMOB	Président
- M ^{me} LAOUCHEDI Dalila	MCB	UAMOB	Encadreur
- Mr AIT TAHAR Kamel	Pr	UAMOB	Co- encadreur
- Mr		UAMOB	Examineur

Année universitaire 2024/2025.

Remercîments

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont soutenu et guidé dans la réalisation de ce mémoire de Master. Tout d'abord, je remercie chaleureusement le Professeur Ait Tahar Kamel, Madame Laouchedi Dalila, pour leur encadrement, leur conseils éclairés et leur disponibilité constante.

Je suis également reconnaissante envers les membres du jury pour leurs remarques pertinentes et leur temps consacré à l'évaluation de ce travail. Merci aux enseignants du Master Matériaux en génie civil pour leurs enseignements enrichissants et leur soutien.

Mes remerciements vont aussi à mes camarades de promotion pour leur camaraderie et les échanges fructueux que nous avons eus. Un immense merci à ma famille et à mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements sans faille.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes, connues ou inconnues, qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire. Votre aide a été inestimable.

Dédicace

Du fond du cœur, je dédie ce travail à toutes les personnes qui me sont chères.

À mes parents

Merci du fond du cœur pour tout votre amour, vos sacrifices et votre soutien depuis mon enfance. Ce travail est le fruit de vos prières. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie. Mama, ton rêve est devenu réalité : ta fille est enfin diplômée.

À mes chers frères, Cherif et Massinissa

Merci pour votre présence, vos sourires et vos mots qui m'ont toujours encouragée. Ce travail est aussi le reflet de notre lien fort et de votre soutien."

À ma chère sœur

Merci pour ton soutien moral et tes conseils qui m'ont beaucoup aidée pendant mes études.

À mon cher binôme

Merci pour ta gentillesse et ta bonne entente tout au long de ce travail.

Merci d'avoir été à mes côtés, toujours disponible et de bonne humeur.

Ta rigueur et ton soutien ont été essentiels à ce projet.

Ce mémoire te doit beaucoup : cette réussite est aussi la tienne.

Safia Thinhinane

Dédicace

Du fond du cœur, je dédie ce travail à toutes les personnes qui me sont chères.

À mes parents

Merci du fond du cœur pour tout votre amour, vos sacrifices et votre soutien depuis mon enfance. Ce travail est le fruit de vos prières. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes chers frères et sœurs

Merci pour votre présence, vos sourires et vos mots qui m'ont toujours encouragée. Ce travail est aussi le reflet de notre lien fort et de votre soutien."

Résumé :

Cette étude porte sur l'analyse de l'influence des charges minérales , en particulier des sédiments de dragage sous formes calcinée et non calcinée, sur les performances physico-mécaniques d'une matrice à base de résine époxyde. Dans le but d'évaluer l'impact de ces additifs, différents taux d'incorporation allant de 2 % à 10 % en poids ont été considérés.

Les résultats expérimentaux ont démontré que l'ajout de ces charges minérales modifie significativement les propriétés intrinsèques de la résine époxy, en lui conférant de nouvelles caractéristiques fonctionnelles. D'une part, leur incorporation permet une réduction substantielle du coût de fabrication des matériaux composites, et d'autre part, elle contribue à une amélioration notable des propriétés mécaniques, et de la rigidité du matériau.

Les sédiments non calcinés se sont révélés plus performants que leur équivalent calciné, avec un comportement optimal observé à un taux d'incorporation de 6 %, conférant à la matrice des propriétés mécaniques supérieures tout en maintenant une bonne homogénéité du composite.

Mots-clés : résine époxyde, charges minérales, sédiments de dragage, renforcement mécanique, propriétés physico-mécaniques, matériaux composites.

Abstract

This study focuses on analyzing the influence of mineral fillers, particularly dredged sediments in calcined and non-calcined forms, on the physico-mechanical performance of an epoxy resin-based matrix. In order to evaluate the impact of these additives, different incorporation rates ranging from 2% to 10% by weight were considered.

The experimental results demonstrated that the addition of these mineral fillers significantly modifies the intrinsic properties of the epoxy resin, imparting new functional characteristics to it. On the one hand, their incorporation allows for a substantial reduction in the manufacturing cost of composite materials, and on the other hand, it contributes to a notable improvement in mechanical properties, particularly through an increase in the material's rigidity.

Notably, the non-calcined sediments proved to be more effective than their calcined equivalent,

with optimal behavior observed at an incorporation rate of 6%, imparting superior mechanical properties to the matrix while maintaining good homogeneity of the composite.
Key words: resin epoxy, the mineral load, properties physical and mechanical properties.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الأثر الميكروهيكلية والإجمالي للإضافات المعدنية المحلية، والمتمثلة في راسب التجريف بصيغتها (المكلسة وغير المكلسة)، على السلوك الفيزيائي والميكانيكي لمادة مركبة قائمة على راتنج الإيبوكسي. تم تحضير عينات مركبة بنسبة إدماج تدريجية للإضافات تتراوح ما بين 2% و 10% وزناً، بغرض تحديد النسبة المثلى لتعزيز الخواص الوظيفية للمادة الأساسية. أظهرت النتائج أن دمج هذه الإضافات يحدث تحولات ملحوظة في الخصائص البنيوية والميكانيكية لراتنج الإيبوكسي، حيث ساهمت في تحسين مؤشرات الصلابة والارتباط الداخلي، إلى جانب خفض التكلفة الكلية لإنتاج المواد المركبة. وقد نبين أن الأداء الميكانيكي يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالتركيب المعدني، والحجم الحبيبي، وطبيعة المعالجة الحرارية للإضافة. لوحظ أن الإضافات غير المكلسة قدمت أفضل استجابة ميكانيكية، خاصة عند نسبة إدماج تبلغ 6%، حيث سجل تحسن معتبر في معامل الصلابة والتجانس البنيوي للمركب النهائي مقارنةً بالإضافات المكلسة. **كلمات مفتاحية:** الراتنج الإيبوكسي، المضافات المعدنية، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ..

Table des matières

Remercîments

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : généralité sur les composites

I.1 Introduction 4

I.2 Définition d'un matériau composite 4

I.3 Classification des composites 4

I.3.1 Classification selon le type de matrice 4

I.3.1.1 Matrices minérales 5

I.3.1.2 Matrice organique 5

I.3.2 Classification selon la catégorie du renfort 10

I.3.3 Classification suivant la forme des constituants 10

I.3.4 Classification suivant la nature des constituants 11

I.4 Les renforts 12

I.4.1 Différents types de renforts 13

I.4.1.1 Renfort en fibres discontinues 13

I.4.1.2 Renfort continue 13

I.4.1.2.1 Les fibres de verre 13

I.4.1.2.2 Avantage des fibres de verre 14

I.4.1.2.3 Inconvénients des fibres de verre 14

I.4.1.3 Fibres de carbone 14

I.5 Caractéristiques des matériaux composites 15

I.6 Les applications des matériaux composites 16

I.6.1 Dans le domaine aérospatial 16

I.6.2 Dans le domaine militaire 16

I.6.3 Dans le domaine de construction 16

I.6.4 Dans domaine sport et loisirs 16

I.7	Intérêt des matériaux composites.....	16
-----	---------------------------------------	----

Chapitre II : sédiments de dragage

Introduction	19
II.1 Caractérisation des sédiments des barrages	19
II.1.1 Définition.....	19
II.1.1.1 Origines des sédiments	20
II.1.1.1.1 Origine en Diogène (naturelle)	20
II.1.1.1.2 Origine exogène (anthropique)	20
II.1.1.2 Le concept vasé	20
II.1.2 Constitution et composition minérale des sédiments.....	20
II.1.2.1 Les illites	21
II.1.2.2 Les montmorillonites	21
II.1.2.3 Le kaolin.....	21
II.2 Caractéristiques des sédiments.....	21
II.3 Taille des particules.....	22
II.3.1 Forme des particules	23
II.3.2 Masse volumique de la particule	23
II.4 Mécanisme de l'envasement	23
II.4.1 Comportement des sédiments grossiers.....	23
II.4.2 Comportement des sédiments fins.....	24
II.5 Altération des sédiments	24
II.6 Transport des sédiments.....	25
II.6.1 Transport par le vent.....	25
II.6.2 Transport par gravité pure	25
II.6.3 Transport par la glace	26
II.6.4 Transport par l'eau.....	26
II.7 Stockage des sédiments	27
II.8 Présentation du barrage de Beni Amrane.....	27
II.9 Le phénomène de l'envasement.....	29
II.9.1 Définition.....	29
II.9.2 Les étapes d'envasement	29
II.9.3 Conséquences de l'envasement	30
II.9.4 La problématique de dragage	31

II.9.4.1	Nécessité du dragage	31
II.9.5	Les techniques de dragage.....	31
II.9.5.1	Définition.....	31
II.9.5.2	Le dragage mécanique.....	32
II.10	Risque causé par l'opération de dragage	33
II.10.1	Lutter contre le dragage.....	33
II.10.2	CARACTERISATIONPHYSICO-CHIMIQUE	34
II.10.3	Valorisation des sédiments de Barrages.....	35
II.10.3.1	. Valorisation des sédiments.....	35
II.11	Les défis liés à l'incorporation des sédiments dans des matériaux.....	36
II.11.1	Défis environnementaux	36
II.11.2	Défis techniques et matériaux	37
II.11.3	Défis réglementaires	37
II.11.4	Défis économiques et industriels.....	37
II.11.5	Solutions possibles	37

Chapiter III: renforcement des polymeres avec des charges minerales

Introduction	39
III.1 Impact des charges minérales sur les propriétés des composites	39
III.1.1 Propriétés mécaniques	39
III.1.2 Propriétés thermiques	40
III.1.3 Propriétés rhéologiques	40
III.1.4 Propriétés environnementales	40
III.2 Techniques de fabrication des composites époxy/argile	41
III.2.1 Mélange et coulage.....	41
III.2.2 Injection et compression.....	41
III.2.3 Stratification et infusion (composites fibre)	41
III.2.4 Électrofilage et extrusion.....	41
III.2.5 Dispersion préalable en phase liquide	42
III.3 Travaux de recherche antérieurs sur l'utilisation des charges argileuses.....	42
III.4 Avantages et limites dans la construction pour l'utilisation des charges minérales....	48
III.4.1 Rigidification et stabilité	48
III.4.2 Barrière thermique et résistance au feu	48

III.4.3	Durabilité chimique et résistance à l'abrasion.....	48
III.4.4	Coût et écoconception	48
III.5	Limites	49
III.5.1	Dispersion et traitement.....	49
III.5.2	Fragilisation potentielle	49
III.5.3	Augmentation de la viscosité et difficultés de mise en œuvre.....	49
III.5.4	Variabilité et finitions	49

Chapitre IV : partie expérimentale

IV.1	Caractérisation des matériaux utilisés.....	52
IV.1.1	Caractérisation de la matrice	52
IV.2	Caractérisation des charges minérales	53
IV.2.1	Sédiment de dragage	53
IV.2.1.1	Granulométrie.....	53
IV.2.1.2	Distribution granulométrique de la charge	54
IV.2.1.3	Diffraction des rayons X.....	54
IV.2.1.3.1	Composition minéralogique par DRX.....	56
IV.2.1.4	Composition chimique.....	56
IV.3	Synthèse des matériaux composites.....	57
IV.3.1	Préparation des échantillons	57
IV.4	Caractérisation du matériau composite	57
IV.4.1	Détermination de la masse volumique.....	57
IV.4.1.1	Valeurs des densités des résines chargées par sédiment non calcinés.....	58
IV.4.1.2	Valeurs des densités des résines chargées par sédiment calcinés	59
IV.4.2	Caractérisation mécanique.....	60
IV.4.2.1	Essai de traction.....	60
IV.4.2.1.1	Géométrie des éprouvettes	60
IV.4.2.1.2	Comportement mécanique en traction des composites (résine inject/Sédiment de dragage)	62
IV.4.3	Comportement mécanique en traction des résines inject/SNC.....	65
IV.4.4	Evolution de la contrainte, de l'allongement et de module d'élasticité.....	65
IV.4.5	Une comparaison entre les valeurs de BC/BNC.....	67
	Conclusion générale	69

Reference bibliographique

Liste des figures

Chapitre I : généralité sur les composites

Figure I. 1: Constituent d'un matériau composite [02].....	4
Figure I. 2: Différentes types de matrice [06].....	5
Figure I. 3: groupement.....	6
Figure I. 4: Comportement d'un matériau soumis à une contrainte mécanique [12]	8
Figure I. 5: Organigramme de la classification des matériaux composite selon le renfort [13]	10
Figure I. 6: Les différents types de renforts [17].....	13
Figure I. 7: Fibre de verre sous forme mat [19]	14
Figure I. 8: Bobine de fibre de carbone [21]	15

Chapitre II : sédiment de dragage

Figure II. 1: Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (Maes E)	19
Figure II. 2: Granulométrie en variable sa dimensionnelles [34].....	22
Figure II. 3: Mode de l'envasement.....	24
Figure II. 4: Processus sédimentaires.....	27
Figure II. 5: Barrage de beni Amrane	28
Figure II. 6: Processus d'envasement d'un barrage [38]	30
Figure II. 7: Dragage mécanique Dragage hydraulique	32
Figure II. 8: Pompe hydraulique	33
Figure II. 9: Différentes couche d'une chaussée.....	36
Figure II. 10: Blocs de bétons réalisés avec des sédiments non-immérgeables traités (droite : Port de Dunkerque, gauche : Rade de Toulon).....	36

Chapitre III: renforcement des polymères avec des charges minérales

Figure III. 1: Spectre FTIR des échantillons de résine époxy vieillis.....	43
Figure III. 2: Variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence.....	44
Figure III. 3: Variation du facteur de dissipation de la résine époxy vieillie sous T=127° en fonction de la fréquence pour différentes durées de temps.....	44
Figure III. 4: Variation de la contrainte au seuil d'écoulement des différents avec le taux de CaCO ₃ brut et traité avec 1 % d'agents de couplage.....	45
Figure III. 5: Variation de la Contrainte au seuil d'écoulement des composites M2 (50/50) en fonction des taux de CaCO ₃ brut et traité avec les agents de couplage	45

Figure III. 6: Variation de la force en fonction de l'allongement des composites M1 / CaCO ₃	46
Figure III. 7: Diffractogrammes RX du PBT, OBT et des mélanges PS/OBT3%	47
Figure III. 8: Diffractogramme RX des deux bentonites brutes et modifiée. BT/OBT	47

Chapitre IV : partie expérimentale

Figure IV. 1: Photo des sédiments non calciné	53
Figure IV. 2: courbe granulométrique	54
Figure IV. 3: Composition minéralogique des sédiments non calcine	56
Figure IV. 4: Composition minéralogique des sédiments calcine	56
Figure IV. 5: Dispositif de densimétrie	58
Figure IV. 6: Histogramme de la masse volumique de la résine chargée par les sédiments non calcines	59
Figure IV. 7: Histogramme de la masse volumique de la résine chargée par les sédiments calcines	59
Figure IV. 8: Essai de traction sur les éprouvettes	60
Figure IV. 9: Photo des éprouvettes	61
Figure IV. 10: Photo de moule en aluminium	61
Figure IV. 11: Dimensions de l'éprouvette haltère	61
Figure IV. 12: La courbe de traction pour les résines \ SC	62
Figure IV. 13: Tableau des caractéristiques mécaniques entr action de la résine inject /SC	63
Figure IV. 14: Propriétés de traction en fonction du taux de charges des résines injecte/SC	64
Figure IV. 15: La courbe de traction pour les résines \ SNC	65
Figure IV. 16: Propriétés de traction en fonction du taux de charges des résines injecte/SNC	66
Figure IV. 17: Histogramme comparatif de contrainte entre les résines chargées, par les sédiments BC/BNC	67
Figure IV. 18: Histogramme comparatif de contrainte entre les résines chargées par	68
Figure IV. 19: Histogrammes comparatifs de module d'élasticité entre les résines chargées par	68

Liste des tableaux

Chapitre I : généralité sur les composites

Tableau I. 1: Propriétés mécaniques des résines Epoxydes [12]	9
Tableau I. 2: Caractéristiques des résines thermodurcissables et thermoplastiques. [12]	10

Chapitre IV : partie expérimentale

Tableau IV. 1: Caractéristiques de la résine MEDAPOXY 812INJ selon la fiche technique du fournisseur	52
Tableau IV. 2: Résultats des masses volumiques obtenues pour la résine chargée par les sédiments non calcinés.....	58
Tableau IV. 3: Résultats des masses volumiques obtenues pour la résine chargée par les sédiments calcinés	59
Tableau IV. 4: Tableau des caractéristiques mécaniques entra ction delarésine inject/SNC	65

Introduction générale

Introduction générale

Dans les domaines de la production industrielle, l'optimisation des performances des matériaux constitue un enjeu majeur. Améliorer un matériau, c'est essentiellement accroître ses propriétés tout en réduisant son coût de production. Les avancées technologiques actuelles nécessitent des matériaux innovants offrant des caractéristiques que les matériaux classiques tels que les métaux, les céramiques ou les polymères ne peuvent fournir.

C'est dans ce contexte que les matériaux composites s'imposent comme une alternative de choix. Leur utilisation en remplacement des matériaux traditionnels s'explique par leurs excellentes propriétés spécifiques. Les composites évoluent sans cesse pour répondre à deux exigences : performance et coût réduit ou idéalement, une combinaison des deux.

Un matériau composite est une association de plusieurs phases, dont la synergie permet d'obtenir des performances supérieures à celles de chacun des constituants pris individuellement. Il se compose d'un renfort, qui assure la résistance mécanique de l'ensemble, et d'une matrice, chargée de maintenir la cohésion, de transmettre les efforts mécaniques, et de garantir une résistance à l'environnement (corrosion, vieillissement, température).

Les propriétés finales d'un composite dépendent de plusieurs facteurs : la nature et la forme du renfort, sa proportion, la qualité de l'interface matrice/renfort, ainsi que le procédé de fabrication utilisé.

L'introduction de charges dans les matrices polymères vise à leur conférer des propriétés ou fonctionnalités spécifiques, un sujet largement exploré dans la littérature [1]. Ces charges peuvent jouer divers rôles : réduire le coût en occupant du volume à moindre prix, ou encore modifier les propriétés macroscopiques du matériau final.

Dans cette étude, l'objectif principal est d'incorporer des charges minérales — en l'occurrence, des sédiments de dragage issus du barrage de Beni Amrane (wilaya de Boumerdès) — dans une matrice à base de résine époxy, afin d'évaluer leur impact sur les propriétés mécaniques du composite obtenu, tout en veillant à préserver les qualités intrinsèques de la résine hôte.

D'un point de vue méthodologique, notre démarche a débuté par la caractérisation des composants de base, à savoir la matrice et les charges minérales, avant d'analyser les matériaux composites obtenus.

Ce mémoire est structuré en deux grandes parties :

- Une étude bibliographique
- Une étude expérimentale

La première partie, théorique, se compose de trois chapitres. Le premier chapitre présente les concepts fondamentaux liés aux matériaux composites et à leurs composants, tandis que le second s'intéresse aux sédiments de dragage, et le troisième chapitre est consacré à l'étude du renforcement des polymères par l'ajout de charges minérales.

La seconde partie, consacrée au choix des matériaux de base, leur composition chimique, la granulométrie des charges utilisées, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus et les conclusions en découlant.

Chapitre I

Généralités sur les composites

I.1 Introduction

Le développement de matériaux innovants s'aligne sur les exigences croissantes des utilisateurs, en quête de performances accrues, de coûts réduits et de durabilité. Si l'optimisation de matériaux existants reste fréquente, certaines situations exigent une approche radicalement nouvelle, fondée sur l'association de matériaux différents. Aujourd'hui, l'innovation repose moins sur la découverte de matériaux bruts que sur la conception de combinaisons intelligentes, aboutissant notamment aux matériaux composites, au cœur de notre étude. [02]

I.2 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite se compose de deux ou plusieurs substances distinctes qui restent séparées à l'échelle microscopique [03]. L'association de ces éléments confère au matériau final des propriétés supérieures à celles de ses constituants individuels. Les composites sont principalement constitués de deux éléments clés : la matrice et le renfort. (Figure I.1) [04, 05].



Figure I. 1: Constituent d'un matériau composite [02].

Des additifs peuvent être incorporés à ces deux éléments de base afin d'altérer l'apparence ou d'améliorer les caractéristiques du matériau [06]

I.3 Classification des composites

La plupart des matériaux composites sont fabriqués à partir d'une matrice polymère. [07] Cependant, les polymères seuls ne possèdent pas des propriétés mécaniques suffisamment élevées pour des applications structurales, d'où l'intérêt de les renforcer progressivement. [08]

I.3.1 Classification selon le type de matrice

D'une manière générale, les matériaux composites sont classés en trois grandes catégories en fonction du type de matrice utilisée [05] :

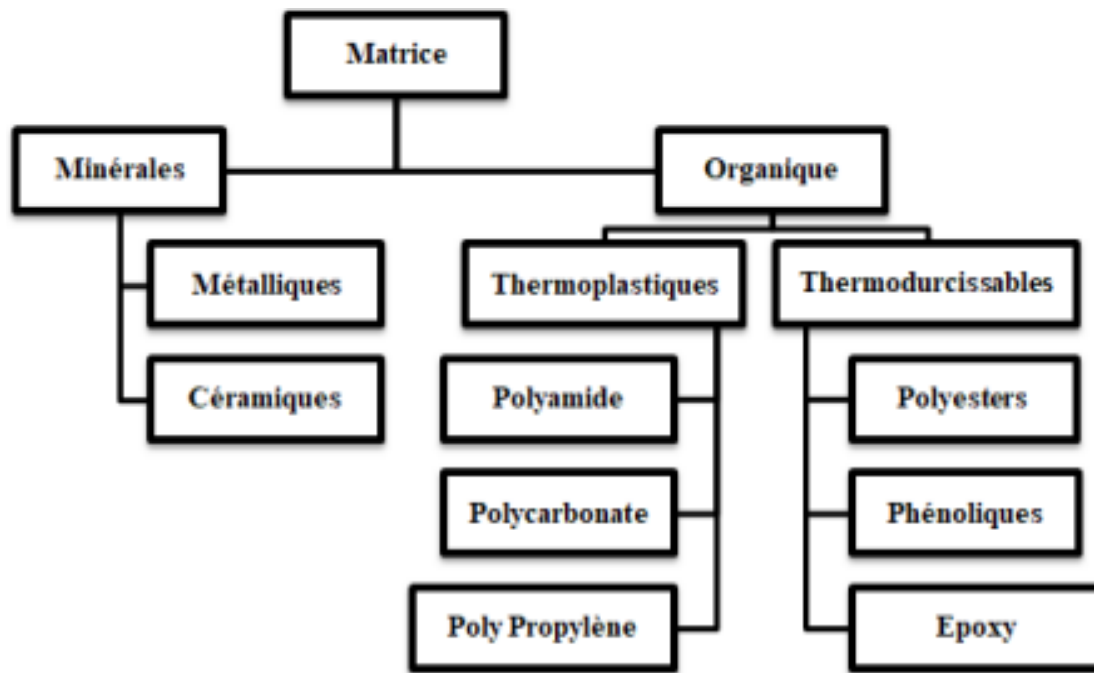


Figure I. 2 : différents types de matrice [06].

