

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par : SELLAMI Ghazala

---

---

**Thème : Comportement des mortiers renforcés par fibres  
de Diss, étude expérimentale, analyse statistique,  
mathématique et optimisation.**

---

---

Sous la direction de : Dr. LAFIFI Brahim

---

Master 2 année 2023

---

# Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude avant tout à Dieu qui nous a donné la vie, le courage et la force d'accomplir ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mon encadreur Professeur LAFIFI brahim qui m'a fait confiance en acceptant de m'encadrer sur ce sujet. Je lui suis très reconnaissante de l'opportunité qu'il m'a donnée, Je le remercie pour l'intérêt et le suivi qu'il a porté à mon thème de fin d'étude, pour les conseils toujours pertinents et enrichissants.

Ce travail de recherche a été réalisé au Laboratoire pédagogique de génie civil et d'hydraulique de l'Université 8 Mai 1945 Guelma.

Un grand remerciement s'adresse à Mademoiselle BOUKOUR Salima une enseignante à centre universitaire Abdlahfid BOUSSOUF Mila pour sa savoir et l'aide qu'il m'a fourni au cours de ce travail, ainsi que pour son conseil.

Nos remerciements vont aussi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Je tiens aussi à remercier tous mes amis et collègues du groupe. Un remerciement particulier au mes amies de recherche : Achraf, Amar, Mohamed.

Nous tenons à remercier les techniciennes du laboratoire pédagogique de génie civil et d'hydraulique de l'Université 8 Mai 1945 Guelma, pour leurs disponibilités pour mener à bien nos essais à l'intérieur du laboratoire

Enfin mes remerciements vont aux responsables du département de Génie Civil l'Université 8 Mai 1945, ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Un très grand merci à mes « *Parents* » lumière de mon cœur qui sont la source de ma réussite et qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes différents choix. Un grand merci à mon fiançailles « *BOUZIDI Abdullah* » et qui m'est toujours soutenu et encouragé pour finir ce travail. A adorable sœur

« *Malak* », mes aimables frères « *Islem, Takieddine et Amir* », et à toute ma famille.  
Mes remerciements vont également à mes beaux- parents.

**A mon père et ma mère.**

**A ma sœur et mes frères.**

**A mon fiancé et sa famille.**

**A toute ma famille.**

**A mes amis.**

**Aux vrais savants, modestes au Dieu**

## Résumé

Au cours des dernières années, une attention particulière a été accordée à la valorisation des matériaux écologiques qui sont des ressources renouvelables, en particulier d'origine végétale, en raison de leur accessibilité universelle. Ce travail porte sur l'étude du comportement d'un bio-composite fabriqué avec un mortier de ciment renforcé par des fibres de Diss pour des éventuelles utilisations en génie civil dans des éléments non structurels.

L'objectif principal sera l'étude de l'influence du renforcement sur les caractéristiques physico-mécaniques du bio composite à l'état frais et à l'état durci. Le deuxième objectif porte sur l'analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques reliant les paramètres du renforcement et les caractéristiques étudiées, pour d'éventuelles optimisations. Enfin, les modèles mathématiques développés seront couplé avec une technique d'optimisation pour l'optimisation des paramètres du renforcement utilisé.

**Mots clés :** Fibres de Diss - Renforcement - Bio Composite - ANOVA - RSM - optimisation.

## **Abstract**

In recent years, particular attention has been paid to the valorization of ecological materials that are renewable resources, particularly of plant origin, due to their universal accessibility. This work focuses on the study of the behavior of a bio-composite made with a cement mortar reinforced with Diss fibers for possible use in civil engineering in non-structural elements.

The main objective will be to study the influence of reinforcement on the physico-mechanical characteristics of the bio-composite in the fresh and hardened state. The second objective is to perform statistical analysis of the results based on analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology (RSM) in order to propose mathematical models linking the reinforcement parameters and the studied characteristics for possible optimizations. Finally, the developed mathematical models will be coupled with an optimization technique for optimizing the reinforcement parameters used.

**Keywords:** Diss fibers - Reinforcement - Bio-composite - ANOVA - RSM - Optimization.

## ملخص

في السنوات الأخيرة، تم إيلاء اهتمام خاص لتقدير المواد البيئية التي تعتبر مصادر متجددة، وخاصة تلك المستمدة من المصادر النباتية، بسبب إمكانية الحصول عليها بسهولة. يركز هذا العمل على دراسة سلوك البايوكومبوزيت المصنوع من ملاط الأسمنت المدعم بألياف Diss للاستخدام المحتمل في الهندسة المدنية في العناصر غير الإنشائية. يتمثل الهدف الرئيسي في دراسة تأثير التعزيز على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبايوكومبوزيت في الحالة الطازجة ومنهجية (ANOVA) والمتصلبة. يتم التركيز في الهدف الثاني على إجراء تحليل إحصائي للنتائج بناءً على تحليل التباين من أجل اقتراح نماذج رياضية تربط بين معلمات التعزيز والخصائص المدروسة من أجل (RSM) سطح الاستجابة. إمكانية التحسينات. وأخيراً، سيتم ربط النماذج الرياضية المطورة بتقنية الأمثلية لتحسين معلمات التعزيز المستخدمة

## LISTE DES FIGURES

---

### Chapitre I : Recherche bibliographique

---

<b>Figure I.1</b> Exemple d'un gâchait de mortier.	P3
<b>Figure I.2</b> Différente type de mortier.	P6
<b>Figure I.3</b> Exemple d'une fabrication des mortiers à la main.	P9
<b>Figure I.4</b> Exemple d'une fabrication des mortiers mécanique.	P10
<b>Figure I.5</b> Déchets ménagers et assimilés.	P11
<b>Figure I.6</b> Déchets des Activités Economiques (DAE).	P11
<b>Figure I.7</b> Déchets industriels.	P12
<b>Figure I.8</b> Déchets médicaux et pharmaceutiques.	P12
<b>Figure I.9</b> Déchets agricoles.	P12
<b>Figure I.10</b> Les déchets organiques.	P12
<b>Figure I.11</b> Classification des fibres naturelles.	P14
<b>Figure I.12</b> (a) Structure complète de la fibre de chanvre dans un faisceau.	
(b) Structure fibrillaire de la fibre de chanvre.	P15
<b>Figure I.13</b> Structure moléculaire de la cellulose.	P15
<b>Figure I.14</b> Organisation des composants cellulosiques dans la paroi cellulaire d'une fibre végétale typique.	P16
<b>Figure I.15</b> Structure de l'hémicellulose (xylane) constituée d'un squelette xylopyranose, avec des branches latérales d'acide glucuronique (1 → 2) et d'arabinofuranose (1 → 3).	P17
<b>Figure I.16</b> Structure des précurseurs de la lignine.	P17
<b>Figure I.17</b> Herbe de Diss <i>Ampélodesmos mauritanicus</i> .	P21



# LISTE DES FIGURES

---

## Chapitre II : Exposé des plans d'expériences et de la méthode des surfaces de réponses

---

- Figure II.1** Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. P28
- Figure II.2** Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental. P29
- Figure II.3** Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. P29
- Figure II.4** Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur. P30
- Figure II.5** Représentation graphique d'une surface de réponses. P31

---

## Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

---

- Figure III.1** Sac de ciment utilisé. P37
- Figure III.2.** Essai de l'analyse granulométrique. P39
- Figure III.3.** Courbe granulométrique du sable. P40
- Figure III.4.** Essai de masse apparente. P41
- Figure III.5.** Essai de masse absolu. P42
- Figure III.6.** Herbe de Diss. P43
- Figure III.7.** Le Résine utilisé. P44
- Figure III.8.** Hydroxyde de Sodium (NaOH). P44
- Figure III.10.** Les Sections De Découpage De DISS. P48
- Figure III.11.** La machine utilise. P48
- Figure III.12.** Fibres de Diss découpées. P48
- Figure III.13.** Préparation de la solution de NaOH. P49

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure III.14.</b> Les étapes pour préparer la pâte de mortier avec différent pourcentage de fibre de Diss.	P52
<b>Figure III. 15.</b> Confection des éprouvettes.	P52
<b>FigureIII.16.</b> Conservation des éprouvettes.	P53
<b>Figure III.17.</b> L'essai de la table de secousse.	P54
<b>Figure III.18.</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	P55
<b>Figure III.19.</b> L'essai de la flexion.	P55
<b>Figure III.20.</b> Distribution des fibres.	P55
<b>Figure III. 21.</b> L'essai de la compression sur des éprouvettes 4x4x16 cm <sup>3</sup> .	P56
<b>Figure III.22.</b> Dispositif de rupture en compression.	P57
<b>Figure III.23.</b> L'essai de capillarité sur des éprouvettes 4x4x16 cm <sup>3</sup> .	P59
<b>Figure III.24.</b> Schéma du dispositif expérimental.	P60
<b>Figure III.25.</b> Mortier de référence.	P63
<b>Figure III.26.</b> Les formulations dans NaOH après 7j, 14j, 21j et28j.	P63
<b>Figure III.27.</b> Pesée hydrostatique.	P64
<b>Figure III.28.</b> Pesée a l'air.	P64

---

### Chapitre IV : Présentation et interprétation des résultats

---

<b>Figure IV.1.</b> Résistance à la compression des mortiers renforcés de fibres de Diss.	P66
<b>Figures IV.2.</b> Résistance à la compression des mortiers renforcés de fibres de Diss.	P68
<b>Figure. IV.3.</b> Vitesse de propagation d'ultrasons des mortiers.	P69
<b>Figures IV.4.</b> La masse volumique des mortiers renforcés de fibres de Diss.	P69
<b>Figures IV.5.</b> Porosité accessible à l'eau.	P70
<b>Figure IV.6.</b> Absorption capillaire.	P71
<b>Figure IV.7.</b> Résistance à la traction par flexion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	P72

## LISTE DES FIGURES

---

**Figure IV.8.** Résistance à la compression dans  $H_2SO_4$ . P73

**Figure IV.9.** Perte de poids des mortiers. P74

---

### Chapitre V : Etude statistique et optimisation

---

**Figure V.1.** Diagrammes de surface 3D de  $R_f$  en fonction de (%Diss, L, %NAOH et T).  
P79

**Figure V.2.** Diagrammes de surface 3D de  $R_{cf}$  en fonction de (%Diss, L, %NAOH et T).  
P81

**Figure V.3.** Diagrammes de surface 3D de  $E_{dyn}$  en fonction de (%Diss, L, %NAOH et T).  
P83

**Figure V.4.** Valeurs expérimentales et valeurs prédites de la résistance à la flexion  $R_f$ . P85

**Figure V.5.** Valeurs expérimentales et valeurs prédites de la résistance à la compression  $R_c$ .  
P86

**Figure V.6.** Valeurs expérimentales et valeurs prédites du module d'élasticité dynamique  $E_{dyn}$ .  
P87

**Figure V.7.** Désirabilité individuelle  $d_i$  d'une réponse  $Y_i$ . P88

**Figure V.8.** Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser. P89

**Figure V.9.** Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler. P90

**Figure V.10.** Représentation graphique de la procédure d'optimisation. P92

## LISTE DES TABLEAUX

---

### Chapitre I : Recherche bibliographique

---

<b>Tableau I.1</b> Composition chimique de quelques plantes à fibres.	P18
<b>Tableau I.2</b> Domaines d'application des fibres végétales.	P19
<b>Tableau I.3</b> Comparaison entre les avantages et les inconvénients des fibres végétales.	P19
<b>Tableau I.4</b> Propriétés mécaniques du lin et du verre.	P20
<b>Tableau I.5</b> Classification scientifique de la plante Diss.	P22
<b>Tableau I.6</b> Composition chimique de fibres végétales.	P22

---

### Chapitre II : Exposé des plans d'expériences et de la méthode des surfaces de réponses

---

<b>Tableau II.1</b> Plan factoriel complet $2^2$ pour deux facteurs (A, B) à deux niveaux.	P32
--	-----

---

### Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

---

<b>Tableau III.1.</b> Caractéristiques du sable utilisé.	P38
<b>Tableau III.2.</b> Analyse granulométrique du sable de dune.	P39
<b>Tableau III.3.</b> Caractéristiques du sable utilisé.	P42
<b>Tableau III.4.</b> Composition chimique du NaOH utilisé dans ce travail.	P45
<b>Tableau III.5.</b> Niveaux de variation des paramètres de l'étude.	P46
<b>Tableau III.6.</b> Le plan d'expériences.	P47
<b>Tableau III.7.</b> Dosage de matériaux utilisé.	P51
<b>Tableau III.8.</b> Valeurs d'étalement NF EN 1015-6.	P54

---

### Chapitre V : Etude statistique et optimisation

---

<b>Tableau V.1.</b> Résultats expérimentaux partiels.	P77
---	-----

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau V.2.</b> Analyse de la variance pour la résistance à la flexion $R_f$ .	P78
<b>Tableau V.3.</b> Analyse de la variance pour la résistance à la compression $R_c$ .	P80
<b>Tableau V.4.</b> Analyse de la variance pour le module élastique $E_{dyn}$ .	P82
<b>Tableau V.5.</b> Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.	P91
<b>Tableau V.6.</b> Résultats de l'optimisation.	P91

# TABLE DES MATIERES

Résumé	
Abstract	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

## CHAPITRE I

### RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT DES MORTIERS CIMENTAIRES.

<b>I.1.</b> Introduction.....	3
<b>I.2.</b> Définition.....	3
<b>I.3.</b> Composants du mortier .....	3
I.3.1. Sable.....	3
I.3.2. Liant .....	4
I.3.2.1. Le ciment de maçonnerie .....	4
I.3.2.2. La chaux .....	4
I.3.3. Eau .....	4
I.3.4. Les adjuvants .....	4
<b>I.4.</b> Fonctions d'un mortier .....	5
<b>I.5.</b> Différents mortiers en fonction du type de liant .....	5
I.5.1. Les mortiers de ciment .....	5
I.5.2. Les mortiers de chaux .....	5
I.5.3. Les mortiers bâtards .....	6
<b>I.6.</b> Les différents mortiers en fonction de l'usage.....	7
I.6.1. Le mortier-ciment.....	7
I.6.2. Le mortier hydrofuge.....	7
I.6.3. Le mortier réfractaire .....	7
I.6.4. Le mortier de chaux .....	8

## TABLE DES MATIERES

I.6.5. Le mortier bâtard .....	8
I.6.6. Le mortier-colle ou ciment-colle .....	8
<b>I.7. Méthodes de préparation des mortiers.....</b>	<b>8</b>
I.7.1. Préparation manuelle .....	8
I.7.2. Fabrication mécanique .....	9
<b>I.8. Les caractéristiques de mortier .....</b>	<b>10</b>
<b>I .9. Introduction.....</b>	<b>11</b>
I.9.1. Classification des déchets .....	11
I.9.1.1. Déchets ménagers et assimilés .....	11
I.9.1.2. Déchets des Activités Economiques (DAE) .....	11
I.9.1.3. Déchets industriels .....	12
I.9.1.4. Déchets médicaux et pharmaceutiques .....	12
I.9.1.5. Déchets agricoles ou végétal.....	12
I.9.1.6. Les déchets organiques .....	12
<b>I.10. Fibres végétales.....</b>	<b>12</b>
I.10.1. Définition de la fibre végétale .....	12
I.10.2. Classification des fibres végétales .....	13
I.10.3. Structure de la fibre végétale.....	14
I.10.3.1. La cellulose .....	15
I.10.3.2. L'hémicellulose .....	16
I.10.3.3. La lignine .....	17
I.10.3.4. Pectines .....	17
I.10.3.5. Extractibles .....	18
I.10.4. Utilisation des fibres végétales dans la construction .....	18
I.10.5. Avantages et inconvénients des fibres végétales .....	19
I.10.6. Points de faiblesse .....	20
I.10.7. Fibres de Diss (Ampélodesmos mauritanicus) .....	21
I.10.7.1. Généralités .....	21
I.10.7.2. Description de Diss (ampélodesmos mauritanicus) .....	21
I.10.7.3. Nomenclature .....	21
I.10.7.4. Composition chimique des fibres de Diss.....	22

## TABLE DES MATIERES

I.10.7.5. Matrice cimentaire et fibres végétales.....	22
<b>I.11. Conclusion .....</b>	<b>22</b>

### CHAPITRE II

#### EXPOSÉ DES PLANS D'EXPÉRIENCE ET DE LA MÉTHODE DES SURFACES DE RÉPONSES

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>24</b>
<b>II.2. Notions de base .....</b>	<b>24</b>
II.2.a. Notion de « plan » .....	24
II.2.b. Notion d'« expériences » .....	25
<b>II.3 Plans d'expériences.....</b>	<b>25</b>
II.3.1. Définition .....	25
II.3.2. But d'un plan d'expérience.....	25
II.3.3. Définir les sorties (Réponses) .....	26
II.3.4. Définir les entrées (facteurs) .....	26
<b>II.4. Choix de la méthode d'expérimentation .....</b>	<b>27</b>
<b>II.5. Comment l'utiliser ? .....</b>	<b>27</b>
<b>II.6 Notion d'espace expérimental .....</b>	<b>28</b>
<b>II.7. Notion de surface de réponse .....</b>	<b>30</b>
<b>II.8. Différents types des plans d'expériences.....</b>	<b>31</b>
II.8.1. Plan factoriel complet.....	31
II.8.2. Plans factoriels fractionnaires.....	32
II.8.3. Plans pour surfaces de réponses .....	33
II.8.4. Plans de Taguchi.....	34
<b>II.9. Conclusion .....</b>	<b>36</b>

### CHAPITRE III

#### EXPOSÉ DES PLANS D'EXPÉRIENCE ET DE LA MÉTHODE DES SURFACES DE RÉPONSES

<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>37</b>
----------------------------------	-----------



# TABLE DES MATIERES

<b>III.2.</b>	Caractérisation des matériaux utilisé.....	37
III.2.1.	Ciment portland composé.....	37
III.2.2.	Sable .....	37
III.2.2.1.	Analyses granulométriques .....	38
III.2.2.1.1.	But de l'essai .....	38
III.2.2.1.2.	Principe de l'essai analyse granulométrique .....	38
III.2.2.1.3.	Mode opératoire .....	38
III.2.2.1.3.1.	Appareillage spécial pour l'analyse granulométrique.....	38
III.2.2.2.	La masse volumique du sable.....	40
III.2.2.2.1.	Masse volumique apparent.....	40
III.2.2.2.2.	Masse volumique absolue .....	41
III.2.3.	L'eau de gâchage .....	42
III.2.4.	Fibre de Diss.....	42
III.2.5.	Adjuvants .....	43
III.2.6.	Résine .....	43
<b>III.3.</b>	Matériaux de traitement .....	44
III.3.1.	Hydroxyde de sodium .....	44
III.3.2.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	45
<b>III.4.</b>	Méthodes expérimentales .....	46
III.4.1.	Plan d'expériences adoptés .....	46
III.4.2.	Sélection et découpage des fibres .....	48
III.4.2.	Préparation des éprouvettes de traction.....	48
III.4.3.	Traitements des fibres .....	49
III.4.1.	Traitements chimiques (traitement alcalin).....	49
<b>III.5.</b>	Formulation des compositions.....	50
III.5.1.	Confection des éprouvettes (malaxage et mise en place) .....	50

## TABLE DES MATIERES

III.5.1.1. Préparation de la pâte .....	51
III.5.1.1.1. Le malaxage des mortiers .....	51
III.5.1.2. Confection des éprouvettes .....	52
III.5.1.3. Conservation des éprouvettes .....	52
<b>III.6. Techniques expérimentales .....</b>	<b>53</b>
III.6.1. Caractéristiques physico-mécaniques .....	53
III.6.1.1. A l'état frais .....	53
III.6.1.2. L'état durci .....	54
III.6.1.2.1. Mesure des résistances mécaniques .....	54
III.6.1.2.1.1. Résistance à la traction par flexion .....	55
III.6.1.2.1.2. Résistance à la compression .....	56
III.6.1.2.2. Essais d'auscultation dynamique .....	57
III.6.1.2.3. Module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$ .....	58
III.6.1.2.4. Absorption d'eau par capillarité .....	59
III.6.2. Durabilité .....	61
III.6.2.1. Essais d'attaque par les sulfates et les acides .....	61
III.6.2.2. Essai de porosité accessible à l'eau .....	63
III.6.2.2.1. Pesée hydrostatique .....	63
III.6.2.2.2. Pesée à l'air .....	64
III.6.2.2.3. Pesée à sec .....	64
<b>III.7. Conclusion .....</b>	<b>65</b>

# TABLE DES MATIERES

## CHAPITRE IV CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

<b>IV.1.</b>	Introduction.....	66
<b>IV.2.</b>	Caractéristiques mécaniques.....	66
IV.2.1.	Résistance à la traction par flexion.....	66
IV.2.2.	Résistance à la compression.....	67
IV.2.4.	Vitesse de propagation des ultrasons et module d'élasticité dynamique	
68		
<b>IV.3.</b>	Propriétés physiques .....	69
IV.3.1.	Masse volumique à sec .....	69
IV.3.2.	Porosité accessible à l'eau .....	70
IV.3.3.	Absorption d'eau par capillarité .....	70
<b>IV.4.</b>	Durabilité	71
IV.4.1.	Propriétés mécaniques des mortiers fibrés après vieillissement naturel	
71		
IV.4.2.	Résistance après immersion .....	71
IV.4.2.1.	Résistance à la traction par flexion.....	71
IV.4.2.2.	Résistance à la compression .....	72
IV.4.1.3.	Durabilité perte de masse.....	73
<b>IV.5.</b>	Conclusion .....	74

## CHAPITRE V ÉTUDE STATISTIQUE ET OPTIMISATION

## TABLE DES MATIERES

<b>V.1.</b> Introduction .....	76
<b>V.2.</b> Résultats utilisés .....	76
<b>V.3.</b> Analyse statistique .....	77
V.3.1. Résistance à la flexion $R_f$ .....	77
a) Analyse de variance ANOVA .....	77
b) Diagramme de surfaces .....	78
V.3.2. Résistance à la compression $R_c$ .....	79
a) Analyse de variance ANOVA .....	79
b) Diagramme de surfaces .....	80
V.3.3. Module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$ .....	81
a) Analyse de variance ANOVA .....	81
b) Diagramme de surfaces .....	82
<b>V.4.</b> Prédiction mathématique .....	83
V.4.1. Résistance à la flexion $R_f$ .....	83
V.4.2. Résistance à la compression $R_c$ .....	84
V.4.3. Module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$ .....	86
<b>V.5.</b> Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité .....	87
a. Désirabilité d'une réponse à maximiser .....	88
b. Désirabilité d'une réponse à minimiser .....	89
c. Désirabilité d'une réponse à cibler .....	89
d. Optimisation de la formulation du bio-composite .....	90
<b>V.6.</b> Conclusion .....	90

## Introduction générale

---

### Introduction générale

Le mortier de ciment est un matériau essentiel dans la construction, utilisé depuis des siècles pour lier des briques, des blocs de béton et d'autres matériaux de construction. Il est composé d'un mélange de ciment, de sable et d'eau, qui est mélangé jusqu'à obtenir une consistance crémeuse et facilement malléable. Le mortier de ciment est utilisé pour joindre les éléments de construction, remplir les joints et créer une surface uniforme.

Le renforcement des mortiers par des fibres est une technique de plus en plus courante dans la construction, qui permet d'améliorer la résistance et la durabilité des structures en béton. Les fibres, qui peuvent être en acier, en verre, en polymère, en carbone ou en d'autres matériaux, sont ajoutées au mélange de ciment et de sable pour renforcer la structure et prévenir les fissures et les dommages.

Le renforcement par des fibres végétales, dans un contexte de matrice à liant hydraulique, a déjà conduit à de nombreuses avancées pour obtenir un composite peu coûteux, moins émetteur de CO<sub>2</sub>, aux propriétés thermiques et sonores intéressantes et au comportement mécanique acceptable. Les composites fibres végétales / matrice cimentaire ont été beaucoup étudiés ces dernières années car les fibres végétales présentent de nombreux avantages par rapport à d'autres types de fibres : coût faible, propriétés d'élaboration plus saines pour la production de composites de différentes formes, renouvellement et recyclage, alors que l'utilisation de l'amiante a été remise en cause par la législation sur la santé.

Les fibres naturelles présentent d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques. Elles sont renouvelables et recyclables. Ces fibres peuvent remplacer les fibres de verre et de carbone dans de nombreux domaines d'application. L'industrie des fibres naturelles représente un secteur économique en pleine expansion en raison des avantages que ce type de fibre procure à tous les secteurs de l'industrie (textile, automobile, bâtiment, etc.). De plus, d'un point de vue économique, le marché des fibres naturelles devrait enregistrer une croissance élevée au cours de la période de prévision de 2019 à 2025 [1].

Dans notre étude, la formulation des mélanges adoptée se base sur le renforcement du mortier par différents pourcentages de fibres de Diss (1%, 2%, et 3%). Le dosage de ciment est fixé à 450 g. En Algérie, l'Alfa, le Diss, le crin végétal et le liège sont abondants et leur récolte ainsi

## Introduction générale

---

que leur industrialisation sont une source de revenus considérable pour des populations entières. La fibre Diss est retenue pour des raisons de disponibilité et d'économie, provenant d'une source renouvelable pouvant être intégrée de manière rationnelle dans le domaine de la construction.

Le manuscrit est composé de cinq chapitres :

Le premier chapitre est une recherche bibliographique sur l'utilisation des déchets et des fibres végétales dans la confection des nouveaux mortiers (définitions, types, classifications et propriétés, etc.).

Dans le chapitre II, nous exposons la technique des plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses.

Le chapitre III présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés pour caractériser nos mortiers au jeune âge.

Le chapitre IV présente et interprète les résultats obtenus à partir des essais réalisés.