I.3.1.1 Matrices minérales

1. Métalliques : Les composites à matrice métallique sont constitués d'un renfort métallique, tel-que des fils d'acier ou des particules de carbure de silicium, de carbone ou d'alumine, intégré dans une matrice métallique comme le titane, l'aluminium, le zinc ou le magnésium. Cependant, l'utilisation de fibres reste complexe en raison des difficultés d'enrobage avec du métal en fusion. La température influence fortement les propriétés mécaniques du matériau, en raison des interactions possibles entre la matrice et le renfort. Cette contrainte limite leur utilisation à des applications ne dépassant pas 800°C. [09]

2. Céramiques : La céramique est l'un des matériaux de matrice les plus adaptés. Lorsqu'elle est associée à un renfort fibreux au sein d'un composite, sa principale faiblesse, la fragilité, peut être atténuée. Grâce à leurs propriétés exceptionnelles, les composites à matrice céramique sont envisageables pour la fabrication à long terme de composants de moteurs thermiques, de véhicules spatiaux et d'applications nucléaires, tant civiles que militaires. Leur excellente résistivité, leur rigidité élevée, leur grande dureté, leur stabilité chimique et leur faible densité en font des matériaux particulièrement performants. [9]

I.3.1.2 Matrice organique

I.3.1.2.1 Matrice thermodurcissable

Les matrices thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être moulés qu'une seule fois, mais elles offrent des performances mécaniques et thermomécaniques supérieures à celles des thermoplastiques. [10] Parmi les matrices thermodurcissables, on

trouve

- Les résines polyesters.
- Les résines phénoliques.
- Les résines Epoxydes : font l'objet de notre Etude.

I.3.1.2.1.1 Résine époxy

C'est une résine extrêmement résistante qui ne subit quasiment aucun retrait lors de l'étape de polymérisation. Il est décrit comme étant super résistant à toutes sortes de stress (physiques, chimiques, météorologiques, etc.).

Dans le commerce, il est généralement vendu sous forme de deux composants mélangés et durcis à température ambiante. Selon sa formule chimique, il peut être utilisé dans des applications variées telles que le moulage, l'enduction, le collage, les structures en fibre de verre ou la fabrication de matériaux composites, etc. Il a également trouvé des marchés comme mastic, conducteur électrique dans l'électronique et comme adhésif de montage haut performance.

1. Composition de résine époxy

C'est des macromolécules linéaires issues de la polycondensation entre un groupement époxyde

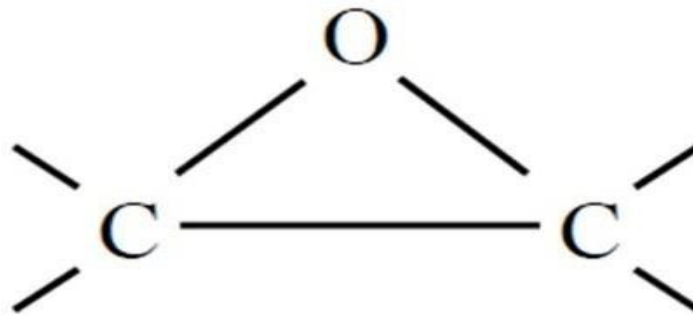


Figure I. 3: groupement

2. Principales familles de poly Epoxydes sont

➤ Bisphénol A Diglycidyléther (DGEBA): C'est la résine époxy la plus utilisée au monde. On la trouve généralement seule, mais peut également être mélangée à d'autres résines plus efficaces pour augmenter sa flexibilité ou faciliter son utilisation. Il s'agit du premier pré-polymère époxy à être lancé sur le marché et il domine la production mondiale, représentant environ 95 % de la production totale.

➤ Diglycidyléther de Bisphénol A et Tétrabromobisphénol A: Ces résines ont une meilleure résistance au feu que le DGEBA, ce qui les rend particulièrement adaptées aux

applications nécessitant une meilleure protection ignifuge.

- Les Novolaques (EPN) sont conçues pour mieux résister aux hautes températures tout en offrant une excellente protection contre les agressions chimiques
- Les époxydes cycloaliphatiques se démarquent par leur robustesse mécanique, leurs performances électriques et leur grande résistance au vieillissement. Elles sont particulièrement prisées dans les formulations bicomposantes avec un durcisseur anhydride, utilisées seules ou en combinaison avec la DGEBA.

3. Caractéristiques des résines époxy

- Adhère aisément au plus grand nombre des matériaux quotidiens.
- Très flexible, il peut être déformé sans se rompre, comme dans le cas de l'emboutissage.
- Très bonne résistance à tout agent chimique, notamment dans le cas d'alcali.
- Rétif à l'usure.
- Peut-être séché naturellement ou dans un four.
- Moins bon au rayonnement ultraviolet, ce qui peut altérer ses propriétés sauf il du temps.
- Non détérioré par des hydrocarbures, ni par certains solvants.
- Bon isolant électrique.
- Ne s'altère ni sous le choc, ni par rupture à texture.
- Garder sa forme et très peu déformé après durcissement. [11]

4. Retrait des résines

Concernant la matière moulée, le retrait a son importance dans le démoulage, car il permet à la pièce de se détacher en se rétractant naturellement des parois du moule. De plus, la matière se contracte autour des inserts métalliques en un phénomène connu sous le nom de frettage, qui améliore l'étanchéité en augmentant la force d'adhérence des parties monoblocs, tout en resserrant la liaison avec le corps de la pièce.

Les résines époxydes ont l'avantage d'un faible retrait, ce qui leur permet de préserver tous leurs avantages tout en bénéficiant d'une grande précision dimensionnelle pour leur pièce moulée.

Le retrait des résines époxydes se divise en deux :

- A. **Retrait chimique** : résultant des réactions de thermo durcissement, lors du passage de l'état liquide, à l'état de gel puis à l'état solide, provoquant un accroissement de la

densité du mélange lié au réarrangement des chaînes macromoléculaires dans une structure plus compacte.

- B. **Retrait physique** : ayant trait au refroidissement des pièces lors que la résine passe de sa température finale à la température ambiante.

La température à laquelle on durcit l'élastomère est en rapport avec le retrait : à température plus élevée, risque plus grand d'emballement de la réaction. C'est pourquoi le durcissement à deux températures est généralement préconisé :

- C. **Gélification** : à température la plus faible possible pour limiter le pic exothermique.
- D. **Recuit** : à température plus élevée, mais « le tout, sans se soucier d'un nouveau pic exothermique.

5. Propriétés mécaniques de la résine Epoxyde :

La manière dont un matériau réagit aux contraintes dépend de ses propriétés mécaniques. Celles-ci entrent en jeu lorsqu'il est soumis à différentes forces, comme la pression, l'étirement, la torsion, le frottement, le cisaillement, les chocs ou encore la gravité. [12]

Comme mentionné précédemment, l'organisation du réseau formé par l'entrelacement des chaînes joue un rôle clé dans les propriétés mécaniques des polymères. Cela leur confère souvent une élasticité comparable à celle du caoutchouc ainsi qu'un comportement viscoélastique à l'état fondu. Sous leur forme solide ces matériaux présentent généralement une nature vitreuse dans un environnement ductile. Un diagramme de comportement illustrant un matériau sous contrainte de traction est présenté à la figure I., mettant en évidence trois zones identifiées.

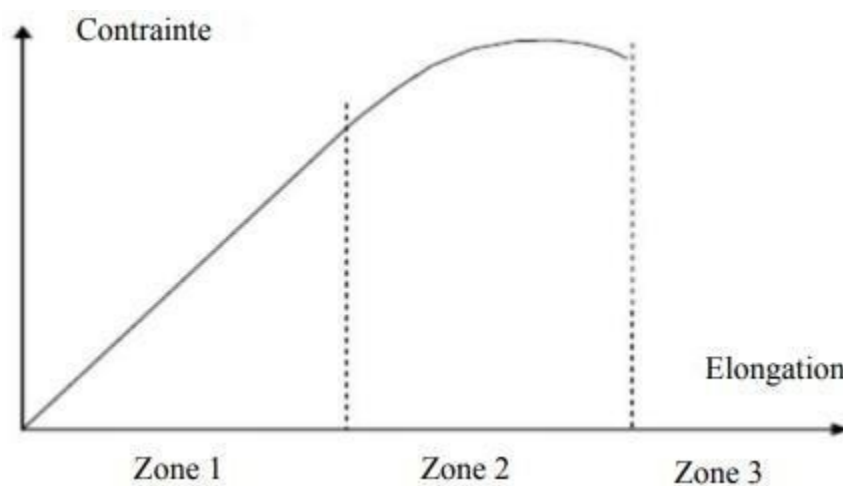


Figure I. 4: Comportement d'un matériau soumis à une contrainte mécanique [12]

Sous l'effet d'une force de traction, un matériau réagit en trois phases. Celles-ci se déclinent sur la courbe contrainte-élongation :

- **Zone 1** : déformation élastique : Dans un premier temps, le matériau s'allonge après avoir appliqué une force de traction, une fois la force retirée, il reste dans sa forme et ses dimensions initiales. Cette portion de droite est caractérisée par la pente : le module de Young, qui traduit la rigidité du matériau.

- **Zone 2** : déformation plastique : à partir de ce stade, la relation contrainte-allongement devient non linéaire, le matériau continuant de se déformer, si la force surpasse un seuil, il conserve une déformation permanente lorsque la contrainte est interrompue. C'est ce qu'on appelle la déformation résiduelle.

- **Zone 3** : rupture ; on continue d'appliquer la force de traction au-delà d'un certain seuil, un matériau fragile se casse dans le domaine élastique par contre s'il subit des déformations dans le domaine plastique il est considéré comme ductile

Tableau I. 1: Propriétés mécaniques des résines Epoxydes [12]

Caractéristiques	Valeur moyenne pour la formule de référence
Contrainte de la rupture en traction	70 à 80 N/mm ² ou MPa
Allongement à la rupture en traction	1 à 1,5%
Contrainte de rupture en compression	140 à 150 N/mm ² ou MPa
Contrainte à la rupture en flexion	110 à 130 N/mm ² ou MPa
Allongement maximale à la rupture en flexion	1,2 à 1,7%
Module d'Young en traction	10200 N/mm ² ou MPa
Coefficient de poisson	>0,35

• **Matrice thermoplastique** : Ce matériau est semi-cristallin, comprenant à la fois une phase amorphe et une phase partiellement cristalline. Les polymères thermoplastiques possèdent des propriétés mécaniques limitées. Ils sont solides et requièrent un traitement à des températures très élevées [6-9] par exemple :

• Polyamide (PA) : matériau résistant, et très résistant aux chocs, à la fatigue et aux hydrocarbures, conviendra pour des pièces soumises à de fortes sollicitations.

• Polyéthylène téréphtalate (PET)–Poly butylène téréphtalate (PBT) : plastiques à la fois rigides et résistants, permettant de réaliser des pièces à la fois solides et durables.

• Polycarbonate (PC) : son pouvoir d'absorption des chocs sans céder à la fissuration en fait un matériau fort prisé, permettant sa généralisation dans les usages nécessitant la robustesse.

• Polysulfuredephénylène(PPS) : matériau de choix dans le milieu humide car il ne

permet pas la dégradation par l'eau (hydrolyse).

- Polyoxyméthylène(POM) : conçu pour résister dans le temps, il résiste parfaitement aux sollicitations répétées sans présenter d'usure rapide.
- Polysulfones (PSU, PPSU) : ces polymères supportent parfaitement les atteintes chimiques, la chaleur, l'humidité, tout en déformant peu sous la contrainte.
- Polypropylène (PP): plus économique et correctement résistant à la chaleur, il va cependant prendre le risque d'évoluer dans une plage d'inflammabilité au niveau de sa résistance, permettant de le favoriser pratiquement pour des applications où coût et légèreté sont de sérieuses préoccupations. [12]

Tableau I. 2: Caractéristiques des résines thermodurcissables et thermoplastiques. [12]

matrice	Thermoplastiques TP	Thermodurcissable TD
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité renfort	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage +Refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Chutes et déchets	Recyclables	Perdus ou recyclé en charge
Conditions de travail	Propreté	Emanation pour « méthode d'humidité »

I.3.2 Classification selon la catégorie du renfort

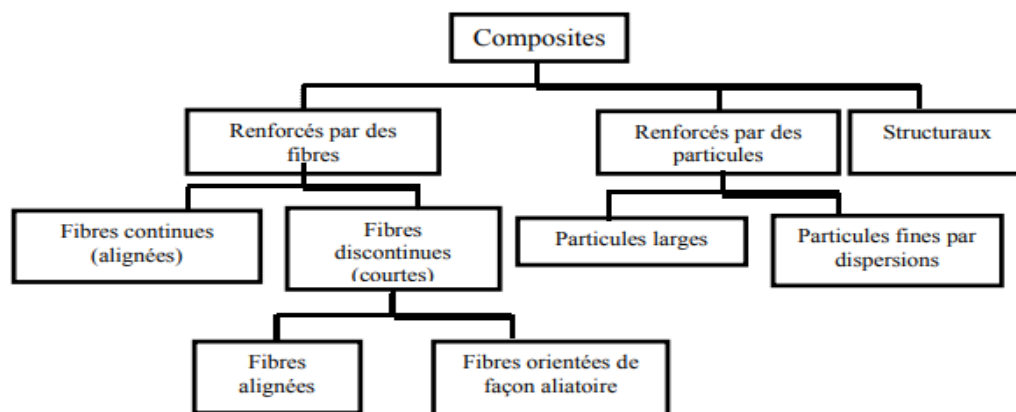


Figure I. 5: Organigramme de la classification des matériaux composite selon le renfort[13]

I.3.3 Classification suivant la forme des constituants :

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes :

- **Renforcés par des fibres :**

Le matériau composite est dit à fibres lorsque son renfort est constitué de fibres. Selon leur nature, ces fibres peuvent être continues ou discontinues (fibres coupées, courtes, etc.).

L'orientation et la disposition des fibres sont cruciales pour adapter les propriétés mécaniques du matériau. Celles-ci permettent de préparer des composites allant de structures fortement anisotropes à des matériaux, dans un plan donné, isotropes.

Le concepteur peut alors agir sur la performance mécanique et physique du matériau en jouant a priori :

- Sur la nature des composants,
- Sur la proportion de chacun des constituants,
- Sur l'orientation des fibres dans la structure. [14]
- **Composites à base de particules**

Un matériau composite est désigné « composite à particules » lorsqu'il est renforcé par des particules solides. Contrairement aux fibres, celles-ci n'ont pas de direction privilégiée.

Elles permettent d'améliorer certaines propriétés de certains matériaux, notamment :

- La rigidité.
- La résistance aux hautes températures.
- La résistance à l'abrasion ou au frottement.
- Le retrait au cours de leur mise en œuvre.

Dans de nombreux cas, les particules servent aussi de charges d'appoint permettant de diminuer le prix du matériau tout en ne modifiant pas trop ses propriétés.

Le couple matrice-particules est choisi en fonction des performances que l'on désire obtenir. Par exemple :

- L'ajout de plomb dans des alliages de cuivre permet d'améliorer leur usinage.
- L'incorporation de particules de tungstène ou de chrome dans des métaux ductiles permet d'améliorer leur résistance aux hautes températures sans supprimer leur ductilité à température ambiante. [14]

I.3.4 Classification suivant la nature des constituants

Les matériaux composites se distinguent en fonction du type de matrice qu'ils utilisent : organique, métallique ou minérale. À ces matrices, on associe divers types de renforts. Toutefois, seules certaines combinaisons sont aujourd'hui couramment utilisées dans l'industrie, tandis que d'autres sont encore en phase de recherche et développement. Parmi ces composites, on peut notamment mentionner :

- **Composites à matrice organique**, généralement constitués de résines et de charges, sont renforcés par :

- Des fibres minérales telles que le verre ou le carbone,
- Des fibres organiques comme le Kevlar ou les polyamides,
- Ou encore des fibres métalliques, notamment le bore ou l'aluminium.
- **Composites à matrice métallique**, réalisés à partir d'alliages légers ou très légers (aluminium, magnésium, titane), sont renforcés par :
 - Des fibres minérales comme le carbone ou le carbure de silicium (SiC),
 - Des fibres métalliques telles que le bore,
 - Ainsi que des fibres métallo-minérales, par exemple les fibres de bore enrobées de carbure de silicium (BorSiC).
- **Composites à matrice minérale**, souvent de type céramique, intègrent :
 - Des fibres métalliques (comme le bore),
 - Des particules métalliques sous forme de cermets,
 - Ou encore des particules minérales telles que les carbures ou les nitrures.

Les composites à matrice organique présentent une résistance thermique limitée, leur emploi étant généralement restreint aux environnements dont la température ne dépasse pas 200 à 300 °C. En revanche, les composites à matrice métallique ou céramique permettent une utilisation à plus haute température, jusqu'à environ 600 °C pour les premiers, et jusqu'à 1000 °C pour les seconds.[15]

I.4 Les renforts

Les renforts dans les matériaux composites jouent un rôle essentiel en apportant la résistance mécanique nécessaire à ces structures. Leur fonction principale est d'améliorer les propriétés mécaniques du composite, telles que la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. De plus, ils contribuent à l'amélioration de certaines propriétés physiques, notamment la résistance au feu, la résistance à l'abrasion, la tenue en température et les propriétés électriques.

Les caractéristiques recherchées dans les renforts incluent une faible masse volumique, une bonne compatibilité avec la matrice, ainsi qu'une facilité de mise en œuvre. Ces critères sont essentiels pour assurer la performance, la durabilité et la rentabilité des matériaux composites dans diverses applications industrielles. [16]

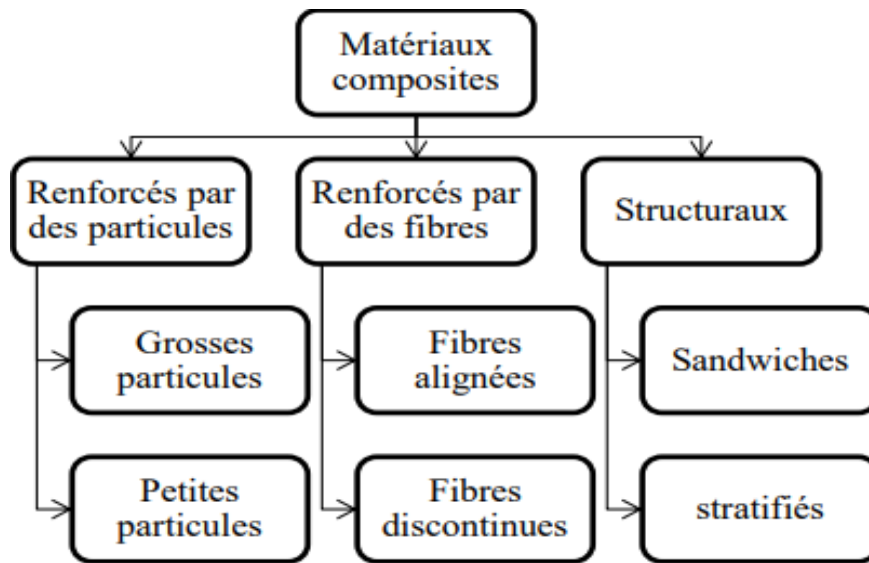


Figure I. 6: Les différents types de renforts [17]

I.4.1 Différents types de renforts

I.4.1.1 Renfort en fibres discontinues

L'incorporation de fibres courtes ou de particules (telles que des microbilles, des fibres broyées, des écailles ou de la poudre) dans une matrice polymère permet d'améliorer certaines de ses propriétés, notamment la résistance à l'usure, les caractéristiques thermiques et la réduction du poids. Dans ce cas, la matrice polymère demeure l'élément principal du matériau, et le composite obtenu est qualifié de « polymère renforcé ».

I.4.1.2 Renfort continue

Les fibres longues sont couramment utilisées dans la fabrication de composite haute performance (HP). Cette configuration fibreuse confère au composite une résistance à la rupture et un module d'élasticité nettement supérieurs à ceux du matériau massif d'origine. Par exemple, en augmentant la longueur des fibres de 10 000 fois, la surface du composite peut être multipliée par 100, comme c'est le cas pour les composites renforcés de fibres de verre.

Actuellement, les fibres de carbone et de verre sont les renforts les plus utilisés dans l'industrie. Les fibres de verre, en particulier, offrent de bonnes caractéristiques mécaniques, telles qu'une résistance élevée à la traction et une bonne résistance à la compression, ce qui les rend adaptées à une variété d'applications industrielles. [18]

I.4.1.2.1 Les fibres de verre

Les fibres de verre offrent un excellent rapport qualité-prix, ce qui en fait les renforts les plus couramment utilisés dans la fabrication de structures composites. On distingue principalement trois types de fibres de verre [19]:

- **Verre E** : principalement destiné aux applications électriques,
- **Verre S** : utilisé dans les applications nécessitant une résistance mécanique accrue,
- **Verre R** : conçu pour des composites à haute performance.

I.4.1.2.2 Avantage des fibres de verre :

- Bonne compatibilité avec les matrices organiques,
- Excellentes propriétés diélectriques,
- Coût relativement faible.

I.4.1.2.3 Inconvénients des fibres de verre :

- Module d'élasticité inférieur à celui des fibres de carbone et d'aramide



Figure I. 7: Fibre de verre sous forme mat [19].

I.4.1.3 Fibres de carbone :

Les fibres de carbone, d'un diamètre variant entre 5 et 10 micromètres, sont principalement composées d'atomes de carbone, avec des traces d'azote, d'oxygène et d'hydrogène. Elles sont obtenues par un processus de carbonisation de précurseurs tels que le poly acrylonitrile (PAN).

Ces fibres présentent une excellente conductivité électrique et thermique, ce qui les rend idéales pour des applications nécessitant une dissipation thermique efficace ou une protection contre les interférences électromagnétiques. Cependant, cette conductivité peut devenir un inconvénient dans des environnements où l'isolation électrique est cruciale, notamment dans les secteurs de l'électronique ou de la construction navale.

Les fibres de carbone sont caractérisées par :

- Une grande rigidité,
- Leur module d'élasticité pouvant varier en fonction des paramètres de mise en œuvre.
- Elles présentent une résistance élevée tant à la traction qu'à la compression, souvent comparable, voire supérieure, à celle de l'acier.

• De plus, elles sont environ 70 % plus légères que l'acier, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications nécessitant une combinaison de légèreté et de résistance mécanique. [20]



Figure I. 8: Bobine de fibre de carbone [21]

I.5 Caractéristiques des matériaux composites

De nombreuses caractéristiques des composites varient en fonction de plusieurs facteurs et varient d'une enquête à l'autre. Les principaux déterminants sont:

- La nature, les propriétés et la proportion de sa gents de liaison médicale,
- La conception renforcée, qui comprend la forme, la dimension et l'organisation du renfort en matrice,
- Les influences entre les différents sous-ensembles, travaille principalement sur le pourcentage de la liaison matrice-renfort.

Les pièces fabriquées à partir des matériaux en composite ont plusieurs avantages notamment :

- Une masse minimaliste qui les rend beaucoup moins lourdes que les matériaux ordinaires.
- Résistance exceptionnelle à la fatigue avec une durée de vie prolongée.
- Liberté de design car la forme et la taille des matériaux peuvent être aménagées pour s'adapter à différentes configurations.
- Résistance à la ternissure avec une faible fluctuation sous l'effet de l'humidité, de la chaleur ou de la corrosion.
- Une bonne résistance chimique à l'exception de certains solvants tels que les décapants de peinture.
- D'excellentes propriétés d'isolement électrique en milieu technique.
- Une absorption des chocs et impacts relativement modérée impliquant par fois des ajustements suivant l'application projetée. [22]

I.6 Les applications des matériaux composites

I.6.1 Dans le domaine aérospatial

Les avions commerciaux d'aujourd'hui sont encore principalement faits d'alliage d'aluminium, qui représente environ 54% de leur structure. Mais les matériaux composites prennent de plus en plus de place, atteignant maintenant 20%. À côté de ça, on trouve aussi 13% d'acier, 6% de titane et 7 % d'autres matériaux. Pour les fibres, celles qu'on utilise le plus sont le carbone, le verre et l'aramide. Côté matrices, les résines époxydes thermodurcissables sont préférées pour les structures tandis que les matrices phénoliques sont sur tout employées pour l'aménagement intérieur. [23]

I.6.2 Dans le domaine militaire

Dans la construction navale militaire, on utilise des matériaux composites à matrice organique. Leur gros avantage ; Ils ne rouillent pas et tiennent très bien face aux conditions difficiles. [24]

I.6.3 Dans le domaine de construction

Pour les ingénieurs japonais, c'est une avancée majeure dans la construction des ponts suspendus et à haubans : remplacer les câbles en acier par des câbles en fibres de carbone. En plus de rendre la structure plus légère, ça permettrait aussi de réduire les coûts d'entretien sur le long terme. [25]

I.6.4 Dans domaine sport et loisirs

Plusieurs raisons expliquent leur adoption :

- Ils offrent une excellente rigidité ou, au contraire, une certaine flexibilité, selon le type de renforcement utilisé.
- Ils résistent très bien à l'humidité et à la corrosion, ce qui permet de les utiliser en extérieur, même sous la pluie, dans l'eau ou la neige.
- Leur légèreté facilite le transport et la manipulation.
- Ils permettent une grande liberté de conception, rendant possible la création de formes variées et innovantes. [26]

I.7 Intérêt des matériaux composites

Dans le secteur technologique, le choix des matériaux traditionnels ne s'effectue qu'à la condition que leurs propriétés spécifiques soient en adéquation avec les contraintes du procédé de fabrication. Par ailleurs, le coût de la performance peut être un facteur décisif dans le choix

de la conception ; il résulte du dimensionnement de la pièce ainsi que du choix des matières et des services de mise en œuvre.

Pour y remédier, on cherche à associer différentes espèces de matériaux de compositions chimiques différentes, dans une même structure, pour optimiser leurs résistances physique, chimique et mécanique, en utilisant des charges renforcées avec des fibres.

La mise en œuvre du renfort dans la matrice obéit à plusieurs critères :

- La compatibilité chimique des matériaux à mettre en contact, servant à la transmission des efforts, soit par liaison physique soit chimique ;
- Le niveau de résistance mécanique et chimique compatible avec les contraintes d'utilisation
- Le coût de fabrication, influençant le choix des matériaux et formes, ainsi que des procédés de mise en œuvre.[27]

Chapitre II

Sédiments de dragage

Introduction

Les sédiments désignent un ensemble de particules issues de l'érosion des continents, résultant de la dégradation des roches ou d'organismes vivants. Cette destruction s'opère par des processus physiques, entraînant la fragmentation des matériaux, ainsi que par des réactions chimiques qui produisent des solutions de lessivage (altération chimique).

Les particules solides sont déplacées sous l'effet de la gravité, souvent par l'intermédiaire d'un fluide transporteur comme l'eau ou la glace, et par l'action des vents causés par les variations de pression atmosphérique. Quant aux éléments dissous [28], ils sont principalement transportés par l'eau.

Dans certains cas, les produits de l'érosion peuvent s'accumuler sur place sans être transportés, formant ainsi une couche d'altération ou éluvion. Toutefois, la majorité des débris sont déplacés avant d'être déposés, généralement dans un milieu aquatique, où ils forment des sédiments détritiques, tels que les alluvions. Par ailleurs, les éléments dissous peuvent précipiter sous l'influence des organismes vivants, donnant naissance à des sédiments d'origine chimique ou biochimique.

II.1 Caractérisation des sédiments des barrages

II.1.1 Définition

Un sédiment constitue l'ensemble des particules se trouvant en suspension dans un courant, dans l'eau, l'air ou la glace, qui sous l'effet de la gravité, finissent par se déposer en couches superposées (notamment en raison des différentes vitesses d'afflux de chaque sédiment qui constituent la masse sédimentaire accrue).

Les sédiments se caractérisent par des traits propres au sédiment lui-même (caractéristiques physico-chimiques de leur composition, du milieu dans lequel ils se sont formé (origine), la taille des grains sédimentaires, la faune et la flore qu'ils renferment ainsi que leur éventuelle toxicité), prélude à l'origine de la roche sédimentaire du « bouton » de la lithosphère. [29]

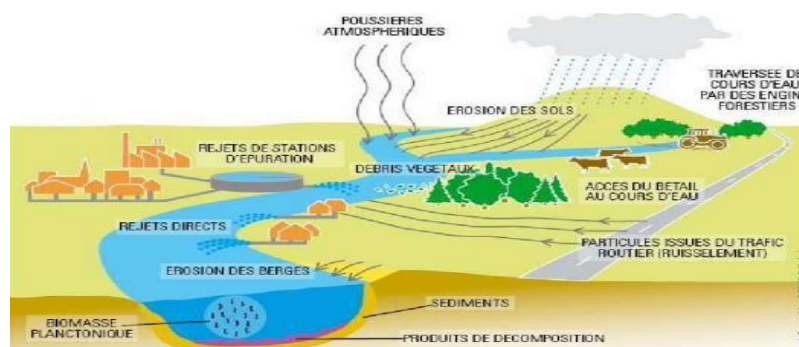


Figure II. 1: Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (Maes E).

II.1.1.1 Origines des sédiments

Les sédiments peuvent avoir deux origines principales

II.1.1.1.1 Origine en Diogène (naturelle)

Les particules proviennent directement du milieu où elles se forment. Elles résultent notamment de la décomposition de macrophytes, comme les plantes aquatiques, ainsi que des restes de microphytes et d'animaux.

II.1.1.1.2 Origine exogène (anthropique)

Ces particules proviennent de sources extérieures, transportées par le ruissellement de l'eau ou par le vent. Elles peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et sont issues de l'érosion des sols, de la dégradation de matières végétales, ou encore de l'apport de substances en suspension, de matières organiques, de nutriments et de micropolluants, souvent liés aux rejets agricoles, industriels et domestiques.[29]

II.1.1.2 Le concept vasé

Le terme "vase", d'origine néerlandaise, désigne une vaste catégorie de sédiments fins et argileux, contenant une proportion variable de matière organique et une forte teneur en eau. Ces sédiments se composent d'une phase minérale, dont la granulométrie varie du sable aux argiles et aux colloïdes, d'une phase organique et d'une phase liquide. La vase peut exister sous différentes formes : soit en suspension, sous l'aspect d'une "crème de vase", soit sous une forme plus compacte et cohérente, appelée sédiment cohésif, qui présente alors des propriétés plastiques, compressibles et thixotropiques. Elle constitue un milieu de vie favorable pour une faune diversifiée comprenant des vers, des mollusques et des bactéries.

Les vases sont des sols constitués à plus de 90 % de particules dont la taille est inférieure à 0,2 mm, avec une teneur en matière organique variant entre 2 et 10 %. Elles se composent principalement de sable, de limon, d'argile et de colloïdes organiques. Ces sédiments sont particulièrement présents dans les estuaires et possèdent souvent une propriété thixotropique, ce qui signifie qu'ils deviennent plus fluides lorsqu'ils sont soumis à une contrainte. [30]

II.1.2 Constitution et composition minérale des sédiments

De manière générale, les vases sont composées de quatre éléments principaux

- **Matrice minérale** : constituée de minéraux tels que le quartz, le feldspath ou les carbonates.
- **Fraction argileuse** : comprenant des minéraux comme la kaolinite, l'illite ou la smectite.

- **Fraction organique** : formée de débris végétaux, de micro-organismes ainsi que de composés tels que les acides fulviques et humiques.

- **Eau** : présente en différentes formes et en quantité variable. [31]

II.1.2.1 Les illites

Ce minéral, largement présent dans les sols et les sédiments, est le plus commun des minéraux argileux. Sa structure, inspirée du mica blanc, est toute fois plus dés ordonnés et contient moins de potassium dans les espaces inter foliaires. On le retrouve fréquemment dans de nombreuses roches détritiques, soit en tant que matrice, soit sous forme de ciment. [32]

II.1.2.2 Les montmorillonites

Les montmorillonites peuvent avoir une origine détritique, résultant de l'érosion de sols ou de sédiments plus anciens qui en contiennent. Elles peuvent également se former de manière secondaire en milieu alcalin, soit à partir d'autres silicates, soit à partir de verres volcaniques. Grâce à leurs propriétés, elles sont largement utilisées dans divers domaines industriels, notamment dans l'industrie chimique et les boues de forage. [32]

II.1.2.3 Le kaolin

La kaolinite, minéral d'origine chinoise (« Kaoling »), résulte de l'altération météorique ou d'un dépôt sédimentaire. Elle se forme sous les conditions de température (25-30°C) et de pression atmosphérique de la surface terrestre. Sa structure cristalline, appartenant au système triclinique, associe des tétraèdres de silicium et des octaèdres d'aluminium, avec un espacement de 0,74 nm.

Les sédiments contiennent divers composés organiques issus de végétaux, d'algues, d'animaux et de la microflore, ainsi que des colloïdes humiques. Leur dégradation est un Processus lent, influençant la couleur et la structure des vases. La matière organique représente 2 à 10 % des sédiments fluviaux, dont 60 % sont d'origine humique.

L'eau interstitielle se divise en quatre types :

- a) **L'eau libre**, qui ne présente aucune interaction avec les particules fines.
- b) **L'eau capillaire**, retenue par capillarité au sein des particules fines.
- c) **L'eau colloïdale**, impliquée dans l'hydratation des colloïdes.
- d) **L'eau adsorbée**, formant un film autour des particules sous l'effet des forces d'adsorption. [33]

II.2 Caractéristiques des sédiments

Les sédiments peuvent être classés en deux catégories : cohérents et non-cohérents.

Les sédiments cohérents se déposent sur le fond ou le long des berges et sont consolidés par des forces électrostatiques ou chimiques, leur conférant une certaine résistance à l'érosion. Toutefois, lorsqu'ils sont mis en mouvement, ces liaisons se fragilisent, et ils peuvent perdre leur cohésion au cours du transport. Bien que leur taille soit généralement inférieure à 0,06 mm, cette limite n'est pas strictement définie.

À l'inverse, les sédiments non-cohérents sont constitués de particules plus volumineuses, dont le déplacement dépend principalement de leurs propriétés physiques et des forces hydrodynamiques environnantes. Dans certains cas, le lit d'un cours d'eau peut contenir un mélange hétérogène de ces deux types de sédiments. [32]

II.3 Taille des particules

La taille des particules est étroitement liée à leur capacité de transport. Elle peut varier d'un diamètre supérieur à 2 mètres, comme les gros rochers sent rainés par les torrents de montagne, à moins de 5×10^{-4} mm pour les argiles très fines, qui restent presque indéfiniment en Suspension sans flocculer.

Les sédiments naturels présentent une forme irrégulière, ce qui rend leur caractérisation selon une seule dimension par fois approximative. En général, ils se composent de particules de tailles diverses, dont la répartition peut être représentée par une courbe de fréquence cumulée. La figure 2 illustre les courbes granulométriques d'une série de sédiments, mettant en évidence que, dans un cours d'eau, la variabilité des tailles est plus marquée pour les sédiments grossiers que pour les sédiments fins. [34]

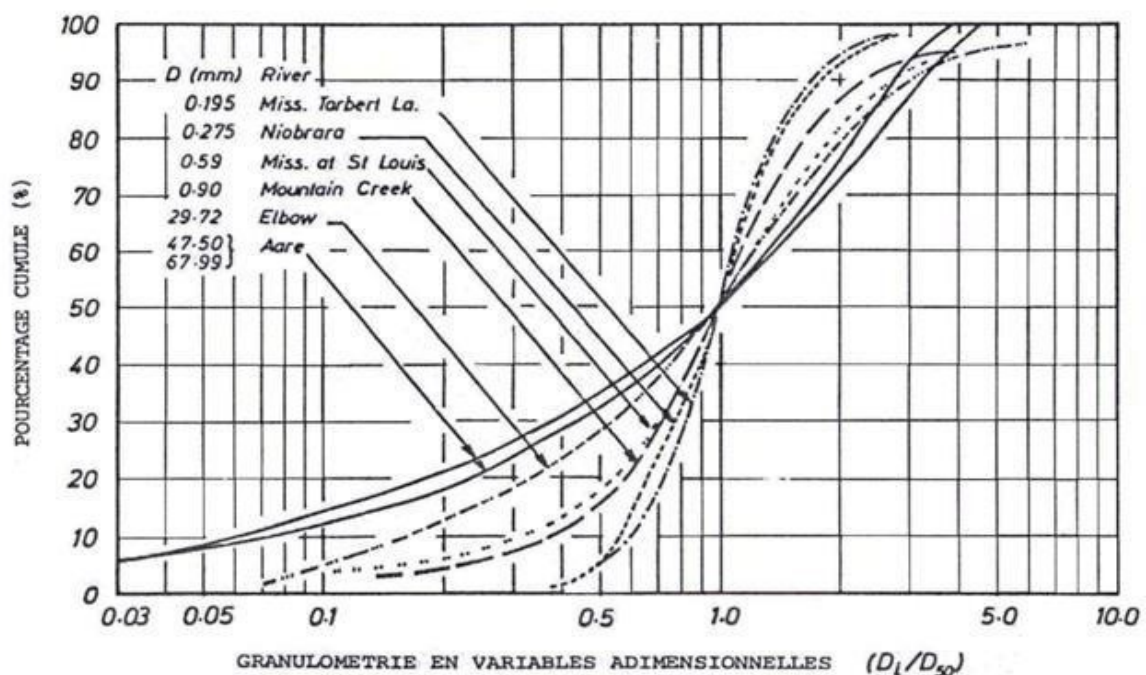


Figure II. 2: Granulométrie en variables adimensionnelles [34]

II.3.1 Forme des particules

Ce facteur influence le volume du transport solide.

Par exemple, les particules des chiste ou d'ardoise se déposent sur le fond en s'orientant de manière à minimiser leur résistance au courant. Cela signifie que la force exercée pour les déplacer diffère de celle appliquée à une particule de même volume mais de forme plus arrondie, ce qui entraîne une modification des caractéristiques du mouvement.

II.3.2 Masse volumique de la particule

Le déplacement d'une particule est déterminé par le rapport entre la force tractrice et son propre poids. La force tractrice varie en fonction de la forme de la particule, tandis que son poids dépend de sa taille et de sa masse volumique. Par conséquent, cette dernière joue un rôle essentiel dans le mouvement des sédiments.

Les sédiments naturels sont composés de divers minéraux présentant des différences significatives de masse volumique, ce qui entraîne une sélection des particules et des variations dans les processus d'érosion et de dépôt.

II.4 Mécanisme de l'envasement

II.4.1 Comportement des sédiments grossiers

Lorsqu'elles atteignent les eaux calmes du réservoir, les eaux des rivières voient leur vitesse diminuer, notamment dans la zone de remous, souvent identifiable par la présence d'éléments flottants. Cette diminution de vitesse entraîne la sédimentation des particules les plus grossières, qui s'accumulent pour former un delta en amont de la retenue. Ce delta caractérise par une hauteur relativement importante, avec une pente marquée en aval correspondant au talus naturel des sédiments et une inclinaison plus douce en surface.

Avec le temps, et au gré des apports continus de sédiments, ce delta se développe progressivement en amont, provoquant une élévation du niveau de l'eau dans cette zone et avançant petit à petit vers le cœur du réservoir. [35]

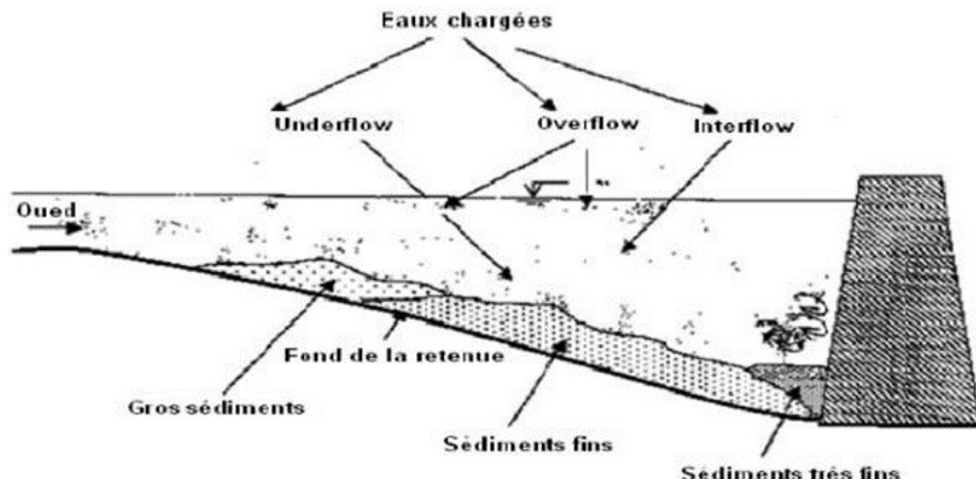


Figure II. 3: Mode de l'envasement

II.4.2 Comportement des sédiments fins :

Dans la zone de remous, l'arrivée des eaux turbides dans la retenue crée une interface plus ou moins distincte et verticale avec les eaux claires du réservoir.

1er cas : Lorsque l'écoulement en amont est de nature torrentielle, les eaux chargées en sédiments plongent vers le fond du réservoir et s'y déplacent sous forme d'un courant de turbidité, dont la densité est supérieure à celle des eaux claires.

Ce courant de densité présente un débit plus élevé que celui des apports entrants en raison de la dilution provoquée par la forte turbulence dans la zone de remous.

2ème cas : Si l'écoulement amont est plutôt fluvial, on observe généralement un mouvement des eaux au pied du front, accompagné d'un contre-courant d'eau claire en surface. Un courant de densité ne se forme véritablement qu'elles le débit et la concentration des sédiments transportés sont suffisamment élevés. En revanche, lorsque ces paramètres sont faibles et que la température des apports et celle des eaux du lac sont proches, le front devient irrégulier et fluctuant. Dans ce cas, l'écoulement amont tend à se disperser plus ou moins à travers la retenue.[35]

II.5 Altération des sédiments

La formation des sédiments résulte de la dégradation des roches et des organismes vivants. Les agents d'érosion exercent une action mécanique qui fragmente les roches, donnant naissance aux sédiments détritiques. Par ailleurs, les processus chimiques entraînent la dissolution de certains minéraux, produisant des solutions enrichies en métaux, à l'origine des sédiments chimiques. Ces différents sédiments, sous l'effet de nouvelles transformations mécaniques et chimiques, évoluent et changent de composition minéralogique. Exposés à l'érosion, ils peuvent être à leur tour transportés, sous forme solide ou en solution, avant de se

Déposer temporairement dans des environnements continentaux. Toutefois, ces dépôts sont généralement remobilisés au fil du temps et finissent par être acheminés vers le milieu marin.

Les variations de température influencent également la fragmentation des sédiments. La dilatation et la contraction des matériaux provoquent des fissures, dont l'intensité varie selon la nature des sédiments et les conditions environnementales. L'eau pouvant s'infiltrer dans ces fissures gèle lors de la baisse des températures, augmentant ainsi de volume et accentuant l'éclatement des matériaux. Si l'eau est salée, les cristaux de sel qui se forment participent également à la désagrégation des roches en créant des craquelures. Enfin, l'érosion hydrique et, dans une moindre mesure, l'action du vent contribuent à l'usure des matériaux. Le transport des particules plus grossières favorise leur fragmentation sous l'effet des chocs successifs, générant ainsi des éléments plus fins.[37]

II.6 Transport des sédiments

Les sédiments ne peuvent être transportés sauf en présence de l'un des agents de transport tel que le vent, la gravité pure, la glace et l'eau

II.6.1 Transport par le vent

Étant donné que l'air est environ mille fois moins dense que l'eau, sa capacité à transporter des sédiments est considérablement réduite. Par conséquent, les particules les plus grossières restent surplace, formant un "pavement". En revanche, le vent a une excellente capacité de tri des particules, et le transport s'effectue principalement par saltation et par collision entre les grains de sable, tandis que les particules fines sont entraînées plus loin. Cela explique

L'uniformité granulométrique des dépôts éoliens. Contrairement aux courants marins, les flux d'air ne sont pas limités par la surface de l'eau, et la hauteur des dunes éoliennes dépend uniquement de la force du vent et de la quantité de sable disponible. [37]

II.6.2 Transport par gravité pure

Ce mode de transport est caractéristique des zones montagneuses et désertiques où les variations d'altitude créent des pentes marquées et où la désagrégation mécanique des roches est intense.

Les matériaux déplacés par courant de courte distance savent de s'accumuler sous forme de cônes d'éboulis. Ces dépôts, constitués de fragments de toutes tailles et non altérés, présentent un tri naturel, les éléments les plus volumineux se retrouvant en périphérie du cône. En raison de leur forte porosité, ces éboulis permettent une bonne infiltration de l'eau. Lors de fortes précipitations, l'eau s'ajoute à l'effet de la gravité, entraînant la formation de coulées

boueuses issues des particules fines d'argile. Ces coulées peuvent glisser le long des pentes et provoquer d'importants dégâts, tandis que les autres éléments, souvent anguleux, sont entraînés et englobés dans ces écoulements. [37]

II.6.3 Transport par la glace

La glace se forme à partir de la transformation progressive de la neige sous un climat froid et humide, à travers des processus de compaction et de fusion. En s'écoulant comme un fluide visqueux, elle donne naissance à un glacier. Les matériaux transportés par les glaciers

Présentent une grande hétérogénéité granulométrique. Contrairement aux transports éolien et aquatique, les éléments transportés par la glace ne s'usent pas par frottement, mais peuvent être broyés sous l'effet de la pression exercée entre eux ou contre les parois de la vallée, produisant ainsi une fine poudre appelée farine glaciaire. La distance parcourue varie selon le type de glacier : pour les glaciers de montagne, elle est généralement de quelques dizaines de kilomètres, tandis que dans les vastes systèmes glaciaires, elle peut dépasser plusieurs centaines de kilomètres.[36]

II.6.4 Transport par l'eau

Le transport des sédiments par l'eau varie en fonction du type d'écoulement, qu'il soit sauvage ou canalisé. De manière générale, l'eau déplace les matériaux par charriage, en suspension ou en solution. Les sédiments détritiques sont transportés sur de plus longues distances lorsqu'ils sont plus fins, tout en subissant des chocs et une usure progressive, ce qui engendre un classement longitudinal des particules.

On distingue deux principaux types d'écoulement

- **L'écoulement canalisé** : qui suit un ou plusieurs chenaux en fonction de la pente et de la vitesse du courant.
- **L'écoulement non canalisé** : correspondant au ruissellement des eaux sauvages après de fortes précipitations sur une pente. Ce type d'écoulement engendre une érosion marquée, bien que la distance de transport des sédiments reste limitée. Les filets d'eau se rejoignent progressivement pour former un chenal.