Le chapitre V est une étude statistique et une prédiction mathématique des résultats et une optimisation des paramètres de renforcement.

Enfin les conclusions principales tirées de cette étude, ainsi les perspectives pour les futurs travaux ont été présentées à la fin de ce mémoire comme conclusion générale.

Ce projet de fin d'études vise à mettre en place une nouvelle génération de mortier fibré et hybride à faible impact environnemental. Les composites développés ont pour objectif d'avoir de bonnes propriétés mécaniques et hygrothermiques.

# Chapitre I

---

**Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers  
cimentaires.**

---

---

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

---

## I.1. Introduction

Le renforcement des matériaux de construction (béton, mortier et composite) par des fibres est une technique de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leurs résistances à la traction et à la fissuration.[1].

## I.2. Définition

Le mortier est un matériau de construction obtenue par mélange de liant, de sable et d'eau éventuellement des adjuvants, réalisé dans des proportions bien définies de manière à obtenir une pâte de plasticité convenable pour la mise en œuvre.[2].



**Figure I.1.** Exemple d'un gâchait de mortier.[3].

## I.3. Composants du mortier

Les composants principaux des mortiers sont : le sable, de liant et d'eau. Le liant le plus courant depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle est le ciment Portland, mais l'ancien mortier de chaux liante est toujours utilisé dans certaines nouvelles constructions.

Dans un mortier, le liant peut être du ciment, de la chaux ou un mélange des deux.[4].

### I.3.1. Sable

Le choix de la granulométrie du sable est en fonction des travaux à réaliser, pour des travaux de maçonnerie, on emploie souvent des sables 0/5 mm ; Cependant pour des travaux de briquetage ou d'enduits, le sable est plus fin 0,5 et 2 mm



# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

---

Le rôle du sable dans un mortier est de :

- Diviser la masse du liant pour permettre la prise (liant aérien).
- Abaisser le prix de revient du mortier.
- Diminuer le retrait et ses conséquences (les fissurations) du fait que le sable est incompressible que le retrait se trouve amoindri. [4].

## **I.3.2. Liant**

Quel qu'il soit, le liant employé doit être de bonne qualité. Son choix pour la confection d'un mortier est très important. Il peut-être du ciment portland, du ciment de maçonnerie, de la chaux.

**I.3.2.1. Le ciment de maçonnerie** : est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

**I.3.2.2. La chaux** : qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide. [4].

## **I.3.3. Eau**

Le choix de l'eau de gâchage a aussi une grande importance car elle remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité.

Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser. [4].

## **I.3.4. Les adjuvants**

Les adjuvants sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé. Ils donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants. [4].

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

---

## **I.4. Fonctions d'un mortier**

La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs, le mortier sépare les éléments et remplit toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène. Le rejointoiement doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. Ceci exige une adhérence complète. Si elle est réalisée, le mur aura une durabilité suffisante pour résister aux éléments.

Les mortiers sont des éléments indispensables à toute construction. Il peut être utile pour la plupart des travaux de construction et de rénovation en maçonnerie. :

- Lier des briques ou des pierres entre elles,
- Effectuer l'enduit d'un mur,
- Sceller des éléments.

## **I.5. Différents mortiers en fonction du type de liant**

Les types de mortiers sont choisis selon l'application. Il existe de multiples types de mortiers avec différentes propriétés et applications, plus ou moins adaptés en fonction des usages. Les mortiers les plus fréquemment utilisés sur les chantiers sont :

### **I.5.1. Les mortiers de ciment**

Le mortier-ciment est le produit le plus basique qui soit, indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau.

Le mortier de ciment est très résistant et étanche à l'eau mais sujet à la fissuration : convient pour l'assemblage de blocs béton , Pour les jointements et les scellements, on peut envisager de se passer de sable.

### **I.5.2. Les mortiers de chaux**

C'est un type de mortier où la chaux (chaux grasse ou chaux hydraulique) est utilisée comme liant et le sable est utilisé comme granulat fin. Ce mélange est couramment utilisé pour enduire les murs intérieurs et extérieurs.

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique. Il a de la souplesse mais il a moins d'imperméabilité que le ciment.

## I.5.3. Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Le ciment lui procure de la résistance, tandis que la chaux lui apporte de la souplesse. L'usage de ces deux liants donne un mortier résistant, une prise plus rapide grâce au ciment, suffisamment gras et onctueux grâce à la chaux. Le tout lui procure une facilité de prise en main. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

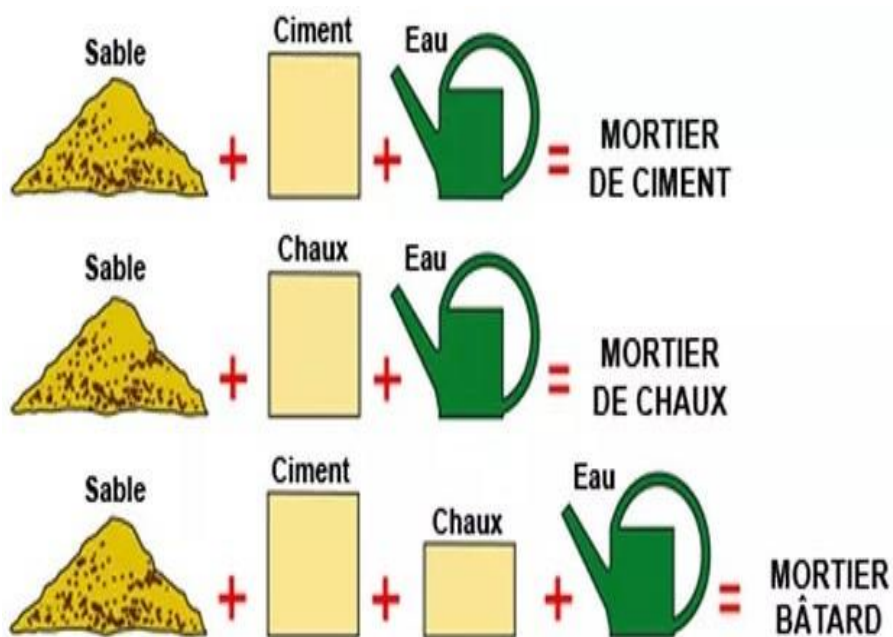


Figure I.2. Différente type de mortier. [4].

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

---

## I.6. Les différents mortiers en fonction de l'usage

### I.6.1. Le mortier-ciment

Ce matériau sera utile pour toutes les constructions classiques (murs, chapes, etc.), qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. L'avantage du ciment est qu'il profite d'une excellente résistance à la compression. Il durcit également plus vite que la plupart des autres solutions.

Les dosages courants sont de l'ordre de : 300 à 400 kg de ciment pour 1 m<sup>3</sup> de sable. De plus un dosage en ciment insuffisant les rend pratiquement imperméables. [4].

### I.6.2. Le mortier hydrofuge

Comme son nom l'indique, le mortier hydrofuge est un mortier résistant à l'eau, qui permet d'éviter les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- Boucher des fissures,
- Enduire un mur,
- Réaliser des chapes.

On l'utilise avant tout dans les lieux humides (salle de bain, extérieur, etc.) ou encore pour concevoir des réalisations étanches, comme un bassin de piscine.

### I.6.3. Le mortier réfractaire

Le mortier réfractaire est un mortier résistant aux hautes températures. Selon les préparations, il peut généralement résister à des températures de 900° ou moins.

En toute logique, il est uniquement utilisé pour les constructions qui sont exposées à cetype de températures, à savoir pour le montage et le jointement des :

- Foyers de cheminée,
- Des barbecues maçonnés.

Ce matériau protège ainsi les joints et la structure des constructions exposées aux flammes et à la chaleur. Il n'est cependant jamais utilisé sur des constructions qui n'en ont pas besoin ?

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

---

## **I.6.4. Le mortier de chaux**

La chaux est l'un des liants les plus utilisés dans les anciennes constructions. À tel point qu'on utilise encore fréquemment des mortiers à la chaux.

Il faut dire que ce type de mortier permet au mur de mieux respirer et dispose également de capacités hydrofuges (idéales pour les pièces humides).

L'usage de chaux dans un mortier permet généralement une application plus facile, grâce à un temps de séchage un peu plus long. Ces mortiers sont cependant plus complexes à doser que le ciment.

## **I.6.5. Le mortier bâtard**

Le mortier dits "bâtard" est un mortier qui utilise à la fois deux types de liants différents (ciment + chaux ou deux ciments différents), généralement, à parts égales.

Un mortier bâtardé (à base de chaux) permet de tirer parti des avantages des deux liants. Plus adhérent et plastique que le ciment pur, il résiste mieux à la fissuration : le bon compromis pour la brique de terre cuite, la pierre mi-tendre.

## **I.6.6. Le mortier-colle ou ciment-colle**

Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un mortier adhésif, qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol.

Ce matériau est utilisé pour coller des plaquettes de parement, des carrelages muraux ou au sol, ou encore des dalles. Selon le mortier-colle choisi, l'utilisation peut se faire en intérieur et/ou en extérieur.

## **I.7. Méthodes de préparation des mortiers**

### **I.7.1. Préparation manuelle**

Il faut tout d'abord, avec la pelle, mélanger à sec le sable et liant aussi parfaitement que possible et former ensuite au milieu du mélange une cuvette qui recevra l'eau de gâchage. La masse est humectée progressivement puis malaxée à l'aide d'un robot à mortier.

Cependant il faut savoir :

## CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

- Que le mélange à sec doit être fait soigneusement pour que le liant soit parfaitement réparti dans toute la masse du sable.
- Que l'eau doive être versée en plusieurs fois, d'abord pour la commodité et la qualité du mélange, ensuite parce qu'il est facile d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas en enlever. [4].



**Figure I.3.** Exemple d'une fabrication des mortiers à la main [5].

### I.7.2. Fabrication mécanique

La fabrication des mortiers se fait à l'aide des engins appelés bétonnières. Avec certains modèles, le mélange doit être fait à sec, en partie avant l'introduction dans le tambour mélangeur où il est mouillé convenablement.

## CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires



**Figure I.4.** Exemple d'une fabrication des mortiers mécanique. [6]

D'autres font elles-mêmes le mélange complet : on introduit soit directement dans le tombeur, soit dans une benne, l'ensemble des éléments constitutifs du mortier. L'opération ne dure que quelques minutes, elle est beaucoup plus rapide et moins pénible qu'à la main.

### I.8. Les caractéristiques de mortier

Elles sont nombreuses. A savoir :

- **Résister** à l'écrasement en répartissant régulièrement les pressions ;
- **Être compact** : pour éviter l'infiltration des eaux dans les ouvrages, et accroître la résistance mécanique ;
- **Être imperméable** : pour obtenir un maximum d'étanchéité des joints de maçonnerie, et des enduits ; Adhérer aux matériaux : pour mieux transmettre les charges, ou créer un écran durable contre les intempéries ;
- **Conserver un volume constant** pendant la prise et le durcissement pour éviter les tassements ou les dislocations des ouvrages ;
- **Résister aux agents agressifs** d'une atmosphère ou d'un sol pollué ;
- **Être ouvrable**, afin que l'exécutant puisse le mettre en place dans les meilleures conditions ;
- **Conserver toutes ses qualités**, et notamment la permanence de la résistance. De quoi dépendront tous ces qualités ? des constituants : de leur nature ; De leur dosage. [7]

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

## I.9. Introduction

Le renforcement des matériaux de construction à l'aide des déchets diminue les problèmes du béton.

**Définition du terme « déchet » :** La Loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit :

« **Déchets** : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer. » (PNUD-MATE,2008) [8].

### I.9.1. Classification des déchets

**I.9.1.1. Déchets ménagers et assimilés :** La Loi n° 28- 00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination définit les déchets assimilés aux déchets ménagers comme étant :

« Tout déchet provenant des activités économiques, commerciales ou artisanales et qui par leur nature, leur composition et leurs caractéristiques, sont similaires aux déchets ménagers » [9] (Figure I.5).



**Figure I.5.** Déchets ménagers et assimilés.[11].

**I.9.1.2. Déchets des Activités Economiques (DAE)** sont constitués de « tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage ». Ils proviennent de l'ensemble des secteurs de production : agriculture, pêche, construction, artisanat, secteur tertiaire, commerce [10] (Figure I.6).



**Figure I.6.** Déchets des Activités Economiques (DAE) [12].



# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

**I.9.1.3. Déchets industriels :** sont typiquement les déchets générés par les entreprises appartenant à différents secteurs d'activités économiques tels que les industries manufacturières, la construction, les services et l'agriculture [13] (Figure I.7).



**Figure I.7.** Déchets industriels [14].

**I.9.1.4. Déchets médicaux et pharmaceutiques :** tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, palliatif ou curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire ou des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires [13] (Figure I.8).



**Figure I.8.** Déchets médicaux et pharmaceutiques [16].

**I.9.1.5. Déchets agricoles ou végétal :** qui provient de l'agriculture, de la sylviculture et de l'élevage, constitué de déchets organiques et de déchets dangereux [15](Figure I.9).



**Figure I.9.** Déchets agricoles [17].

**I.9.1.6. Les déchets organiques :** sont des déchets provenant de matières d'origine animale ou végétale (alimentaires, verts, agricoles, issus des industries agroalimentaires ou de la restauration), et composent une grande partie des déchets ménagers [15] (Figure I.10).



**Figure I.10.** Les déchets organiques [18].

Dans notre étude bibliographique, on s'intéresse aux fibres végétales. Ce type de renfort permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des composites comme la résistance à l'impact et à la rupture. [19].

## I.10. Fibres végétales

### I.10.1. Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose,

## CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

---

hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante. [20].

### I.10.2. Classification des fibres végétales

Les fibres naturelles peuvent être classées selon leur origine en fibres animales, minérales et végétales (VF). Ces dernières, également connues sous le nom de fibres lignocellulosiques en raison de leurs composants principaux étant la cellulose, l'hémicellulose et la lignine [21] sont classées selon leur composition chimique en fibres de bois et non ligneuses.

Les fibres de bois contiennent une plus grande quantité de lignine que les fibres non ligneuses et peuvent être divisées en fibres de bois résineux (Soft Wood fibers) ou de bois dur (hard Wood fibers).

Les fibres de résineux peuvent être trouvées dans les pins, les sapins, etc., et les fibres de bois durs se trouvent dans le bouleau, l'eucalyptus, le hêtre, etc. Les fibres non ligneuses couvrent quatre grandes catégories selon la partie de la plante où se trouvent les fibres (p. Ex. Fibres libériennes, graines, feuilles, tiges et roseaux) [22]. Figure 1 montre des exemples de fibres naturelles et leur classification [23].

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénafe, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abace, paille de graminée). [24].
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénafe, le chanvre, le sisal, le jute et le lin). [25].
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. Et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues. [24].

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

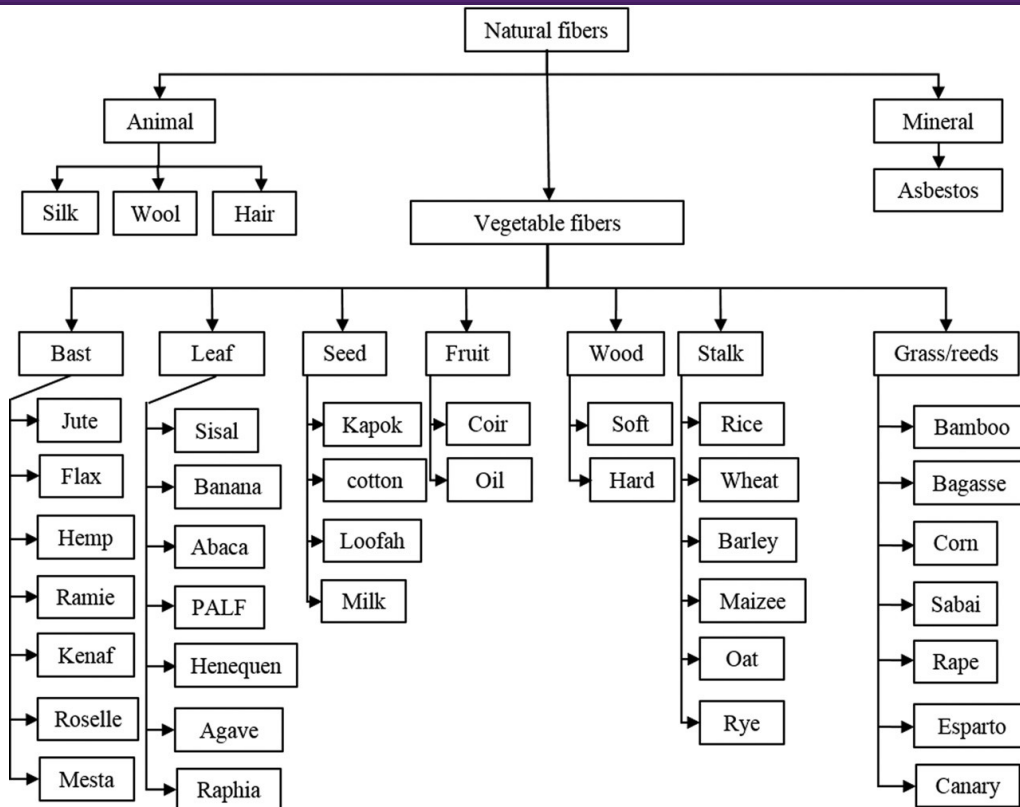


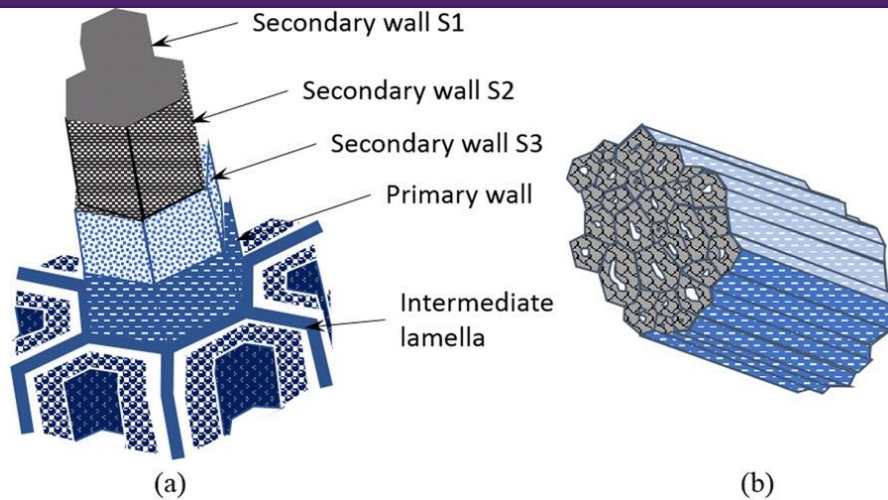
Figure I.11. Classification des fibres naturelles [25].

## I.10.3. Structure de la fibre végétale

Dans une plante, les fibres sont généralement assemblées sous forme de faisceau, d'où leurs formes polygonales. La fibre est constituée d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire, la paroi secondaire étant constituée des 3 couches S1, S2 et S3. La couche S2 est la plus épaisse et définit le comportement de toute la fibre. Cette structure multicouche confère une anisotropie au matériau [26]. Dans une usine,

les fibres sont généralement assemblées sous la forme d'un faisceau, qui à son tour forme leurs formes polygonales. La structure de la fibre végétale est comparable à un empilement de plis composites, dont la structure est détaillée à la Figure 2 [27]. Les parois primaire et secondaire contiennent un cadre formé de micro fibrilles de cellulose qui est entouré d'une matrice contenant de l'hémicellulose et de la lignine [28].

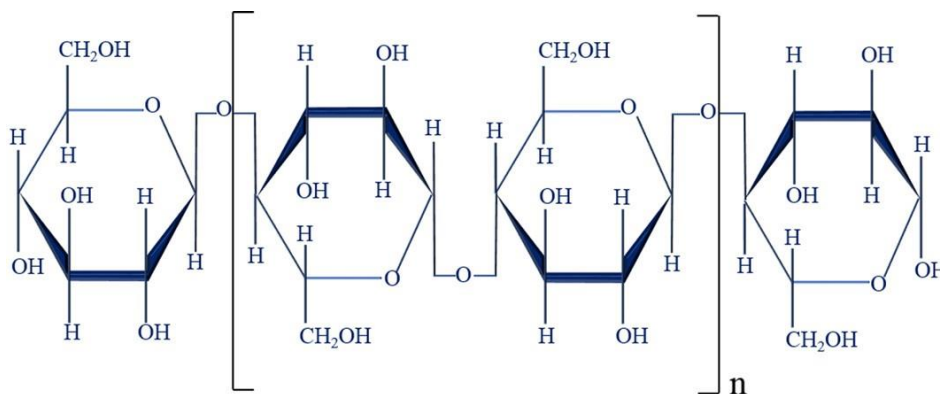
# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires



**Figure I.12.** (a) Structure complète de la fibre de chanvre dans un faisceau.  
(b) Structure fibrillaire de la fibre de chanvre [27].

## I.10.3.1. La cellulose

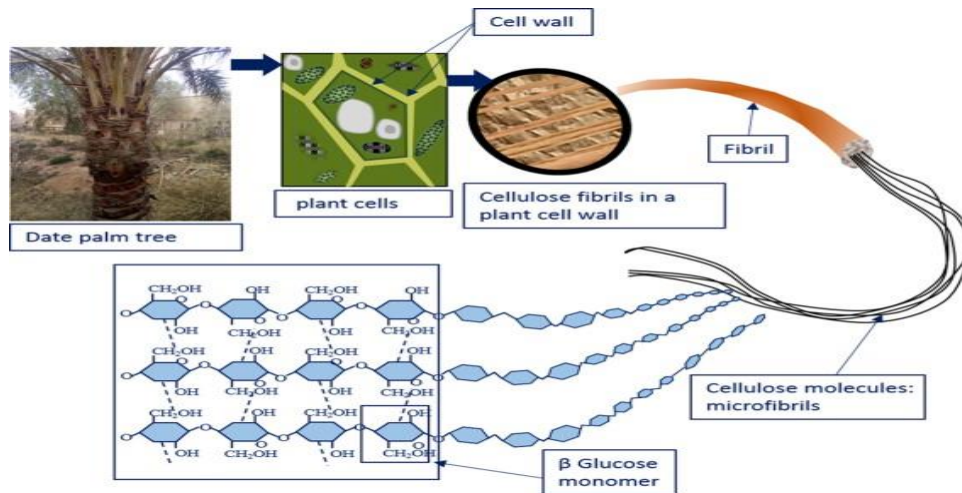
La cellulose est un polymère naturel le plus disponible sur terre. Il peut être trouvé dans de nombreux domaines de l'industrie, tels que l'emballage, les textiles et le papier, ainsi qu'être utilisé comme additif alimentaire. La cellulose est constituée de longues chaînes de molécules unitaires d'anhydride de glucose comptant jusqu'à 15 000 molécules. Les particules d'anhydride de glucose sont liées entre elles par des liaisons bêta [ $\beta$  (1,4)]. La molécule de cellulose a une formation linéaire en raison de cette configuration de liaison (voir Figure I.13). Le degré de polymérisation déterminé par les scientifiques, basé sur le comptage des résidus de glucane, est d'environ 10000 pour la cellulose de bois [29].



**Figure I.13.** Structure moléculaire de la cellulose [29].

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

La forme unitaire cellulaire de la cellulose est connue dans la littérature sous différents noms, tels que microfibrilles, fibrilles élémentaires et protofibrilles. Une telle configuration de différents composants cellulosiques est illustrée sur la Figure 4 [30].



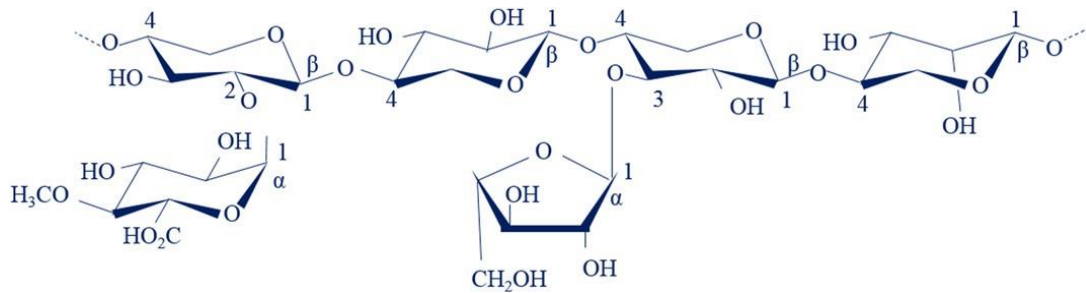
**Figure I.14.** Organisation des composants cellulosiques dans la paroi cellulaire d'une fibre végétale typique [30].

## I.10.3.2. L'hémicellulose

L'hémicellulose est un polymère naturel comme la cellulose, constitué de monomères glucidiques. Cependant, l'hémicellulose se compose d'une variété de monomères glucidiques, contrairement à l'homopolysaccharide cellulose. Ainsi, les monomères glucidiques, L'arabinose, le mannose, le galactose, le glucose et l'xylose. L'hémicellulose ayant des groupes de ramifications latérales considérables, sa structure est plus ouverte et non cristalline.

L'hémicellulose est plus hygroscopique que la cellulose et attire plus de molécules d'eau en raison de sa structure ouverte. Le degré de polymérisation de l'hémicellulose dans le bois est d'environ 100 à 200, ce qui est très faible par rapport à celui de la cellulose, qui est de 10 000. La différence entre les fibres de bois et non ligneuses n'apparaît pas dans la teneur en cellulose, mais elle apparaît dans les teneurs en hémicellulose et en lignine. Les fibres non ligneuses telles que les graminées (blé, maïs, riz) contiennent jusqu'à 40% de l'hémicellulose principale trouvée dans les graminées, tandis que les fibres de bois sont composées de 25% à 35% d'hémicellulose en poids sec. La Figure 5 illustre une molécule d'hémicellulose typique trouvée dans un type de fibre de bois appelé Arabino Glucuronoxylane (xylane) [29].