Ce phénomène est particulièrement développé en milieu montagneux, notamment dans les bassins de réception des torrents, où il peut évoluer en véritables coulées boueuses. [36]

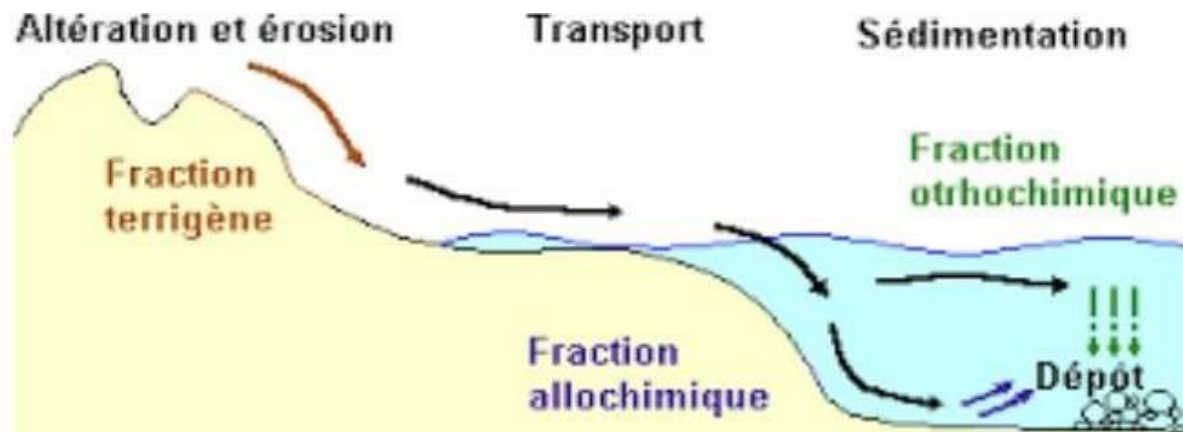


Figure II. 4: Processus sédimentaires

II.7 Stockage des sédiments

Dans une perspective de développement durable, la gestion de l'environnement doit intégrer tous les aspects liés au dépôt et au stockage des sédiments issus des opérations de dragage.

Grâce aux médias, le public est désormais bien informé des impacts négatifs des diverses formes de pollution sur l'environnement. Cependant, il est moins conscient du rôle protecteur que le sol peut jouer contre ces pollutions, à condition que certaines conditions soient respectées.

L'efficacité du sol en tant que barrière naturelle est moins perceptible lorsque la pollution provient directement de ses propres composants ou de ses caractéristiques physiques, pouvant perturber l'équilibre des bassins versants en influençant le ruissellement et l'infiltration des eaux vers les nappes souterraines. Néanmoins, il est essentiel de porter une attention particulière aux déséquilibres susceptibles de survenir en raison du dépôt et du stockage de matériaux à granulométrie fine. [37]

II.8 Présentation du barrage de Beni Amrane

Le barrage de Béni-Amrane est implanté sur l'Oued Isser, dans la Wilaya de Boumerdès, à environ 70 km au sud-est d'Alger. Il est délimité au nord-est par la daïra de Draa El Mizane, au sud-est par la Wilaya de Bouira et Ain Boucif, au sud-ouest par la daïra de Ksar El Boukhariet la Wilaya de Médéa, au nord-ouest par la daïra de Tablat et Larbaâ, et au nord par la mer Méditerranée. Sa construction a débuté en 1984 et il a été mis en service en février 1988. Son principal objectif est d'assurer l'approvisionnement en eau potable pour la région du Grand Alger, y compris jusqu'à Boudouaou.



Figure II. 5: Barrage de beni Amrane

La structure du barrage est constituée d'un enrochement avec un noyau central en argile ainsi qu'une paroi moulée. Il mesure 40 mètres de hauteur pour une longueur de 460 mètres. La cote normale de retenue s'élève à 67 mètres, tandis que la cote maximale atteint 76 mètres.

L'ouvrage comprend un déversoir à hausses fusibles d'une capacité de 10000m^3 et une vidange de fond équipée de six pertuis, permettant un écoulement de $3\,100\text{ m}^3/\text{s}$.

Le volume de stockage du barrage est de 16 hm^3 , alimenté par les eaux de l'Oued Isser, dont l'apport moyen annuel est estimé à $414 \text{ km}^3/\text{an}$. Le taux d'envasement du barrage est évalué à $4,10 \text{ hm}^3/\text{an}$.

Faisant partie intégrante du système hydraulique Isser-keddara-Boudouaou-Alger, le barrage de Béni-Amrane bénéficie d'une répartition des apports régularisés, avec les contributions suivantes :

- Oued Hamiz : $31 \text{ hm}^3/\text{an}$,
- Oued Boudouaou : $27 \text{ hm}^3/\text{an}$,
- Oued Isser : $114 \text{ hm}^3/\text{an}$,

Ce qui porte la moyenne des principaux ouvrages du dispositif à $172 \text{ hm}^3/\text{an}$.

La gorge de Béni-Amrane est située à environ 1 km à l'est du village portant le même nom. Le barrage a été édifié sur un méandre situé à l'extrémité aval de cette gorge. En aval, la vallée s'élargit et l'oued traverse une vaste plaine avant de se jeter dans la mer. [37]

II.9 Le phénomène de l'envasement

II.9.1 Définition

Le phénomène d'envasement d'un barrage résulte d'un processus naturel impliquant l'érosion des bassins versants ainsi que le sapement des berges des cours d'eau, comme le décrit la source [32]. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les zones arides et semi-arides, notamment au Maghreb et en Algérie. Il se traduit par l'accumulation progressive de sédiments au fil du temps.

II.9.2 Les étapes d'envasement

Les différentes phases du processus d'envasement d'un barrage commencent par le détachement des particules fines de leur emplacement d'origine sous l'effet du ruissellement. Ensuite, ces sédiments sont transportés par les cours d'eau en direction du barrage. En fin, lors de la dernière phase, les particules en suspension se déposent progressivement au fond du lac de retenue, où elles s'accumulent et se compactent [38].

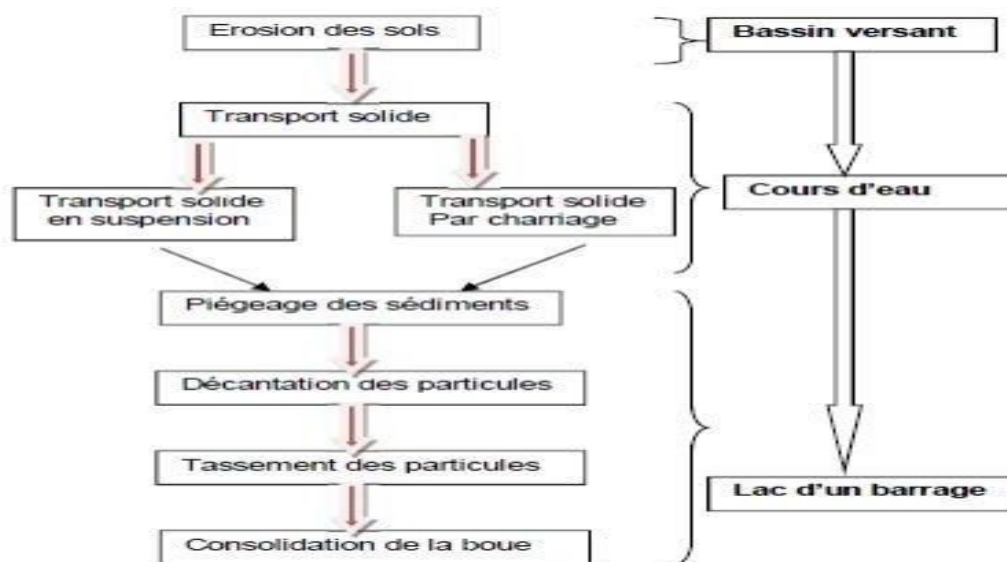


Figure II. 6: Processus d'envasement d'un barrage [38]

II.9.3 Conséquences de l'envasement

L'importante accumulation des sédiments dans les barrages engendre plusieurs effets néfastes, parmi lesquels :

- **Diminution de la capacité de stockage** : chaque année, l'accumulation progressive de vase entraîne une réduction significative du volume utile de la retenue.
- **Impact sur la stabilité de l'ouvrage** : au-delà de la perte de capacité du réservoir, l'envasement peut compromettre la stabilité structurelle du barrage. En effet, lorsque la hauteur de vase augmente de manière linéaire, la poussée exercée sur l'ouvrage évolue proportionnellement au carré de cette hauteur.
- **Obstruction des dispositifs de vidange** : l'accumulation de sédiments peut bloquer les organes de vidange de fond, rendant leur fonctionnement inefficace et accentuant ainsi les risques de dysfonctionnement du barrage.
- **Envasement des canaux d'irrigation** : l'eau utilisée pour l'irrigation étant chargée en particules fines, celles-ci se déposent progressivement dans les canaux, réduisant leur section et risquant d'obstruer le réseau d'irrigation situé en aval du barrage.
- **Altération de la qualité de l'eau** : les sédiments transportent divers éléments chimiques, notamment des nitrates et des sulfates issus des engrais agricoles. Leur accumulation dans les réservoirs contribue ainsi à la détérioration de la qualité de l'eau destinée à la consommation ou à l'irrigation. [39]

II.9.4 La problématique de dragage

II.9.4.1 Nécessité du dragage

• Les raisons justifiant le curage d'un cours d'eau relèvent principalement de considérations hydrauliques ainsi que de la préservation et de la restauration de l'écosystème aquatique.

Parmi les principaux indicateurs de dysfonctionnement, on peut citer :

- **Risques d'inondation** causés par l'accumulation de sédiments et l'obstruction du lit du cours d'eau.
- **Perturbation de la navigation** due à l'envasement, rendant la circulation des embarcations difficile, voire impossible.
- **Développement excessif de la végétation riveraine** : envahissant le lit du cours d'eau et modifiant son écoulement naturel.
- **Prolifération d'algues et de plantes aquatiques** : altérant la qualité de l'eau et perturbant l'équilibre écologique.
- **Accumulation de divers dépôts** (débris flottants, objets encombrants, vase affleurant), nuisant à l'écosystème et à l'écoulement de l'eau.
- **Modification du tracé du cours d'eau** : pouvant entraîner des changements dans l'écoulement et l'extension du lit mineur.
- **Affaissement des berges** : causé par l'érosion et pouvant mener à des risques d'effondrement.

II.9.5 Les techniques de dragage

II.9.5.1 Définition

Le dragage désigne l'opération d'extraction de matériaux situés au fond d'un plan d'eau. Cette intervention peut avoir plusieurs objectifs, tels que la réalisation d'infrastructures portuaires (creusement de bassins ou de chenaux), l'entretien des voies navigables fluviales ou maritimes en raison de leur comblement par des sédiments, le remblaiement visant à restaurer les plages ou à gagner du terrain sur la mer, ainsi que l'extraction de granulats marins destinés au secteur de la construction.

Les travaux de dragage sont réalisés à l'aide de navires et d'engins spécialisés, dont les caractéristiques varient en fonction du type de travaux à effectuer et de l'environnement concerné. On distingue notamment les dragues hydrauliques et mécaniques, ainsi que les navires équipés pour manœuvrer ou les pontons fixes. Les matériaux extraits sont soit stockés

à bord pour être transportés ailleurs, soit déposés dans des barges attenantes, soit évacués par un réseau de canalisations. Selon sa conception et son mode de fonctionnement, la drague peut opérer en position fixe ou en déplacement.

II.9.5.2 Le dragage mécanique

Le dragage peut être effectué à l'aide de différentes méthodes, représentées dans la figure II.7 :

- **Drague à godets** : Cette technique repose sur l'utilisation d'un tapis roulant pour acheminer les sédiments extraits de la retenue vers la zone de dépôt.
- **Benne preneuse** : Cet équipement, installé sur un ponton flottant, nécessite l'utilisation de chalands pour assurer l'évacuation des matériaux dragués.
- **Matériel de terrassement** : Cette méthode implique l'usage d'engins tels que des bulldozers, des pelles et des chargeurs hydrauliques, ainsi que de camions pour transporter les vases.

Note : Ce type de dragage ne peut être réalisé que lorsque la retenue est entièrement vidée.

Cependant, pour déterminer la technique de dragage la plus appropriée, plusieurs aspects doivent être pris en compte :

- ✓ Extraire et transporter les sédiments avec une consommation minimale d'eau.
- ✓ Identifier et aménager une zone de dépôt adaptée à la réception des matériaux dragués.
- ✓ Maintenir l'exploitation de la retenue tout en procédant aux opérations de dévasement.

[40]



Figure II. 7: Dragage mécanique Dragage hydraulique

Cette méthode repose sur l'utilisation d'une drague suceuse rémouleuse ainsi que d'une conduite flottante et terrestre permettant l'évacuation des sédiments (vase et eau) jusqu'à la zone de dépôt. La figure II.6 illustre ce procédé de dragage.

Les matériaux sont fragmentés soit par des jets d'eau sous pression, soit par la rotation d'un dispositif spécifique. Une fois mis en suspension, ils sont aspirés et acheminés par des pompes vers les zones de stockage. [40]



Figure II. 8: Pompe hydraulique

II.10 Risque causé par l'opération de dragage :

En 1977, J. Clark considérait le dragage comme la principale menace pesant sur les écosystèmes côtiers. Cette pratique soulève des préoccupations environnementales majeures, notamment en raison de la dispersion des polluants qu'elle entraîne, favorisant ainsi leur

Bioaccumulation. A l'époque, la méthode la plus couramment utilisée pour l'élimination des sédiments dragués consistait à les rejeter en mer.

II.10.1 Lutter contre le dragage

La lutte contre les impacts négatifs du dragage repose sur plusieurs stratégies visant à limiter la dispersion des contaminants et la dégradation des écosystèmes côtiers. Voici quelques solutions

1. Réduction de la nécessité du dragage

- Aménagement durable des ports et voies navigables : Concevoir des infrastructures qui minimisent l'accumulation des sédiments.
- Gestion des apports sédimentaires : Limiter l'érosion en amont par la reforestation des berges et l'aménagement des bassins versants.

2. Techniques de dragage plus respectueuses de l'environnement :

- Dragages électifs : Éviter les zones les plus contaminées pour réduire la remise en

suspension des polluants.

- Méthodes à faible turbulence : Utiliser des techniques comme le dragage hydraulique à aspiration contrôlée.
- Barrières anti-dispersion : Employer des écrans flottants pour limiter la propagation des sédiments.

3. Gestion responsable des sédiments dragués :

- Traitement et réutilisation : Utiliser les sédiments propres pour la restauration des plages ou l'agriculture.
- Stockage en site confiné : Isoler les sédiments contaminés dans des bassins de décantation sécurisés.

4. Réglementation et surveillance :

- Contrôle strict des opérations de dragage : Imposer des études d'impact environnemental avant toute intervention.
- Sur veillance continue : Mettre en place un suivi de la qualité de l'eau et de la biodiversité après les travaux.

II.10.2 Caractérisation physico-chimique :

L'analyse physico-chimique des sédiments permet d'évaluer leurs propriétés, notamment le pH, la conductivité électrique, ainsi que la teneur en ions majeurs, en éléments indésirables tels que l'azote et le phosphore, en micropolluants organiques, en hydrocarbures, engrais et en métaux lourds. Ces composés résultent principalement de processus naturels et des activités humaines.

- Le potentiel hydrogène (pH) : qui donne une idée de la propre acidité ou alcalinité des sédiments, ainsi que de la biodisponibilité de la plupart des éléments chimiques.
- La conductivité électrique : qui permet d'inférer une estimation de la salinité et de la concentration en ions dissous.
- La concentration en ions majeurs : notamment calcium, magnésium, sodium et potassium, ions qui influencent les réactions chimiques dans les sédiments.
- La présence de substances indésirables : (ex. azote et phosphore provenant des engrais et des rejets domestiques) pouvant favoriser l'eutrophisation ;
- Les micropolluants organiques : (ex. pesticides, hydrocarbure et autres substances toxiques issus des activités industrielles et agricoles) ;
- Les huiles et graisses : venant d'origine essentiellement urbaine et industrielle, susceptibles de perturber l'écosystème aquatique ;

- Les métaux lourds : que sont plomb, mercure, cadmium et arsenic, dont l'accumulation peut avoir des effets toxiques sur la faune et la flore.

II.10.3 Valorisation des sédiments de Barrages

Le traitement des vases regroupe l'ensemble des méthodes mises en œuvre pour améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques. Il peut s'effectuer de deux manières : soit par stabilisation, en incorporant des additifs afin d'optimiser certaines caractéristiques, soit par dépollution. Dans tous les cas, l'objectif principal est de valoriser la vase.

La réutilisation des sédiments issus des rejets apparaît comme une solution efficace face aux problématiques de stockage et aux impacts environnementaux. Toutefois, la transformation et l'exploitation de ces vases restent encore peu étudiées et nécessitent l'élaboration de nouvelle réglementation en accord avec les principes de protection de l'environnement et de développement durable.

II.10.3.1. Valorisation des sédiments

Les sédiments issus du dragage peuvent être réutilisés comme matériau pour la couche de forme dans la construction des routes.

La valorisation et l'usage des vases sont des sujets encore peu explorés et demeurent d'actualité pour l'élaboration de nouvelles réglementations alignées sur les principes de protection de l'environnement et de développement durable.

❖ Définition de la structure de chaussée

La chaussée routière est constituée de plusieurs couches superposées, bien que seule celle en contact direct avec la circulation soit visible. En réalité, elle peut comporter jusqu'à quatre couches, dont une couche intermédiaire appelée «couche de forme », qui a pour fonction de transmettre les charges générées par le trafic jusqu'au sol support.

D'un point de vue géométrique, la chaussée désigne la surface aménagée de la route destinée à la circulation des véhicules.

Sur le plan structurel, il s'agit d'un ensemble multicouche composé de différentes strates de matériaux disposées sur un sol préalablement préparé. Cette structure est conçue pour supporter le passage des véhicules et inclut l'ensemble des épaisseurs des différentes couches qui la composent.

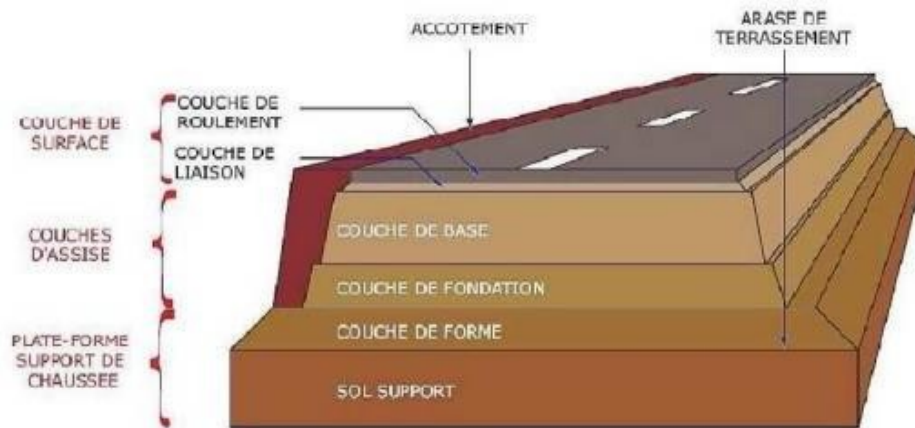


Figure II. 9: Différentes couche d'une chaussée



Figure II. 10: Blocs de bétons réalisés avec des sédiments non-immérgeables traités (droite : Port de Dunkerque, gauche : Rade de Toulon)

II.11 Les défis liés à l'incorporation des sédiments dans des matériaux

L'intégration des sédiments de dragage dans des matériaux de construction ou d'autres applications industrielles comporte plusieurs défis, parmi lesquels :

II.11.1 Défis environnementaux

- **Présence de contaminants :** Les sédiments de dragage peuvent renfermer des métaux lourds, des hydrocarbures ainsi que d'autres polluants susceptibles de présenter des risques pour l'environnement.
- **Gestion des lixiviats :** L'incorporation des sédiments dans des matériaux peut engendrer la libération de substances nuisibles dans l'environnement.
- **Évaluation du cycle de vie :** Il est impératif de s'assurer que l'utilisation des sédiments dans des matériaux ne génère pas de nouvelles problématiques environnementales sur le long terme.

II.11.2 Défis techniques et matériaux

- Hétérogénéité des sédiments : La composition des sédiments varie selon le site de dragage, ce qui complique leur intégration homogène dans des matériaux.
- Propriétés physiques et chimiques : Certains sédiments peuvent se révéler trop fins, trop humides ou présenter une résistance mécanique insuffisante, ce qui peut restreindre leur utilisation dans le domaine de la construction.
- Traitement et stabilisation : Des procédés tels que la stabilisation chimique, la déshydratation ou la solidification sont souvent requis pour améliorer leurs caractéristiques.

II.11.3 Défis réglementaires

- Norme set législation : L'utilisation des sédiments dans des matériaux est soumise à des réglementations rigoureuses en matière de qualité et de pollution.
- Acceptation par les autorités : L'obtention de l'aval des agences environnementales peut constituer un processus long et complexe.

II.11.4 Défis économiques et industriels

- Coût du traitement : Le traitement des sédiments pour les rendre utilisables peut engendrer des coûts significatifs, diminuant ainsi leur compétitivité par rapport aux matériaux traditionnels.
- Absence de marché structuré : L'utilisation des sédiments dans le secteur des matériaux demeure peu développée, ce qui restreint les perspectives commerciales.
- Résistance des industriels : Certains acteurs du secteur de la construction peuvent être réticents à utiliser des matériaux résultant des sédiments en raison d'incertitudes quant à leurs performances à long terme.

II.11.5 Solutions possibles

- Développer des méthodes de traitement efficaces et économiquement viables.
- Réaliser des études approfondies sur la performance et l'impact des matériaux basés sur des sédiments.
- Sensibiliser les industriels et les autorités aux bénéfices associés à cette valorisation.
- Adapter les réglementations pour favoriser l'innovation tout en garantissant la sécurité environnementale.

Chapitre III

Renforcement des polymères avec des charges minérales

Introduction

Les composites à matrice polymère renforcée par des charges minérales sont de plus en plus étudiés pour le secteur de la construction. Parmi les matrices polymères, les résines époxy (thermodurcissables) sont particulièrement prisées pour les applications structurales en raison de leur haute résistance mécanique et de leur excellente adhérence. Par ailleurs, l'incorporation de charges minérales – notamment des argiles – permet d'améliorer certaines propriétés tout en réduisant les coûts et l'empreinte environnementale. Ce chapitre passe en revue l'état de l'art sur l'utilisation des résines époxy renforcées par des charges minérales (principalement des argiles) et leurs applications dans la construction, en s'appuyant sur des sources scientifiques récentes (articles et mémoires algériens, français ou méditerranéens). [41]

III.1 Impact des charges minérales sur les propriétés des composites

L'ajout de charges argileuses modifie en profondeur le comportement du composite époxy. Les principaux effets étudiés concernent les propriétés mécaniques, thermiques, rhéologiques et environnementales :[42]

III.1.1 Propriétés mécaniques

L'introduction d'argile augmente typiquement la rigidité du composite (module d'Young), car les feuillets rigides entravent la mobilité des chaînes. Par exemple, Laouachedi et al. (2017) ont observé que pour un composite époxy chargé à 18 % (en masse) de kaolin fin calciné, le module élastique passait de 0,56 à 2,4 GPa – soit une augmentation de +325 % par rapport à l'époxy pure. De façon générale, le module croît avec la fraction de charge. La résistance à la traction et à la flexion peut également augmenter. Toutefois, ces gains dépendent fortement de la dispersion et de la compatibilité : si l'argile s'agglomère, le composite peut souffrir de défauts concentrant les contraintes.

Dans certains cas, un traitement organophilique trop prononcé peut avoir un effet inverse : Brendlé et Burget (2006) ont noté qu'avec 3 % de MMT organoclay modifiée (C16TMACl), le module de Young de l'époxy a diminué (de 1579 à 1270 MPa) et le matériau résultant était plus *flexible* (module plus faible, ductilité accrue) que le composite micro chargé ou non chargé. Ceci illustre que le choix du type et de la dose de charge doit être optimisé : un excès ou un mauvais comptabilisant peut réduire la rigidité initiale. Néanmoins, de nombreux travaux confirment l'augmentation du module et de la résistance en fatigue lorsque l'argile est bien dispersée et bien associée. [43]

III.1.2 Propriétés thermiques

- Les argiles renforcent la stabilité thermique du polymère. Les composites époxy-argile présentent généralement une décomposition retardée et une température de transition vitreuse T_g au moins aussi haute que le polymère seul. Brendlé (2006) a montré que la T_g restait pratiquement inchangée (+/- quelques degrés) après addition de petites quantités d'argile hydrophile ou organophile. En revanche, l'argile peut augmenter la résistance à la chaleur et au feu : les couches silicatées forment un charinnocuité lors de la combustion, limitant la propagation des flammes. Des formulations époxy spécifiquement enrichies en montmorillonite modifiée sont utilisées comme retardateurs de flamme (sans ajouter de produits chimiques toxiques).[44]

III.1.3 Propriétés rhéologiques

Dans l'état non durci, l'époxy chargé en argile devient significativement plus visqueux. Les argiles (surtout organophiles) induisent un comportement thixotrope : le mélange époxy/argile peut présenter un seuil d'écoulement et un cisaillement non newtonien. Ceci complique la mise en œuvre : un mélange intensif (mélange mécanique ou sonication) est souvent nécessaire pour disperser les charges avant durcissement. On observe typiquement une augmentation de la viscosité à froid proportionnelle à la teneur en argile, ce qui peut nécessiter l'usage de solvants ou de procédés sous vide pour éviter les poches d'air au moulage.

III.1.4 Propriétés environnementales

D'un point de vue écologique, l'incorporation de charges naturelles réduit la quantité de polymère synthétique (issu du pétrole) et peut améliorer le bilan environnemental du matériau. Par ailleurs, les composites minéralisés sont plus stables aux UV et à la dégradation microbienne que des plastiques purs, car les argiles ne sont pas biodégradables et protègent partiellement la résine. Les charges minérales, étant généralement inorganiques et « non toxiques » (certaines bentonites sont même pharmaceutiques), peuvent faciliter le recyclage ou la valorisation (par exemple en broyant le composite pour réutilisation en granulats). En revanche, la production des argiles (extraction, purification) a aussi un coût énergétique, mais celui-ci est souvent compensé par leur faible prix d'achat par rapport aux charges synthétiques comme le dioxyde de silicium ultra-fin.

Dans l'ensemble, l'impact des argiles sur les propriétés dépend fortement du type et de la quantité de charge : une faible charge (quelques %) peut améliorer la résistance aux chocs et la rugosité du composite, alors qu'une forte charge ($\geq 10-20\%$) vise surtout la rigidification et la

barrière thermique. Les études montrent ainsi un « trade-off » : les charges minérales augmentent la rigidité et la résistance aux flammes, mais peuvent rendre le composite plus fragile (moins d'allongement) et augmenter la viscosité lors de la fabrication.[45]

III.2 Techniques de fabrication des composites époxy/argile

Plusieurs procédés sont employés pour fabriquer ces nanocomposites époxy/argile, selon l'application finale :

III.2.1 Mélange et coulage

- La méthode la plus simple consiste à disperser la poudre d'argile dans la résine époxy liquide (par agitation mécanique, parfois assistance ultrasons) avant ajout du durcisseur. Le mélange est ensuite coulé (moulage au poids) dans un moule et durci à température ambiante ou sous chauffage modéré. Cette méthode permet de mouler des pièces simples de faible épaisseur.

III.2.2 Injection et compression

- Pour des volumes plus importants ou des pièces techniques, on utilise des moules sous pression. Comme indiqué dans les spécifications fabricant, la température de moulage d'un époxy chargé varie typiquement de 130 à 220 °C selon le procédé. Par exemple, une coulée peut être réalisée à 130–200 °C, tandis que l'injection ou la compression molding s'effectuent classiquement entre 150 et 220 °C pour l'époxy. Ces procédés exigent un contrôle précis de la température (étapes de gélification puis de recuit) pour limiter l'exotherme. [46]

III.2.3 Stratification et infusion (composites fibre)

- Lorsque l'époxy/argile est utilisée comme matrice renforcée par des fibres (verre, carbone), on peut combiner les méthodes classiques de stratification (lay-up) ou d'infusion sous vide (RTM). L'argile modifiée est alors mélangée à l'époxy avant imprégnation des fibres. Des presses ou autoclaves sont souvent employés pour compacter la couche et assurer la diffusion de la résine dans le renfort fibreux.

III.2.4 Electro filage et extrusion

- Pour des fibres ou films, des techniques plus spécialisées peuvent être utilisées (par exemple, extrusion de profils composites ou filage centrifuge de résine chargée).

III.2.5 Dispersion préalable en phase liquide

Certaines équipes réalisent un traitement préliminaire de l'argile (ex. dispersion en solvant organique, thermoliage) pour faciliter son incorporation. Des procédés innovants comme la *sol-gel* ou la photo polymérisation ont aussi été testés pour synthétiser des nanocomposites époxy/argile, notamment pour les résines époxy « vertes » photo durcissables.

Quelle que soit la méthode, il est crucial de désaérer le mélange (dégazage) pour éviter les bulles et de bien contrôler la cure. La température de durcissement est un paramètre clé (surtout en milieu confiné) car une montée trop rapide peut provoquer des fissures ou des défauts. Les tableaux industriels recommandent souvent un cycle de polymérisation en deux étapes (gel à basse température suivi d'un durcissement à plus haute température) afin d'obtenir des composites à hautes performances dimensionnelles. [47]

III.3 Travaux de recherche antérieurs sur l'utilisation des charges argileuses :

Plusieurs recherches menées traitent ces composites époxy/argile.

- **Laouachedi Dalila. (2017)** a menée une étude à l'Université M'Hamed Bougara de Boumerdès porté sur le développement de matériaux composites à base de **résine époxy** chargée en **argiles locales**, notamment le **kaolin** et son dérivé calciné, le **métakaolin**. L'objectif principal était d'exploiter des ressources minérales disponibles localement pour renforcer la matrice polymère et améliorer ses performances mécaniques et thermiques, tout en réduisant les coûts de production. Le kaolin a d'abord été utilisé sous forme brute, avec différentes tailles de particules et à des taux de charge allant de 2 % à 20 %. Les tests ont montré que le kaolin permettait d'augmenter significativement la rigidité du composite : un taux optimal de 18 % de kaolin fin a permis de tripler le module d'élasticité par rapport à la résine pure.

Dans une seconde phase, les chercheurs ont calciné le kaolin à une température de 500 à 550 °C pour obtenir du **métakaolin**, une forme amorphe plus réactive, qu'ils ont ensuite incorporée dans la résine époxy. Les composites obtenus à base de métakaolin ont présenté de meilleures performances globales que ceux à base de kaolin brut, grâce à une meilleure dispersion dans la matrice et à une interface plus homogène entre la charge et la résine. Les analyses ont été complétées par des techniques de **diffraction des rayons X (XRD)**, de **fluorescence X (XRF)** et des essais mécaniques (traction, flexion), confirmant l'effet bénéfique des charges sur la résistance mécanique et la stabilité thermique des composites. Cette recherche met en valeur le potentiel des matériaux locaux dans la fabrication de composites performants

et économiques, avec des applications possibles dans les domaines de la construction, du transport ou de l'électronique.

• **Achit et Ben Ammar**, chercheurs à l'Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, ont mené une étude approfondie sur la caractérisation thermique et mécanique de la **résine époxy pure**, servant de base à leurs recherches sur les composites. Les chercheurs ont utilisé la résine **DGEBA** (épichlorhydrine et bisphénol A) associée à un durcisseur **IPD** (isophorone diamine). Ils ont observé que le processus de réticulation modifiait la structure chimique de la matrice, comme en témoigne la disparition du pic caractéristique des groupes oxirane à 915 cm^{-1} dans les spectres FTIR, indiquant une conversion complète des sites réactifs. Les analyses thermogravimétriques ont révélé que la transition vitreuse (T_g) de la résine pure se situait autour de 55 °C , avec une stabilité thermique jusqu'à environ 300 °C . Les tests mécaniques ont montré que la résine époxy pure présente une bonne rigidité, mais sa résistance à la traction et son module d'élasticité sont relativement faibles comparés à ceux des composites renforcés. Cette étude a ainsi établi une base de référence pour évaluer l'impact de l'ajout de charges minérales ou naturelles sur les performances des composites à matrice époxy.

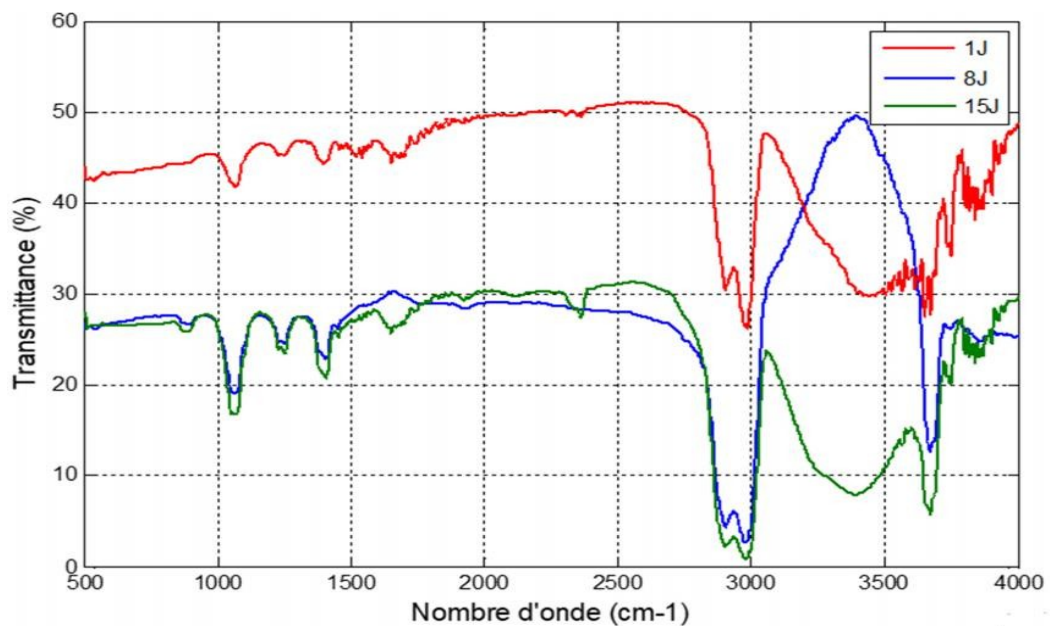


Figure III. 1: Spectre FTIR des échantillons de résine époxy vieillis

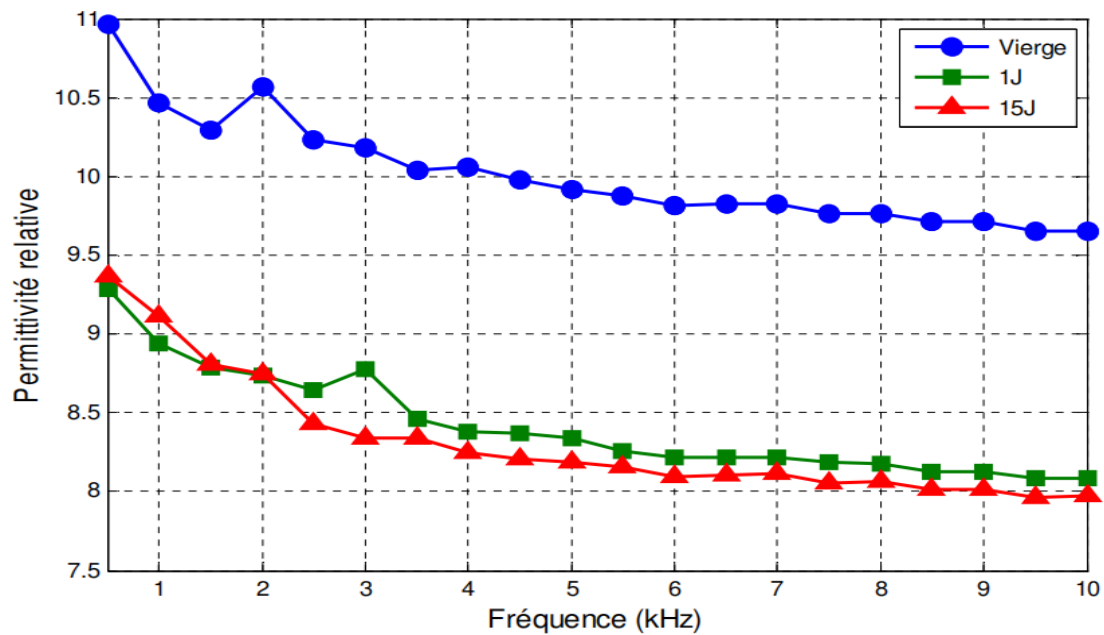


Figure III. 2: Variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence

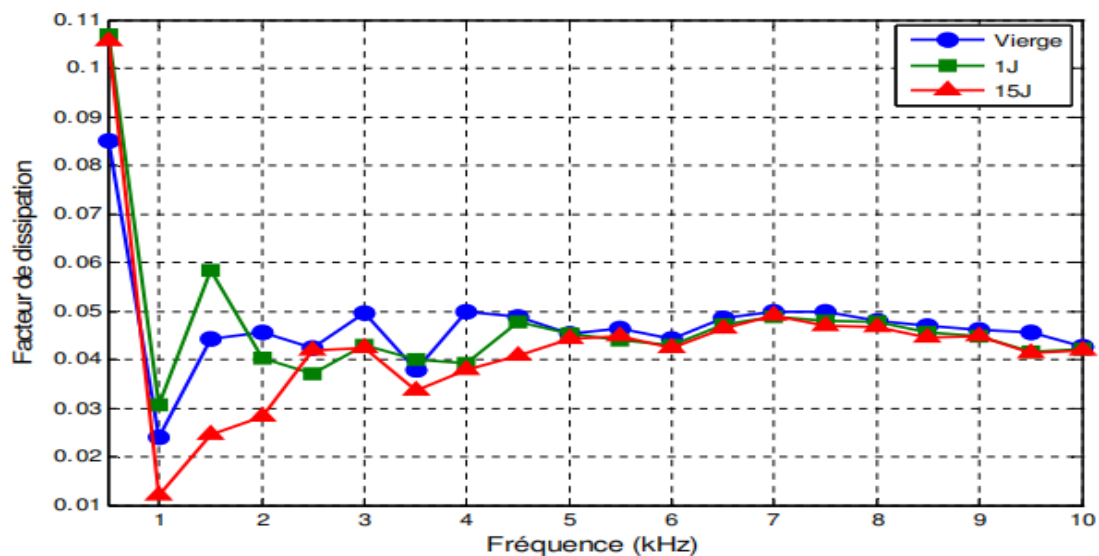


Figure III. 3: Variation du facteur de dissipation de la résine époxy vieillie sous $T=127^{\circ}$ en fonction de la fréquence pour différentes durées de temps.

• **Samia Boufassa**, dans son mémoire intitulé « *Étude des relations morphologie-propriétés de composites hybrides polymères-charge minérale : applications au renforcement mécanique du mélange PP/PEHD* », a mené une recherche approfondie à l'Université Ferhat Abbas de Sétif en 2009. L'objectif de son travail était d'examiner l'effet de l'ajout de charges minérales, brutes ou traitées, sur les propriétés mécaniques et la morphologie d'un mélange de polypropylène (PP) et de polyéthylène haute densité (PEHD). Les résultats ont montré que l'intégration de ces charges améliore la compatibilité entre les phases polymères, modifie favorablement la structure morphologique du composite et conduit à une amélioration notable

des propriétés mécaniques, notamment en termes de rigidité et de résistance à la traction. Ce travail met en évidence l'intérêt du renforcement minéral pour optimiser les performances des mélanges polymères dans des applications industrielles.

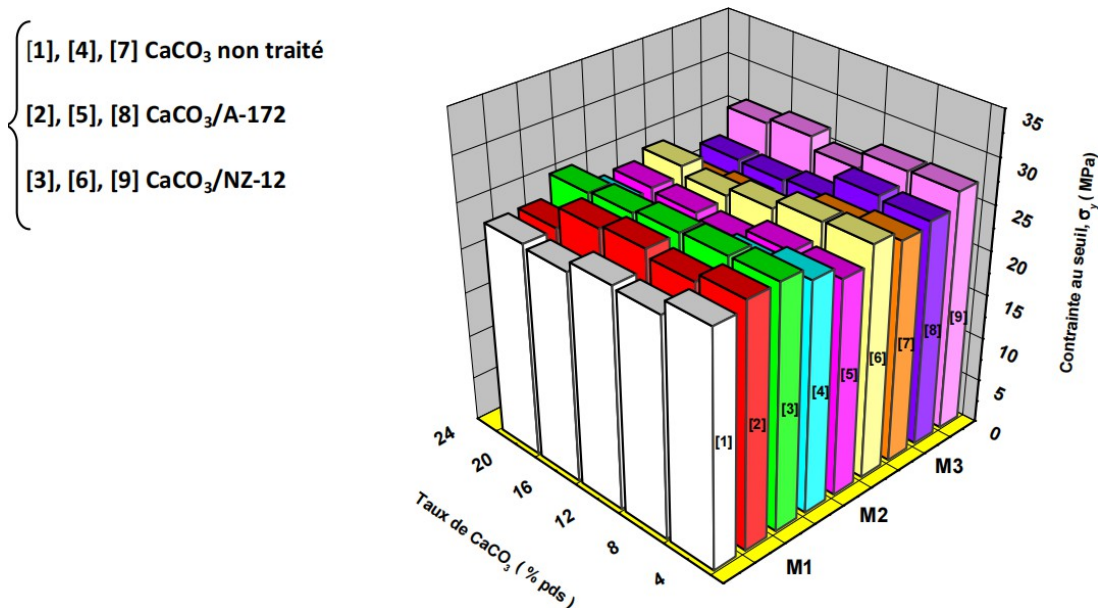


Figure III. 4: Variation de la contrainte au seuil d'écoulement des différents avec le taux de CaCO_3 brut et traité avec 1 % d'agents de couplage

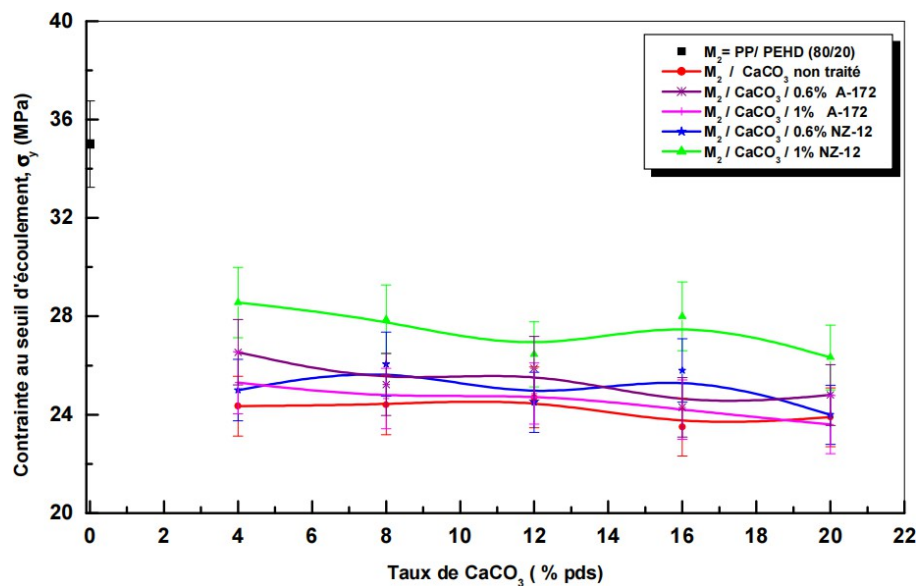


Figure III. 5: Variation de la Contrainte au seuil d'écoulement des composites M2 (50/50) en fonction des taux de CaCO_3 brut et traité avec les agents de couplage

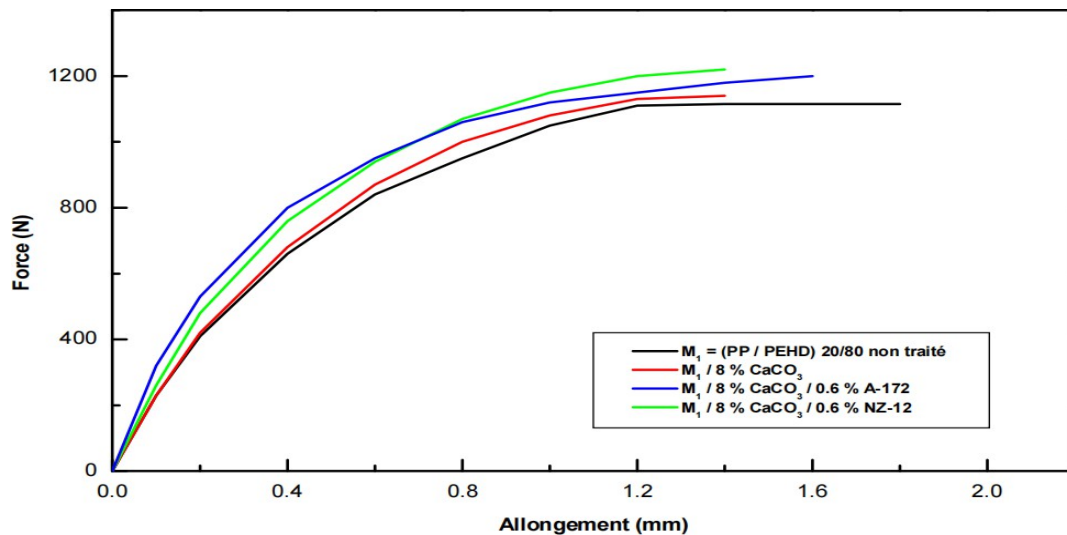


Figure III. 6: Variation de la force en fonction de l'allongement des composites M1 / CaCO₃

• **Sabria Ziane**, dans son mémoire de 2021 à l'Université Yahia Fares de Médéa, a étudié l'élaboration et la caractérisation de nanocomposites à base d'argile, en se focalisant sur la préparation de bentonites modifiées par intercalation d'un sel organique afin de les rendre organophiles. L'objectif principal était d'améliorer la compatibilité entre la matrice polymère, ici le polystyrène, et la charge minérale pour obtenir une meilleure dispersion des nanoparticules de montmorillonite dans le polymère. Le mémoire détaille les différentes étapes de modification de l'argile, la préparation des nanocomposites, ainsi que leur caractérisation par des techniques telles que la diffraction des rayons X (XRD), la microscopie électronique à transmission (MET) et la spectroscopie infrarouge (FTIR). Les résultats ont montré que l'intercalation du sel organique permet d'augmenter l'espacement interfoliaire de la montmorillonite, facilitant ainsi sa dispersion exfoliée dans la matrice polystyrène. Cette meilleure dispersion s'est traduite par une amélioration significative des propriétés mécaniques et thermiques des composites, notamment une augmentation de la rigidité, une meilleure stabilité thermique et une résistance accrue à la dégradation thermique. Ce travail met en évidence l'importance de la modification chimique des charges minérales pour Optimiser les performances des nano composites polymères.