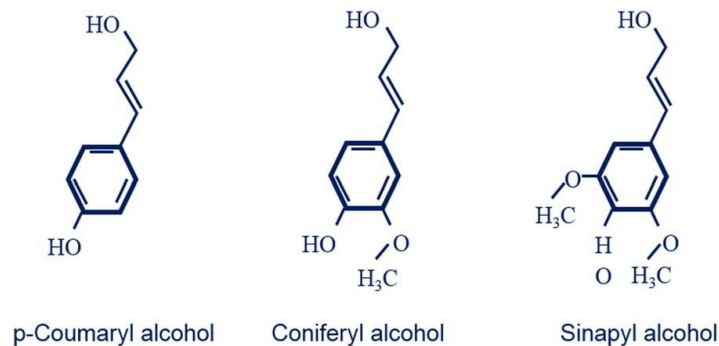
# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires



**Figure I.15.** Structure de l'hémicellulose (xylane) constituée d'un squelette xylopyranose, avec des branches latérales d'acide glucuronique (1 → 2) et d'arabinofuranose (1 → 3) [29].

### I.10.3.3. La lignine

La lignine est une macromolécule extrêmement hétérogène qui représente environ 30% du carbone organique de la biosphère. La lignine est totalement amorphe, et contrairement aux autres celluloses et hémicellulose à base de glucides, elle contribue à la protection des parois cellulaires en agissant comme la colle qui retient les cellules. La lignine a une structure aromatique représentée par trois précurseurs voire la Figure I.16. La teneur en lignine d'une fibre végétale varie de 2% à 45% [29, 30].



**Figure I.16.** Structure des précurseurs de la lignine [29, 30].

### I.10.3.4. Pectines

Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux [31]. Sur le plan structural, les pectines sont une famille de polysaccharides complexes qui contiennent un enchaînement d'unités d'acide α-D-galacturonique liées entre elles par des liaisons α (1-4), interrompu par la présence d'unités Lhamnopyranose. Les pectines portent aussi des substances non sucrées, essentiellement le méthanol, l'acide

## CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

acétique, l'acide phénolique et parfois des groupes d'amide. L'estérification des résidus d'acide galacturonique avec le méthanol ou l'acide acétique est une caractéristique qui joue un rôle très important sur les propriétés physicochimiques des pectines particulièrement sur la formation de gel [32].

### I.10.3.5. Extractibles

Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques, d'où leur dénomination. La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur et l'odeur. Il s'agit de tanins, de pectines, de sucre et d'autres composés [33].

Le tableau suivant présente la composition chimique de quelques plantes à fibres.

Type de Fibre	Cellulose	Hemicellulose	Lignine
Cotton	82,7	5,7	/
Jute	64,4	12	11,8
Zoster	57	28	5
Ramie	68,6	13,1	0,6
Sisal	65,8	12	9,9
Chanvre	57-77	14-17	9-13
Kenaf (ecorce)	77-60,8	20,3-23	10-19
Kenaf (bois)	37-49	18-24	15-21
Résineux	48	15	25,3

**Tableau I.1.** Composition chimique de quelques plantes à fibres [34, 35].

### I.10.4. Utilisation des fibres végétales dans la construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques.

L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et des dallages de parking ainsi que le renforcement du plâtre [36].

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés.

Le tableau suivant résume les domaines d'application des fibres

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

Produits de construction	Infrastructure	Automobile	Divers
- Planchers	- Trottoirs	- Panneaux intérieurs	- Palettes
- Profilés de portes et defenêtres.	- Dignes	- Garnitures de toit	- Tables de pique-unique
- Clôtures	- Signalisations routières	- Panneaux de sièges	- Equipment de jeux publics
- Bardage	- Isolations phoniques.	- Tablettes arrière	
- Garde de corps.		- Planchers de camion	
- Panneaux décoratifs			

**Tableau I.2.** Domaines d'application des fibres végétales [36].

## I.10.5. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres naturelles ce sont des bio composites agro sources qui présentent comme tous les matériaux composites de notre planète des avantages qui favorisent leur utilisation dans plusieurs domaines d'application (Civil et Militaire). Ces matériaux verts montrent aussi des inconvénients qui limitent leur utilisation si aucune amélioration n'a été appliquée sur la fibre brute [37].

Le tableau I.3 indique les principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales.

Avantages	Inconvénient
Ressource renouvelable et biodegradable.	Variabilité importante et défauts.
Pas d'émission de CO <sub>2</sub> , en plus elle absorbe le CO <sub>2</sub> émis par les activités quotidiennes.	Faible durabilité à long terme
Moins abrasive.	Compatibilité entre la fibre et la matrice
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Faibles tenues à la température.
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Forte absorption de l'humidité.
Production : peu de technologie, ni d'énergie.	Variations dimensionnelles (gonflement /rétractabilité).
Non-toxiques : Pas d'allergie ou d'irritation cutanée lors de la manipulation.	Nécessite la gestion des stocks, surtout pour des applications industrielles.
Peu coûteux.	Forte capacité d'absorption d'eau : Le coefficient d'absorption de la fibre de Banane, Chanvre, Sisal, Palmier dattier, Lin et Noix de coco est respectivement d'environ 407, 158, 149, 140, 136, et 120%, [38] [39].
Faible densité (légère)	
Disponible	
Très bonne capacité d'isolation thermique et acoustique.	



# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

## I.10.6. Points de faiblesse

- La température de mise en forme de ces matériaux est limitée, une température trop élevée pourrait endommager les fibres.
- Les fibres sont hydrophiles et peuvent donc absorber de l'eau en grande quantité. Cela peut donc causer un gonflement des parois cellulaires et l'humidité peut créer des moisissures. Une autre conséquence est la mauvaise compatibilité entre les fibres et la matrice cimentaire. Cela provoque une forte absorption d'humidité entraînant des changements dimensionnels dans les fibres à base de lignocellulose.
- La dispersion des propriétés en termes de rigidité ou de résistance mécanique, principalement causée par la difficulté à estimer de manière exacte les dimensions de la section transversale car elle varie sur toute sa longueur.
- L'origine naturelle de fibres fait que leurs propriétés sont assez variables. La variété de la plante, la densité de la plantation, la qualité de la terre, le climat, l'exposition au soleil, la fertilisation, ....
- L'influence de l'apport en eau durant la croissance influence les propriétés mécaniques des fibres. Par exemple, les fibres de lin cultivées en France peuvent avoir un module d'Young longitudinal qui varie entre 43,9 et 61,1 GPa, avec des valeurs de résistance et d'allongement à la rupture moyennes de 945 +/- 200 MPa et 2,07 +/- 0,45 % respectivement. Malgré cette dispersion, les fibres de lin possèdent des propriétés mécaniques spécifiques similaires voire supérieures à celles des fibres de verre, grâce à leur faible masse volumique.

	p(g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	Contrainte à rupture (MPa)	Élongation (%)	Références
Lin	1.4	40-85	800-2000	2.4-3	[55]
		58	1339	3.27	[56]
		71	1381	2.1	[57]
		77	1795	2.4	[8]
Verre	2.54	72-73	2000-2400	3	[58]

**Tableau I.4.** Propriétés mécaniques du lin et du verre.

Le plus grand problème de ce type de fibre est sa durabilité en milieu alcalin, en

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

particulier dans les matrices de ciment [40].

## I.10.7. Fibres de Diss (*Ampélodesmos mauritanicus*)

### I.10.7.1. Généralités

La fibre Diss (*Ampélodesmos mauritanicus*), est une herbe vivace. Il existe en abondance à l'état sauvage sur le pourtour du bassin méditerranéen et l'Asie occidentale et au sud-ouest de l'Amérique du Nord. Il est utilisé auparavant dans la réalisation des habitations anciennes en raison de ses qualités mécaniques et hydriques et en tant que fibre pour la fabrication de tapis. [41]



**Figure I.17.** Herbe de Diss *Ampélodesmos mauritanicus*. [42]

### I.10.7.2. Description de Diss (*ampélodesmos mauritanicus*)

Graminée vigoureuse aux longues feuilles linéaires persistantes, vert foncé, sont décoratives toute l'année. Les inflorescences très hautes au-dessus de la touffe sont d'abord vert-jaune en mai, puis dorées en automne. Cette graminée se plaît au soleil et pousse mieux dans des sols sableux, caillouteux ou argileux qui sont modérément humides. Sa hauteur peut atteindre 3 mètres environ (Figure I.17). L'utilisation de cette herbe dans les composites permet de préserver les ressources non renouvelables et d'ouvrir de nouveaux marchés. [41]

### I.10.7.3. Nomenclature

Le tableau I.5 regroupe la classification scientifique de la plante :

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

**Tableau I.5.** Classification scientifique de la plante Diss. [41]

Genre	Espèce	Sous-famille	Famille	Ordre
Ampelodesmos	Mauritanicus	Stipoideae	Poaceae	Poales

## I.10.7.4. Composition chimique des fibres de diss

Le Tableau I.6 donne la composition chimique et les proportions en pourcentage de chaque substance (cellulose, lignine, hémicelluloses, pectine et cire) des fibres végétales

**Tableau I.6.** Composition chimique de fibres végétales. [42]

Constituant de la fibre de Diss		%
<b>Matières sèches</b>		91.8
<b>Matières minérales</b>		11.4
<b>Matières organiques</b>		80.3
<b>Composition de la matière organique</b>	Constituants extractibles	12.10
	(Cire, graisse)	
	Pectine	11.85
	Lignine	16.80
	Hémicellulose	15.15
	Cellulose	44.10

## I.10.7.5. Matrice cimentaire et fibres végétales

Les fibres naturelles ont été utilisées depuis l'antiquité comme renfort dans diverses applications telles que l'habitation et la poterie. Toutefois, ces vingt dernières années, elles ont commencé à être largement utilisées dans le secteur des composites à base cimentaire, que ce soit dans le domaine du bâtiment ou en science des matériaux, suscitant ainsi un grand intérêt [43].

## I.11. Conclusion

L'utilisation de fibres comme renforcement dans les matrices cimentaires présente de nombreux avantages pour le secteur du bâtiment, en particulier dans les pays en voie de développement. Les fibres végétales et de bois sont des matériaux abondants, peu coûteux et facilement disponibles, ce qui rend leur utilisation économiquement viable. De plus, leur

## CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur le renforcement des mortiers cimentaires

---

incorporation dans les mortiers cimentaires permet d'améliorer considérablement leur résistance en flexion et en traction, tout en réduisant les risques de fissuration et de fragmentation. Cependant, il est important de noter que les propriétés mécaniques des composites renforcés par des fibres dépendent de nombreux facteurs tels que la nature, la taille et la distribution des fibres, ainsi que leur taux de renforcement. Il est donc nécessaire d'effectuer des études approfondies pour optimiser leur utilisation en fonction des besoins spécifiques de chaque application.

# **Chapitre**

## **II**

---

**Exposé des plans d'expériences et de la  
méthode des surfaces de réponses.**

---

## II.1. Introduction

Les plans d'expériences peuvent être considérés comme des techniques d'optimisation des processus qui possèdent des entrées contrôlables et des sorties mesurables. Ces plans sont utilisés aussi bien dans les scénarios de production que de conception.[44]

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. [45]

Au début des années 1920, Ronald Fisher a introduit une technique statistique appelée le plan d'expériences. Cette méthode a été développée dans le cadre de recherches agronomiques pour étudier l'impact de variables telles que la quantité de pluie, d'eau et de rayons solaires sur les rendements des cultures. Les plans d'expériences sont des techniques d'optimisation des processus qui permettent de contrôler les variables d'entrée et de mesurer les résultats. Ces plans sont utilisés dans les scénarios de production et de conception. La méthode des plans d'expériences est basée sur deux concepts fondamentaux : l'espace expérimental et la modélisation mathématique des variables étudiées [44].

## II.2. Notions de base

L'expression « plan d'expériences » contient deux notions :

- La notion de « plan »,
- La notion d' « expériences ».

**II.2.a. Notion de « plan »** Ce terme renvoie aux mots planification, organisation et exploitation :

- Planification : action de diriger suivant un plan déterminé ;
- Organisation : action de préparer en vue d'un but précis ;
- Exploitation : action de tirer profit d'une chose (ici des expériences).

**II.2.b. Notion d'« expériences »**

Modification volontaire des paramètres d'un système pour en observer ou en mesurer les effets. [46]

## II.3. Plans d'expériences

### II.3.1. Définition

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt (réponse) et des variables (facteur).

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

Les plans d'expériences sont une méthode qui permet d'optimiser les essais menés dans le cadre de la recherche scientifique ou des études industrielles. Ils peuvent être appliqués à une grande variété de disciplines et d'industries, dès lors qu'il est nécessaire d'analyser la relation entre une grandeur d'intérêt (la réponse) et des variables (les facteurs). Cette approche permet d'obtenir le maximum d'informations avec le minimum d'expériences en suivant des règles mathématiques et une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à toutes les situations auxquelles un expérimentateur peut être confronté. [47]

### **II.3.2. But d'un plan d'expérience**

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le temps et le coût de réalisation des essais, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement. Pour cela et avant d'entamer la procédure expérimentale.[48] Un plan d'expériences permet de connaître le comportement d'un système, c'est-à-dire de :

- Connaître les facteurs qui ont le plus grand impact sur les résultats (sur la conformité d'un produit).[46]
- Dans l'objectif d'optimiser le nombre d'essais, le temps et les coûts de réalisation, nous avons opté pour une approche statistique pratique et informatisée appelée « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil requiert une compréhension préalable de son principe et de son fonctionnement, avant de débiter la procédure expérimentale [48]. Les plans d'expériences permettent d'analyser le comportement d'un système, en identifiant les facteurs ayant le plus grand impact sur les résultats, tels que la conformité d'un produit [46].

### **II.3.3. Définir les sorties (Réponses)**

La réponse Y (variable de sortie) correspond à un paramètre de sortie du système étudié. Une réponse doit être représentative, quantifiable et la moins dispersée possible pour des variables d'entrées maîtrisées et constantes. Pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est conseillé d'avoir une réponse exprimée sous forme quantitative. En effet, les méthodes d'analyses des résultats d'essais telles que l'analyse de variance ou l'analyse de régression au sens des moindres carrés, s'appuient sur des données exclusivement quantitatives. Par ailleurs, les réponses qualitatives comme par exemple la morphologie d'un dépôt (lisse, poreux...etc.) qui n'est pas un critère quantitatif, pourront s'interpréter à partir d'un codage spécifique des modalités des réponses.[49]

La variable de sortie Y représente un paramètre du système étudié, qui doit être représentatif, quantifiable et avoir la plus faible dispersion possible pour des variables d'entrée constantes et maîtrisées. Pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est recommandé d'exprimer la réponse sous forme quantitative. En effet, les méthodes d'analyse des résultats d'essais telles que l'analyse de variance ou l'analyse de régression au sens des moindres carrés s'appuient sur des données exclusivement quantitatives. Toutefois, les réponses qualitatives, telles que la morphologie d'un dépôt (lisse, poreux, etc.) qui ne peut être mesurée quantitativement, peuvent être interprétées à partir d'un codage spécifique des modalités des réponses [49].

### **II.3.4. Définir les entrées (facteurs)**

Un paramètre d'entrée d'un système (variable d'entrée) est appelé facteur X. Ce facteur est une cause possible de variation de la réponse Y. Le choix d'un facteur se fait souvent en plusieurs phases : une phase de recensement faisant appel à la créativité du groupe, une phase de classement et une phase de sélection où les modalités des facteurs devant être étudiés de façon prioritaire seront définies.[49]

Un paramètre d'entrée d'un système, également appelé variable d'entrée, est désigné comme facteur X. Ce facteur peut être une cause potentielle de variation de la réponse Y. Le choix des facteurs est généralement réalisé en plusieurs étapes : une phase de recensement qui sollicite la créativité du groupe, une phase de classement, ainsi qu'une phase de sélection où les modalités des facteurs à étudier en priorité sont définies [49].

## **II.4. Choix de la méthode d'expérimentation**



La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.[50]

La méthode d'expérimentation sélectionnée doit faciliter l'interprétation des résultats et minimiser le nombre d'essais, tout en garantissant la qualité des résultats obtenus. La théorie des plans d'expériences permet de trouver les conditions optimales pour obtenir la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. Cette approche permet d'obtenir le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences, ce qui se traduit par un coût minimal [50].

### II.5. Comment l'utiliser ?

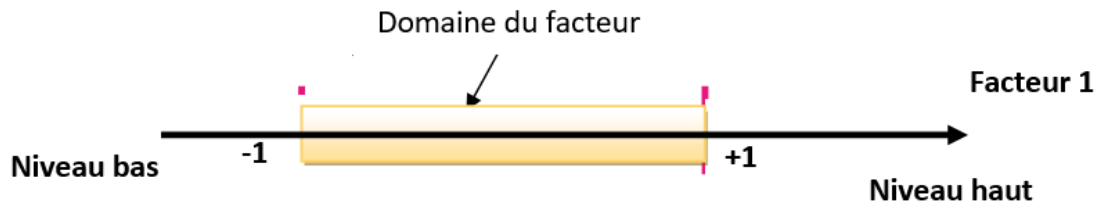
#### Étapes :

- Identifier la façon dont la qualité du " produit " à mettre au point peut se mesurer ;
- Choisir l'indicateur le plus pertinent pour analyser la réponse pendant l'expérimentation ;
- Identifier les différents paramètres qui influencent le résultat. Ils s'appellent couramment les facteurs ;
- Définir le nombre de valeurs à étudier pour chaque facteur ;
- En déduire le type de plans à réaliser (il dépend du nombre de facteurs, du nombre de valeurs) ;
- Effectuer les essais en respectant les variations de facteurs et de niveaux mentionnées dans le plan ;
- Analyser et interpréter les résultats (l'analyse de variance et le calcul de régression linéaire sont réalisables avec des logiciels spécifiques) ;
- Modéliser la réponse en fonction de tous les paramètres ;
- Valider la modélisation par des expériences aléatoires de vérification ;
- Ajuster les facteurs pour optimiser la réponse en fonction de la modélisation retenue.[51]

### II.6. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette

grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas, la borne supérieure est le niveau haut.[45]

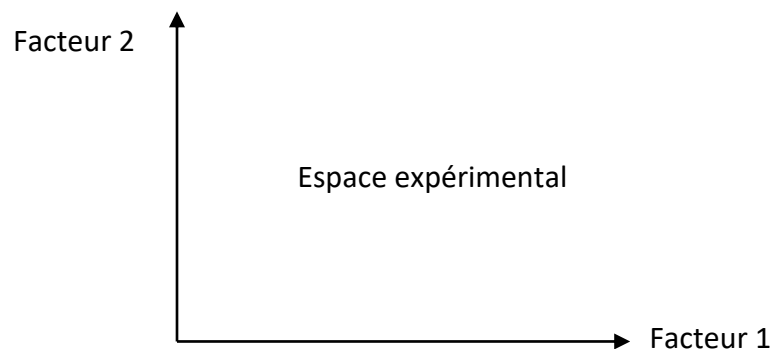


**Figure II.1.** Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le **domaine** du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par  $-1$  et le niveau haut par  $+1$ .

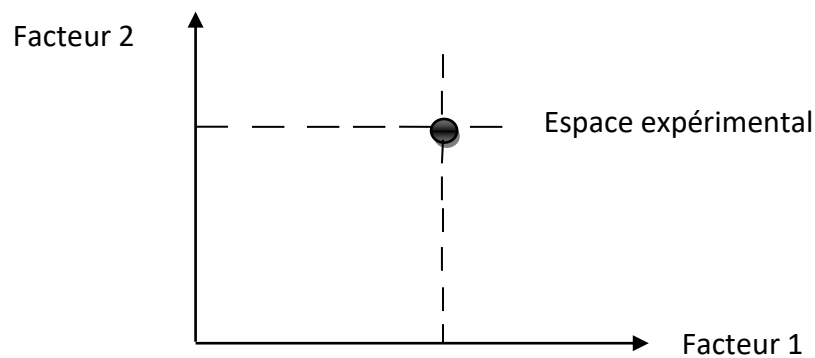
S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé **l'espace expérimental** (Figure 2).



**Figure II.2.** Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

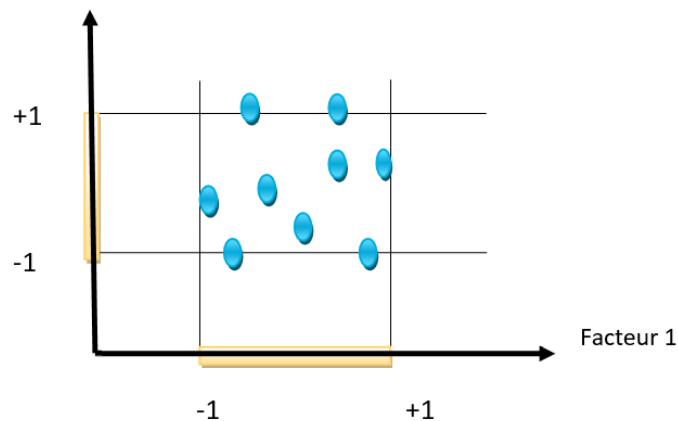
Le niveau  $x_1$  du facteur 1 et le niveau  $x_2$  du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le « **domaine d'étude** ». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.4).



**Figure II.3.** Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.



**Figure II.4.** Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

## II.7. Notion de surface de réponse

Les niveaux  $x_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental et  $y$  est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure II.5).

Les niveaux  $x_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental, tandis que  $y$  correspond à la valeur de la réponse en ce point. Pour représenter la réponse, on définit un axe orthogonal à l'espace expérimental. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Par exemple, un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse et deux dimensions pour les facteurs. Chaque point de l'espace expérimental correspond à une réponse, et l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond à un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (voir Figure II.5).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences. Elle vient pour enrichir les méthodes des plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires. [4]

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences constitue le problème fondamental des plans d'expériences. L'objectif est d'obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse, tout en limitant le nombre d'essais nécessaires. L'approche D-optimal est une méthode qui améliore considérablement les plans factoriels complets et fractionnaires, en enrichissant les méthodes des plans d'expériences [47].

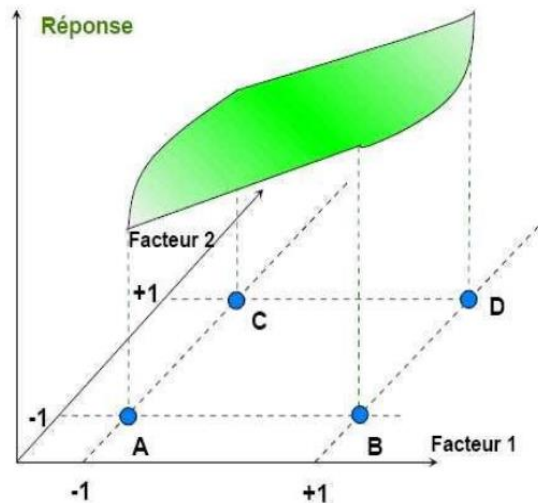


Figure II.5. Représentation graphique d'une surface de réponses.

## II.8. Différents types des plans d'expériences

### II.8.1. Plan factoriel complet

La réalisation d'un PE peut être très simple ou très compliquée suivant le nombre des facteurs étudiés et les hypothèses formulées. L'étude d'un plan complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience. On note ce plan  $X^k$ , ce qui signifie que cette expérimentation concerne un système comportant k facteurs à X niveaux. Le principal inconvénient d'une telle méthode réside dans le nombre d'expériences nécessaires, vite dissuasif lorsque k devient important. Pour étudier une réponse y en fonction de k facteurs, les expériences correspondant à toutes les combinaisons possibles des facteurs sont réalisées.

Par exemple, pour deux facteurs à deux niveaux, le nombre de combinaisons possibles entraîne  $2^2 = 4$  configurations (Tableau II.1). Dans le cas d'un plan comportant des facteurs ayant des niveaux différents, le calcul du nombre d'expériences du plan complet est effectué

de manière similaire. Par exemple, pour un plan complet de 3 facteurs à 2 niveaux et 4 facteurs à 2 niveaux,  $2^3 \times 2^4 = 128$  expériences sont nécessaires. [52]

N° essai	Facteurs		Réponse
	Facteur A	Facteur B	
1	-1(niveau bas)	-1	Y <sub>1</sub>
2	+1(niveau haut)	-1	Y <sub>2</sub>
3	-1	+1	Y <sub>3</sub>
4	+1	+1	Y <sub>4</sub>

**Tableau II.3.** Plan factoriel complet  $2^2$  pour deux facteurs (A, B) à deux niveaux.

### II.8.2. Plans factoriels fractionnaires

Le principal inconvénient des plans factoriels complets est le nombre excessif d'essais à réaliser lorsque le nombre de facteurs devient important. La question est alors de savoir s'il est possible d'estimer les coefficients du modèle avec une précision acceptable sans pour autant réaliser tous les essais du plan factoriel. Les travaux de Box et Hunter (1978) [52] d'une part et Taguchi (1987) [53] d'autre part a débouché sur les plans fractionnaires présentés sous forme de tables standards en fonction des éléments que l'on souhaite prendre en compte dans l'expérimentation et qui concernent les facteurs, les valeurs (ou niveaux) de ces facteurs, et les interactions entre facteurs [54] [55] [52]. L'hypothèse faite dans l'élaboration de plans fractionnaires est que certaines interactions sont insignifiantes et qu'elles peuvent donc être confondues avec des facteurs dont l'influence est significative. L'inconvénient majeur des plans fractionnaires est qu'ils occasionnent par conséquent des risques potentiels d'erreurs. Les avantages de ces plans résident dans le fait qu'ils sont beaucoup plus économiques, plus rapides et demandent moins d'essais. [56]

Le principal inconvénient des plans factoriels complets est le nombre excessif d'essais requis lorsque le nombre de facteurs à étudier devient important. Ainsi, il est nécessaire de déterminer s'il est possible d'estimer les coefficients du modèle avec une précision acceptable sans réaliser tous les essais prévus dans le plan factoriel. Les travaux de Box et Hunter (1978) d'une part, et Taguchi (1987) d'autre part, ont donné lieu au développement de plans fractionnaires présentés sous forme de tables standards comprenant les facteurs, leurs niveaux et les interactions entre facteurs. L'hypothèse sous-jacente à l'utilisation de plans fractionnaires est que certaines interactions sont insignifiantes et peuvent donc être

confondues avec des facteurs dont l'influence est significative. Le principal inconvénient de ces plans est le risque potentiel d'erreurs qu'ils impliquent. Toutefois, leurs avantages résident dans leur économie, leur rapidité et leur nécessité d'un nombre réduit d'essais [56].