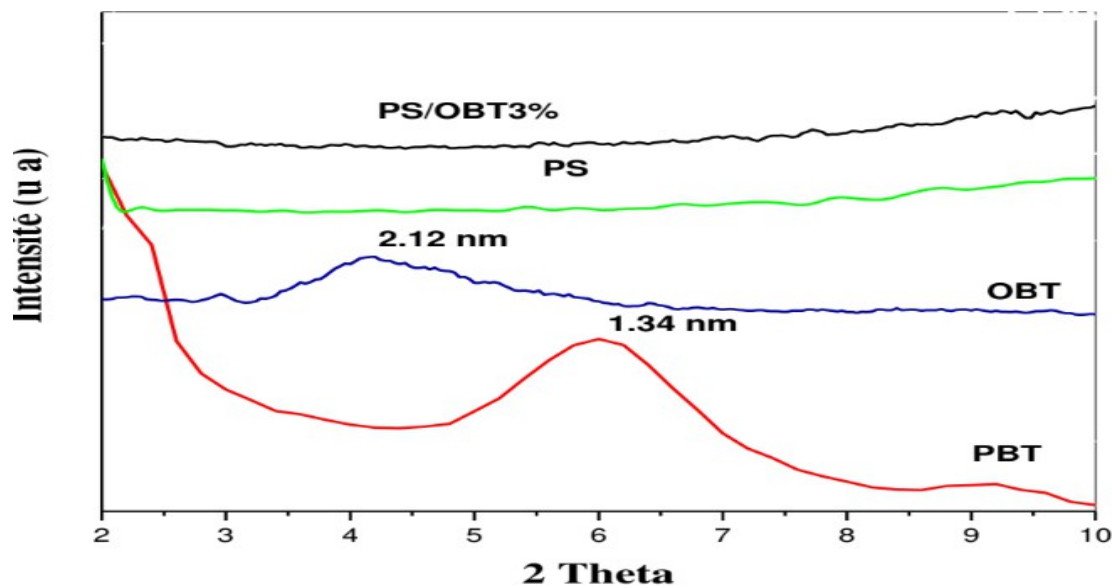


Figure III. 7: Diffraction patterns RX of PBT, OBT and PS/OBT3% blends.

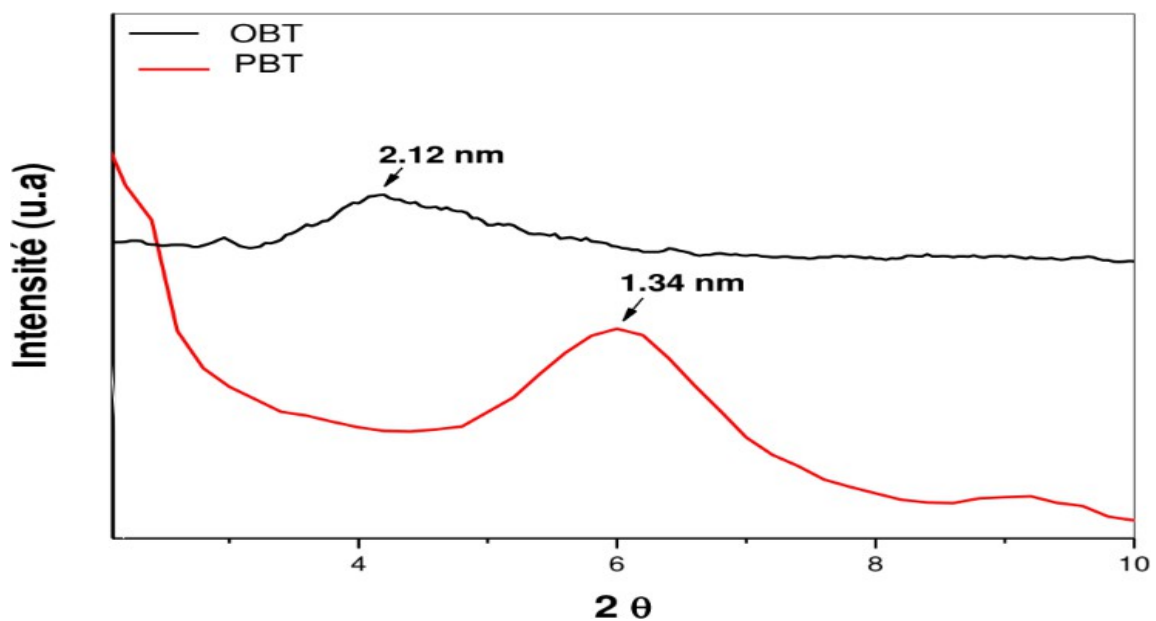


Figure III. 8: XRD pattern of raw and modified bentonites. BT/OBT.

- **Laziz Benmouhoub**, in his memoir on the study of mechanical and thermal properties of composites based on polyvinyl chloride (PVC) charged with wood flour modified chemically with soda, was interested in valorizing natural renewable charges to reinforce polymeric materials. The main objective was to evaluate the impact of the alkaline treatment of wood flour on the interaction between the charge and the PVC matrix, as well as on the global performance of the composite. The treatment with soda aimed to eliminate impurities and to improve the adhesion between wood fibers and the resin, favoring thus a better dispersion and a reinforced interface. Through a series of tests

mécaniques (traction, flexion, impact) et thermiques (analyse thermogravimétrique, DSC), les résultats ont montré que la modification chimique de la farine de bois améliore significativement la rigidité et la résistance mécanique du composite par rapport à un matériau non modifié, tout en maintenant une stabilité thermique satisfaisante. Ce travail démontre le potentiel des charges naturelles traitées chimiquement pour développer des composites PVC performants, écologiques et économiquement intéressants.

III.4 Avantages et limites dans la construction pour l'utilisation des charges minérales

Avantages

III.4.1 Rigidification et stabilité

- Les charges argileuses augmentent la rigidité du matériau (module plus élevé) et améliorent la stabilité dimensionnelle (faible retrait thermique). Dans la construction, cela se traduit par des composites *plus résistants à la déformation* sous charge permanente. Par exemple, l'augmentation de la rigidité des joints ou des nappes d'armature époxy chargées peut permettre de réduire l'épaisseur du matériau sans sacrifier la performance.[48]

III.4.2 Barrière thermique et résistance au feu

- Les argiles inhibent l'inflammation de l'époxy (formation d'une couche carbonée isolante). Un composite époxy/argile présente généralement une classe de résistance au feu supérieure à un époxy brut, sans ajout de retardateurs de flamme chimiques, ce qui est important pour les structures intérieures (planchers, couplages de parois) et l'isolation des conduits.

III.4.3 Durabilité chimique et résistance à l'abrasion

- Les argiles inertes protègent la résine contre les attaques chimiques (acides, alcalis) et améliorent la dureté de surface. Ainsi, des mortiers résine-argile appliqués sur béton ou métal offrent une protection anticorrosion et une résistance à l'abrasion accrues.

III.4.4 Coût et écoconception

- Les argiles étant généralement peu coûteuses (notamment localement disponibles) et non toxiques, elles permettent de réduire la quantité de résine époxy (matière première coûteuse) pour un coût moindre. Ceci est un avantage économique et environnemental (réduction d'émissions carbone par kg de matériau). L'emploi d'argiles naturelles (bentonite comestible, kaolins industriels) peut faciliter la certification environnementale (par ex. HPD, EPD).

III.5 Limites

III.5.1 Dispersion et traitement

- Les argiles doivent être très finement dispersées. Un mélange inhomogène (amas d'argile) crée des défauts (poches, points faibles) qui nuisent aux performances mécaniques. L'obtention d'une dispersion nanométrique (exfoliation complète) est difficile industriellement et nécessite souvent des étapes de mélange coûteuses (sonication, vitesse élevée) ou des prétraitements.

III.5.2 Fragilisation potentielle

- Si la charge est trop élevée ou mal associée, le composite peut devenir plus cassant (allongement à la rupture réduit). Comme mentionné, certaines charges organophiles ont conduit à une baisse du module initial (produit plus souple). Dans une application structurelle, cela peut être préjudiciable (par exemple, une poutre époxy chargée pourrait fléchir plus que prévu). Il faut donc calibrer la teneur en argile pour équilibrer rigidité et ténacité.

III.5.3 Augmentation de la viscosité et difficultés de mise en œuvre

Comme vu, l'époxy chargé est plus visqueux, rendant le moulage (injection, infusion) plus difficile. Pour le génie civil, cela peut compliquer l'application sur chantier (pose de mortiers époxy, injection sous pression). De plus, en cas d'humidité, certaines argiles peuvent absorber de l'eau (phénomène de gonflement) et ainsi affecter la longue durée des composites exposés (dilatation, blanchiment). [49]

III.5.4 Variabilité et finitions

Les argiles naturelles varient en composition (présence de quartz, feldspath, fer) d'un gisement à l'autre, ce qui peut entraîner des variations de couleur et de performance. En finition, l'aspect de surface (mat/gris) d'un composite chargé en argile est différent d'un époxy pur ; cela peut être gênant esthétiquement pour les applications visibles, nécessitant parfois un revêtement supplémentaire.

En conclusion, les composites époxy/argile offrent de nombreux avantages pour la construction (rapport rigidité/poids élevé, résistance améliorée, coût réduit), mais ils ne remplacent pas toujours les renforts fibreux pour les charges importantes. Ils excellent en revanche dans les applications de type adhésifs structuraux, revêtements de surface, ou élaboration de granulats composites pour dalles (fibre de verre + argile dans l'époxy, par exemple). La recherche actuelle vise à minimiser les inconvénients (dispersion, fragilité) en

affinant le contrôle des interfaces (silane, copolymères) et en combinant parfois charges organiques et inorganiques pour un compromis optimal.

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1 Caractérisation des matériaux utilisés

Dans ce chapitre, une attention particulière est portée à l'élaboration d'un composite à base d'une résine époxy et les sédiments de dragage en mettant en œuvre les différentes étapes de sa préparation ainsi que les méthodes employées pour sa caractérisation physico-chimique. Par ailleurs, les matériaux de charge, notamment les sédiments issus des opérations de dragage, sont étudiés en détail afin d'évaluer leur aptitude à être intégrés dans une matrice polymère pour la fabrication de composites. Cette analyse comprend à la fois la préparation des charges, leur caractérisation (composition, granulométrie, structure, etc.), et leur interaction potentielle avec la résine époxy.

IV.1.1 Caractérisation de la matrice

La matrice polymère utilisée dans notre étude est constituée de deux composants : le premier, désigné comme composant A, correspond à la résine, tandis que le second, appelé composant B, est un agent de durcissement. Ce durcisseur joue un rôle essentiel dans la formation d'un réseau polymérique tridimensionnel au cours du processus de réticulation.

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé la résine époxy MEDAPOXY 812INJ, commercialisée par la société Granitex. Il s'agit d'une formulation époxyde aux performances élevées, reconnue pour ses excellentes propriétés mécaniques, sa résistance aux agents chimiques, sa faible absorption d'humidité, sa forte capacité d'adhérence, son faible retrait au durcissement, ainsi qu'une bonne compatibilité avec les renforts grâce à sa mouillabilité élevée et sa faible viscosité. Ces caractéristiques font de cette résine un matériau adapté à de nombreuses applications, y compris dans des domaines à forte exigence technologique. Le rapport en masse entre la résine (composant A) et le durcisseur (composant B), tel que recommandé par le fabricant Granitex, est de 2:1 pour la MEDAPOXY 812INJ.

Tableau IV. 1: Caractéristiques de la résine MEDAPOXY 812INJ selon la fiche technique du fournisseur

Rapport massique	Caractéristiques	
Monomère : 1Kg Durcisseur : 0,5Kg	Densité (ISO758)	1,1± 0,1
	Durée pratique d'utilisation (NFP18 810)	30 mn à 20 °C
	Résistance à la compression (NA 427)	>70Mpa
	Résistance à la flexion (NA 234)	>57Mpa

IV.2 Caractérisation des charges minérales

Dans le cadre de cette étude, les matériaux de charge incorporés à la matrice sont constitués de sédiments issus d'opérations de dragage. Afin de les adapter à une utilisation en tant que charge minérale dans les composites, ces sédiments sont d'abord séchés puis transformés sous forme de poudre fine à l'aide d'un broyeur mécanique. Ce broyage permet de réduire leur granulométrie pour favoriser une dispersion homogène au sein de la résine, condition essentielle à l'obtention de propriétés mécaniques et physico-chimiques optimales dans le matériau final.

IV.2.1 Sédiment de dragage

Dans le cadre de cette étude, la charge minérale utilisée est constituée de sédiments de dragage prélevés dans la région de Beni Amrane, située à proximité de la wilaya de Boumerdès, en Algérie. Ces sédiments proviennent d'opérations d'entretien et de curage des fonds fluviaux, menées pour garantir la navigabilité et prévenir les risques d'inondation. La composition de ces sédiments, en fait un candidat intéressant pour une valorisation dans les matériaux composites.

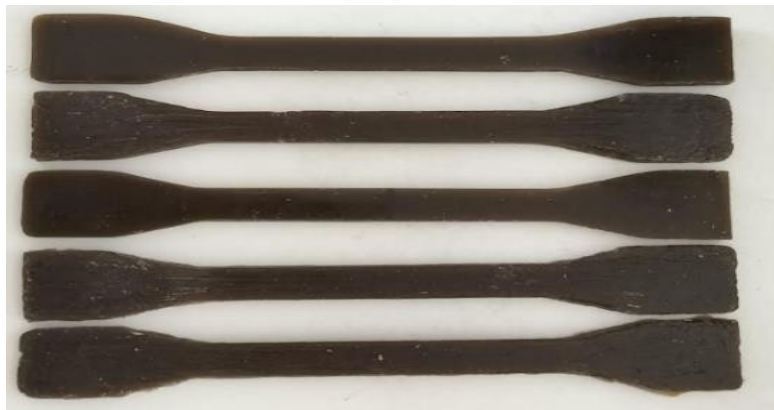


Figure IV. 1: Photo des sédiments non calciné

Plusieurs techniques d'analyse ont été exploitées pour caractériser les sédiments utilisés :

IV.2.1.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique par diffraction laser est une méthode physico-chimique de haute précision permettant de déterminer la distribution des tailles de particules dans une suspension, sur une plage allant généralement de 0,1 à 2000 μm . Elle repose sur la mesure de l'intensité angulaire de la lumière diffractée lorsqu'un faisceau laser interagit avec une population de particules dispersées. L'interprétation du signal est effectuée à l'aide des modèles de diffusion de Mie ou de Fraunhofer, en fonction de la nature optique et de la taille des particules. Cette technique, couramment utilisée en sédimentologie, permet une caractérisation

quantitative et reproductible des fractions granulométriques (argiles, limons, sables) et fournit des paramètres clés tels que D10, D50, D90, l'indice de polydispersité ou la courbe de répartition cumulative, indispensables pour l'étude des processus de transport, de dépôt ou d'érosion des sédiments.

La granulométrie des charges minérales constitue un paramètre déterminant influençant à la fois les propriétés mécaniques, la qualité de dispersion et l'aspect esthétique des matériaux composites à matrice polymère. Elle représente également un critère fondamental dans la classification des résines chargées, qui repose principalement sur la forme et la taille des particules constitutives.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse granulométrique des sédiments de dragage a été réalisée à l'aide d'un granulométrie laser de type MASTERSIZER 2000. Cet équipement permet une évaluation précise de la distribution des tailles de particules au sein de l'échantillon. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbe de distribution granulométrique, illustrant la répartition des dimensions des particules présentes dans les sédiments traités.

IV.2.1.2 Distribution granulométrique de la charge :

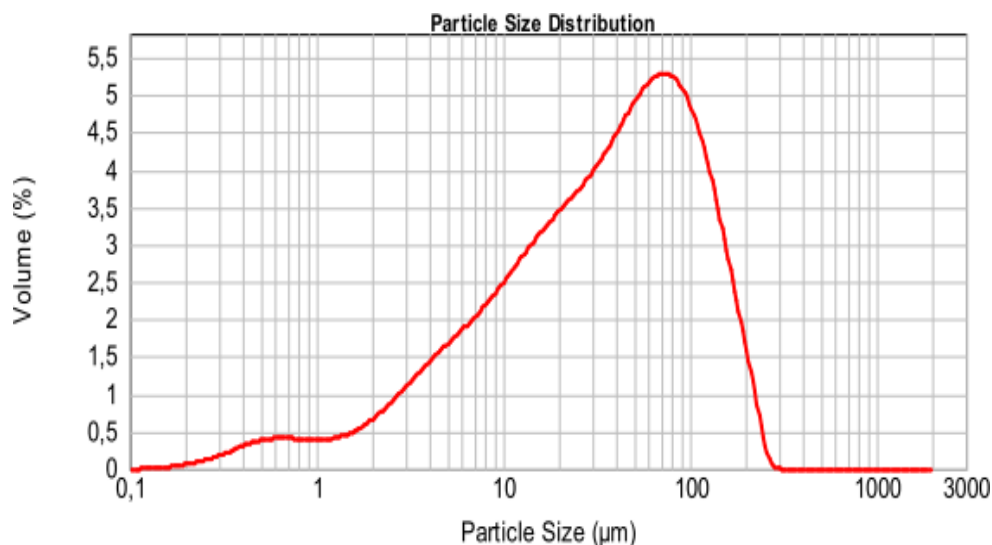


Figure IV. 2: courbe granulométrique

La courbe granulométrique obtenue met en évidence que les particules constituant la charge présentent une répartition avec des dimensions allant approximativement de 0.1 μm à 200 μm ou la majorité inférieure à 80 μm .

IV.2.1.3 Diffraction des rayons X :

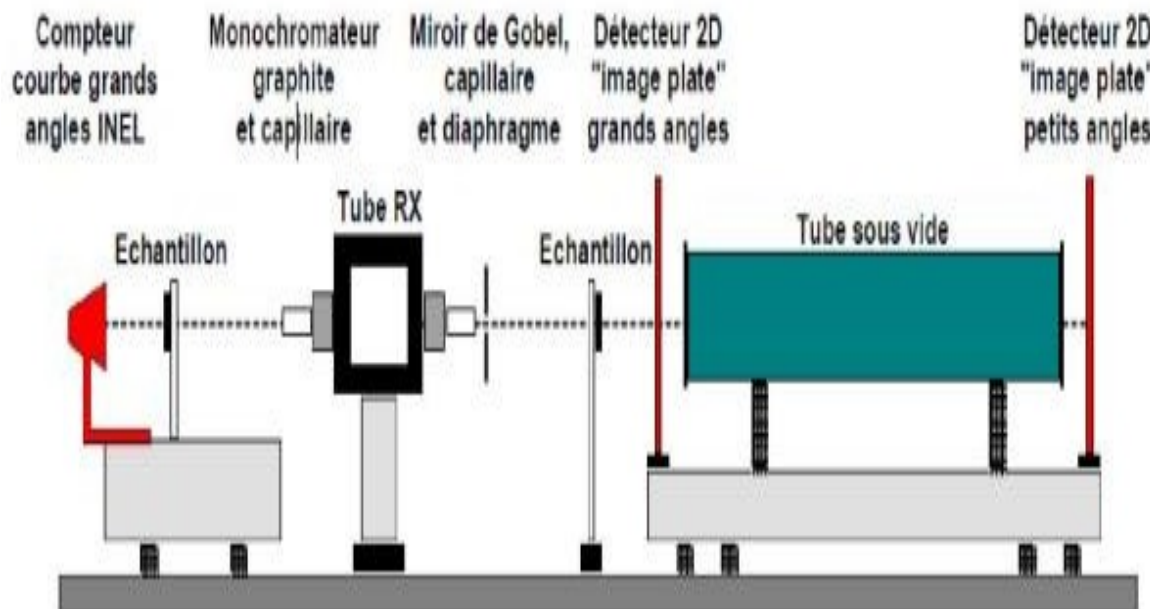
La diffraction des rayons X (DRX) est une technique utilisée pour identifier et quantifier les minéraux présents dans les sédiments en analysant leur structure cristalline. Lorsqu'un faisceau de rayons X est dirigé sur un échantillon de sédiment, les plans atomiques des minéraux

cristallins provoquent une diffraction spécifique selon la loi de Bragg, générant un diffractogramme composé de pics caractéristiques. Chaque minéral, comme le quartz, la kaolinite, l'illite ou la smectite, produit des pics à des angles bien définis, permettant leur identification et leur quantification. La présence d'un halo diffus indique des phases amorphes ou peu cristallisées.

Cette méthode, après une préparation soignée de l'échantillon (séchage, broyage, montage), permet de déterminer la composition minéralogique des sédiments, d'en déduire leur origine, leur histoire géologique, ou encore d'évaluer leur interaction avec l'environnement

Le principe de la diffraction des rayons X (DRX) repose sur l'interaction entre un faisceau de rayons X et les plans atomiques d'un cristal. Lorsqu'un faisceau monochromatique de rayons X est dirigé sur un matériau cristallin, les ondes sont diffusées par les atomes selon des directions bien précises. Si ces ondes diffusées interfèrent de manière constructive, elles donnent lieu à des pics d'intensité mesurables selon la **loi de Bragg**.

En analysant les angles et les intensités des pics obtenus dans le diffractogramme, on peut identifier les phases cristallines présentes, déterminer leur structure et estimer leur proportion dans l'échantillon.



IV.2.1.3.1 Composition minéralogique par DRX :

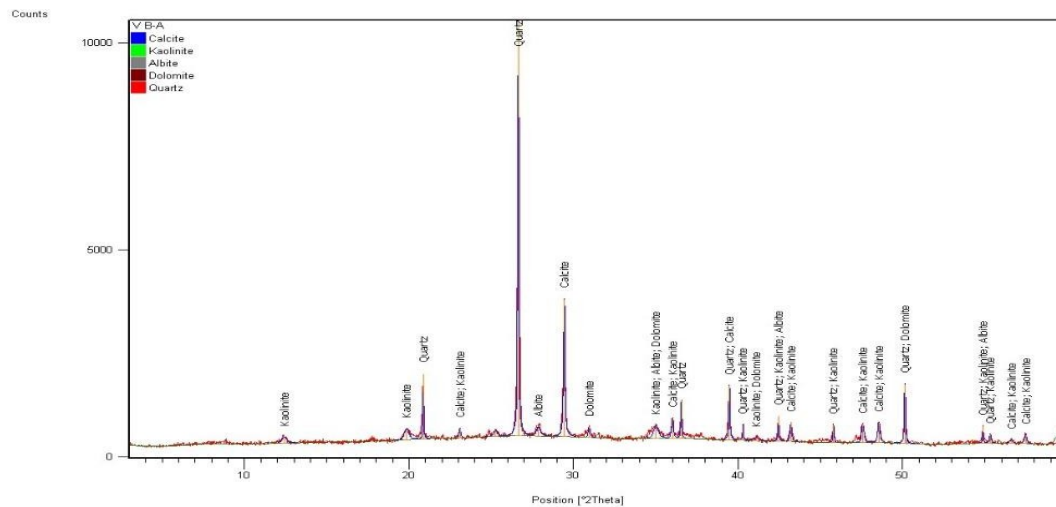


Figure IV. 3: Composition minéralogique des sédiments non calcinés

Sédiments calcinés

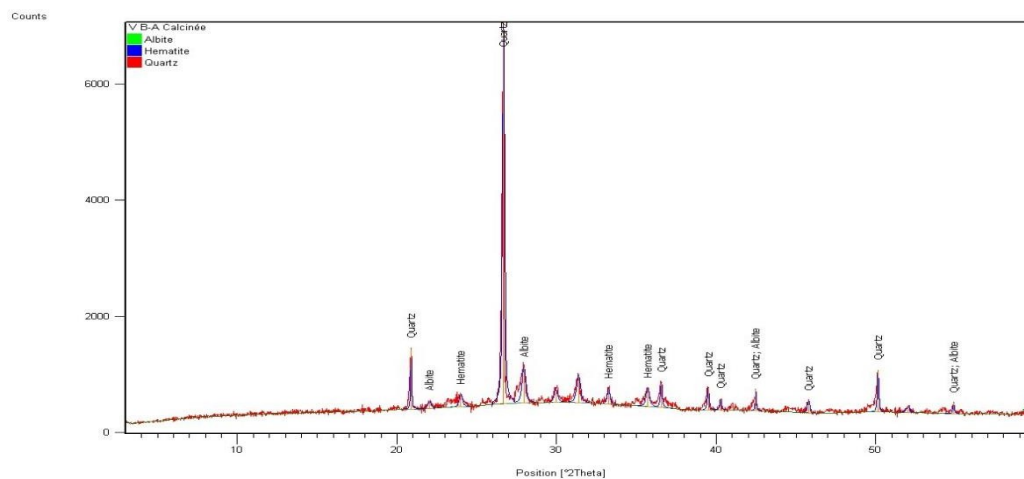


Figure IV. 4: Composition minéralogique des sédiments calcinés

IV.2.1.4 Composition chimique

L'analyse de la composition chimique des sédiments consiste à déterminer quantitativement les éléments majeurs, mineurs et traces présentes dans un échantillon afin de mieux comprendre son origine et son évolution géochimique. Pour cela, l'échantillon est d'abord préparé par broyage et dissolution chimique afin de libérer les éléments, puis analysé à l'aide de techniques telles que la spectrométrie de fluorescence X (XRF), la spectrométrie d'absorption atomique (AAS) ou la spectrométrie de masse (ICP-MS), qui permettent de mesurer précisément les concentrations élémentaires.

Ces données fournissent une caractérisation détaillée de la nature chimique des sédiments, essentielle pour étudier les processus d'altération, de transport, de dépôt, ainsi que l'impact environnemental.

Nom échantillon	Perte au feu (%)	Sommes des conc (%)	SiO2 Si2 (%)	Al2O3 Al2 (%)	Fe2O3 Fe2 (%)	CaO Ca2 (%)	MgO Mg2 (%)	SO3 S2 (%)	K2O K2 (%)	Na2O Na2 (%)	P2O5 P2 (%)	TiO2 Ti2 (%)
Sédiments non calciné	16,1800	100,000	47,33	14,68	5,81	11,07	1,39	0,09	1,84	0,64	0,26	0,70
Sédiments calciné	0,5900	100,000	57,00	17,44	7,14	12,05	1,46	0,23	2,15	0,81	0,32	0,82

IV.3 Synthèse des matériaux composites

La synthèse des composites est fait par le mélange de la résine époxy inject 812 et des différentes charges utilisées (les sédiments de dragage pur et les sédiments de dragage calciné à 750°C à différents taux.

IV.3.1 Préparation des échantillons

Les échantillons sont préparés selon le rapport massique entre le monomère et le durcisseur ($R_m=2$) qui est donné par le fournisseur (Granitex), on prend 100% de la résine inject avec 50% de durcisseur plus un taux de charge qui est mesuré par rapport au pourcentage massique de la résine, cette charge est séchée dans une étuve à 80°C. D'abord on mélange la résine avec la charge pendant 15 min afin d'avoir une bonne dispersion et une bonne distribution de la charge.

Le durcisseur est ensuite incorporé au mélange et agité pendant 07 min

IV.4 Caractérisation du matériau composite

IV.4.1 Détermination de la masse volumique

La densité réelle des échantillons a été déterminée à l'aide de la méthode hydrostatique, conformément à la norme NF T 51-561. Cette méthode repose sur le principe d'Archimède et offre une meilleure précision que le simple calcul du rapport entre la masse et le volume. Elle permet notamment de prendre en compte les éventuelles irrégularités de forme ou de porosité des échantillons. Les mesures ont été effectuées à une température stable de 22 °C, en réalisant une double pesée pour chaque échantillon, et les valeurs de masse volumique ont été obtenues en calculant la moyenne de deux échantillons par série. La densité est ensuite déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho = \frac{p e x m r}{m r - (m f - m p)}$$

Avec :

ρ , p_e : En g/cm³, sont respectivement la masse volumique de l'échantillon et du liquide d'immersion. Comme liquide d'immersion, on utilise l'eau à 22 °C dont $p_e \approx 1$ g/cm³.

- M_r : représente la masse de l'échantillon mesurée à l'air libre.
- m_f : correspond à la masse combinée du porte-éprouvette et de l'éprouvette immergée dans le liquide.
- m_p désigne la masse du seul porte éprouvette immergé.

Les résultats trouvés expérimentalement sont présentés dans les tableaux suivants pour les différents types d'échantillon.

IV.4.1.1 Valeurs des densités des résines chargées par sédiment non calcinés :

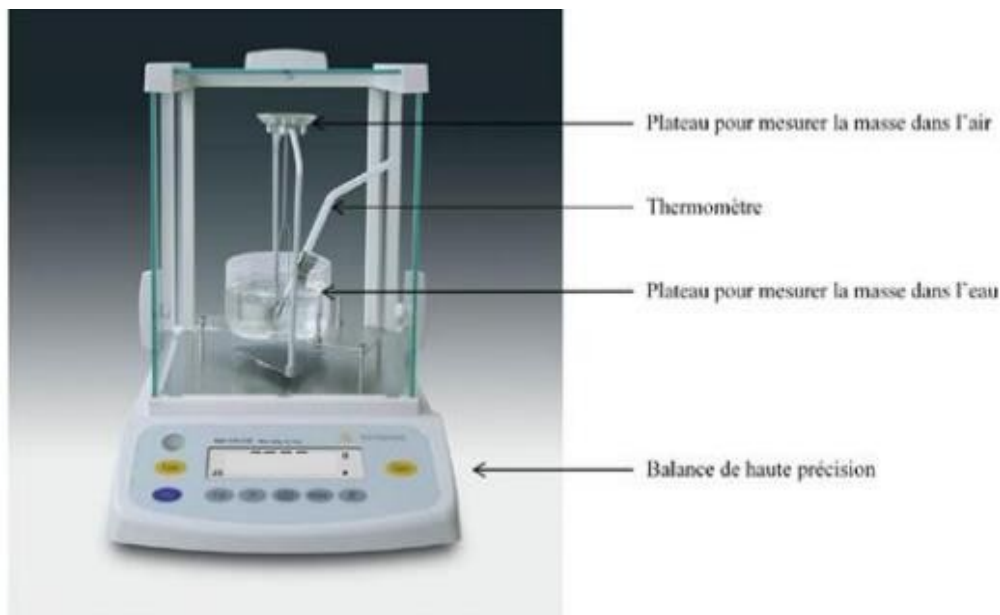


Figure IV. 5: Dispositif de densimétrie

Tableau IV. 2: Résultats des masses volumiques obtenues pour la résine chargée par les sédiments non calcinés

Taux de charge (%)	0	2	4	6	8	10
ρ_m	1,1428	1,1508	1,1515	1,1603	1,1662	1,1756

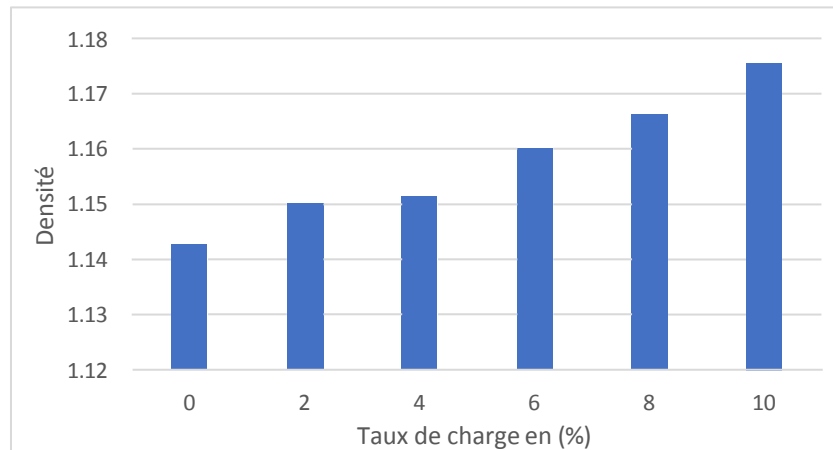


Figure IV. 6: Histogramme de la masse volumique de la résine chargée par les sédiments non calcinés

IV.4.1.2 Valeurs des densités des résines chargées par sédiment calcinés :

Tableau IV. 3: Résultats des masses volumiques obtenues pour la résine chargée par les sédiments calcinés

Taux de charge (%)	0	2	4	6	8	10
ρ_m	1,1428	1,1538	1,1647	1,1711	1,1790	1,1836

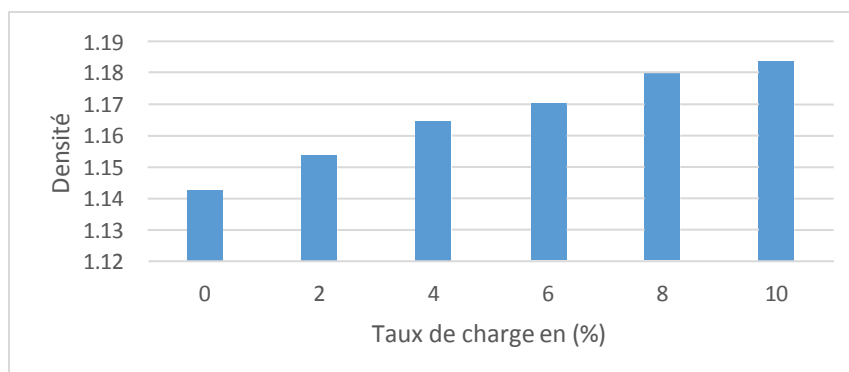


Figure IV. 7: Histogramme de la masse volumique de la résine chargée par les sédiments calcinés

Les histogrammes montrent que la densité du matériau augmente progressivement avec le taux de charge en sédiments, qu'ils soient calcinés ou non calcinés. Cette augmentation s'explique par le fait que l'ajout de sédiments, plus denses que la matrice initiale, réduit la porosité et augmente la masse volumique du mélange.

L'ajout de sédiments (déchets) dans la résine entraîne une augmentation de sa densité, laquelle évolue proportionnellement au taux de charge introduit.

IV.4.2 Caractérisation mécanique

Les propriétés mécaniques des matériaux composites sont des propriétés pour lesquelles il existe le plus grand nombre de travaux en vue d'une amélioration. Dans notre étude, l'élaboration des nouveaux composites à base des différentes charges et différentes fractions granulométriques pour chaque type de charge avec une variation de taux de charge, nous permis de montrer le rôle que jouent ces charges et effet de leur taille ainsi leur taux dans l'amélioration des contraintes mécaniques et la diminution remarquable de l'allongement.

IV.4.2.1 Essai de traction

Les essais de traction sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Roll de l'université de boumerdes munie d'un capteur de force de 10 KN et d'un extensomètre, Une vitesse de charge de 2 mm/min est appliquée. Ces essais ont été réalisés à température ambiante.

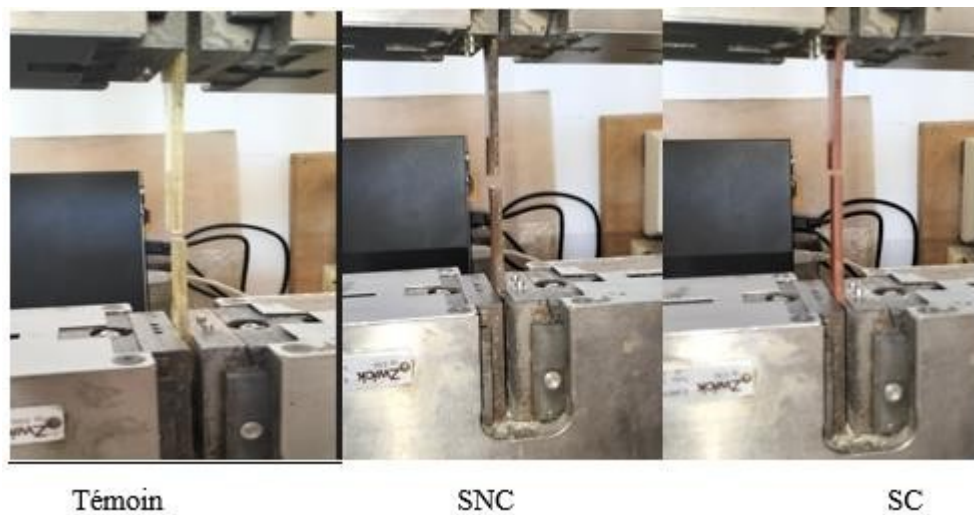


Figure IV. 8: Essai de traction sur les éprouvettes

IV.4.2.1.1 Géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour les essais ont été confectionnées selon la norme NF EN ISO 527-4, de type B, présentant une géométrie en forme d'haltère. Leur mise en forme a été réalisée à l'aide de moules en aluminium.



Figure IV. 9: Photo des éprouvettes

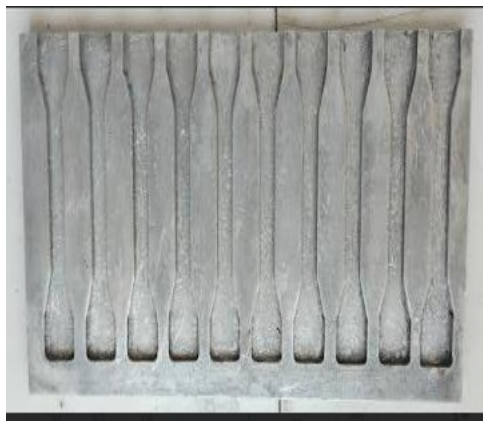


Figure IV. 10: Photo de moule en aluminium.

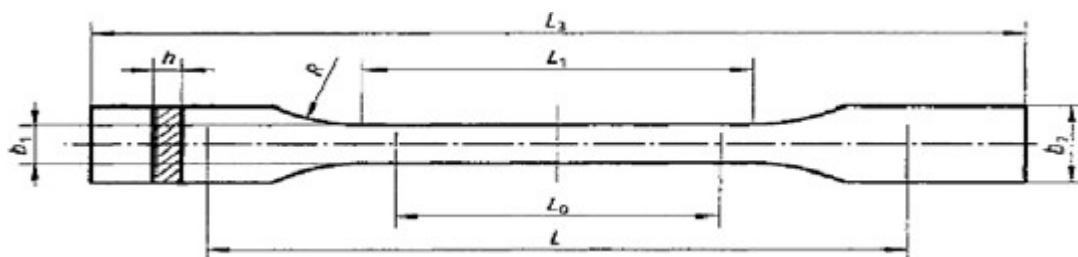


Figure IV. 11: Dimensions de l'éprouvette haltère

L_3 : Longueur totale

L_1 : Longueur de la partie étroite parallèle

R : Rayon

b_2 : Largeur aux extrémités

b_1 : Largeur de la partie étroite

h : Épaisseur

L_0 : Longueur de référence

L : Distance initiale entre mors

IV.4.2.1.2 Comportement mécanique en traction des composites (résine inject/Sédiment de dragage) :

1. Comportement mécanique en traction des résines inject/SC:

L'ensemble des mesures représentent les évolutions de la contrainte en fonction de l'allongement appliqué aux éprouvettes. Les diagrammes suivants présentent les courbes moyennes de trois éprouvettes pour chaque type du matériau.

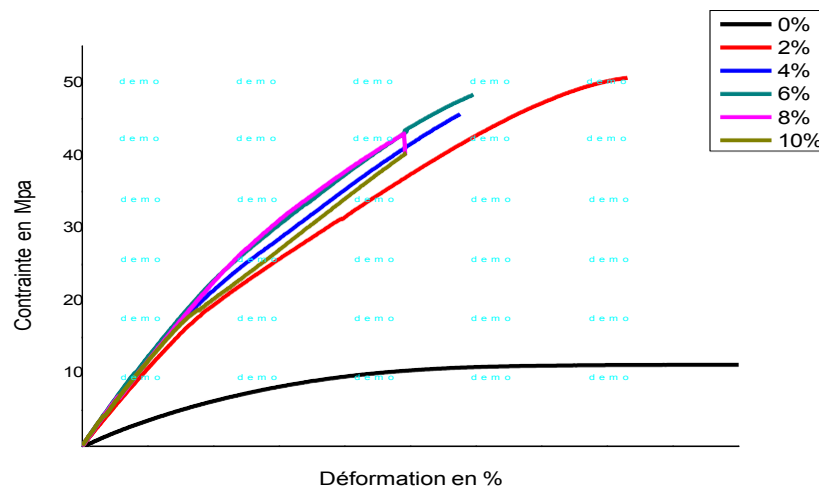


Figure IV. 12: La courbe de traction pour les résines \ SC.

La courbe montre l'évolution de la contrainte (en MPa) en fonction de la déformation (%) pour des éprouvettes contenant différentes proportions de sédiments calcinés, ajoutés comme charges, allant de 0 % à 10 %. L'échantillon sans sédiment (0 %) présente une faible résistance, avec une contrainte maximale autour de 10 MPa. En ajoutant des sédiments calcinés, la résistance mécanique augmente progressivement, atteignant un maximum d'environ 50 MPa pour un taux de 6 %. Cette amélioration est liée à une meilleure cohésion de la matière et une répartition plus efficace des efforts internes. Au-delà de 6 %, les performances n'augmentent plus de façon significative, ce qui suggère qu'il existe un seuil optimal de renforcement à ne pas dépasser.

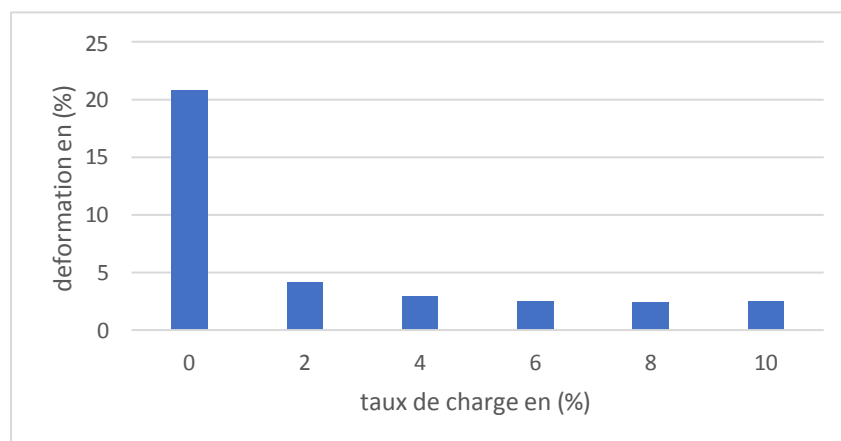
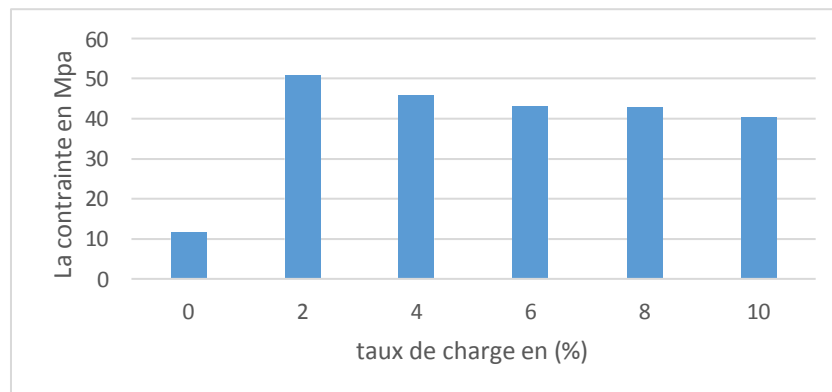
2. Propriétés de traction en fonction du taux de charges des résines injecte/SC:

Les caractéristiques mécaniques de la résine injecte/SC sont regroupées dans le tableau.

Figure IV.13: Tableau des caractéristiques mécaniques en traction de la résine inject /SC

Type d'échantillon	Taux de charge (%)	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ_{rup} (%)	E (N/mm ²)
Inject /BC	0	11,56	20,80	743,09
	2	50.63	4.15	2167.16
	4	45.68	2.88	2460.09
	6	43.24	2.47	2560.60
	8	42.94	2.45	2314.76
	10	40.29	2.47	2347.6

Les évolutions des contraintes max, d'allongement et du module d'élasticité en fonction de taux de charge sont présentées sur la figure :



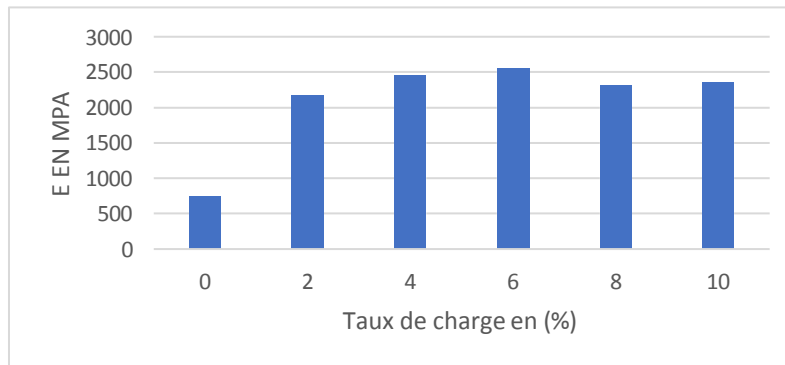


Figure IV. 14: Propriétés de traction en fonction du taux de charges des résines injecte/SC

a) Contrainte de traction b) Allongement la rupture c) Module d'élasticité

Les résultats montrent que l'augmentation du taux de charge conduit à une amélioration de la contrainte à la rupture ainsi que du module d'élasticité, tandis qu'une diminution de l'allongement à la rupture est observée.

Comparées aux échantillons non chargés, les résines chargées montrent une augmentation de la contrainte à la rupture accompagnée d'une diminution de l'allongement à la rupture. Cette tendance s'accroît avec l'augmentation du taux de charge, se traduisant par une élévation du module d'élasticité et une réduction progressive de la capacité d'allongement.

Les contraintes à la rupture des échantillons chargés augmentent significativement avec l'accroissement du taux de charge. La valeur maximale enregistrée atteint 42,94 MPa pour un taux de charge de 8 %.

L'allongement à la rupture en traction décroît fortement à mesure que le taux de charge augmente, jusqu'à atteindre un minimum de 2,45 %, traduisant une perte notable de ductilité du matériau.

Le module d'élasticité augmente avec le taux de charge, atteignant une valeur maximale de 2,56 GPa pour un taux de charge de 6 %.

IV.4.3 Comportement mécanique en traction des résines inject/SNC:

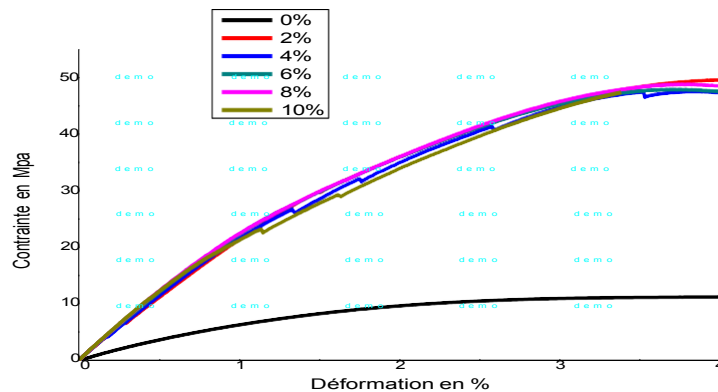


Figure IV. 15: La courbe de traction pour les résines \ SNC.

L'incorporation de sédiments non calcinés (SNC) dans la matrice résineuse améliore significativement les propriétés mécaniques en traction, avec une contrainte maximale atteignant environ 50 MPa pour des taux de charge allant jusqu'à 6 %, contre 12 MPa pour la résine non chargée. Cette amélioration résulte d'un bon ancrage des particules dans la matrice, assurant un transfert efficace des contraintes. Au-delà de ce seuil, la résistance tend à se stabiliser voire à diminuer, probablement en raison d'une dispersion moins homogène ou d'une saturation de la matrice. La déformation à la rupture reste globalement inchangée, traduisant le maintien de la ductilité du matériau. Une teneur optimale en SNC se situe donc autour de 6 %, permettant d'allier renforcement mécanique et stabilité du comportement en traction.