### II.8.3. Plans pour surfaces de réponses

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'étude par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du second degré. On fait alors appel aux plans pour surfaces de réponse. Ces plans utilisent des modèles polynomiaux du second degré. Nous étudierons les trois plus importants plans de ce type : les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert.[50]

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

Les plans d'expériences précédemment présentés utilisaient seulement deux niveaux d'étude par facteur et des modèles mathématiques de premier degré (avec ou sans interactions) pour chaque facteur. Ces plans sont couramment utilisés car ils permettent de cribler les facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Toutefois, dans de nombreux cas, une modélisation plus approfondie des phénomènes étudiés est nécessaire, ce qui nécessite l'utilisation de modèles mathématiques de second degré. Les plans pour surfaces de réponse sont utilisés dans ces situations et utilisent des modèles polynomiaux de second degré. Les trois plans les plus couramment utilisés pour les surfaces de réponse sont les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert [50].

Le modèle mathématique utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle de second degré avec des interactions d'ordre 2 :

Pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (\text{II.1})$$

Pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e$$

(II.2)

#### II.8.4. Plans de Taguchi

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui vous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, vous manipulez les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis vous déterminez les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit. Un procédé conçu dans cette optique produira des résultats plus cohérents. Un produit conçu dans cette optique aura des performances plus cohérentes, quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, qui évaluent les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Avec un répertoire orthogonal, le plan est équilibré de telle sorte que les niveaux de facteurs sont également pondérés. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment de tous les autres et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cela peut réduire la durée et le coût de l'expérience en cas d'utilisation des plans fractionnés.

Vous pouvez également ajouter un facteur de signal au plan de Taguchi, afin de créer une expérience à réponse dynamique. Une expérience à réponse dynamique vise à améliorer la relation fonctionnelle entre un signal et une réponse de sortie.[57]

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui permet de choisir un produit ou un procédé fonctionnant de manière plus cohérente dans son environnement opérationnel. Les plans de Taguchi supposent que tous les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas être contrôlés, et que certains d'entre eux, appelés facteurs de bruit, sont incontrôlables. Les plans de Taguchi cherchent à identifier les facteurs de contrôle qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, les facteurs de bruit sont manipulés pour imposer une variabilité, puis les paramètres de facteurs de contrôle optimaux sont déterminés pour rendre



le processus ou le produit plus robuste ou plus résistant à la variation causée par les facteurs de bruit. En utilisant cette approche, un processus conçu sera plus cohérent, tandis qu'un produit conçu aura des performances plus cohérentes quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Les plans de Taguchi utilisent des tableaux orthogonaux pour évaluer les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Les tableaux orthogonaux sont équilibrés de telle sorte que les niveaux de facteurs sont pondérés de manière égale. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment des autres, et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cette approche peut réduire la durée et le coût de l'expérience, notamment en utilisant des plans fractionnés.

Il est également possible d'ajouter un facteur de signal aux plans de Taguchi pour créer une expérience à réponse dynamique. Ces expériences visent à améliorer la relation fonctionnelle entre un signal et une réponse de sortie.

En résumé, les plans de Taguchi permettent de concevoir des produits ou des processus plus robustes et plus résistants à la variabilité causée par les facteurs de bruit en identifiant les facteurs de contrôle optimaux. Les tableaux orthogonaux utilisés dans ces plans permettent une évaluation indépendante des effets des différents facteurs, réduisant ainsi la durée et le coût de l'expérience.

### **II.9. Conclusion**

Les plans d'expériences sont une méthode d'expérimentation efficace pour la mise au point de produits, services ou procédés industriels. Cette approche consiste à faire varier simultanément tous les paramètres plutôt que de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois, permettant ainsi de gagner du temps et de réduire les coûts financiers, tout en obtenant des informations précises sur les effets des différents paramètres étudiés. Les plans d'expériences peuvent également être utilisés pour la modélisation mathématique de phénomènes complexes, en utilisant des plans pour surfaces de réponse et des modèles mathématiques de second degré. Enfin, les plans de Taguchi sont une méthode spécifique de plan d'expériences qui permettent d'identifier les facteurs de contrôle optimaux pour minimiser l'effet des facteurs de bruit et rendre un produit ou un processus plus robuste et plus résistant à la variabilité. Dans l'ensemble, les plans d'expériences sont une méthode puissante pour

l'optimisation de produits et de processus, permettant d'obtenir des résultats de haute qualité tout en économisant du temps et des ressources.

# Chapitre

## III

---

**MATERIAUX UTILISES ET PROCEDURE  
EXPERIMENTALE**

---

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

---

### III.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux de notre étude et les techniques expérimentales utilisées. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition des mortiers.

Dans une seconde partie, on exposera les types de traitements utilisés sur la fibre de Diss. Ensuite, nous décrivons la méthode de formulation et nous présentons les différents essais réalisés au cours notre étude.

### III.2. Caractérisation des matériaux utilisés

Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières utilisées pour la confection des mortiers sont présentées ci-après.

#### III.2.1. Ciment portland composé

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment portland composée CEM II/A-M(S-L)42,5N. C'est un ciment conforme à la norme NA 442 :2000. Il provient de la cimenterie de Hjar Souda (Wilaya de Skikda). Ce ciment est obtenu par le mélange de clinker finement broyé avec certains ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. Les analyses concernant sa composition chimique et ses caractéristiques physico-mécaniques ont été réalisées au laboratoire du fabricant.



Figure III.1. Sac de ciment utilisé.

#### III.2.2. Sable

Le sable utilisé est un sable naturel roulé (SN) moyen de couleur jaunâtre et de classe (0/4). Il est issu d'une sablière située à Oum Ali, dans la wilaya de Tébessa (Algérie).

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

---

### III.2.2.1. Analyses granulométriques : NA 2607 [58]

#### III.2.2.1.1. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de détecter et de mesurer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des filets.

#### III.2.2.1.2. Principe de l'essai analyse granulométrique

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

#### III.2.2.1.3. Mode opératoire

L'opération du tamisage du sable se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série de tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. L'arrangement de grain est arrangé par la vibration et choc de la colonne de tamis.

##### III.2.2.1.3.1. Appareillage spécial pour l'analyse granulométrique (Figure III.2)

- Tamiseuse électrique.
- Série de tamis en mm (4 - 2 - 1 - 0.500 - 0.250 - 0.125 - 0,063).
- Balance.
- Brosse pour nettoyage des tamis.
- Etuve.

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

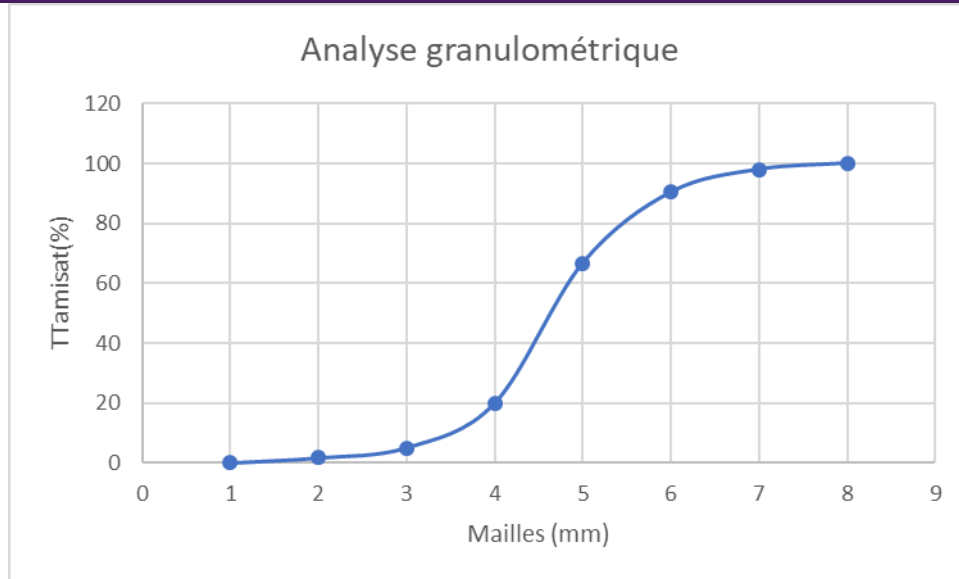


Figure III.2. Essai de l'analyse granulométrique.

Le tableau III.2 ci-dessous regroupe les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour le sable utilisé.

Poids de l'échantillon sec:		1000 g				
Maille tamis (mm)	Poids tamis (g)	Poids tamis +Refus partiel (g)	Rufus partiel (g)	Rufus cumulé (g)	Rufus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	400.2	400.2	0	0	0	100
2	385.7	406.4	20,7	20,7	2,07	79,3
1	338.2	413.8	75,6	96,3	9,63	90,73
0,500	300.3	536	235,7	332	33.2	66,8
0,250	281.1	757.9	467,8	799,8	79,98	20.02
0,125	264.8	413,8	149	948,8	94,88	5,12
0,063	256.6	290,6	34	982,8	98.28	1,72
fond	249.3	266.4	17.1	999,9	99,99	0.01

Tableau III.2. Analyse granulométrique du sable.



**Figure III.3.** Courbe granulométrique du sable.

### III.2.2.2. La masse volumique du sable

#### III.2.2.2.1. Masse volumique apparent

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$P_{app} = (M_2 - M_1) / v \quad (III.1)$$

M1 : Masse du récipient vide.

M2 : Masse du récipient plus le sable.

Le tableau II.2 présente les résultats obtenus de l'essai de la masse volumique apparente.



**Figure III.4.** Essai de masse apparente.

### III.2.2.2.2. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue [ $\rho_{Ab}$ ] est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains comme montre la figure II.5.

La formule qui nous permet la détermination de la masse volumique absolue est :

$$\rho_{Ab} = \frac{M}{(V_2 - V_1)} \quad (\text{III.2})$$

$\rho_{Ab}$ : Masse volumique absolue ;

M : Masse des grains solides ;

$V_1$  : Volume de l'eau ;

$V_2$  : Volume total (grains solides + eau).





Figure III.5. Essai de masse absolu.

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.56
Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.54
Module de finesse	2.36
Equivalent du sable visuel (%)	82
Absorption d'eau %	2.66

Tableau III.3. Caractéristiques du sable utilisé.

### III.2.3. L'eau de gâchage

Pour mélanger notre mortier, nous avons utilisé l'eau du robinet disponible dans notre laboratoire pédagogique de génie civil et hydraulique de l'Université 8 mai 1945 de Guelma. Cette eau doit être conforme à la norme NA 1966 [59]. Et ne doit pas contenir d'impuretés nocives telles que chlorure, sulfate, matière organique, nitrates, sodium (Na), sels de potassium (K) ... etc.

L'utilisation de l'eau potable dans les mortiers est considérée comme une pratique sécuritaire.

### III.2.4. Fibre de Diss

Le Diss (*Ampélodesmos Mauritanicus*, famille des poacées) est une herbe très répandue dans l'Afrique du Nord et les régions sèches de la Grèce à l'Espagne. Cette herbe est utilisée dans

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

la réalisation des habitations anciennes de ces régions en raison de ses qualités mécaniques et hydriques [60].



**Figure III.6.** Herbe de Diss.

Le Diss utilisé dans notre étude provient des montagnes de la ville de Guelma.

### III.2.5. Adjuvants

C'est un superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau « Meda Plast SP40 » à base d'Éther polycarboxylates, fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implantée à Oued SMAR, conforme à la norme EN 934-2. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0.6 à 2.5 % (en extrait sec) du poids de ciment [61].

Les caractéristiques de Meda Plast SP40 sont :

Aspect.....Liquide.

Couleur .....Marron.

PH.....8.2.

Densité.....  $1.2 \pm 0.01$ .

Teneur en chlore..... < 1g/ L.

Extrait sec .....40 %.

### III.2.6. Résine

La résine utilisée est une dispersion aqueuse synthétique (SIKALATEX) qui se présente sous la forme d'un liquide laiteux concentré, parfaitement durable, produit par la société SIKA. Sa densité est de 1kg/l. Il s'ajoute directement à l'eau de gâchage des mortiers hydrauliques [62]. Selon [63], la teneur en latex (résine) varie entre 10% et 20% par rapport à la masse de ciment.

Dans cette étude nous avons opté, dans une étape préliminaire, pour un dosage de 10% qui

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

nous a conduit à une maniabilité de 22 cm à la table à secousses correspondant à un mortier fluide. Après maintes tentatives par tâtonnement, nous avons fixé ce dosage à 7% (du poids de ciment) pour tous les mélanges correspondant à la maniabilité visée ( $16 \pm 2$ ) cm.



Figure III.7. Le Résine utilisé.

### III.3. Matériaux de traitement

#### III.3.1. Hydroxyde de sodium

Appelé également soude caustique, c'est un corps chimique composé minéral de formule chimique NaOH, qui est à température ambiante un solide ionique, fusible vers  $318^{\circ}\text{C}$ , il se présente généralement sous forme de pastilles, de paillettes ou de billes blanches ou d'aspect translucide, corrosives et très hygroscopiques. Il est très soluble dans l'eau et légèrement soluble dans l'éthanol. Nous l'avons utilisé dans ce travail pour traiter les granulats de Diss et améliorer ainsi l'adhérence granulats de Diss-mortier, les détails de traitement sont exposés dans la section III.8 qui suit.

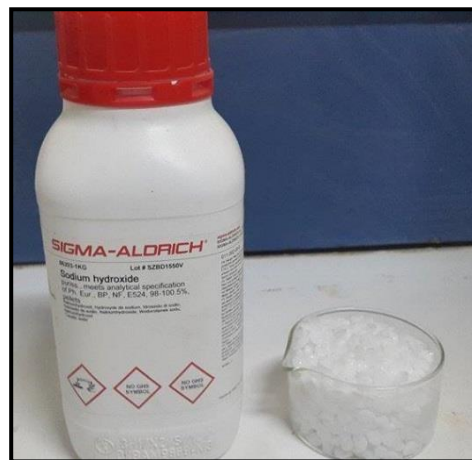


Figure III.8. Hydroxyde de Sodium (NaOH).

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

Composition	Quantités mg/kg
Chlorure Cl <sup>-</sup>	≤ 20
Phosphate PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	≤ 10
Silicate SiO <sub>2</sub>	≤ 100
Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	≤ 30
Al	≤ 10
As	≤ 2
Ca	≤ 10
Fe	≤ 10
Hg	≤ 1
K	≤ 1000
Pb	≤ 0.5

Tableau III.4. Composition chimique du NaOH utilisé dans ce travail [64].

### III.3.2. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

L'acide sulfurique (**formule III.3**) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



**Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau**

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O) moins soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. (**Formule III.4**) décrit la réaction

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte du ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [65].

### III.4. Méthodes expérimentales

#### III.4.1. Plan d'expériences adoptés

Pour aboutir à notre objectif fixé dans cette étude, c'est à dire l'étude du comportement d'un mortier renforcé par des fibres de Diss traitées par la solution NaOH, il faut tout d'abord choisir les facteurs et leurs niveaux de variation. Dans notre étude, nous considérons 4 facteurs et affectons 3 niveaux à chacun d'entre eux.

Ces facteurs sont : le pourcentage des fibres de Diss (%Diss), la longueur de ces fibres (L), le pourcentage de la solution de traitement (%NaOH) et le temps de traitement (T). Les niveaux de variation de chaque paramètre sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Pourcentage de fibres de Diss (%Diss) (%)	1	2	3
Longueur de fibres (L), (mm)	5	10	15
Pourcentage du NaOH (%NaOH) (%)	3	6	9
Temps de traitement (T), (mn)	30	60	90

**Tableau III.5.** Niveaux de variation des paramètres de l'étude.

A partir des données du tableau ci-dessus, un plan d'expériences sera adopté, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais permettant de varier les différents paramètres d'étude. Dans notre cas, un plan d'expérience de type Box-Behenken L27 sera adopté.

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

Run	Factor 1 A : % Diss	Factor 2 B : Longueur	Factor 3 C : % NaOH	Factor 4 D : Temps
1	2	10	6	60
2	2	10	3	30
3	1	5	6	60
4	2	5	6	90
5	1	10	6	90
6	1	10	6	30
7	1	15	6	60
8	3	5	6	60
9	2	15	6	30
10	2	15	9	60
11	3	15	6	60
12	3	10	3	60
13	2	5	9	60
14	2	10	6	60
15	2	10	6	60
16	2	10	9	90
17	3	10	9	60
18	3	10	6	90
19	2	15	3	60
20	2	15	6	90
21	2	5	6	30
22	2	5	3	60
23	1	10	9	60
24	2	10	3	90
25	2	10	9	30
26	3	10	6	30
27	1	10	3	60

Tableau III.6. Le plan d'expériences.

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

Dans ce tableau, chaque ligne correspond à une expérience à réaliser, donc il faut réaliser 27 essais, conformément aux données du tableau ci-dessus.

### III.4.2. Sélection et découpage des fibres

La sélection des fibres se base sur leur couleurs (vert et vert claire). Ensuite on se débarrasse des fibres qui possèdent n'importe quelle tache (blanche, noir, marron, etc.), afin de limiter les sources de dispersion des résultats.



**Figure III.9.** Le Diss choisie.

Le découpage des fibres s'effectue à l'aide d'une lame rasoir aux longueurs suivante : 5,10 et 15 mm.



**Figure III.10.** Les Sections De Découpage De DISS.



**Figure III.11.** La machine utilise.

Puis en poser le Diss dans un récipient pendant 24heures.

### III.4.2. Préparation des éprouvettes de traction

Plusieurs démarches sont faites pour optimiser les techniques de mesures avant d'adopter la

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

présente solution pour la détermination des différents paramètres.

Nous avons effectué des essais de traction sur des éprouvettes simples (des fibres découpées aux longueurs désirés). On a constaté que les fibres glissent ou s'écrasent selon l'effort de serrage au niveau des mors à cause de leur forme (la fibre de Diss se présente sous forme d'une feuille enroulée de forme circulaire ou parfois elliptique). Pour remédier à ces problèmes nous avons confectionné des talons aux extrémités des éprouvettes.



**Figure III.12.** Fibres de Diss découpées.

La résine de SIKALATEX est la plus adéquate pour l'élaboration des talons aux extrémités des éprouvettes. Nous avons préparé éprouvettes de chaque longueur citée précédemment.

### **III.4.3. Traitements des fibres**

#### **III.4.1. Traitements chimiques (traitement alcalin)**

Les fibres sont immergées dans une solution alcaline préparée à partir de la dissolution de 5 g de pastilles d'hydroxyde de sodium NaOH dans 95cm<sup>3</sup>d'eau distillée. Cette solution a donc une concentration de 5%. Des solutions de concentrations plus élevées ont un effet très néfaste sur les propriétés des fibres traitées. Ces dernières provoquent la modification de la structure moléculaire de la cellulose (rupture des chaînes de cellulose), ce qui entraîne la chute des propriétés mécaniques) [66].

Les temps de traitement sont 60min, 90min, et 120min selon différent pourcentage de NaOH (3%, 6%, et 9%).





**Figure III.13.** Préparation de la solution de NaOH.

L'élimination de l'excès de la soude adsorbée sur la surface de la fibre nécessite un rinçage avec de l'eau distillée. La neutralisation de l'effet de la soude caustique (NaOH) nécessite le rinçage des fibres avec de l'acide acétique dilué et finalement avec de l'eau distillée. Enfin les fibres sont séchées à la température ambiante et étuvées à  $60^{\circ}\text{C}$  pendant 24 H.

### III.5. Formulation des compositions

Formuler un mortier ou un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés physiques (ouvrabilité, ..... ) et mécaniques (résistance à la compression, ..... ) répondant à des critères techniques et économiques autorisent une meilleure application dans le domaine de la construction. Dans cette partie, nous avons adapter la méthode de formulation d'un mortier Normalisé.

Cette méthode se base sur une portion de ciment (450 g), trois portions de sable (1350 g), avec un rapport  $E/C = 0.5$  soit pour le mortier sans fibre de Diss, soit pour les trois autres mortiers à différent teneur en fibre (3%, 6%, 9%).

#### III.5.1. Confection des éprouvettes (malaxage et mise en place)

Dans ce travail nous avons confectionnés 17 éprouvettes pour le premier coulage et 28 éprouvettes pour le deuxième de dimensions (4 x 4 x 16)  $\text{cm}^3$  dans des moules de dimensions

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

respectives.

Ciment(g)	Sable(g)	Eau(g)
450	1350	225

**Tableau III.7.** Dosage de matériaux utilisé.

### III.5.1.1. Préparation de la pâte

#### III.5.1.1.1. Le malaxage des mortiers

Cette opération influe d'une façon notable sur le produit final. Pour les mortiers, le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 litres. La palette du malaxeur pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide). La séquence de malaxage est conforme à la norme (EN 196-1).

- Les composants secs (ciment, sable, fibre de diss) ont été introduits dans le malaxeur puis malaxés pendant 3 minutes à vitesse lente afin d'assurer une bonne dispersion des fibres.
- Après rajout d'une solution contenant 80% d'eau et de la totalité des deux adjuvants (SP), pour la deuxième série on ajoute la résine avec ses deux adjuvants et fait un malaxage à vitesse lente pendant 2 minutes.
- Les 20% restants de l'eau ont été introduits et le tout a été malaxé pendant 2 minutes à vitesse lente.
- Un malaxage à vitesse rapide a été finalement adopté jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène (environ de 2 à 3 minutes).

La consistance de  $16 \pm 2$  cm correspondant à un mortier plastique, déterminée par l'essai de la table à secousses conformément à la norme européenne EN 1015-6, a été vérifiée pour tous les mélanges.

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale



**Figure III.14.** Les étapes pour préparer la pâte de mortier avec différent pourcentage de fibre de

### III.5.1.2. Confection des éprouvettes

À effectuer immédiatement après préparation du mortier.

- Les moules sont bien nettoyés, et bien montés.
- Enduire les parois latérales des moules d'une légère couche d'huile de décoffrage avant chaque confection des éprouvettes .
- Introduire la première des deux couches de mortier dans chaque compartiment.
- Etaler la couche en utilisant la plus grande spatule tenue verticalement.
- Serrer la première couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine).
- Introduire la seconde couche de mortier.
- Etaler la couche en utilisant la petite spatule tenue verticalement.
- Serrer la deuxième couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine).
- Ôter la hausse et enlever l'excédent de mortier avec la règle plate à araser.
- Etiqueter les moules pour identifier les éprouvettes (noms, date, caractéristiques).

### III.5.1.3. Conservation des éprouvettes



**Figure III. 15.** Confection des éprouvettes.

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

- Poser une plaque en verre ou en acier sur le périmètre du moule.
- Placer le moule dans une pièce humide pendant 24 heures.
- Démouler ensuite les éprouvettes avec précautions et marquer les éprouvettes.
- Conserver les éprouvettes dans l'eau à 20°C (Figure III.16).



Figure III.16. Conservation des éprouvettes.

### III.6. Techniques expérimentales

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés physico mécaniques et de durabilité des mortiers d'étude en faisant varier le pourcentage de NaOH et la longueur de fibre de Diss en comparant ceux-ci aux propriétés des mortiers témoins à différentes échéances d'âges.

#### III.6.1. Caractéristiques physico-mécaniques

##### III.6.1.1.A l'état frais

Nous décrivons dans ce qui suit l'essai de la table à secousses qui nous a permis de mesurer la consistance des éco-mortiers d'étude afin de la contrôler. Nous avons en effet opté pour la confection d'éco-mortiers ayant des consistances semblables.

Cet essai d'étalement (Figure 2.13) est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton et mortier à s'étaler par écoulement [67]. La consistance de tous les mortiers étudiés dans ce travail a été évaluée conformément à la norme européenne EN 1015-3 [68].

La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée.

Le moule tronconique de diamètre inférieur 100 mm, de diamètre supérieur 70 mm et de hauteur 60 mm est placé au centre de la table et après rempli de mortier. Le remplissage se fait en deux couches, chacune étant compactée avec 10 coups de bâton en pilon pour homogénéiser la matière dans l'embase tronconique. L'échantillon est retiré au moyen d'une règle en acier. Le moule est soulevé lentement et verticalement et la table à secousses est actionnée par 15 secousses à une cadence d'une par seconde est appliquée au mortier. Puis l'étalement de l'échantillon est mesuré à 2 endroits diamétralement opposés (Figure III.17). L'étalement est calculé par une moyenne de deux diamètres  $D_1$  et  $D_2$  en mm  $D_1$  et  $D_2$  sont respectivement le diamètre de la galette.



Figure III.17. L'essai de la table de secousse.

Les valeurs sont arrondies au millimètre près. Pour chacun des mortiers, 3 points de mesure sont effectués et une moyenne permet de définir le diamètre d'étalement du mortier.

Consistance d'utilisation	Valeurs d'étalement
Mortier raide	< 14 mm
Mortier plastique	Entre 140 et 200 mm
Mortiers fluide	> 200 mm

Tableau III.8. Valeurs d'étalement NF EN 1015-6 [69].

### III.6.1.2. L'état durci

#### III.6.1.2.1. Mesure des résistances mécaniques

Les résistances mécaniques en compression et en flexion ont été déterminées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Après conservation dans l'eau pendant

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

28 jours, elles sont séchées dans une étuve ventilée à 70°C jusqu'à masse constante, avant d'être soumises aux essais. Les essais mécaniques normalisés ont été réalisés aux échéances de 28 jours de façon à observer l'évolution progressive des performances.

### III.6.1.2.1.1. Résistance à la traction par flexion

Pour chaque échéance, trois échantillons ont été testés en flexion simple sur une machine d'essais de résistance à la flexion (3 points) de marque "CONTROLS" permettant d'appliquer des charges jusqu'à 50KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s. Les mesures sont effectuées sur une presse qui répond aux normes EN 196-1 et NF EN 1015-11 [70,71].

Les Figures III.18 et III.19 qui suivent décrivent les essais de résistances réalisés dans ce travail.

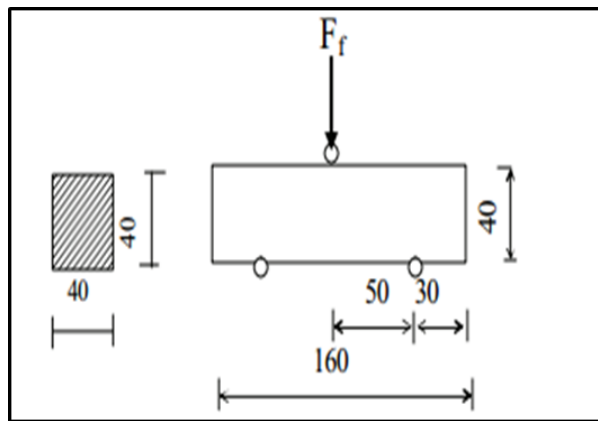


Figure III.18. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.



Figure III.19. L'essai de la flexion.

Figure III.20. Distribution des fibres.

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $F_f L/4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1,5f F_f L}{b^3} \quad (\text{III.5})$$

$F_f$  : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

L: La distance entre les appuis ( $L = 100$  mm).

b: Le coté de la section carrée de l'éprouvette ( $b = 40$  mm).

Si  $F_f$  est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) vaut :

$$R_f(\text{MPa}) = 0,234 F_f(\text{N}) [72].$$

### III.6.1.2.1.2. Résistance à la compression

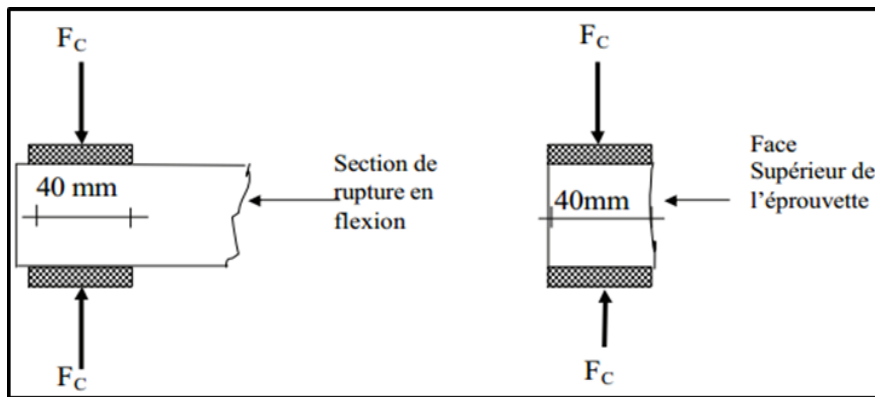
L'essai de compression simple est l'un des plus significatifs pour caractériser la qualité d'un mortier. Cet essai s'effectue par chargement monotone jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Pour l'essai de résistance en compression, la presse hydraulique utilisée est du type Contolab, d'une capacité de 1500 KN conforme à la norme EN 196-1 et NF EN 1015-11 [70,71], avec une vitesse de mise en charge de  $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ . Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion ont été rompus en compression comme indiqué sur la Figure III.22.

L'éprouvette est placée au milieu du plateau de la presse comme le montre la Figure III.21, la surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de  $16 \text{ cm}^2$  ( $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ).



**Figure III. 21.** L'essai de la compression sur des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ .



**Figure III.22.** Dispositif de rupture en compression.

La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, elle est calculée selon l'expression suivante. La valeur prise en compte est la moyenne de trois mesures pour chaque composition.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{III.6})$$

$R_c$  : Résistance à la compression en (MPa).

$F_c$ : Charge de rupture en (N).

$b$  : Côté de l'éprouvette cubique (40 mm).

Si  $F_c$  est exprimée en newton, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{III.7})$$

### III.6.1.2.2. Essais d'auscultation dynamique

La vitesse sonique est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le mortier résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le mortier. Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le mortier. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion [73].



## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

Cet essai est réalisé conformément à la spécification de la norme NF EN 12504-4 [74]. Il est effectué sur des éprouvettes cylindrique (4×4×16) cm<sup>3</sup> conservées dans l'eau pendant 28 jours et séchées à l'étuve à température de 60°C jusqu'au masse constante.

La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de gel de contact est indispensable.

Un train d'ondes longitudinales (54KHz) est produit par un transducteur (émetteur) électro-acoustique maintenu au contact d'une surface du mortier soumis à l'essai. Après avoir parcouru une longueur connue dans le mortier, le train de vibrations est converti en signal électrique par un deuxième transducteur (récepteur), et des compteurs électroniques de mesure du temps permettent de mesurer le temps de parcours de l'impulsion.

Après avoir actionné l'appareil on lit le temps de propagation en microseconde (μsec). La distance entre les têtes doit être connue avec une précision de 1% pour calculer la vitesse de propagation à l'aide de l'expression suivante :

$$v = \frac{L}{T} \quad (\text{III.8})$$

V : La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le mortier en m/sec.

L : La distance entre les têtes en m.

T : Le temps de propagation en μsec.

A partir de la vitesse de propagation du son, on peut déterminer quelques paramètres intéressants comme le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression.

### III.6.1.2.3. Module d'élasticité dynamique $E_{\text{dyn}}$

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique  $E_{\text{dyn}}$  selon l'expression suivante :

$$E_{\text{dyn}} = V^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{III.9})$$

V : vitesse du train d'ondes (m/s).

$\rho$  : masse volumique apparente des éprouvettes (kg/m<sup>3</sup>).

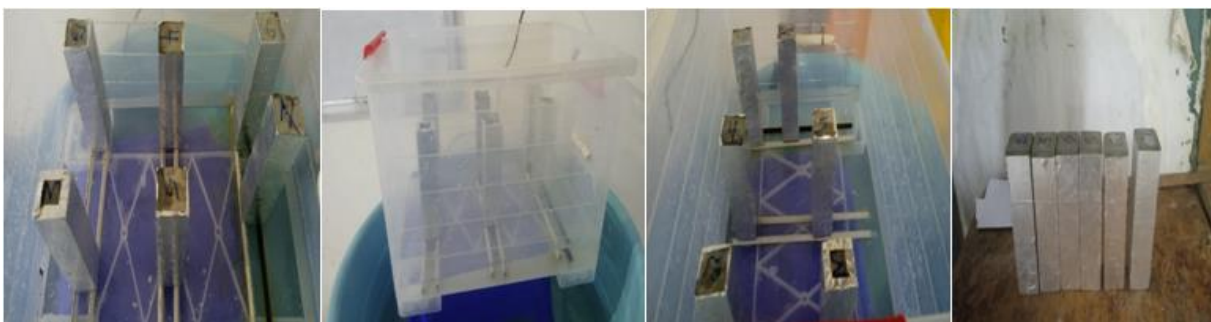
$\nu$  : le coefficient de poisson, on prendra  $\nu = 0.3$ , valeur usuelle pour les mortiers.

### III.6.1.2.4. Absorption d'eau par capillarité

La mesure de la sportivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. Plus la sportivité est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide de contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

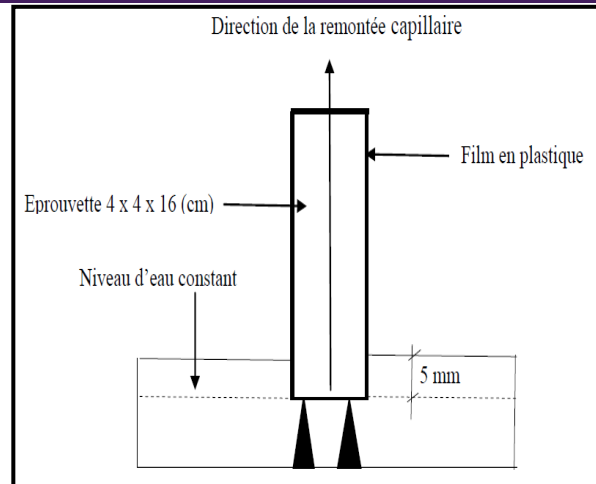
Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. L'essai renseigne globalement sur les structures et sur l'importance du réseau capillaire. Il est utilisé en complément à d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton et du mortier.

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5 [75] et consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps. Le taux d'absorption par remontée capillaire due à la force de succion d'une éprouvette prismatique de mortier  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  posée à sa base sur des petits supports (non absorbants) dans un bac à eau de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par un film plastique sur toutes les autres faces afin d'obtenir un écoulement unidirectionnel, le bac d'eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau permet de maintenir le niveau d'eau constant tout le long de l'expérience (Figure III.23).



**Figure III.23.** L'essai de capillarité sur des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ .

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale



**Figure III.24.** Schéma du dispositif expérimental.

Puis on procède à de relevés de masses successifs à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g sur des intervalles de temps très courts au début puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience (1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 1h, 2h, 4h, 8h jusqu'à 24h). A chaque échéance, l'éprouvette prismatique séchée préalablement à l'étuve (105 °C) jusqu'à masse constante, est sortie du récipient, essuyée légèrement puis pesée ( $M_j$ ) et replacée dans le récipient en position verticale.

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré, par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S} \text{ (En g/mm}^2\text{)} \quad \text{(III.10)}$$

Avec :

$M_0$  : Masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes.

$M_j$  : Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.  $S$  : Section de la base de l'éprouvette en millimètre carré, c'est-à-dire 1600 mm<sup>2</sup>.

Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes de chaque type du mortier sont exprimés sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

Le coefficient de sorptivité  $S$  (mm / s<sup>1/2</sup>) a été déterminé mathématiquement selon Hall [76] en utilisant l'équation suivante :

$$i = S \cdot t^{1/2} + i_0 \quad (\text{III.11})$$

Où :

$i = \frac{W}{A}$  : Volume cumulé d'eau absorbée (W) par rapport à la section transversale (A). Il a une dimension de profondeur ( $\text{mm}^3 / \text{mm}^2$  ou mm).

$i_0$  : Coefficient empirique qui dépend de la finition de surface de l'échantillon. Il correspond au remplissage instantané des pores en contact avec l'eau.

t : Temps (s).

S : Coefficient de sorptivité ( $\text{mm/s}^{1/2}$ ).

Les résultats d'essais sur différents mortiers sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps.

### III.6.2. Durabilité

#### III.6.2.1. Essais d'attaque par les sulfates et les acides

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatiques.

La résistance vis-à-vis de notre attaque chimique a été déterminée sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  confectionnées selon la norme NF EN 196-1.

Après la durée de cure sous l'eau pendant 28 jours (temps zéro), les éprouvettes de mortier sont pesées pour déterminer la masse ( $M_1$ ) avant d'être soumises à l'immersion dans plusieurs types de solutions d'attaque. Elles ont été placées dans des bacs séparés (Figure 2.26) pendant 7 jours, 15 jours, 21 jours et 28 jours.

La solution utilisée est : une solution d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de concentration 5% et un pH = 1, une solution du sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de concentration 5% et de pH = 11. [77].

Cette concentration est souvent choisie dans la littérature. L'utilisation des faibles concentrations demanderait plus de temps d'investigation, c'est pourquoi le choix s'est porté sur celle de 5% qui représente le seuil maximal pour un milieu très agressif.

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

---

Les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis séchées pendant ½ heure avant d'être replongées dans des solutions d'attaque renouvelées. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières ( $M_2$ ), la balance utilisée était de précision 0,01 gramme et fait l'ultrason sur eux et la solution d'attaque est renouvelée tout le mois chaque 7 jours (selon la valeur du pH).

Le degré de l'attaque d'acide sulfurique  $H_2SO_4$  a été déterminé conformément à la norme ASTM C 267-96 [78]. Il a été évalué à partir de la perte de poids selon la formule :

$$\text{Perte de poids (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (\text{III.12})$$

## CHAPITRE III : Matériaux utilisés et procédure expérimentale

$M_1$  et  $M_2$  sont les masses des éprouvettes avant et après immersion respectivement.



Figure III.25. Mortier de référence.



Figure III.26. Les formulations dans NaOH après 7j, 14j, 21j et 28j.

### III.6.2.2. Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la norme NF EN 18-459 [79]. Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pâtes de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. Elle est calculée grâce à la différence de masse entre un échantillon à l'état sec et ce même échantillon à l'état saturé.

Cette méthode (pesée hydrostatique) présentée dans la figure III.27 étant certainement la plus simple parmi toutes celles permettant d'accéder aux différents indicateurs de durabilité, les spécifications proposées sont préférentiellement basées sur la porosité à l'eau. L'essai comprend les étapes suivantes :

#### III.6.2.2.1. Pesée hydrostatique

Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision de 0.01 g) pour obtenir  $M_{\text{eau}}$  de l'éprouvette immergée dans l'eau.



Figure III.27. Pesée hydrostatique.

### III.6.2.2.2. Pesée à l'air

Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement et superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse  $M_{\text{air}}$  de l'éprouvette imbibée. Pour mieux caractériser un mortier, l'essai est réalisé sur trois échantillons.



Figure III.28. Pesée à l'air.

### III.6.2.2.3. Pesée à sec

S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de 65°C jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05 %. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche  $M_{\text{sec}}$ .

On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau  $P$  :

$$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})}$$

### III.7. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude. Par ailleurs, nous avons détaillé les différentes méthodes de traitement appliquées aux fibres végétales,

Nous avons également montré les protocoles d'essais utilisés dans cette recherche pour la détermination des propriétés physiques (masse volumique, porosité, absorption d'eau), mécaniques (résistance à la compression et de traction par flexion) et des composites cimentaires renforcés avec les fibres végétales.



# **Chapitre**

## **IV**

---

**Présentation et interprétation des résultats**

---

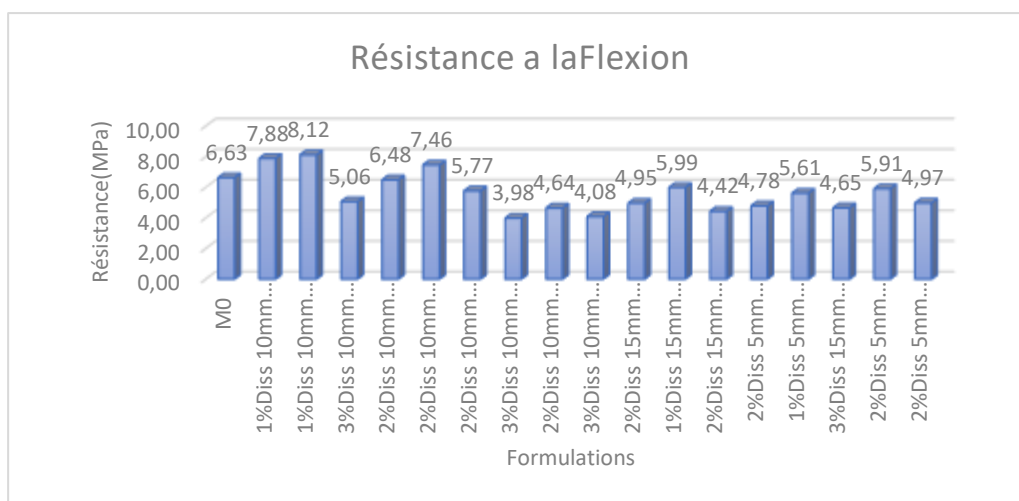
## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, Nous présenterons les résultats des différents essais réalisés sur les mortiers renforcés par des fibres traitées. L'objet du présent chapitre est de mettre en évidence les caractéristiques mécaniques et les propriétés physiques de mortier formulé. Ces propriétés sont aujourd'hui des critères incontournables pour valider la valorisation d'un sous-produit ou dans le domaine des matériaux de construction.

## IV.2. Caractéristiques mécaniques

### IV.2.1. Résistance à la traction par flexion

Généralement, l'introduction de fibres dans le béton ou le mortier augmente la résistance à la flexion. La Figure IV.1 présente l'évolution des résistances en flexion des mortiers à base de ciment en fonction de la teneur en fibres de Diss. Les résultats montrent que la résistance à la traction par flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Cependant, la résistance à la traction par flexion à 28 jours des mortiers renforcés par les fibres traitées de Diss a augmenté d'environ 22,47% par rapport au mortier témoin pour une teneur optimale en fibres de 1%. La résistance maximale à la traction par flexion est obtenue avec une formulation composée de 1% de fibres de 10mm de longueur traitée avec 6% de NaOH pendant une durée de 30 minutes ( $R_f = 8,12$  MPa), tandis que la résistance du mortier témoin est de 6,63 MPa.



**Figure IV.1.** Résistance à la compression des mortiers renforcés de fibres de Diss.

Alors que pour les mortiers renforcés avec 2% de fibres traitées la résistance à la traction par flexion augmente de 12,52% par rapport à celle du mortier témoin. Cette augmentation est

## CHAPITRE IV : Présentation et interprétation des résultats

---

enregistrée avec une formulation composée de 2% de fibres de 10mm de longueur traitée avec 3% de NAOH pour une durée de 30 mn ( $R_f=7.46$  MPa).

Nous constatons aussi que, l'augmentation du pourcentage des fibres de Diss a 3% a provoqué une diminution de résistance de 23.68%, cette maximale diminution est obtenue avec un mortier composé de 3% de fibres de 10mm de longueur traitée avec 6% de NAOH pour une durée de 90 mn ( $R_f=5.06$  MPa).

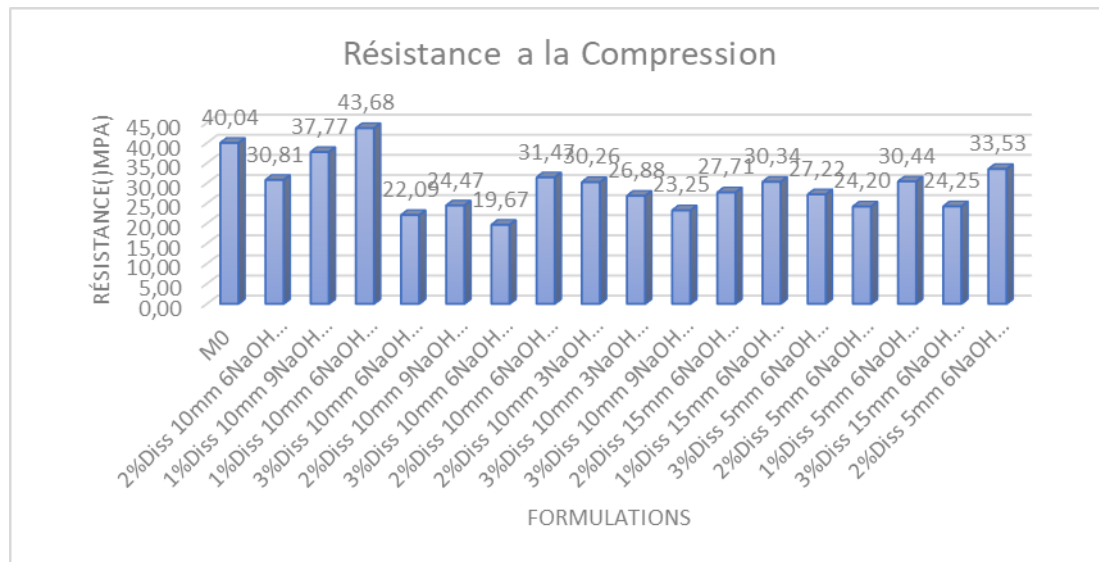
Ces résultats sont directement influencés par les pourcentages de fibres et du type de traitement (NAOH). En effet, en plus du pourcentage des fibres, ce comportement est lié à l'effet du traitement chimique des fibres qui élimine les matériaux amorphes à la surface extérieure de la fibre produisant une surface propre et rugueuse ce qui améliore l'interverrouillage et l'adhérence interfaciale entre la fibre et la matrice cimentaire, induisant une augmentation de la résistance à la traction des mortiers cimentaires à base de fibres traitées [64] [65]. [1] [2].

Pour étudier l'effet de chaque facteur (% des fibres, longueur, %NAOH et le temps de traitement), une étude statistique des résultats est indispensable afin de quantifier l'influence de chaque facteur sur la résistance à la flexion. Cette étude sera abordée dans le prochain chapitre.

### IV.2.2. Résistance à la compression

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes avec différentes longueurs et pourcentages de fibres en masse, conformément au plan d'expériences adopté (L27), pour étudier l'influence des facteurs de renforcement sur la résistance en compression. La figure IV.2 montre l'effet de la longueur et du pourcentage de fibres de Diss traitées sur la résistance en compression. La résistance du mortier témoin est de 40,04 MPa.

On constate que la résistance à la compression à 28 jours des mortiers renforcés par les fibres traitées de Diss a augmenté d'environ 5,71% par rapport au mortier témoin pour une teneur optimale en fibres de 1%. La résistance maximale à la compression est obtenue avec une formulation composée de 1% de fibres de 10mm de longueur traitée avec 6% de NaOH pendant une durée de 30 minutes ( $R_c=43,68$  MPa). Cependant, pour les mortiers renforcés avec 2% de fibres traitées, la résistance à la compression diminue de 19,41% avec une formulation de 2% de Diss, 5mm de longueur, 6% de NaOH et 30 minutes de traitement. De plus, on observe une diminution de 47,09% avec une formulation de 3% de Diss, 5mm de longueur, 6% de NaOH et 60 minutes de traitement.



**Figures IV.2.** Résistance à la compression des mortiers renforcés de fibres de Diss.

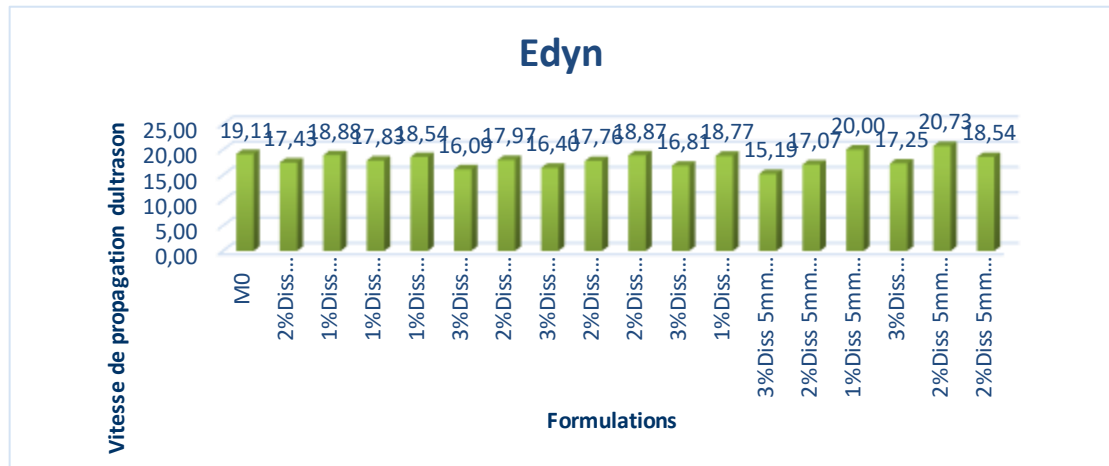
Les résultats montrent que plus le taux d'inclusion de ces fibres végétales dans les mortiers étudiés est élevé, plus la résistance à la compression des composites produits diminue. Selon de nombreux chercheurs [3, 4, 5], l'inclusion de fibres végétales a un effet négatif sur la résistance à la compression des matériaux cimentaires.

Par exemple, dans leur étude, Kriker et al. (2005) [3] ont mentionné que la résistance à la compression diminuait à mesure que la teneur en fibres et leur longueur augmentaient.

#### IV.2.4. Vitesse de propagation des ultrasons et module d'élasticité dynamique

Dans la figure IV.3 qui suit, nous présentons l'ensemble des résultats des essais expérimentaux réalisés sur les éco-mortiers étudiés à l'âge de 28 jours. Les observations suivantes peuvent être relevées :

La vitesse moyenne du mortier de référence après 28 jours est de 3373,28 m/s. Les ondes doivent contourner les bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment, ce qui augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Les vitesses de propagation des ultrasons sont plus élevées lorsqu'il s'agit d'éprouvettes contenant 2% de Diss, 5mm de longueur, 3% de NaOH, et 60 minutes de traitement, avec une valeur du module d'élasticité dynamique de 20,73 GPa.



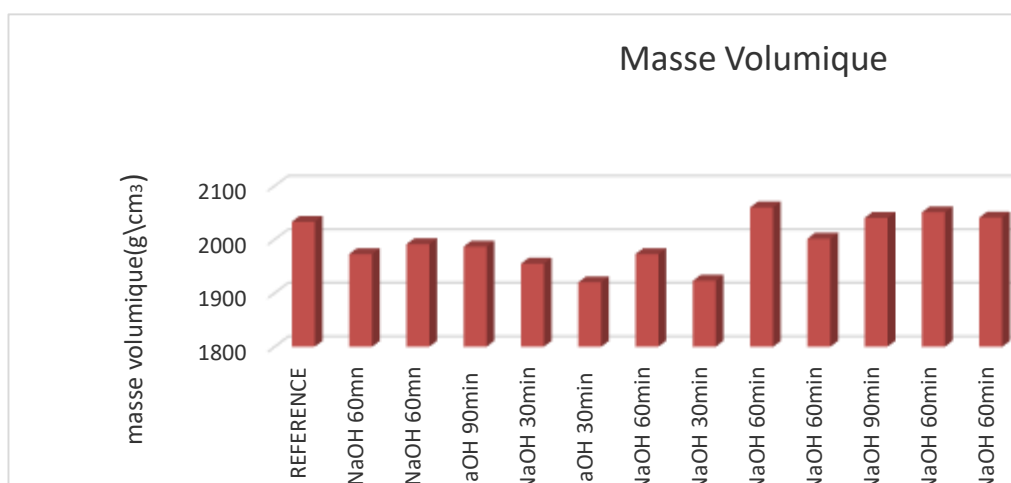
**Figure IV.3.** Vitesse de propagation d'ultrasons des mortiers.

Concernant le module dynamique relevé sur 1% de Diss, la valeur maximale obtenue est de 20 GPa avec une formulation de 1% de Diss, 5mm de longueur, 6% de NaOH, et 60 minutes de traitement. Le module obtenu pour 3% de Diss est de 18,57 GPa avec une formulation de 3% de Diss, 10mm de longueur, 3% de NaOH, et 60 minutes de traitement. Selon nous, l'effet du pourcentage de traitement et la longueur de Diss est la principale raison de cette augmentation.

## IV.3. Propriétés physiques

### IV.3.1. Masse volumique à sec

Les mesures des masses volumiques sèches ont été effectuées après séchage des éprouvettes dans une étuve régulée, jusqu'à masse constante. L'évolution de la masse volumique sèche pour les différentes séries est illustrée sur la figure IV.4.

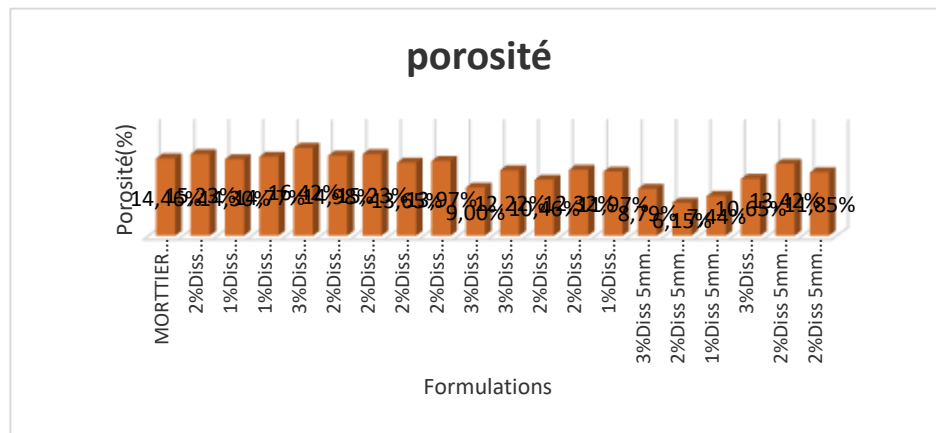


**Figures IV.4.** La masse volumique des mortiers renforcés de fibres de Diss.

## CHAPITRE IV : Présentation et interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que plus le volume des fibres augmente, plus les masses volumiques diminuent et les composites deviennent plus légers. La masse volumique du mortier témoin est de  $2000 \text{ kg/m}^3$ , et pour chaque formulation, la masse volumique la plus élevée correspondait à une teneur en fibres de 2% sur la base des résistances mécaniques. Des recherches antérieures ont attribué cette diminution à l'augmentation du nombre de défauts et à la non-uniformité de la distribution des fibres.

### IV.3.2. Porosité accessible à l'eau



Figures IV.5. Porosité accessible à l'eau.

Les résultats des mesures expérimentales réalisées sur des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16$  cm et présentés dans la Figure IV.5 indiquent globalement une augmentation de la porosité avec l'augmentation du taux de fibre de Diss par rapport au mortier de référence. Concernant les mortiers de référence les résultats donnent 14,46%. On peut constater que l'augmentation est de l'ordre 16,42 puis 15,23 et 14,77% en comparaison avec le mortier de référence pour les taux de fibre de Diss de 3%, 2 % et 1% respectivement.

### IV.3.3. Absorption d'eau par capillarité

La quantité d'eau absorbée par un matériau composite lors de son immersion dans l'eau pendant une durée déterminée est appelée eau d'absorption. Cette technique est utilisée pour déterminer la susceptibilité aux infiltrations d'eau à travers les pores du composite insaturé lors de l'immersion dans l'eau, celle-ci est affecté par les pores (vides) dans le composite [6].

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité sur les différents mortiers étudiés sont présentés sous forme de droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps dans la figure IV.6. Il apparaît que l'absorption d'eau "i" des mortiers d'étude (par unité de surface) augmente avec la racine

## CHAPITRE IV : Présentation et interprétation des résultats

carrée du temps aux différentes échéances d'après la figure IV.6.

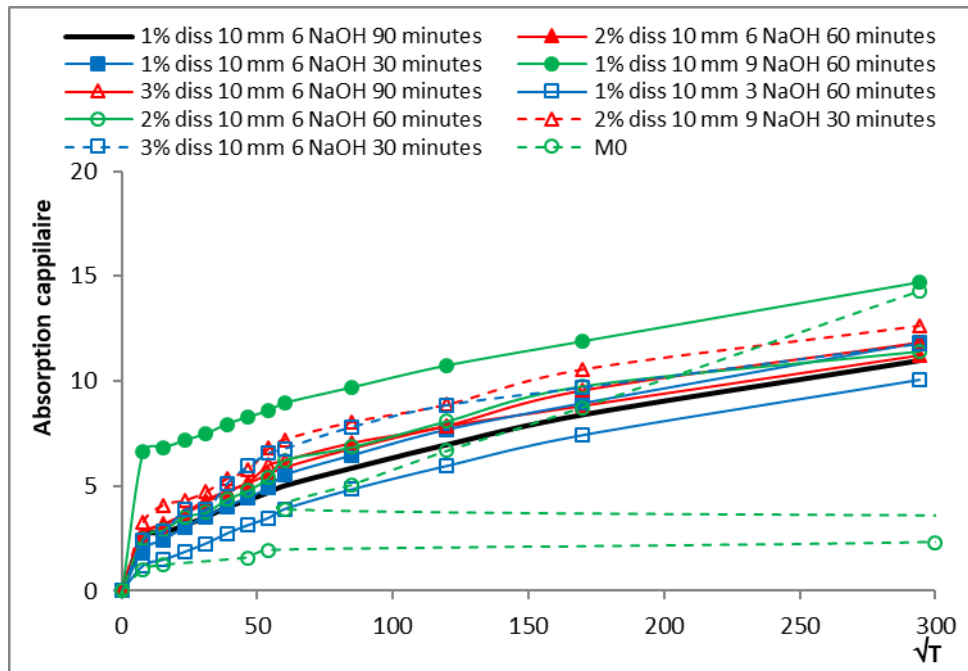


Figure IV.6. Absorption capillaire.

D'après la figure IV.6, une augmentation de l'eau absorbée est observée lorsque le pourcentage de fibre de Diss diminue. La formulation de 1% de Diss, 10mm de longueur, 6% NaOH, et 60 minutes de traitement a la valeur maximale par rapport au mortier témoin.

### IV.4. Durabilité

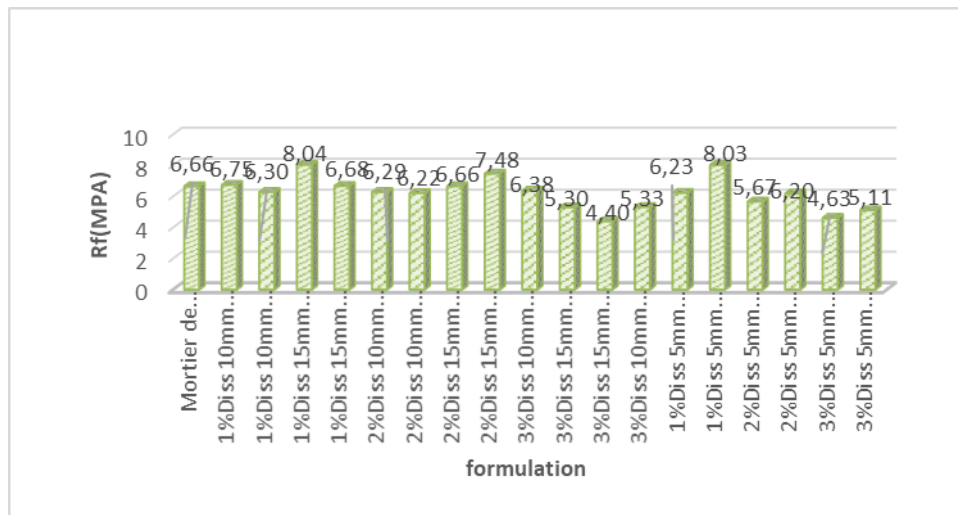
#### IV.4.1. Propriétés mécaniques des mortiers fibrés après vieillissement naturel

Les éprouvettes de mortiers chargés par des différentes natures et pourcentage et longueurs des fibres végétales sont conservés après démoulage dans l'eau pendant 28 jours puis sont conservée dans le milieu agressif pendant aussi 28 jours.

#### IV.4.2. Résistance après immersion

##### IV.4.2.1. Résistance à la traction par flexion

Les fibres ont un rôle très important dans l'amélioration de la résistance à la traction par flexion et la limitation par propagation des fissures du mortier de fibres en traction, surtout après l'apparition de la première fissure.



**Figure IV.7.** Résistance à la traction par flexion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

On remarque que la meilleure valeur de résistance en traction par flexion égale 8,04 MPa avec une formulation de 1% de fibre 15mm de longueur, 9% de NaOH et 90 min de traitement. Alors que pour 2% on constate 7,48MPa pour une formulation de 2% de Diss, 15mm de longueur, 3% NaOH, et 120 minutes. Mais pour 3% on constate une diminution par rapport au mortier de référence ( $R_f=6,38$ MPa) avec une formulation de 3% de Diss, 10mm, 6%NaOH, et 60 minutes. La résistance à la traction par flexion du mortier de référence est 6,66 MPa.

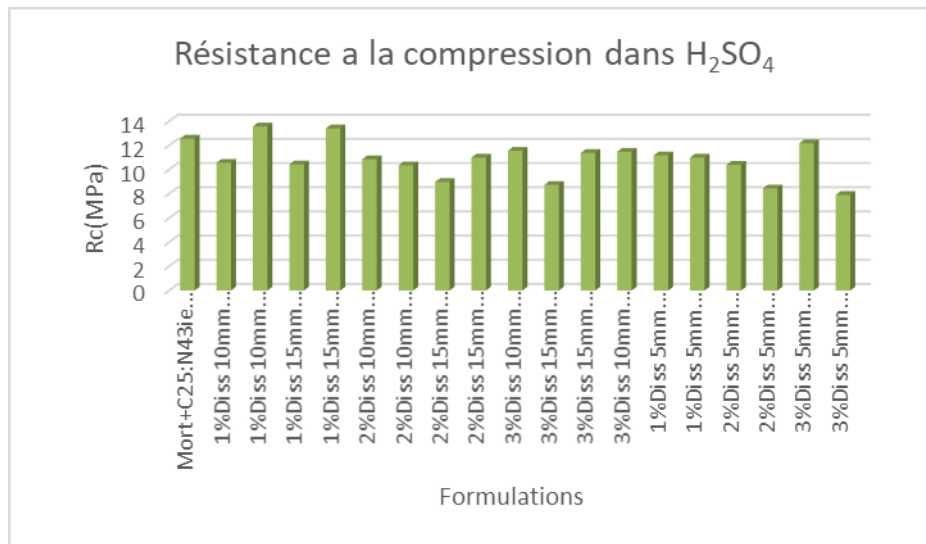
Le comportement en flexion du mortier de fibre est largement influencé par la longueur, la durée de traitement, et le pourcentage de NaOH.

#### IV.4.2.2. Résistance à la compression

Le comportement du mortier ou béton placé dans un environnement chimiquement agressif dépend de facteurs complexes et multiples liés d'une part, à l'environnement (nature, concentration, renouvellement), d'autre part, à la matrice cimentaire elle-même (nature et dosage des constituants). Les environnements maritimes sont parmi les milieux naturels les plus agressifs vis-à-vis des matériaux cimentaires.

D'après la figure, nous remarquons que le mortier de 1% de renforcement par fibres présente la meilleure résistance à la compression par une valeur de 13,57MPa avec une formulation de 1% de Diss, 10mmde longueur, 3% NaOH, 120 minutes. La résistance du mortier témoin est 12,57 MPa.





**Figure IV.8.** Résistance à la compression dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

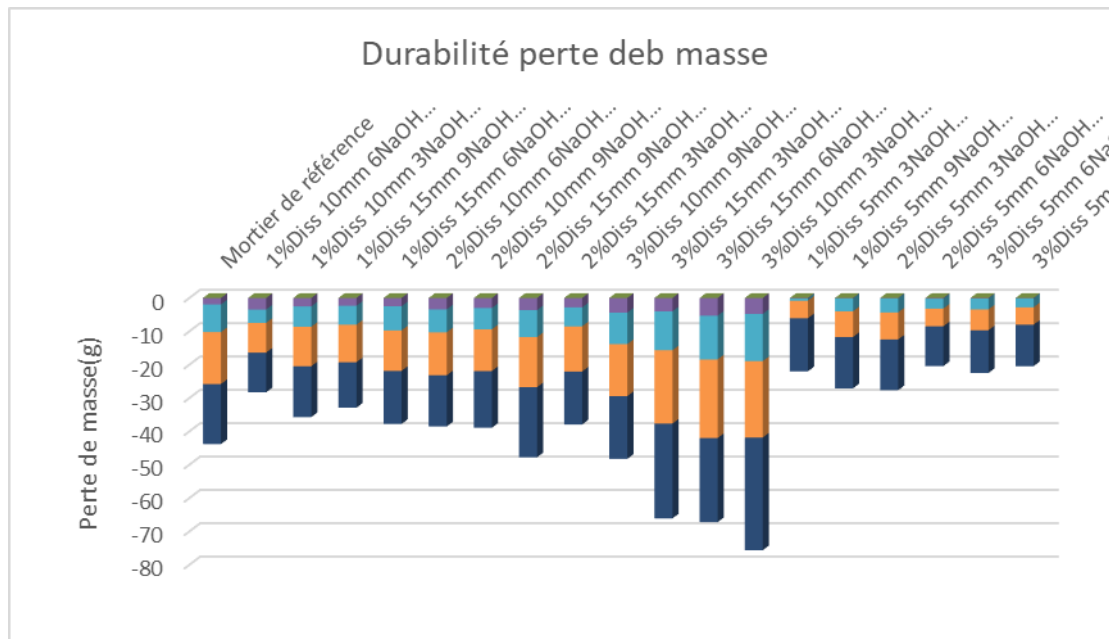
On constate que les mortiers de 2% de Diss et 3% présente une évolution négative de la résistance à la compression avec une formulation de 2% de Diss 5mm de longueur 3% de NaOH 120 minute (Rc=11MPa) et 3% de Diss 5mm, 6% NaOH et 60 minutes (Rc=12,18MPa), le mortier sans fibre reste le plus résistant que le 2% et 3% de Diss.

Nous remarquons aussi que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de pourcentage des fibres.

### IV.4.1.3. Durabilité perte de masse

En examinant la progression des courbes de perte de poids des mortiers, il est observable une diminution de masse permanente pour ceux qui ont été immergés dans une solution d'acide chlorhydrique à une concentration de 5% et dans une solution basique également à une concentration de 5%.

La dégradation la plus importante est observée dans le mortier traité avec 3% de Diss, 10mm de longueur de fibre, 3% de NAOH, et un temps de traitement de 120 minutes. Après une immersion de 28 jours en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, il perd 46,71% de son poids par rapport au mortier de référence. En revanche, pour un mortier traité avec 1% de Diss, 5mm de longueur de fibre, 3% de NAOH, et un temps de traitement de 60 minutes, la perte de poids diminue à seulement 13,06% du poids du mortier de référence sur la même période de 28 jours d'immersion en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



**Figure IV.9.** Perte de poids des mortiers.

Pour un mortier traité avec 2% de Diss, 15mm de longueur de fibre, 9% de NAOH, et un temps de traitement de 60 minutes, la perte de poids est de 14,40% du poids du mortier de référence. La variation de la perte de poids du mortier de référence après 28 jours est de -18,01. Ces résultats indiquent que la perte de masse du mortier dépend principalement de la longueur de la fibre.

### IV.5. Conclusion

En conclusion, les fibres ont un rôle crucial dans l'amélioration de la résistance à la traction par flexion et la limitation de la propagation des fissures dans le mortier en traction, surtout après l'apparition de la première fissure. La meilleure valeur de résistance en traction par flexion a été obtenue avec une formulation de 1% de fibre de 15mm de longueur, 9% de NaOH et 90 minutes de traitement. En revanche, la résistance à la traction par flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibre. Pour ce qui est de la résistance à la compression, le mortier de 1% de renforcement par fibres présente la meilleure résistance, tandis que la résistance diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Les résultats suggèrent que le comportement en flexion du mortier de fibre est fortement influencé par la longueur, la durée de traitement et le pourcentage de NaOH. En ce qui concerne la durabilité, une diminution de masse permanente est observable pour les mortiers immergés dans une solution d'acide chlorhydrique et dans une solution basique. La perte de masse du mortier dépend

## CHAPITRE IV : Présentation et interprétation des résultats

---

principalement de la longueur de la fibre. Ces résultats montrent l'importance de considérer les effets des fibres et des traitements chimiques sur les propriétés des matériaux à base de ciment pour leur utilisation dans des environnements chimiquement agressifs tels que les milieux maritimes.

# Chapitre V

---

**ETUDE STATISTIQUE ET OPTIMISATION**

---

### V.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu seulement, les résultats expérimentaux qui seront utilisés par la suite. Nous évaluons l'influence des facteurs considérés dans cette étude, à savoir le pourcentage de Diss (% Diss), sa longueur (L), le % de NaOH (%NaOH) et la durée de traitement des fibres de Diss (T), sur les réponses étudiées, à savoir la résistance à la flexion à 28 jours ( $R_f$ ), la résistance à la compression à 28 jours ( $R_c$ ) et le module élastique dynamique ( $E_{dyn}$ ). Nous utilisons pour cela une analyse de variance ANOVA avec le logiciel "Design-Expert V10" pour identifier les facteurs les plus significatifs. Ensuite, nous utilisons des modèles mathématiques pour exprimer la relation entre les facteurs d'entrée et les différentes réponses, afin de déterminer le meilleur régime répondant à certains critères d'optimisation. Enfin, nous menons l'optimisation des meilleures valeurs des facteurs d'entrée en utilisant la méthode d'optimisation basée sur la fonction de désirabilité, pour obtenir des conditions optimales pour la fabrication du mortier renforcé aux fibres de Diss. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à améliorer la performance des matériaux de construction et à réduire les coûts de production.

### V.2. Résultats utilisés

Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau V.1. Ces résultats ont été obtenus en suivant le plan d'expérience de Box-Behnken, qui comprend 27 essais avec 4 facteurs à 3 niveaux (L27). Ce plan d'expérience permet une évaluation efficace de l'influence des facteurs sur les réponses étudiées, tout en minimisant le nombre d'essais requis. Les résultats obtenus fournissent ainsi une base solide pour l'analyse statistique et l'optimisation des facteurs clés de l'étude par la suite.

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

Run	A : % Diss (%)	B : L (mm)	C : % NaOH (%)	D : T (mn)	Rf (MPa)	Rc (MPa)	Edyn (GPa)
1	2	10	6	60	6,52	30,81	17,43
2	2	10	3	30	7,46	31,6	18,31
3	1	5	6	60	5,61	30,44	20
4	2	5	6	90	4,78	25,13	17,07
5	1	10	6	90	7,53	42,97	17,94
6	1	10	6	30	8,12	43,68	18,54
7	1	15	6	60	5,99	30,34	18,77
8	3	5	6	60	5,01	27,22	15,19
9	2	15	6	30	4,93	27,71	18,2
10	2	15	9	60	4,97	23,5	18,09
11	3	15	6	60	4,65	20,52	17,25
12	3	10	3	60	3,98	23	18,57
13	2	5	9	60	5,33	33,36	18,59
14	2	10	6	60	6,48	31,47	18,46
15	2	10	6	60	5,21	28,17	17,76
16	2	10	9	90	4,64	26,85	18,87
17	3	10	9	60	4,08	21,7	16,81
18	3	10	6	90	5,06	22,09	16,09
19	2	15	3	60	4,42	28,79	19,26
20	2	15	6	90	4,95	25,74	18,59
21	2	5	6	30	4,97	33,53	18,54
22	2	5	3	60	5,91	33,33	20,73
23	1	10	9	60	6,04	37,77	18,88
24	2	10	3	90	5,77	30,26	18,45
25	2	10	9	30	5,03	24,47	17,97
26	3	10	6	30	4,77	19,67	16,4
27	1	10	3	60	7,88	40,23	17,83

**Tableau V.1.** Résultats expérimentaux partiels.

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

### V.3. Analyse statistique

#### V.3.1. Résistance à la flexion $R_f$

##### a) Analyse de variance ANOVA

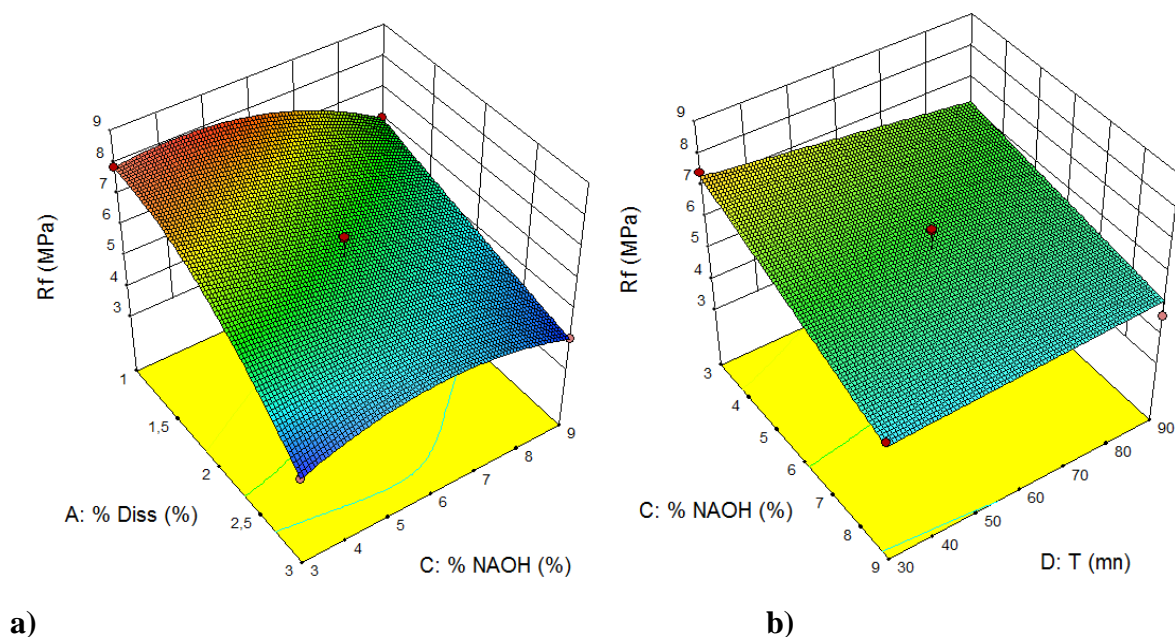
Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la résistance à la flexion à 28 jours ( $R_f$ ) sont présentés dans le tableau V.2. Selon ce tableau, le pourcentage de fibres de Diss (%Diss) est le facteur qui exerce l'influence la plus significative sur  $R_f$ , avec une contribution de 51,43%. Ensuite, le terme quadratique de la longueur des fibres ( $L^2$ ) contribue à un taux de 14,48%, tandis que le pourcentage de la solution de traitement chimique (%NaOH) contribue à un pourcentage de 9,56%. En revanche, les analyses indiquent que ni la longueur des fibres (L) ni le temps de traitement chimique n'ont une influence significative sur la résistance à la flexion  $R_f$ .

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de Contribution	Remarque
Model	31,07	16	1,94	9,33	0,0005	93,72	Significant
A-% Diss	17,05	1	17,05	81,93	< 0,0001	51,433	Significant
B-L	2,813E-003	1	2,813E-003	0,014	0,9098	0,008	Non significant
C-% NAOH	3,17	1	3,17	15,22	0,0030	9,563	Significant
D-T	0,54	1	0,54	2,60	0,1377	1,629	Non significant
AB	0,14	1	0,14	0,66	0,4362	0,422	Non significant
AC	0,94	1	0,94	4,52	0,0594	2,836	Non significant
AD	0,19	1	0,19	0,93	0,3576	0,573	Non significant
BC	0,32	1	0,32	1,53	0,2438	0,965	Non significant
CD	0,42	1	0,42	2,03	0,1847	1,267	Non significant
A <sup>2</sup>	0,78	1	0,78	3,76	0,0813	2,353	Non significant
B <sup>2</sup>	4,80	1	4,80	23,07	0,0007	14,480	Significant
A <sup>2</sup> C	0,41	1	0,41	1,99	0,1888	1,237	Non significant
AB <sup>2</sup>	2,54	1	2,54	12,18	0,0058	7,662	Significant
B <sup>2</sup> C	1,56	1	1,56	7,48	0,0210	4,706	Non significant
BC <sup>2</sup>	0,62	1	0,62	2,97	0,1157	1,870	Non significant
A <sup>2</sup> C <sup>2</sup>	1,55	1	1,55	7,44	0,0213	4,676	Non significant
Residual	2,08	10	0,21			6,275	
Cor Total	33,15	26				100	

**Tableau V.2.** Analyse de la variance pour la résistance à la flexion  $R_f$ .

### b) Diagramme de surfaces

Les résultats de la surface de réponse (3D) de la résistance à la flexion à 28 jours ( $R_f$ ), en fonction des paramètres d'étude (%Diss, L, %NaOH et T), sont présentés dans les graphes de la figure V.2. Les analyses des surfaces de réponses confirment les résultats de l'ANOVA. On observe une variation significative du facteur d'interaction (%Diss x %NaOH) dans la figure (a), qui se traduit par une courbure marquée de la surface (3D) correspondante. De même, le facteur d'interaction (%NaOH x T) dans la figure (b) montre une courbure moins importante que le premier facteur. Ces observations renforcent les conclusions de l'ANOVA.



**Figure V.1.** Diagrammes de surface 3D de  $R_f$  en fonction de (%Diss, L, %NaOH et T).

### V.3.2. Résistance à la compression $R_c$

#### a) Analyse de variance ANOVA



## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de Contribution	Remarque
Model	989,65	10	98,96	19,38	< 0.0001	92,37	Significant
A-% Diss	503,78	1	503,78	98,65	< 0.0001	56,521	Significant
B-L	58,12	1	58,12	11,38	0,0039	6,521	Significant
C-% NaOH	31,88	1	31,88	6,24	0,0237	3,577	Non significant
D-T	0,95	1	0,95	0,19	0,6728	0,107	Non significant
AB	10,89	1	10,89	2,13	0,1636	1,222	Non significant
BD	10,34	1	10,34	2,02	0,1740	1,160	Non significant
B <sup>2</sup>	27,07	1	27,07	5,30	0,0351	3,037	Non significant
AB <sup>2</sup>	126,80	1	126,80	24,83	0,0001	14,226	Significant
AC <sup>2</sup>	16,79	1	16,79	3,29	0,0886	1,884	Non significant
B <sup>2</sup> D	22,99	1	22,99	4,50	0,0498	2,579	Non significant
Residual	81,71	16	5,11			9,167	Significant
Cor Total	1071,35	26				100	

**Tableau V.3.** Analyse de la variance pour la résistance à la compression R<sub>c</sub>.

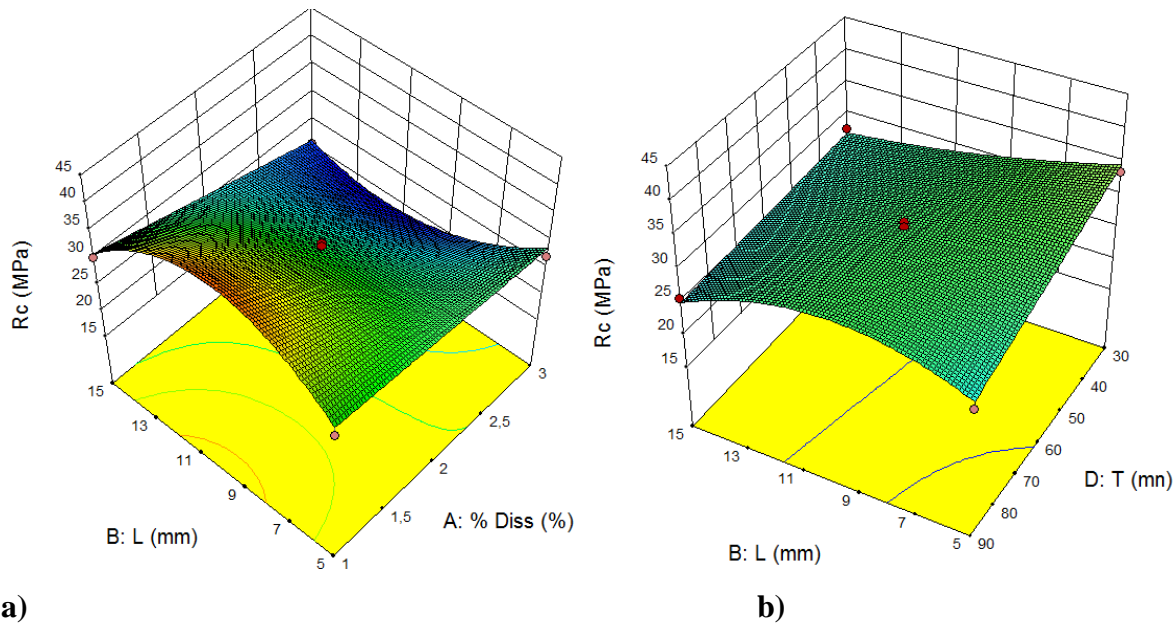
Le tableau V.3 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la résistance à la compression à 28 jours (R<sub>c</sub>). Les données indiquent que le pourcentage de fibres de Diss (%Diss) est le facteur qui exerce l'influence la plus significative sur la résistance R<sub>c</sub>, avec une contribution de 56,53%. En outre, l'interaction entre le pourcentage de Diss (%Diss) et le terme quadratique de la longueur des fibres (%Diss x L<sup>2</sup>) contribue avec un taux de 14,23%, tandis que la longueur des fibres (L) contribue avec un pourcentage de 6,52%. Cependant, les analyses révèlent que ni le pourcentage de traitement (%NaOH) ni le temps de traitement chimique n'ont une influence significative sur la R<sub>c</sub>.

### b) Diagramme de surfaces

Les graphes de la figure V.2 présentent les résultats de la surface de réponse (3D) de la résistance à la compression à 28 jours (R<sub>c</sub>), en fonction des paramètres d'étude (%Diss, L, %NaOH et T). L'analyse des surfaces de réponse confirme les résultats de l'ANOVA, ce qui renforce la validité des conclusions. Cependant, on observe une faible variation de la réponse en fonction de l'interaction (%Diss x L) dans la figure (a), qui se manifeste par une courbure

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

de la surface (3D) relativement faible. De même, pour le facteur d'interaction (L x T) dans la figure (b), la courbure est moins importante que pour le premier facteur. Ces observations suggèrent que ces interactions ont une influence limitée sur la  $R_c$ , du moins dans la plage de valeurs considérée pour les paramètres d'étude. Cela peut être utile pour optimiser les paramètres de production de matériaux composites à base de fibres de Diss.



**Figure V.2.** Diagrammes de surface 3D de  $R_c$  en fonction de (%Diss, L, %NaOH et T).

### V.3.3. Module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$

#### a) Analyse de variance ANOVA

L'analyse de la variance (ANOVA) du module d'élasticité dynamique à 28 jours ( $E_{dyn}$ ) est présentée dans le tableau V.4. Selon ce tableau, le pourcentage de fibres de Diss (%Diss) reste le facteur qui exerce l'influence la plus significative sur  $E_{dyn}$ , avec une contribution de 16,54%. Le terme quadratique ( $\%NaOH^2$ ) contribue à un taux de 15,75%, tandis que les interactions entre les facteurs (%Diss x L) et (%Diss x %NaOH) ont des contributions respectives de 11,26% et 8,18%. En revanche, le reste des termes n'a pas d'influence significative sur  $E_{dyn}$  ( $P > 0,05$ ) d'après les analyses. Ces résultats peuvent être utiles pour améliorer la compréhension des propriétés mécaniques des matériaux composites à base de fibres de Diss et pour optimiser les paramètres de production pour atteindre les performances souhaitées.

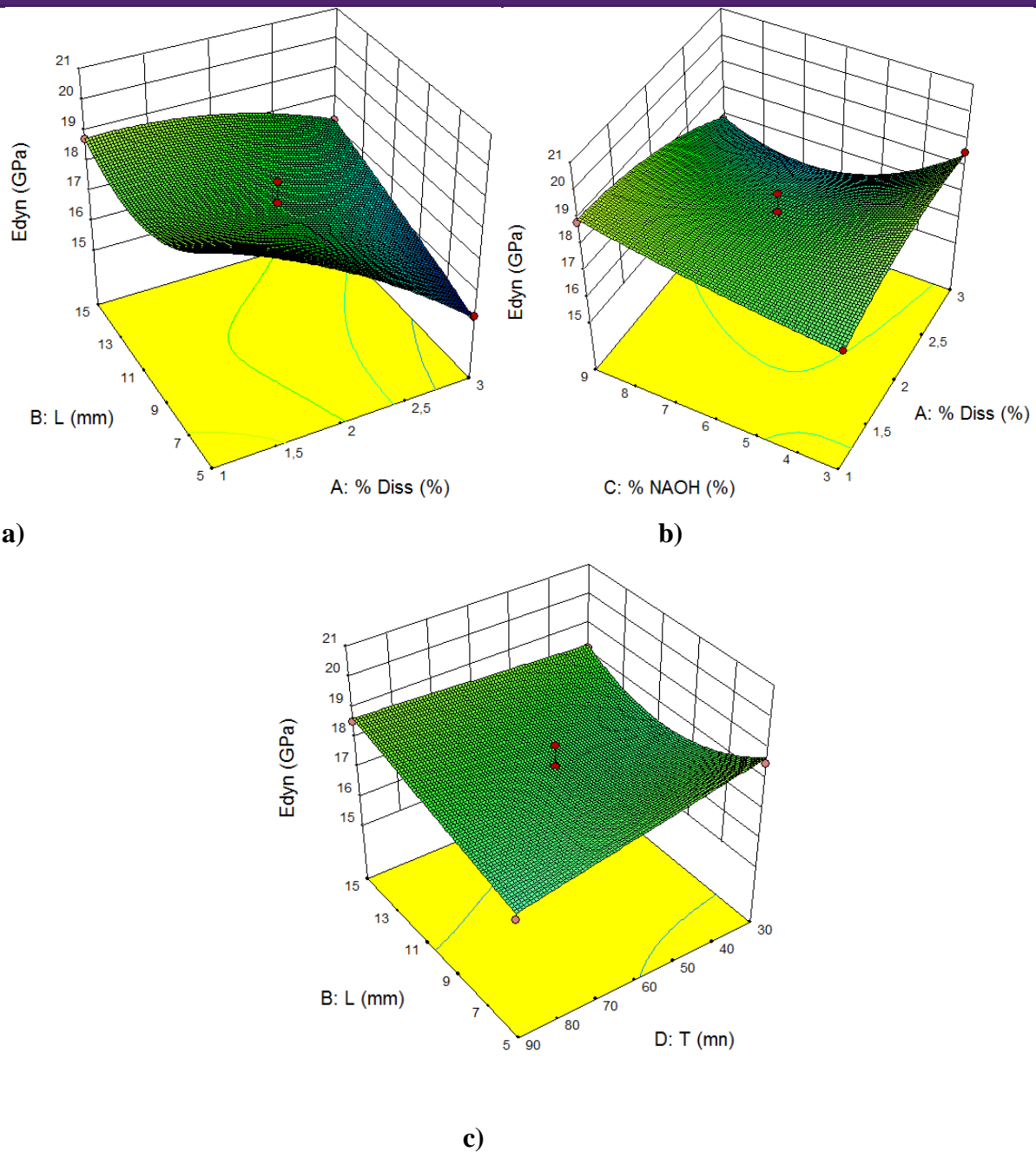
## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de Contribution	Remarque
Model	33,11	16	2,07	15,51	< 0,0001	96,13	Significant
<i>A-% Diss</i>	3,98	1	3,98	29,84	0,0003	16,54	Significant
<i>B-L</i>	0,51	1	0,51	3,79	0,0803	2,12	Non significant
<i>C-% NaOH</i>	0,050	1	0,050	0,37	0,5555	0,21	Non significant
<i>D-T</i>	0,27	1	0,27	2,03	0,1849	1,12	Non significant
<i>AB</i>	2,71	1	2,71	20,29	0,0011	11,26	Significant
<i>AC</i>	1,97	1	1,97	14,80	0,0032	8,18	Significant
<i>BD</i>	0,86	1	0,86	6,48	0,0290	3,57	Non significant
<i>A<sup>2</sup></i>	1,30	1	1,30	9,77	0,0108	5,40	Significant
<i>B<sup>2</sup></i>	1,72	1	1,72	12,88	0,0049	7,15	Significant
<i>C<sup>2</sup></i>	3,79	1	3,79	28,44	0,0003	15,75	Significant
<i>A<sup>2</sup>D</i>	0,48	1	0,48	3,56	0,0884	1,99	Non significant
<i>AB<sup>2</sup></i>	0,68	1	0,68	5,13	0,0469	2,83	Non significant
<i>AC<sup>2</sup></i>	0,88	1	0,88	6,63	0,0276	3,66	Non significant
<i>B<sup>2</sup>C</i>	1,50	1	1,50	11,21	0,0074	6,23	Significant
<i>B<sup>2</sup>D</i>	0,56	1	0,56	4,21	0,0672	2,33	Non significant
<i>BC<sup>2</sup></i>	1,48	1	1,48	11,06	0,0077	6,15	Significant
Residual	1,33	10	0,13			5,53	
Cor Total	34,44	26				100	

**Tableau V.4.** Analyse de la variance pour le module élastique  $E_{dyn}$ .

### b) Diagramme de surfaces

Les graphes de la figure V.3 présentent les résultats de la surface de réponse (3D) du module élastique dynamique à 28 jours ( $E_{dyn}$ ), en fonction des paramètres d'étude (%Diss, L, %NaOH et T). L'analyse des surfaces de réponse confirme les résultats de l'ANOVA, ce qui renforce la validité des conclusions. On observe une variation remarquable des facteurs d'interaction (%Diss x L) et (%Diss x %NaOH) dans les figures (a et b), qui se manifeste par une courbure significative de la surface (3D) de ces facteurs.



**Figure V.3.** Diagrammes de surface 3D de  $E_{dyn}$  en fonction de (%Diss, L, %NaOH et T).

Ces interactions ont donc une grande influence sur  $E_{dyn}$ , et leur optimisation peut conduire à une amélioration significative des propriétés mécaniques des matériaux composites à base de fibres de Diss. Pour le facteur d'interaction (L x T) dans la figure (c), la courbure est moins importante que pour les premiers facteurs, mais elle reste significative.

### V.4. Prédiction mathématique

#### V.4.1. Résistance à la flexion $R_f$

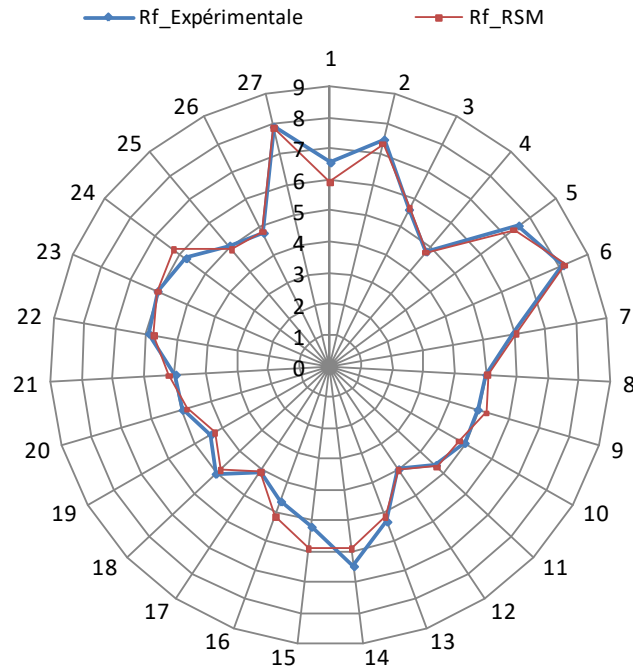
## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie ( $R_f$ ) et les variables d'entrée (%Diss, L, %NaOH et T) a été exprimée avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 93,70 \%$ ), qui indique la précision de la régression. Le modèle quadratique résultant de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la réponse ( $R_f$ ) en fonction des facteurs étudiés. Ce modèle est présenté par l'équation (V.1).

Ces résultats indiquent une forte corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie, ce qui permet de prédire avec précision la sortie en fonction des facteurs étudiés. Cependant, il convient de noter que les modèles de régression sont basés sur des données expérimentales et peuvent ne pas être généralisables à d'autres situations ou conditions. Par conséquent, il est important de valider les modèles de régression avec de nouveaux jeux de données expérimentales pour confirmer leur validité et leur applicabilité.

$$\begin{aligned} R_f = & 5.393 + 4.89x\%Diss + 3.45xL + 0.76x\%NaOH - 0.043xT - 0.83x\%DissxL \\ & - 0.44x\%Dissx\%NaOH + 0.0073x\%DissxT - 0.159xLx\%NaOH \\ & + 0.0036x\%NaOHxT - 0.82x\%Diss^2 - 0.183xL^2 + 0.139x\%Diss^2x\%NaOH \\ & + 0.04x\%DissxL^2 + 0.012xL^2x\%NaOH - 0.0048xL * \%NaOH^2 \\ & + 0.0011x\%Diss^2x\%NaOH^2 \end{aligned} \quad (V.1)$$

La figure V.4 présente une comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la variable de sortie ( $R_f$ ). L'analyse des résultats montre une très bonne concordance entre les valeurs numériques prédites par le modèle et les valeurs expérimentales mesurées. Cette observation indique la précision du modèle trouvé et confirme ainsi la validité de l'équation (V.1) pour prédire la sortie ( $R_f$ ) en fonction des facteurs d'entrée (%Diss, L, %NaOH et T). Cela suggère que le modèle de régression quadratique est capable de représenter avec précision la relation fonctionnelle entre les variables d'entrée et la variable de sortie. Ces résultats sont encourageants car ils montrent que le modèle peut être utilisé pour prédire avec précision la sortie ( $R_f$ ) en fonction des facteurs d'entrée, ce qui peut être utile pour optimiser la production de matériaux composites à base de fibres de Diss.



**Figure V.4.** Valeurs expérimentales et valeurs prédites de la résistance à la flexion  $R_f$ .

## V.4.2. Résistance à la compression $R_c$

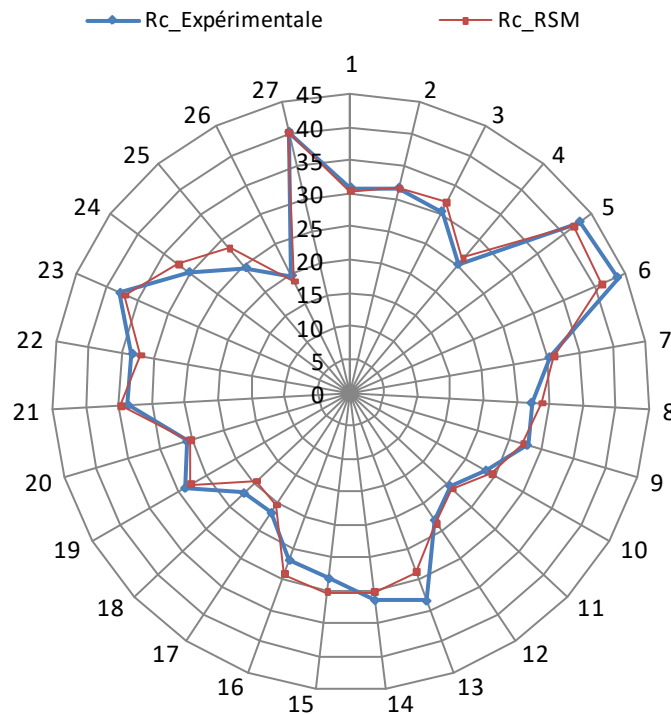
La relation fonctionnelle entre les variables d'entrée (%Diss, L, %NaOH et T) et la variable de sortie ( $R_c$ ) a été exprimée avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 92,37\%$ ) qui indique la précision de la régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la sortie ( $R_c$ ) en fonction des facteurs étudiés. Ces résultats sont encourageants car ils montrent une forte corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie, ce qui permet de prédire avec précision la sortie en fonction des facteurs étudiés. Cela peut être utile pour optimiser la production de matériaux composites à base de fibres de Diss en ce qui concerne leur résistance à la compression.

$$R_c = 21.27 + 19.34x\%Diss + 6.96xL - 0.80x\%NaOH - 0.49xT - 5.58x\%DissxL + 0.089xLxT - 0.37xL^2 + 0.26x\%DissxL^2 + 0.014x\%NaOH^2x\%Diss - 0.0039xT * L^2 \quad (V.2)$$

La figure V.5 illustre une comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la variable de sortie ( $R_c$ ). L'analyse des résultats montre que les valeurs numériques prédites par le modèle et les valeurs expérimentales mesurées sont très proches, indiquant la précision du

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

modèle trouvé. Cette observation renforce ainsi la validité de l'équation (V.2) pour prédire la sortie ( $R_c$ ) en fonction des facteurs d'entrée (%Diss, L, %NaOH et T). Ces résultats sont encourageants car ils montrent que le modèle de régression quadratique est capable de représenter avec précision la relation fonctionnelle entre les variables d'entrée et la variable de sortie.



**Figure V.5.** Valeurs expérimentales et valeurs prédites de la résistance à la compression  $R_c$ .

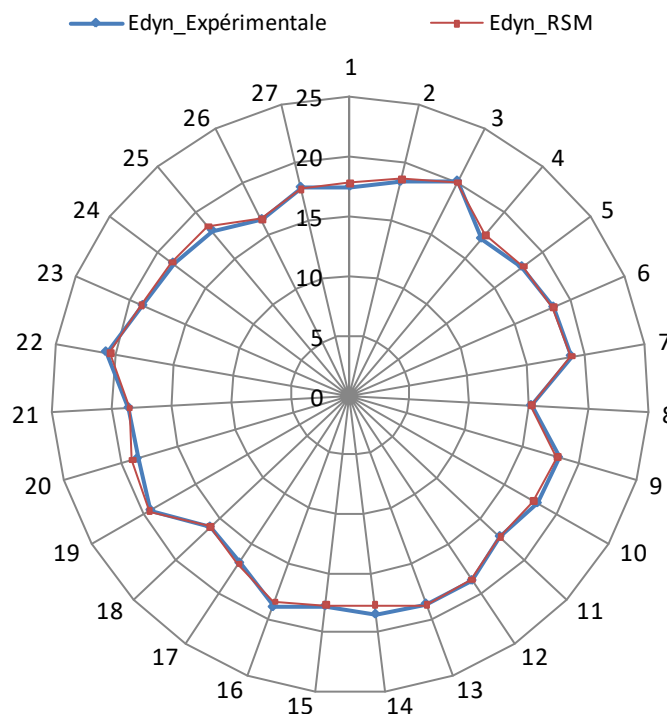
### V.4.3. Module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$

Le coefficient de détermination ( $R^2 = 96,13\%$ ) indique une forte corrélation entre la variable de sortie ( $E_{dyn}$ ) et les variables d'entrée (%Diss, L, %NaOH et T). Ainsi, le modèle de régression quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire avec précision la sortie ( $E_{dyn}$ ) en fonction de ces facteurs. L'équation (V.3) représente le modèle obtenu, qui peut être utilisé pour optimiser la production de matériaux composites à base de fibres de Diss en vue d'améliorer leur module élastique dynamique.

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

$$\begin{aligned}
 E_{dyn} = & 25.99 + 0.95x\%Diss - 1.89xL + 1.05x\%NaOH - 0.035xT + 0.63x\%DissxL \\
 & - 1.12x\%Dissx\%NaOH + 0.003xLxT - 0.48x\%Diss^2 + 0.067xL^2 \\
 & - 0.063x\%NaOH^2 + 0.0028x\%Diss^2xT - 0.023x\%DissxL^2 \\
 & + 0.007x\%Dissx\%NaOH^2 + 0.00016x\%NaOH * L^2 \\
 & + 0.0004xLx\%NaOH^2
 \end{aligned}
 \tag{V.3}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites est présentée dans la figure V.6. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs numériques sont très proches, cela montre la précision du modèle trouvé.



**Figure V.6.** Valeurs expérimentales et valeurs prédites du module d'élasticité dynamique  $E_{dyn}$ .

### V.5. Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser la formulation du bio-composite, chaque paramètre dans la conception (*MSR*) a été étudié à trois niveaux différents, l'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (*MSR*) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent



## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1.

Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

### a. Désirabilité d'une réponse à maximiser

Un exemple de fonction de désirabilité individuelle ( $d_i$ ) dans le cas d'une réponse à maximiser, est représenté sur la figure V.7. La valeur de 0 (une désirabilité individuelle prenant la valeur nulle) est attribuée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirée) et celle de 1 lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés.

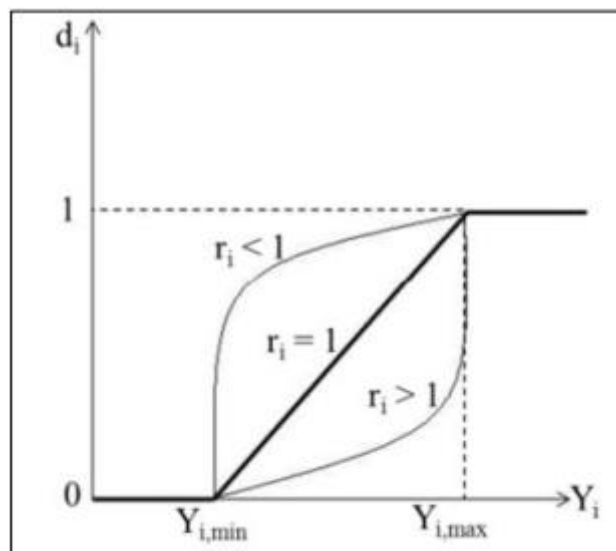


Figure V.7. Désirabilité individuelle  $d_i$  d'une réponse  $Y_i$ .

L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée :

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min} \\
 d_i &= \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_{i,\max} - Y_{i,\min}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (\text{V.4}) \\
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,\max}
 \end{aligned}$$

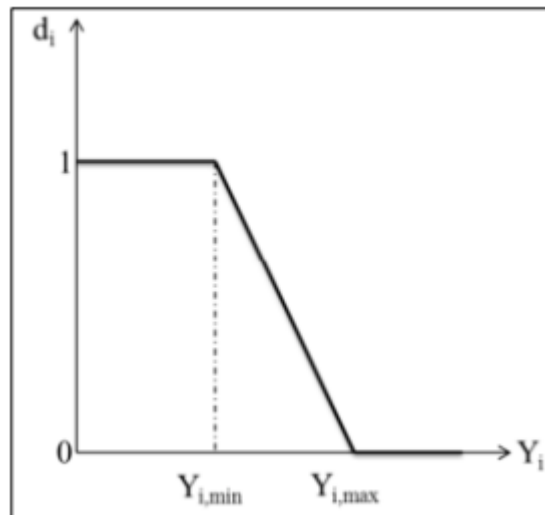
Avec :

$Y_{i,\min}$  : valeur en dessous de laquelle la réponse  $Y_i$  ne convient pas ( $d_i = 0$ ),

$Y_{i,\max}$  : valeur cible au-dessus de laquelle la réponse  $Y_i$  est très satisfaisante ( $d_i = 1$ ).

### b. Désirabilité d'une réponse à minimiser

Lorsque l'on cherche à minimiser une réponse, la fonction de désirabilité peut être tracée comme le montre la figure V.8.



**Figure V.8.** Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser.

Dans ce cas, la fonction de désirabilité est nulle quand la réponse dépasse la valeur limite ( $Y_{i,\max}$ ), elle vaut 1 lorsque la réponse est inférieure ou égale à la valeur cible ( $Y_{i,\min}$ ). L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée :

$$\begin{aligned}
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min} \\
 d_i &= \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,\min} - Y_{i,\max}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (\text{V.5}) \\
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,\max}
 \end{aligned}$$

Avec :  $Y_{i,\min}$ , la valeur cible en dessous de laquelle la réponse  $Y_i$  est très satisfaisante ( $d_i = 1$ ),

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

$Y_{i,max}$  : la valeur au-dessus de laquelle la réponse  $Y_i$  ne convient pas ( $d_i = 0$ ).

### c. Désirabilité d'une réponse à cibler

Dans le cas où l'on souhaite avoir une valeur cible d'une réponse, la fonction de désirabilité individuelle est représentée sur la figure V.9.

Si on cherche par exemple une valeur cible  $Y_c$  de la réponse  $Y_i$ , l'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être présentée de la façon suivante :

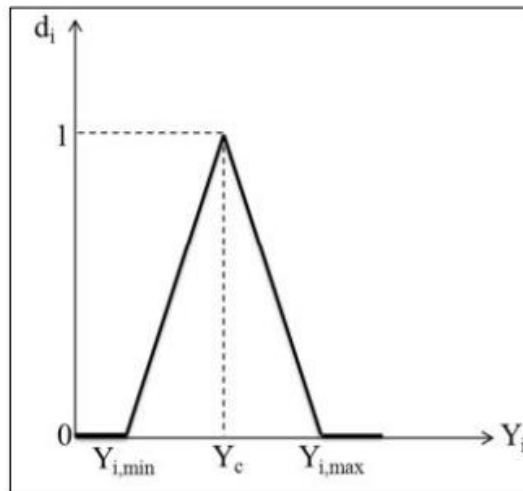


Figure V.9. Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler.

$$\begin{aligned}d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min} , Y_i \geq Y_{i,\max} \\d_i &= \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_{i,c} - Y_{i,\min}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,c} \\d_i &= \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,c} - Y_{i,\max}} \right] \text{ Si } Y_{i,c} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\d_i &= 1, \text{ Si } Y_i = Y_c\end{aligned} \quad (\text{V.6})$$

La fonction de désirabilité vaut 1 lorsque la réponse est égale à la valeur cible cherchée. Elle vaut zéro si la réponse est en dessous ou au-dessus des valeurs  $Y_{i,\min}$  et  $Y_{i,\max}$  précisées.

### d. Optimisation de la formulation du bio-composite

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation

Les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrées dans le tableau V.4. Les valeurs des paramètres optimaux sont obtenues en utilisant le logiciel « *Design Expert V10* ». Le problème revient à cibler la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables.

Paramètre	Objectif	Limite inférieure	Limite Supérieure	Poids inférieur	Poids Supérieur	Importance
A : % Diss	intervalle	1	3	1	1	3
B : L	intervalle	5	15	1	1	1
C : % NAOH	intervalle	3	9	1	1	3
D : T	intervalle	30	90	1	1	3
Rf	maximisé	3,98	8,12	1	1	3
Rc	maximisé	19,67	43,68	1	1	3
Edyn	maximisé	15,19	20,73	1	1	3

**Tableau V.5.** Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.

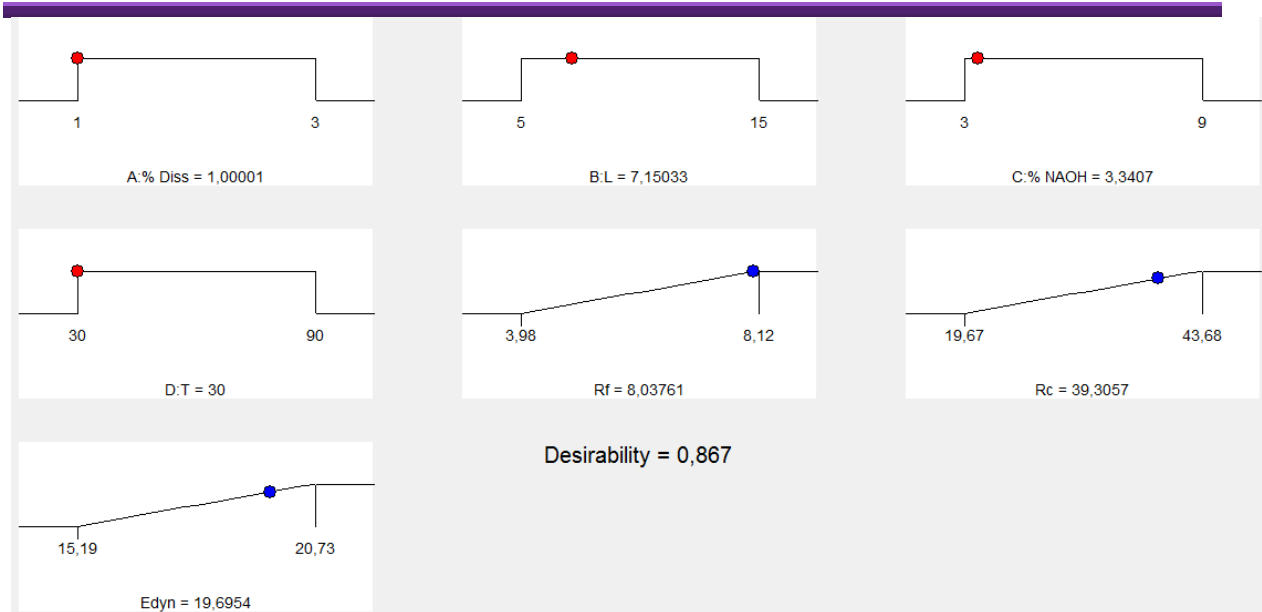
Le tableau V.6 illustre les valeurs optimales des paramètres du bio-composite.

N°	A : % Diss	B : L	C : % NAOH	D : T	Rf	Rc	Edyn	Désirabilité	
1	1,000	7,150	3,341	30,000	8,038	39,306	19,695	0,867	Selected
2	1,000	7,183	3,396	30,000	8,051	39,408	19,657	0,867	
3	1,000	7,130	3,296	30,000	8,029	39,229	19,722	0,867	
4	1,000	7,112	3,352	30,000	8,017	39,274	19,725	0,867	
5	1,000	7,128	3,244	30,000	8,031	39,163	19,735	0,867	

**Tableau V.6.** Résultats de l'optimisation.

Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure V.10. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres optimisés pour obtenir une valeur maximale du groupe de réponses.

## CHAPITRE V : Etude statistique et optimisation



**Figure V.10.** Représentation graphique de la procédure d'optimisation.

### V.6 Conclusion

En conclusion, l'étude statistique présentée utilise l'analyse de la variance (ANOVA) et la surface de réponse pour identifier les facteurs les plus significatifs qui influencent le comportement du composite à base de fibres de Diss, en termes de comportement physico-mécanique. Les résultats indiquent que le pourcentage de fibres de Diss (%Diss) est le facteur le plus important qui influe sur les réponses traitées. De plus, les modèles de régression quadratique obtenus présentent une forte corrélation entre les variables d'entrée et celles de sortie, ce qui permet de prédire avec précision les réponses en fonction des facteurs étudiés. Ces résultats peuvent être utiles pour optimiser la production de matériaux composites à base de fibres de Diss et améliorer leurs propriétés mécaniques. Globalement, cette étude fournit des informations précieuses pour la compréhension et l'optimisation des propriétés mécaniques des matériaux composites à base de fibres de Diss.

Ainsi, la méthode d'optimisation proposée à la fin de cette étude a permis d'identifier les paramètres de formulation du composite. Cette étude montre que l'application de la méthode (ici, à l'aide de la méthode de surface de réponse) ne représente aucune difficulté particulière, et montre que dans les cas les plus simples, les valeurs souhaitées peuvent être trouvées, sans faire appel à des méthodes d'optimisation complexes.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale et perspectives

L'objectif général de cette étude est de développer des bio-composites à faible empreinte environnementale destinés à des applications dans le domaine du bâtiment. Étant donné que les fibres végétales sont des matériaux renouvelables et recyclables avec un faible bilan carbone, leur association à diverses matrices telles que la chaux et le ciment présente un bon moyen pour développer des composites durables, écologiques et économiques. Cependant, et d'après des travaux de recherche antérieurs, l'utilisation des fibres végétales à leur état brut dans la matrice cimentaire a donné lieu à l'apparition de problèmes, notamment le retard de prise de la pâte cimentaire et la cristallisation et la rigidification des fibres. Afin de résoudre ces problèmes, un traitement chimique a été proposé et une série de caractérisations a été entreprise. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que :

Les résultats des essais de traction montrent clairement que le pourcentage de fibres et le traitement chimique par le NaOH adoptés dans ce travail sont les facteurs les plus significatifs et permettent une augmentation significative de la résistance à la flexion. En termes de résistance à la flexion, l'utilisation de fibres comme matière première a montré une augmentation significative de la résistance à la flexion. Les meilleures propriétés mécaniques sont obtenues avec 2% de fibres de 10mm de longueur traitée avec 3% de NaOH pendant 30 minutes ( $R_f=7.46$  MPa), ce qui a permis une augmentation de 12,52% de la contrainte par rapport aux fibres non traitées.

La résistance à la compression des matériaux à base de fibres de Diss avec un pourcentage de 2% et 3% diminue en raison de la durée de traitement des fibres appliquées. Cette remarque a été confirmée par l'augmentation de l'absorption d'eau du composite renforcé de fibres par rapport au mortier témoin.

Le traitement chimique combiné avec du NaOH à différentes concentrations a une influence significative sur le comportement physico-mécanique du bio-composite.

À la fin de cette étude, une méthodologie statistique robuste a été utilisée pour identifier les facteurs les plus significatifs qui influencent le comportement physico-mécanique des composites à base de fibres de Diss. L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer les facteurs les plus significatifs qui influencent les réponses traitées. Dans ce cas, l'ANOVA a permis d'identifier que le pourcentage de fibres de Diss est le facteur le plus important qui influe sur les réponses traitées.

## Conclusion générale

---

En utilisant la méthode de surface de réponse, il est possible de déterminer la relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie. Les modèles de régression quadratique obtenus ont montré une forte corrélation entre les variables d'entrée et celles de sortie, ce qui permet de prédire avec précision les réponses en fonction des facteurs étudiés.

De plus, la méthode d'optimisation proposée à la fin de cette étude a permis d'identifier les paramètres de formulation du composite. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour améliorer la compréhension et l'optimisation des propriétés mécaniques des matériaux composites à base de fibres de Diss.

Ce travail a montré la possibilité d'utiliser les fibres de Diss dans des matériaux cimentaires. Ces fibres peuvent être utilisées dans la pratique de la construction pour, entre autres, des éléments de construction non structuraux, c'est-à-dire avoir un matériau écologique.

Les perspectives de cette étude sont nombreuses et incluent des études supplémentaires sur les propriétés mécaniques des fibres végétales dans les matériaux cimentaires, le développement de traitements chimiques avec différentes concentrations, l'analyse des interactions physico-chimiques aux interfaces entre les fibres végétales et la matrice cimentaire, ainsi que la durabilité à long terme des fibres végétales dans des milieux agressifs.

## Références bibliographiques

---

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU

[1] Sellami. A., « *Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss) : Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie* », Thèse de doctorat université Annaba, 2015

[2] <https://elearning-facsct.univ->

[3] <https://q=photo+Exemple+d%E2%80%99un+g%C3%A2chait+de+mortier&tbm=isch&source=iu&ictx=1&vet=1&fir=-BiMRQWFswLD2M%252Cn37a->

[4]. Cours PDF des mortiers par layachi

[5]. <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/construction-maison-preparer-bon-mortier-hourdage-1023/page/7/>

[6]. <https://www.pavebeton.fr/comment-faire-du-mortier/>

[7]. BOUGUERRA Anwar., BAHACHE fatma. « Effet de l'incorporation de l'entraineur d'air sur les caractéristiques du mortier à base de la poudre de verre et fibres métalliques », Mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila (2021).

[8]. [https://moodle.univ-ouargla.dz/course/info.php?id=12688&lang=ar#:~:text=%C2%AB%20D%C3%A9chets%20%3A%20tout%20r%C3%A9sidu%20d',PNUD%2DMATE%2C%202008\).](https://moodle.univ-ouargla.dz/course/info.php?id=12688&lang=ar#:~:text=%C2%AB%20D%C3%A9chets%20%3A%20tout%20r%C3%A9sidu%20d',PNUD%2DMATE%2C%202008).)

[9] [https://www.spi-vds.org/medias/publications/les\\_dechets\\_definition\\_gestion\\_collecte\\_traitement\\_responsabilites\\_police\\_speciale.pdf](https://www.spi-vds.org/medias/publications/les_dechets_definition_gestion_collecte_traitement_responsabilites_police_speciale.pdf).

[10]. [https://www.spi-vds.org/medias/publications/les\\_dechets\\_definition\\_gestion\\_collecte\\_traitement\\_responsabilites\\_police\\_speciale.pdf](https://www.spi-vds.org/medias/publications/les_dechets_definition_gestion_collecte_traitement_responsabilites_police_speciale.pdf)

[11] <https://www.avranches.fr/collecte-des-dechets/>

[12] [https://www.spi-vds.org/medias/publications/les\\_dechets\\_definition\\_gestion\\_collecte\\_traitement\\_responsabilites\\_police\\_speciale.pdf](https://www.spi-vds.org/medias/publications/les_dechets_definition_gestion_collecte_traitement_responsabilites_police_speciale.pdf)

[13] [https://www.spi-vds.org/medias/publications/les\\_dechets\\_definition\\_gestion\\_collecte\\_traitement\\_responsabilites\\_police\\_speciale.pdf](https://www.spi-vds.org/medias/publications/les_dechets_definition_gestion_collecte_traitement_responsabilites_police_speciale.pdf)

[14] <https://maroc-diplomatique.net/valorisation-dechets-industriels-contrainte-transformee-ressource/>

[15] [https://www.dictionnaire-environnement.com/dechet\\_agricole\\_ID1191.html](https://www.dictionnaire-environnement.com/dechet_agricole_ID1191.html)

[16] <https://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photo-hospital-waste-image28025685>

[17] <https://www.istockphoto.com/fr/photo/d%C3%A9charge-de-d%C3%A9chets-agricoles-alimentaires-d%C3%A9tail-de-compost-de-fosse-gm1062249972-283996518>



## Références bibliographiques

---

- [18] <https://renouveau-habitat.fr/gestion-des-dechets-organiques/>
- [19] <https://www.sydom-aveyron.com/dechets-speciaux/>
- [20] F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [21] Hakeem KR, Jawaid M, Rashid U. Biomass and Bioenergy: Springer International Publishing; 2014.
- [22] Ardanuy M, Claramunt J, Toledo Filho RD. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*. 2015; 79:115- 28.
- [23] Jawaid M, H.P.S AK. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2011 ;86 :1-18.
- [24] A. Y. Nenonene, "Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [25] F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [26] John MJ, Thomas S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*. 2008 ;71(3) :343-64.
- [27] Baley C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Techniques de L'ingénieur*. 2004.
- [28] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*. 1999 ;24(2) :221-74.
- [29] Stokke D. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites* 2013
- [30] Al-Oqla FM, Salit MS. 5 - Material selection of natural fiber composites. In: Al-Oqla FM, Salit MS, editors. *Materials Selection for Natural Fiber Composites*: Woodhead Publishing; 2017. p. 107-68.
- [30] B.Montiès Lpv-Ppe, alimentaires non azotés GVe, Paris (1980).
- [31] Sharma NL, N.C. Dhuldhoya, S.U. Merchant and U.C., Merchant Lucid "Colloids

## Références bibliographiques

---

Limited Jodhpur”-342005 R, India,2006.

[32] P B, "Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse, produits rpbf-adlravd, préfabriqué en gypse tdddléNSdMd, Saint Etienne Gdp, 2002.

[33] Davies P, Morvan C, Sire O, Baley C. Propriétés de fibres extraites de phanérogames marines (*Zostéra Marina*). *Revue des composites et des matériaux avancés*. 2006 ;16.

[34] Nenonene A. Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage. 2009

[35] Väisänen T, Haapala A, Lappalainen R, Tomppo L. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. *WasteManagement*. 2016 ;54 :62-73.

[36] Khenfer. M.M., « *Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques* », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Juin 1990.

[37] Swamy N, Gram. H.E., « *Durability of natural fibers in concrete* », Natural fibre reinforced cement and concrete, 1988.

[38] Magniont. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Université de Toulouse ; 2010.

[39] Pacheco-Torgal F, Jalali S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*. 2011 ;25(2) :575-81.

[40] Sellami. A., Merzoud. M., Amziane. S., « *Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers* », *Construction and Building Materials*, Vol.47, 1117-1124, 2013.

[41] Bourahli. M.E.H., « *Caractérisation d'un composite verre/époxy* », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif, 2014.

[42] Sellami. A., « *Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss) : Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie* », Thèse de doctorat université Annaba, 2015.

[43] Canovas. S.K., « *New economical solutions for improvement of durability of portland cement mortars reinforced with sisal fibers* », *Materials and Structures*, pp. 417- 422, 1992.

[44] CHEIKHI Laila. Thèse « Etudes empiriques des relations entre les modèles de qualité du logiciel DTSO 9126 en utilisant le référentiel de

## Références bibliographiques

---

données DTSBSG et la méthode Taguchi », école de technologie supérieure université du QUEBEC.montreal, le 6 mars 2008.

[45] <https://www.rocq.inria.fr/axis/modulad/numero-34/Goupy-34/goupy-34.pdf> vu le 21/02/2020 à 22 :10.

[46] GRILLIER Jean-Claude.VII-210, livre « Comprendre les plans d'expériences Taguchi » AFNOR- Janvier 2017-MAJ 62.

«<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=GRILLIER+Jean-Claude.VII-210%2C+livre+%C2%ABComprendre+les+plans+d%E2%80%99exp%C3%A9riences+Taguchi%C2%BB+AFNOR-+Janvier+2017-MAJ+62>»vu le 20/02/2020 à 21:56.

[47] BOUZIDI Adlen-BADEK Mhand. « Modélisation et optimisation mono et multi objectif des paramètres de coupe Lors de tournage d'un acier inoxydable 304L », Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en fabrication mécanique et productique ; Université Saad Dahleb de Blida 1, Faculté de Technologie, département de mécanique. 2018-2019.

[48] ABDERRHMEN ZERTI. Thèse de doctorat « Modélisation des efforts et de la rugosité de surface de l'acier inoxydable Martensitique basé sur les méthodes statistiques et les A.N.N», Université 8 Mai 1945 Guelma.

[49] Sandrine KARAM, 2004.Thèse de doctorat « Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt », Université de LIMOGES.

[50] GOUPY Jacques. Lee Creighton. Livre « Introductions aux plans d'expériences ». 3<sup>e</sup> édition, 25 octobre 2006.

[51] <https://www.e-marketing.fr/Thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/Le-plan-d-experience-324909.htm#> vu le 23/02/2020 à 19 :48.

[52] Bouchra Wahdame. Thèse « Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences ». Energie électrique. Université de Franche-Comté ; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2006. Français. tel-00163317.

## Références bibliographiques

---

[53] <http://www2.gch.ulaval.ca/cduchesne/Documents/64940/Chap3.PDF> vu le [29/02/2020](#) à 11 :28.

[54] BoumazzaNassira. Thème « Optimisation des paramètres géotechniques des sols par la méthode de Taguchi », Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma, Option : GEOTECHNIQUE. Juin 2018.

[55] Géraldine Benoit-Cervantes. Livre :« La boîte à outils de l'Innovation » - 2<sup>e</sup> édition (Français) Broché – 5 septembre 2012 ; Chapitre VII : Développement de l'innovation ; page 150. Collection : Bào La Boîte à Outils, Dunod ,Broché: 192 pages.

[56] Dr. YAHIAOUI Idris ; « Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centre », Université A. MIRA – Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie des Procédés ; 2014/2015.

[57] <https://3dc.asso-web.com/29+genichi-taguchi.html> vu le 28/02/2020 à 20 :08.

[58] NA 2607(2005) : Norme Algérienne, CS 91.100.20, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, adopter le 08/10/2009 (Consulter le 5/5/2022).

[59] NA 1966(2009) : Norme Algérienne, Eau de gâchage pour bétons spécifications de processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton. Révisée le 2/5/2009 (Consulter le 6/5/2022).

[60] M. Merzoud, M.F. Habita, A. Gouasmia, " Influence d'un traitement Hygrothermique sur les caractéristiques Physico-mécaniques de composites cimentaire à base de Diss", 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

[61] Notice technique : "*MEDAPLAST SP 40, super plastifiant –haut réducteur d'eau*". Granitex. 93.

[62] Fiche technique, "*SikaLatex, Résine à mélanger à l'eau de gâchage des mortiers*". Sika. 1-5.

[63] Guettala, A., Abibsi, A., Houari, H. "*Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure*". Construction and Building Materials. 2006, 20 : 119-127.

## Références bibliographiques

---

[64] <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigald/06203?lang=en&region=DZ>, consulté le 22-10-2016.

[65] Van de Weyenberg, I., Chi Truong. T., Vangrimde. B., Verpoest.

I., « *Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fiber treatment. Composites* », Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.37, 1368- 1376, 2006.

[66] Weatherwax. R.C., Tarkow. H., « *Effect of wood on the setting of Portland cement: decayed wood as an inhibitor* », Forest Products Journal, pp, 30-32, 1967.

[67] Dreux. G., Festa, J. "*Nouveau guide du béton*". Edition EYROLLES. Paris. Mai 1998.

[68] NF EN 1015-3. "*Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses)*". Octobre 1999.

[69] NF EN 1015-6. "*Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6 : détermination de la masse volumique apparente du mortier frais*". Octobre 1999.

[70] NF EN 196-1. "*Méthodes d'essais des ciments-Partie 1 : détermination des résistances mécaniques Indice de classement*". Avril 2006 : P15-471-1.

[71] NF EN 1015-11. "*Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci*". 2000.

[72] Dupain, R., Lanchon, R., Saint Arroman, J.C. "*Granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire*". Collection CAPLIEZ, édition CASTEILLA, V235. Paris 2000.

[73] Cherait Y, Nafa Z. "*Eléments de matériaux de construction et essais*". Collection : le livre de génie civil. Direction de la publication universitaire de Guelma.

[74] NF EN 12504-4. "*Essais pour béton dans les structures-Partie4 : détermination de la vitesse de propagation du son*". Mai 2005.

[75] NF EN 480-5. "*Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis - Méthodes d'Essai -Partie5 : détermination de l'Absorption Capillaire*". Janvier 2006.

[76] Hall, C. "*Water movement in porous building materials. I. unsaturated flow*

## Références bibliographiques

---

*theory and its applications*". Building and Environment. 1977, 12(2) : 117-125.

[77] [http : doc.lerm.fr/salinite-l'eau-mer](http://doc.lerm.fr/salinite-l'eau-mer), consulté le 18-10-2016.

[78] ASTM C 267. "Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacing and polymer concretes". Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Structures. June 1996.

[79] NF EN 18-459. "Béton - Essai pour béton durci : essai de porosité et de masse volumique". Mars 2010.

### CHAPITRE

[80] Cao Y, Shibata S, Fukumoto I. Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing. 2006 ;37(3) :423-9.

[81] Sedan D, Pagnoux C, Smith A, Chotard T. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. Journal of the European Ceramic Society. 2008 ;28(1) :183-92.

[82] Kriker A, Debicki G, Bali A, Khenfer MM, Chabannet M. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. Cement and Concrete Composites. 2005 ;27(5) :554-64.

[83] Ozerkan NG, Ahsan B, Mansour S, Iyengar SR. Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars. International Journal of Sustainable BuiltEnvironment. 2013;2(2):131-42.

[84] Hamzaoui R, Guessasma S, Mecheri B, Eshtiaghi AM, Bennabi A. Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes. Materials & Design (1980-2015). 2014 ;56 :60-8.

[85] Cherait Y, Nafa Z. "Eléments de matériaux de construction et essais". Collection : le livre de génie civil. Direction de la publication universitaire de Guelma.