IV.4.4 Evolution de la contrainte, de l'allongement et de module d'élasticité

Les caractéristiques mécaniques des résines inject/SNC sont regroupées dans le tableau.

Tableau IV. 4: Tableau des caractéristiques mécaniques en traction de la résine inject/SNC

Type d'échantillon	Taux de charge (%)	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ_{rup} (%)	E (N/mm ²)
Inject /BNC	0	11,56	20,80	743,09
	2	49.1	4.6	2189.63
	4	47.02	4.09	2281.92
	6	45.97	4.37	2447.28
	8	47.58	4.25	2519.00
	10	48.75	3.54	2547.02

Les évolutions des contraintes max, d'allongement et du module d'élasticité en fonction de taux de charge sont présentées sur la figure

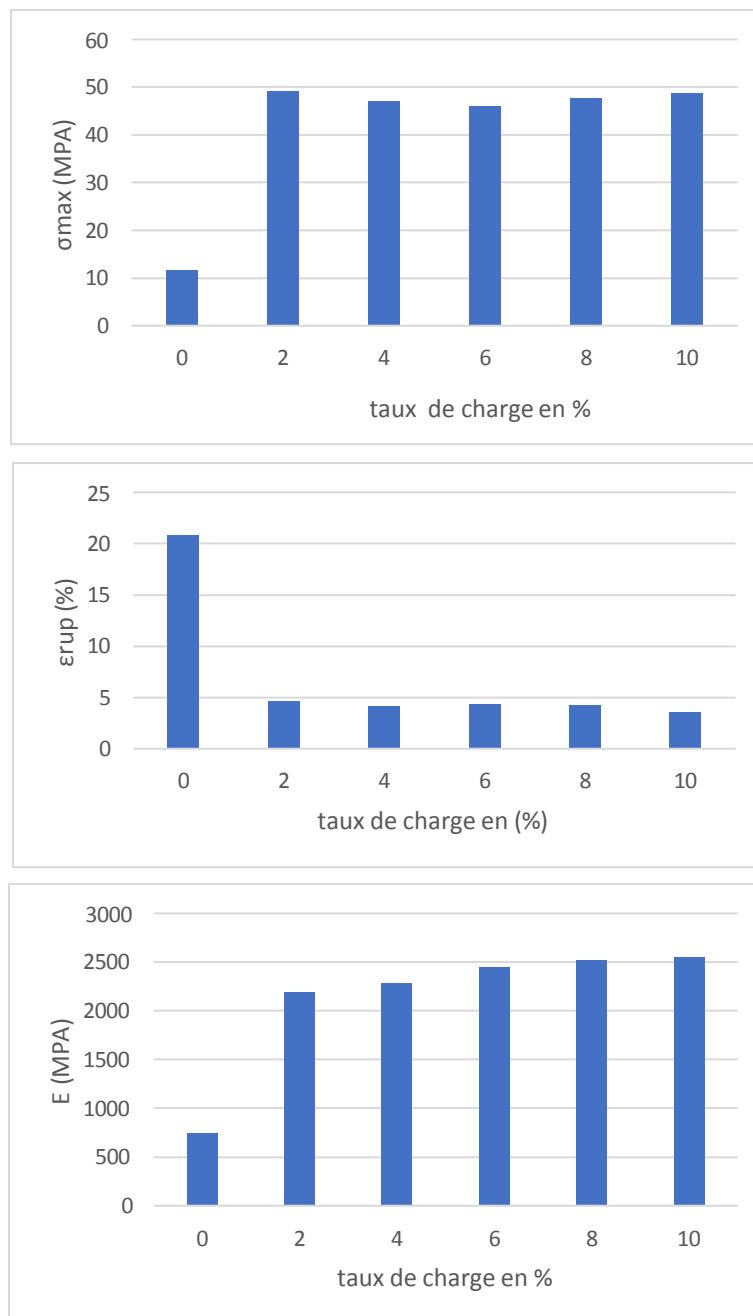


Figure IV. 16: Propriétés de traction en fonction du taux de charges des résines injecte/SNC

a) Contrainte de traction, b) Allongement à la rupture c) Module d'élasticité

Une augmentation marquée de la contrainte maximale dès l'ajout de 2 % de SNC, passant d'environ 12 MPa pour la résine pure à près de 50 MPa. Ce niveau de résistance reste relativement constant entre 2 % et 10 % de charge, ce qui indique que l'incorporation des

sédiments non calcinés améliore significativement la résistance mécanique de la résine dès les premiers ajouts, sans effet notable de saturation jusqu'à 10 %.

La déformation à la rupture diminue brutalement dès 2 % de SNC, passant de plus de 20 % pour la résine pure à environ 4 %, et reste stable par la suite. Cela traduit une perte importante de ductilité, indiquant que le matériau devient plus rigide et cassant à mesure que la charge est incorporée, même si la résistance augmente.

Le module d'élasticité augmente significativement avec l'ajout de SNC, passant d'environ 800 MPa pour la résine non chargée à plus de 2500 MPa dès 4 % de charge, puis se stabilise. Cette évolution traduit un renforcement notable de la rigidité du matériau, les particules de SNC jouant un rôle structurant en limitant la déformation élastique de la matrice.

IV.4.5 Une comparaison entre les valeurs de BC/BNC :

1) Pour la contrainte :

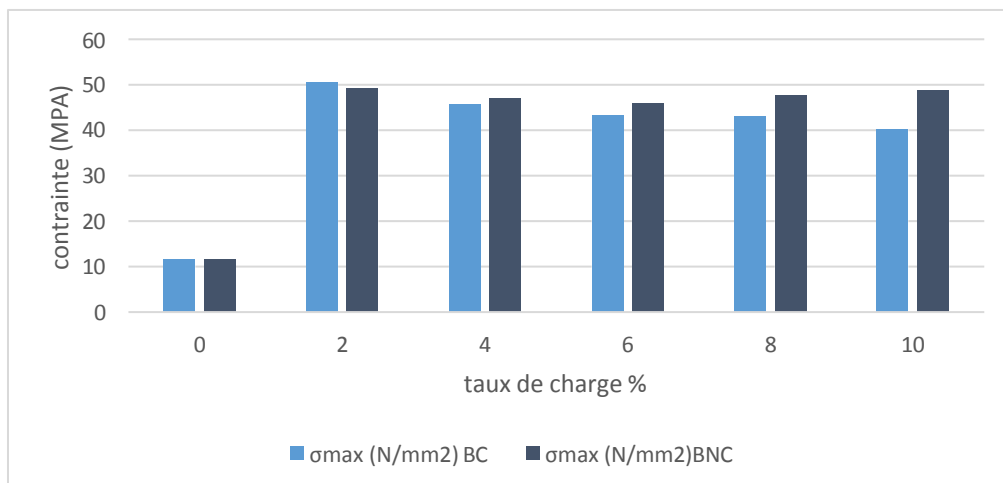


Figure IV. 17: Histogramme comparatif de contrainte entre les résines chargées, par les sédiments BC/BNC

Le sédiment non calciné présente une meilleure résistance maximale (σ_{\max}) que les sédiments calcinés à partir du troisième point, avec des valeurs plus élevées jusqu'à 48,75 N/mm² contre 40,29 N/mm² pour la boue calcinée. Seuls les deux premiers points montrent une légère supériorité ou égalité pour la boue calcinée. Globalement, la boue non calcinée donne de meilleurs résultats en résistance.

2) Pour la déformation

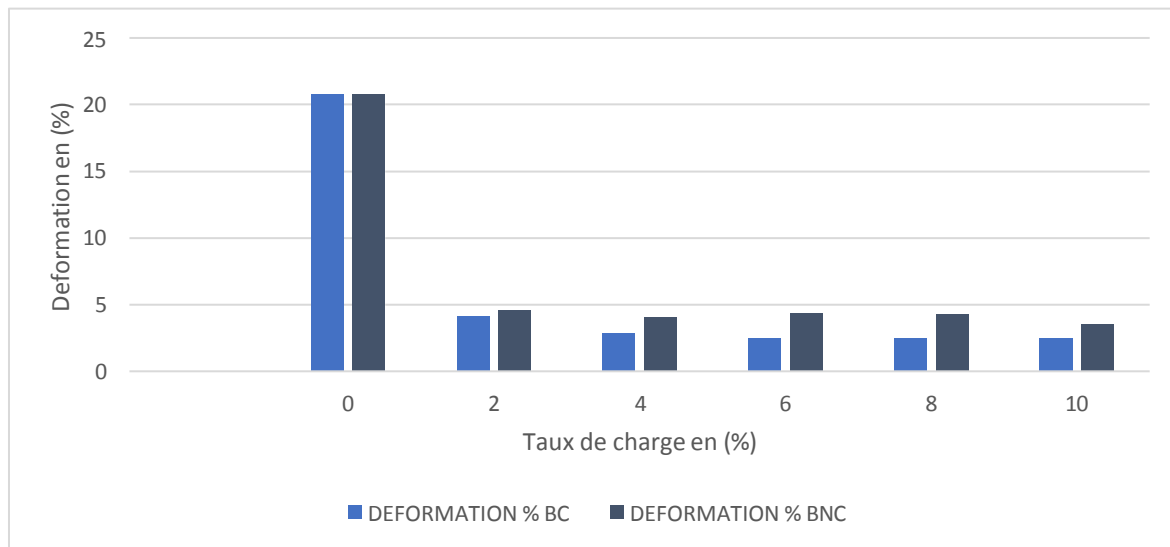


Figure IV. 18: Histogramme comparatif de contrainte entre les résines chargées par

Cette comparaison montre que la boue non calcinée présente systématiquement des valeurs plus élevées à chaque taux de charge, indiquant une meilleure capacité à se déformer avant rupture, à 6 % de charge, sa déformation atteint 4,37 % contre seulement 2,47 % pour la boue calcinée. Cela signifie que la boue non calcinée est plus ductile et offre une plus grande flexibilité, ce qui peut être un avantage en termes de résistance aux contraintes et à la fissuration.

3) Pour le module d'élasticité

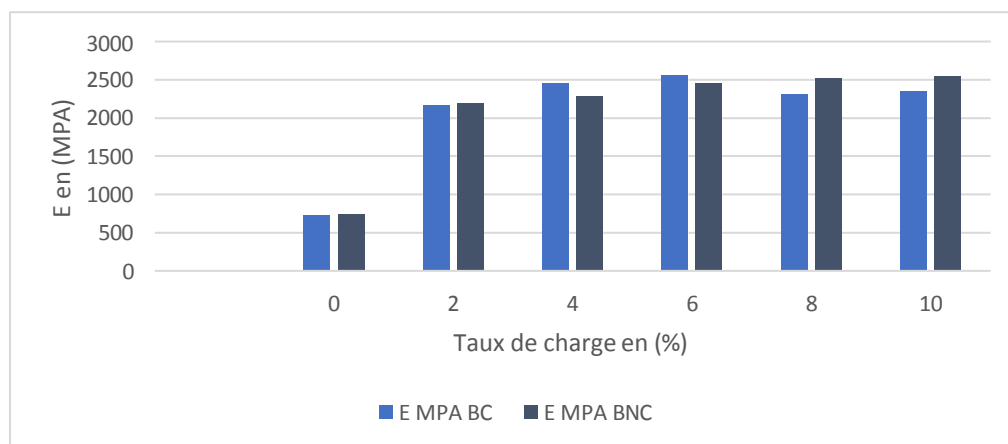


Figure IV. 19: Histogrammes comparatifs de module d'élasticité entre les résines chargées par

Le module d'élasticité (E) des boues calcinée et non calcinée est proche aux faibles charges, avec un léger avantage pour la boue non calcinée. À des charges intermédiaires (4 % et 6 %), la boue calcinée montre une rigidité légèrement supérieure, tandis qu'à des charges plus élevées (8 % et 10 %), la boue non calcinée dépasse la boue calcinée en module d'élasticité. Cela suggère que la boue calcinée est plus rigide sous charges modérées, alors que la boue non calcinée conserve une meilleure résistance à la déformation sous fortes sollicitations.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'influence de charges minérales, en l'occurrence des sédiments de dragage sous forme calcinée et non calcinée, sur les propriétés physico-mécaniques d'une matrice polymère à base de résine époxyde. La démarche adoptée, articulée autour d'une caractérisation fine des matières premières, de la formulation de composites à différents taux d'incorporation (de 2 % à 10 % en masse), et de l'analyse des performances mécaniques, a permis de mettre en évidence plusieurs résultats significatifs.

L'introduction de ces charges minérales dans la résine époxy a démontré un double intérêt : d'une part, une amélioration des propriétés mécaniques, notamment une augmentation de la rigidité, et d'autre part, une réduction notable du coût de revient des matériaux composites, grâce à l'utilisation de ressources locales abondantes et peu valorisées. Ces résultats s'inscrivent pleinement dans une logique de développement durable et de valorisation des déchets industriels.

Parmi les différentes formulations étudiées, les sédiments non calcinés incorporés à hauteur de 6 % ont présenté les meilleures performances globales. Ce taux a permis d'atteindre un compromis optimal entre renforcement mécanique, homogénéité structurale et faisabilité de mise en œuvre, confirmant l'efficacité de ces charges naturelles comme additifs fonctionnels dans les systèmes époxydiques.

Les résultats obtenus ouvrent la voie à de nouvelles perspectives de recherche, notamment l'étude approfondie des mécanismes d'interaction à l'échelle microstructurale entre la matrice et la charge, l'évaluation du comportement en vieillissement et en conditions environnementales sévères, ainsi que la transposition à d'autres types de matrices polymères. En définitive, cette étude constitue une contribution pertinente à la fois à l'optimisation des matériaux composites et à la valorisation de ressources minérales locales à faible impact environnemental

Reference bibliographique

Référence bibliographique

1. *Imprégnation de poudres et CVI réactive*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2014. Rédigée en français.
2. **Irekthi, A.** *Synthèse des matériaux composites à matrice thermodurcissable et charge minérale*. Mémoire de Magistère, Université de Boumerdès, 2011.
3. **Wang, H., Tian, H., Wang, Y., & Han, W.** (2005). *The preparation and properties of glass*. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, Chine.
4. **Belkacemi, C.** *Étude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale*. Mémoire de Magistère, Université M'Hamed Bougara, 2006.
5. **Lepetit, A.** *Élaboration de matériaux composites à base de filaments de cellulose et de polyéthylène*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières.
6. Anis Hamoudi, *Elaboration et caractérisation d'un matériau composite « Matrice polyester chargé en PET recyclé »* master, UMMTO, 2020
7. **Serbah, M., Bourabah, A., Bouchemella, S., Eid, J., Abou-Bekr, N., & Taibi, S.** *Étude du comportement mécanique d'un sédiment de barrage : application en technique géotechnique*.
8. **Beddiar, M. I., & Heraiz, H.** *Élaboration et caractérisation de biocomposites à matrice polyéthylène (PE) renforcée par des fibres végétales*. Mémoire de Magistère, Université Mohamed Boudiaf de M'Sila, 2018.
9. Boudenne, A., *Etude expérimentale et théorique. Des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère*, 2003, Paris 12
10. BOUKEMMOUM Nour El Houda and N. Abdessalam, "Valorisation des sédiments de barrages Cas du barrage de Ain Dalia (Souk Ahras), 2019
11. Brendlé J., Burget D., *Congrès Eco-composites* (2006) – « Nanocomposites argile/polymère par photopolymérisation », bilan de l'influence de l'argile sur Tg (pas de variation) et module (baisse en cas d'argile organophile).
12. Universitaire, B. Bouchaib, M. Fili, and G. C. Sp, "Contribution à l'amélioration du confort thermique du bâtiment," 2020.
13. Cahiers Risques – INRS (Fiche « Résines époxy, EP »), *Plastiques – Risques & analyse thermique*, fds E, pp. 29-34. *Polyépoxyde*, Fiche Wikipédia (2019) : Usages aéronautiques, spatiaux, collage bois, propriétés mécaniques supérieures.

14. Choi Y.Y. et al., op. cit. (abstract résumé).
15. Choi Y.Y. et al., *Polymer Bulletin* 63(1): 47-55 (2009) – MMT modifiée au silane aminé (APTMS) : amélioration de la résistance mécanique et de l'allongement de l'époxy.
16. **Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued.** *Cours de Master 2 – Matériaux composites.* Département de Génie des Matériaux, El Oued.
https://elearning.univeloued.dz/pluginfile.php/19941/mod_resource/content/1/chapitre1%20-MC.pdf
17. Coursmaster2matériauxcompositeuniversitéEchahidHammaLakhdard'ElOued
https://elearning.univeloued.dz/pluginfile.php/19941/mod_resource/content/1/chapitre1%20-MC.pdf
18. Daniel Gay. Matériaux composites. 3eme édition Hermès, Paris 1991p569
19. **Goudjil, T. M.** *Comportement d'un composite PP/fibres de palmier dattier à l'essai de traction.* Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
20. HAL *Nanocomposite argile/green époxy...* (Vo et al., 2017) – Conférence Française : formulation et simulation de nanocomposite époxy biosourcé.
21. <http://www.technocampus-composites.fr/defis-technologiques>.
22. INRS, *Méthodes de mise en œuvre des époxyes*, *Cahiers Techniques* (2003) – Température de moulage epoxy (coulée, injection, compression).
23. JacquesCINQUIN,Lescompositesenaérospatiale,techniquede l'ingénieur(2002), Réf : AM5645 v1.
24. Jagtap S. et al., *J. Reinforced Plastics & Compos.* 32(8): 505-516 (2013) – TEM images de nanocomposites époxy/argile (Cloisite) (figures disponibles).
25. JeanLUYCKX,Compositesà fibresdecarbonedanslegéniecivil,techniquede l'ingénieur (1999), Réf : AM5620 v1
26. **Laouchedi, D., Bezzazi, B., & Aribi, C.** (2017). *Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de résine époxy et de charges minérales.*
27. **Ledain, O.** *Élaboration de matrices céramiques par un nouveau procédé hybride.*
28. M.Achit,F.Benammar,proprietes thermique de la résine epoxy mémoire de master universitéAkli Mohand oulhadjBouira
29. Marc Marzano - Action Composite Pascal Celle – GNFA, 2014 ' exemple industrie automobile'
30. Michel Fontanille -Yves Gnanou, chimie et physico-chimie des polymères, Dunod paris 2010
31. MOUSSAOUIAnouar. Effet des traitements chimiques sur les propriétés mécaniques des composites polychlorures de vinyle/fibre de palmier.

Mémoire de magister. Université Mohamed Khider de Biskra 2020.

32. NINOULH Lasaad. Caractérisation d'un biocomposite polypropylène/fibres de palmier dattier en flexion trois points. Mémoire de Master. Université Mohamed Khider de Biskra 2019.

33. P. Scordia, "Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers To cite this version : HAL Id : tel-00339371 Délivrée par," école doctorale, 2008.

34. Patrick PARNEIX, Dominique LUCAS, Les structures composites en construction navale militaire (2000), Réf : AM5665 v1.

35. PROMBUT Pongtorn. Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels. Thèse de doctorat. Université Toulouse III 2007

36. R. JACK VINSON, the Behavior of Structures Composed of Composite Materials, édition second, 2002.

37. RAGOUBI Mohamed. Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1 2010.

38. Recherche Cambridge *Clays and Clay Minerals* (2019) – Revue sur la modif. organique des montmorillonites : augmentent l'affinité avec les milieux non aqueux.

39. RG *Effect of silane functionalization of montmorillonite on epoxy nanocomposite* (2009) – Silanisation crée des liens covalents (bonds) polymère/argile et renforce l'interaction (meilleures propriétés finales).

40. ROUTIÈRE MECHANICAL BEHAVIOR OF A DAM SEDIMENT. APPLICATION TO ROAD CONSTRUCTION

41. Spécialiste de la fabrication de pièces techniques et d'aspect en composites
<https://www.pag-composites.fr/domaines-application/>

42. T. D. E. Doctorat and E. N. Science, "Valorisation de la vase pour l'utilisation dans la technique routi

Elaboration et caractérisation d'une matrice polymère à base de sédiments de dragage :

Résumé :

Cette étude porte sur l'analyse de l'influence des charges minérales , en particulier des sédiments de dragage sous formes calcinée et non calcinée, sur les performances physico-mécaniques d'une matrice à base de résine époxyde. Dans le but d'évaluer l'impact de ces additifs, différents taux d'incorporation allant de 2 % à 10 % en poids ont été considérés.

Les résultats expérimentaux ont démontré que l'ajout de ces charges minérales modifie significativement les propriétés intrinsèques de la résine époxy, en lui conférant de nouvelles caractéristiques fonctionnelles. D'une part, leur incorporation permet une réduction substantielle du coût de fabrication des matériaux composites, et d'autre part, elle contribue à une amélioration notable des propriétés mécaniques, et de la rigidité du matériau.

les sédiments non calcinés se sont révélés plus performants que leur équivalent calciné, avec un comportement optimal observé à un taux d'incorporation de 6 %, conférant à la matrice des propriétés mécaniques supérieures tout en maintenant une bonne homogénéité du composite.

Mots-clés : résine époxyde, charges minérales, sédiments de dragage, renforcement mécanique, propriétés physico-mécaniques, matériaux composites.

Elaboration and characterization of a polymer matrix based on dredged sediments

Abstract

This study focuses on analyzing the influence of mineral fillers, particularly dredged sediments in calcined and non-calcined forms, on the physico-mechanical performance of an epoxy resin-based matrix. In order to evaluate the impact of these additives, different incorporation rates ranging from 2% to 10% by weight were considered.

The experimental results demonstrated that the addition of these mineral fillers significantly modifies the intrinsic properties of the epoxy resin, imparting new functional characteristics to it. On the one hand, their incorporation allows for a substantial reduction in the manufacturing cost of composite materials, and on the other hand, it contributes to a notable improvement in mechanical properties, particularly through an increase in the material's rigidity.

Notably, the non-calcined sediments proved to be more effective than their calcined equivalent,

with optimal behavior observed at an incorporation rate of 6%, imparting superior mechanical properties to the matrix while maintaining good homogeneity of the composite.

Key words: resin epoxy, the mineral load, properties physical and mechanical properties.

تحضير وتوصيف مصفوفة بوليمرية مدعمة برواسب التجريف: دراسة في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الأثر الميكروهيكلّي والإجمالي للإضافات المعدنية المحلية، والمتمثلة في راسب التجريف بصيغتها (المكلسة وغير المكلسة)، على السلوك الفيزيائي والميكانيكي لمادة مركبة قائمة على راتنج الإيبوكسي. تم تحضير عينات مركبة بنسبة إدماج تدريجية للإضافات تتراوح ما بين 2% و 10% وزناً، بغرض تحديد النسبة المثلى لتعزيز الخواص الوظيفية للمادة الأساسية.

أظهرت النتائج أن دمج هذه الإضافات يحدث تحولات ملحوظة في الخصائص البنيوية والميكانيكية لراتنج الإيبوكسي، حيث ساهمت في تحسين مؤشرات الصلابة والارتباط الداخلي، إلى جانب خفض التكلفة الكلية لإنتاج المواد المركبة. وقد تبين أن الأداء الميكانيكي يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالتركيب المعدني، والحجم الحبيبي، وطبيعة المعالجة الحرارية للإضافة.

لوحظ أن الإضافات غير المكلسة قدمت أفضل استجابة ميكانيكية، خاصة عند نسبة إدماج تبلغ 6%، حيث سجل تحسن معتبر في معامل الصلابة والتجانس البنيوي للمركب النهائي مقارنةً بالإضافات المكلسة.

كلمات مفتاحية : الراتنج الإيبوكسي ، الإضافات المعدنية ، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ..