

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département de Génie Civile*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **Génie Civile**

**Spécialité : Matériaux du Génie Civil**

Par

Zouaoui Riyadh fakhereddine

Bendif Said

## THÈME

**Effet des fibres végétales sur le comportement des mortiers  
polymère-modifiés**

*Soutenu le :*

*Mémoire évalué sans soutenance ( Covid – 19 ) par la commission composée de :*

*NOUI Ammar*

*Université de BBA*

*Président*

*LOGZIT nacer*

*Université de BBA*

*Examineur*

*BENANIBA samir*

*Université de BBA*

*Examineur*

*KESSAL oussama*

*Université de BBA*

*Encadreur*

*BELKADI Ahmed Abderraouf*

*Université de BBA*

*Co-Encadreur*

*Année Universitaire 2019/2020*

# *Remerciements*

*Nous remercions tout d'abord " Allah" le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et la patience afin d'arriver à la finalité de ce parcours.*

*Nous tenons remercier nos encadrants: Kessal Oussama et Belkadi Ahmed abderraouf qui ont bien fourni des efforts pour nous avons donné toutes les informations, nous à profiter de leur savoir et leurs précieux conseils. Nous tenons à remercier également les membres du jury qui ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.*

*Nos remerciements vont aussi à nos familles et amis qui nous ont prodigué conseils et encouragements.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, à ma très chère mère.*

*A celui qui a été toujours là pour moi, à celui qui m'indique la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes, à mon adorable papa.*

*Mes très chers frères djihed et akrem.*

*A tous mes ami (es) son exception et spécialement pour les étudiants du groupe matériaux*

*Riyadh*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail en signe de  
reconnaissance et de respect :*

*A mon père et ma mère qui m'ont donnée tous  
les moyens disponibles.*

*A mon frère*

*A mes soeurs*

*A toute ma famille en témoignage de mon  
profond respect.*

*A tous mes amis, tous ceux qui j'ai passé des  
meilleurs moments et gardé de  
Très bon souvenirs.*

*A mon binôme et sa famille.*

*Saïd*

## Résumé

Ces dernières années ont vu un regain d'intérêt pour, des fibres végétales. En effet, ces fibres peuvent représenter une alternative aux fibres traditionnelles utilisées dans les matériaux de construction, telles que les fibres polypropylènes. Le développement durable exige des matériaux respectueux de l'environnement donc des matériaux naturels. En ce sens, les fibres végétales utilisées comme renfort pour les matériaux cimentaires constituent une option très intéressante pour l'industrie de la construction.

Ainsi, notre travail de recherche se compose de deux parties. La première partie concerne généralité sur les polymères et une étude approfondie sur l'effet des fibres végétales sur les mortiers de polymère.

La seconde partie est dédiée à une modélisation à l'aide de logiciel JMP qui se base sur le plan expérimental

Les résultats de l'étude théorique obtenus montrent que l'incorporation des fibres végétales comme renfort écologique dans les polymères présente des caractéristiques à l'état frais et à l'état durci comparable à celles d'un composite témoin sans fibres. Dans cette étude on confirme que la réalisation des polymères avec fibres végétales est possible. Néanmoins, ces fibres doivent être préalablement traitées pour un meilleur comportement, notamment vis-à-vis de la durabilité.

**Mots clés :** fibres végétale, bétons polymères fibrés, durabilité, écologique.

## Abstract

In recent years, there has been a renewed interest in plant fibers. These fibers can be an alternative to traditional fibers used in building materials, such as polypropylene fibers. Sustainable development requires environmentally friendly materials, and therefore natural materials. In this sense, plant fibers used as reinforcement for cement materials are a very interesting option for the construction industry.

Thus, our research work consists of two parts. The first part deals with general polymers and a thorough study of the effect of plant fibers on polymer mortars.

The second part is dedicated to modeling using experimental JMP software

The results of the theoretical study show that the incorporation of plant fibers as an ecological reinforcement in polymers has characteristics in a fresh and hard state comparable to those of a fiber-free control composite. In this study it is confirmed that the realization of polymers with vegetable fibers is possible. However, these fibers must be treated beforehand for better behavior, especially with regard to durability.

**Keywords:** vegetable fibers, fibrous polymer concrete, durability, ecological.

## ملخص

وفي السنوات الأخيرة، تجدد الاهتمام بالألياف النباتية. ويمكن أن تكون هذه الألياف بديلاً للألياف التقليدية المستخدمة في مواد البناء، مثل ألياف البولي بروبيلين. فالتنمية المستدامة تتطلب مواد صديقة للبيئة، وبالتالي مواد طبيعية. وبهذا المعنى، فإن الألياف النباتية المستخدمة كتعزيز لمواد الأسمنت هي خيار مثير جداً للاهتمام بالنسبة لصناعة البناء .

وبالتالي فإن عملنا البحثي يتألف من جزأين. يتناول الجزء الأول البوليمرات العامة ودراسة شاملة لتأثير الألياف النباتية على مدافع البوليمر.

أما الجزء الثاني فيكرس للنمذجة باستخدام برمجيات JMP التجريبية

وتظهر نتائج الدراسة النظرية أن دمج الألياف النباتية كندعيم إيكولوجي في البوليمرات له خصائص في حالة طازجة وصعبة مقارنة بخصائص مركب التحكم الخالي من الألياف. وفي هذه الدراسة، يؤكد أن من الممكن تحقيق البوليمرات ذات الألياف النباتية. بيد أنه يجب معالجة هذه الألياف قبل ذلك من أجل تحسين السلوك، وخاصة فيما يتعلق بالمتانة.

**الكلمات المفتاحية :** ألياف نباتية، خرسانة البوليمر اللبيفية، المتانة، الإيكولوجية.

# Tables des matières

**Remerciement**

**Dédicaces**

**Résumé**

**Tables des matières**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

|   |    |
|---|----|
| <b>Introduction générale</b> .....  | 1  |
| <b>Chapitre 1 : Généralité sur les bétons et mortiers polymère</b>                      |    |
| 1. Introduction .....   | 3  |
| 2. Généralités – Définitions .....  | 3  |
| 3. Les différents types de bétons polymère .....  | 3  |
| 3.1 Le béton imprégné de résine : polymer impregnated concrete (PIC) .....              | 3  |
| 3.2 Le béton modifié par adjonction de polymère : polymer modified concrete (PMC) ..... | 4  |
| 3.3 Bétons à matrice organique «BMO» : polymer Concrete (PC) .....                      | 6  |
| 4. Ouvrabilité, comportement mécanique et durabilité des Mortiers/Bétons polymère ..... | 9  |
| 4.1 Ouvrabilité .....   | 9  |
| 4.2 Comportement mécanique .....  | 10 |
| 4.3 Durabilité .....  | 11 |
| 5. Conclusion .....   | 12 |
| <b>Chapitre 2 : Généralité sur les fibres</b>   |    |
| 1. Introduction .....   | 14 |
| 2. Fibres végétales .....   | 14 |
| 2.1 Définition des fibres végétales .....   | 14 |
| 2.2 Origine des fibres naturelles .....   | 14 |
| 2.3 Classification des fibres végétales .....   | 15 |
| 2.4 Constituants d'une fibre végétale .....   | 15 |
| 2.5 Propriétés des fibres végétales .....   | 17 |
| 3. Effet des fibres végétale sur le comportement des BAP .....                          | 20 |



|  |    |
|--|----|
| 3.1 Introduction.....  | 20 |
| 3.2 Résumé des travaux antérieurs sur l'effet des fibres végétales sur le comportement des polymères ..... | 21 |
| 4. Conclusion.....   | 22 |

### **Chapitre 3 : Les plans d'expérience**

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction.....   | 24 |
| 2. Définition .....  | 24 |
| 3. Domaine expérimental.....                                       | 25 |
| 4. Démarche méthodologique d'un plan d'expériences.....            | 26 |
| 4.1 La recherche des facteurs influents .....                      | 26 |
| 4.2 Définition du domaine expérimental.....                        | 26 |
| 4.3 Définition du modèle empirique .....                           | 26 |
| 5. Types de plan d'expériences .....                               | 27 |
| 5.1 Plans factoriels complets .....                                | 27 |
| 5.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux.....                | 27 |
| 5.1.2 Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres.....            | 27 |
| 5.2 Plans fractionnaires .....                                     | 27 |
| 5.2.1 Plans fractionnaires à deux niveaux.....                     | 27 |
| 5.2.2 Plan fractionnaire à n niveaux et p paramètres.....          | 28 |
| 6. Analyse des résultats .....                                     | 28 |
| 6.1 Analyse de régression .....                                    | 28 |
| 6.2 Analyse de la variance .....                                   | 29 |
| 6.2.1 Calcul du carré moyen des facteurs et des interactions ..... | 30 |
| 6.2.2 Calcul de la variance résiduelle.....                        | 31 |
| 6.2.3 Tableau d'analyse de la variance.....                        | 33 |
| 6.3 Analyse graphique des résultats .....                          | 33 |
| 7. Méthode des surfaces de réponse .....                           | 34 |
| 8. Conclusion .....  | 34 |

### **Chapitre 4 : Résultats et discussions**

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction.....                                       | 36 |
| 2. Résistance à la compression.....                        | 36 |
| 3. Modélisation statistique .....                          | 36 |
| 3.1 Modèle de la résistance à la compression à 28jour..... | 36 |
| 3.2 Modèle de la résistance à flexion à 28jours .....      | 39 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 3.3 Modèle de la consistance ..... | 41 |
| 4. Conclusion .....                | 44 |
| <b>Conclusion général</b> .....    | 46 |
| <b>Références</b> .....            | 47 |

# Liste des figures

## Chapitre 1 : Généralité sur les bétons et mortiers polymère

- Figure 1. 1 :** Schéma du modèle simplifié expliquant la formation d'une matrice mixte polymère/ciment.....6
- Figure 1. 2 :** Affaissement de différents bétons polymère..... 10

## Chapitre 2 : Généralité sur les fibres

- Figure 2. 1 :** Arrangement des micros fibrilles et de la cellulose dans la paroi cellulaire végétale ..... 16
- Figure 2. 2 :** Mécanismes d'endommagement des composites à fibres courtes .....22

## Chapitre 3 : Les plans d'expérience

- Figure 3. 1 :** Domaine d'étude d'un plan  $2^2$  .....25
- Figure 3. 2 :** Domaine d'étude d'un plan  $2^3$  .....26
- Figure 3. 3 :** Courbe de surface de réponse .....33

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

- Figure 4. 1 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours.....37
- Figure 4. 2 :** L'évolution de la résistance à la compression a 28jour en fonction de Poids de cendre volante (%) .....38
- Figure 4. 3 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues .....39
- Figure 4. 4 :** L'évolution de la résistance à la flexion a 28 jours en fonction de poids de cendre volante (%), Poids de Agent expansif .....41
- Figure 4. 5 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues .....41
- Figure 4. 6 :** L'évolution de la résistance à la consistance en fonction de en fonction poids de cendre volante (%) et le Poids de Agent expansif .....43

# Liste des tableaux

## Chapitre 1 : Généralité sur les bétons et mortiers polymère

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1. 1</b> : Caractéristique générale et application des bétons polymères .....                   | 8  |
| <b>Tableau 1. 2</b> : Différents mélanges de béton polymère.....   | 11 |
| <b>Tableau 1. 3</b> : Résistance à la compression et à la flexion de différents mélanges de polymère ..... | 11 |

## Chapitre 2 : Généralité sur les fibres

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 2. 1</b> : Comparaison entre les fibres naturelles et les fibres de verre .....   | 14 |
| <b>Tableau 2. 2</b> : Valeurs caractéristiques pour la densité, le diamètre et les propriétés mécaniques de Fibres végétales et synthétiques ..... | 18 |
| <b>Tableau 2. 3</b> : Illustre Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales .....   | 20 |

## Chapitre 3 : Les plans d'expérience

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 3. 1</b> : Tableau d'analyse de variance ..... | 33 |
|---|----|

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 4. 1</b> : présente les résultats de la résistance à la compression trouvée..... | 36 |
| <b>Tableau 4. 2</b> : Résumé de l'ajustement .....  | 37 |
| <b>Tableau 4. 3</b> : l'analyse des effets de différents paramètres.....                    | 37 |
| <b>Tableau 4. 4</b> : Résumé de l'ajustement .....  | 39 |
| <b>Tableau 4. 5</b> : l'analyse des effets de différents paramètres.....                    | 40 |
| <b>Tableau 4. 6</b> : Résumé de l'ajustement .....  | 42 |
| <b>Tableau 4. 7</b> : Estimations des coefficients .....                                    | 42 |

---

# *Introduction générale*

## ***Introduction générale***

---

En générale, l'introduction de fibres, quelle soient métalliques ou synthétiques dans les matériaux composites améliorent leurs performances : limitation des propagations des fissures, amélioration des résistances mécaniques (résistance à la traction, à la flexion) et amélioration de la ténacité du béton durci. Néanmoins le prix de revient de ces fibres est élevé et leur fabrication dégage du CO<sub>2</sub> et utilise des ressources non renouvelables. Ainsi, les recherches actuelles s'orientent vers, la possibilité de les remplacer par des fibres naturelles. Les fibres végétales sont biodégradables et renouvelables. Elles peuvent être issues de la valorisation d'une ressource locale dans certains pays. Ainsi les fibres végétales peuvent permettre d'atteindre des propriétés mécaniques intéressantes, tout en réduisant de façon significative le coût de revient du composite cimentaire.

De plus, le développement durable exige des matériaux respectueux de l'environnement donc des matériaux naturels. En ce sens, les fibres végétales utilisées comme renfort pour les matériaux cimentaires constituent une option très intéressante pour l'industrie de la construction.

L'Algérie est riche en plantes telles que l'Alfa, le Dis, les palmiers dattier, etc... Largement utilisé dans le domaine de construction (les maisons...etc.).

La revue de littérature montre qu'il y'a peu d'étude sur l'incorporation des fibres végétales dans les polymères. Les quelques études réalisées portent seulement sur la caractérisation classique. Par contre des études portent sur le comportement à long terme et le comportement vis-à-vis de la durabilité (notamment la tenue aux cycles gel/dégel et le comportement au feu...etc) restent limitées voire absentes.

Dans le cadre de cette étude, cinq fibres végétales de nature différente ont été utilisées (Alfa, Palmier dattier, Dis, chanvre et chènevotte) en remplacement des fibres de polypropylène.

L'approche est essentiellement théorique et comporte trois axes principaux :

Le premier axe concerne une généralité sur les bétons polymères. L'objectif ici est de comprendre la définition et les différents types de polymères selon les travaux de la littérature.

Le deuxième axe concerne l'introduction des fibres végétales dans la fabrication des bétons polymères. L'objectif ici est de valoriser leur utilisation et d'étudier leur influence sur les propriétés à l'état frais et durci du composite.

Le troisième axe consiste à modéliser les travaux de différents chercheurs à l'aide de logiciel JMP.

# ***CHAPITRE 1***

---

## ***Généralité sur les bétons et mortiers polymère***

---

## **1. Introduction**

Récemment, l'ingénierie des matériaux polymères a attiré l'attention croissante des communautés scientifiques et techniques, parce qu'elle permet de concevoir et de fabriquer les matériaux ayant les propriétés désirées et un coût raisonnable dans le domaine de construction et de réparation des structures. Par contre, les mortiers et les bétons modifiés par polymères sont utilisés préliminairement comme matériaux de finition ou de réparation

Dans ce chapitre on va donner une définition générale sur les bétons polymères ainsi de leurs différents types.

## **2. Généralités - Définitions**

Les qualités mécaniques et le coût relativement peu élevé du béton de ciment Portland en font le matériau de construction le plus utilisé. Cependant, celui-ci présente certains inconvénients : faible résistance en flexion, faible déformation à la rupture, sensibilité aux effets du gel-dégel et faible résistance aux produits chimiques. Pour remédier à ces inconvénients, le ciment Portland peut être substitué ou additionné de polymères ou de résines organiques. Le matériau obtenu est appelé « béton polymère ». Les différents types de bétons polymère sont : le béton imprégné de polymère (Polymère Impregnated Concrete) et le béton modifié par adjonction de polymère (Polymère Modified Concrete : PMC). Les applications les plus courantes des bétons polymériques sont la construction et la réparation des structures ainsi que la réalisation : d'escaliers, de plaques et panneaux de parements de diverses structures, d'appuis fenêtre, de canalisations des eaux usées, de ponts, de planchers et de beaucoup d'éléments de construction préfabriqués soumis à des agressions climatiques de type gel-dégel ou exposés à des solutions aqueuses corrosives (Vipulanandan and Dharmarajan, 1989).

## **3. Les différents types de bétons polymère**

### **3.1 Le béton imprégné de résine : polymer impregnated concrete (PIC)**

Selon Fowler (Amianti and Botaro, 2008), le béton imprégné de polymère est le premier béton polymère composite qui a reçu une attention répandue avec un certain intérêt commercial. La résistance aux attaques chimiques des acides est l'un des plusieurs propriétés distinctives de ce matériau. Il est obtenu par imprégnation d'un béton préfabriqué avec un monomère à faible viscosité. Ce dernier est ensuite polymérisé sous l'action d'agents physiques (rayonnement ultraviolet ou thermocatalyse) ou chimiques (catalyseurs). Les



monomères les plus utilisés pour l'imprégnation font partie des familles acryliques et vinyliques : méthacrylate de méthyle (MMA), styrène, acrylonitrile, acétate de vinyle (Shaw, 1989). L'imprégnation est un traitement très efficace lorsque les propriétés mécaniques des constructions après durcissement ou après un certain temps de service sont faibles. La résistance contre la corrosion chimique augmente, et la perméabilité (gaz, solutions) des constructions diminue de façon marquée après l'imprégnation. Le procédé d'imprégnation du béton avec différents types de matériaux polymère a permis d'améliorer les propriétés physico-mécaniques de tels composites (Chen *et al.*, 2006). Le béton imprégné de polymère assure aussi des avantages importants par rapport au béton conventionnel du point de vue force et durabilité en améliorant la structure poreuse du béton (faible perméabilité) (Yuill, 2017). En effet, il présente une résistance à la compression trois à quatre fois plus importante que celle du béton à partir duquel il a été fabriqué ainsi qu'une augmentation de la résistance à la traction et à la flexion. La durabilité est également améliorée en particulier celle au gel-dégel.

Grace à ses propriétés remarquables , le PIC est utilisé dans de nombreuses applications y compris les tabliers de ponts, les tuyaux et les conduites pour des fluides agressifs, carrelage, l'enfouissement de déchets dangereux...

### **3.2 Le béton modifié par adjonction de polymère : polymer modified concrete (PMC)**

Le béton modifié par adjonction de polymère (PMC) a déjà été utilisé dans diverses applications dans l'industrie de la construction depuis que le concept de la modification des matériaux cimentaires par les polymères a été présenté dans les années 1920(Lefebure, 1924). Le mortier et le béton modifié par des polymères sont préparés par le mélange d'un polymère ou d'un monomère soit dans une dispersion, soit sous forme pulvérulente, ou soit sous forme liquide avec un mortier de ciment frais ou un béton, à durcir par la suite, et si nécessaire, le monomère contenu dans le mortier ou dans le béton est polymérisé in situ. Le processus technologique associé au PMC est très similaire à celui du béton conventionnel. L'objectif est de permettre la formation simultanée de structure inorganique (cristalline) et organique (polymérique). Les polymères latex agissent généralement comme agents réducteurs d'eau et entraînent des quantités considérables d'air dans le béton. Les conditions de cure du béton modifié au latex de polymère ne sont pas les mêmes que pour le béton conventionnel, car le polymère forme une pellicule superficielle qui empêche dans une certaine mesure l'humidité

de s'échapper du béton, favorisant ainsi le maintien de l'hydratation. C'est pourquoi la période de cure du béton modifié au latex est habituellement plus courte que celle du béton ordinaire.

Il y a plusieurs types de mortiers et bétons modifiés par des polymères. Les polymères utilisés sont (Ohama, 1998):

- Des latex, constitués de particules de copolymères dispersées en milieu aqueux (diamètres compris entre 0,05 et 5  $\mu\text{m}$ ). Les plus utilisés sont les latex acryliques, en particulier ceux à base de poly (éthylène-vinyl acétate) ou EVA, de poly (acrylique ester) ou PAE, et de poly (acétate de vinyle) ou PVAc. L'adjonction de produits émulsifiants permet par ailleurs d'assurer la stabilité de la dispersion.
- des polymères hydrosolubles, les plus courants étant les dérivés de la cellulose, l'alcool

Polyvinylique ou PVA, le polyacrylamide. Dans les structures des mortiers et bétons modifiés, les agrégats sont liés par une phase Co-matrice, conduisant à des bétons caractérisés par des propriétés meilleures que celles du béton conventionnel. En effet des études antérieures ont montré que l'incorporation de polymères dans un mortier de ciment ou du béton entraîne souvent une amélioration de la maniabilité et des propriétés mécaniques, en particulier une plus grande résistance à la flexion et une diminution du module d'élasticité (Pascal *et al.*, 2004), une imperméabilité améliorée conduisant à la diminution de la diffusion des ions chlorure (Yang *et al.*, 2009), une plus grande résistance au gel (Mirza *et al.*, 2002), la réduction du taux de retrait (Wang and Wang, 2011), ainsi que l'amélioration de la durabilité (Sakai and Sugita, 1995) des structures en béton. L'amélioration de ces caractéristiques est due à la modification de la microstructure poreuse du béton ou du mortier. Le liant devient plus dense et la porosité totale ainsi que la taille des pores diminuent (Schulze, 1999).

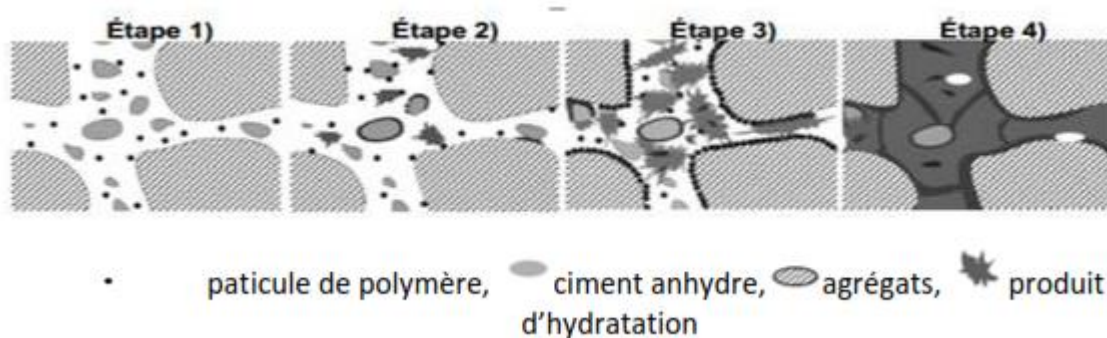
(Shaker *et al.*, 1997) ont montré qu'un PMC avec un ratio en masse polymère/ ciment de 15% a une étanchéité à l'eau plus importante, une meilleure protection de l'acier contre les chlorures, une amélioration de la résistance à l'abrasion et une meilleure résistance à la solution de sulfate par rapport aux bétons traditionnels.

Les différentes étapes conduisant à la formation de la matrice mixte polymère/ciment sont présentées sur la Figure 1. 1 :

- La première étape correspond au mélange des composants (polymère, grains de ciment, agrégats) et au début de l'hydratation.
- Dans la deuxième étape, une fraction des particules de polymère se dépose à la surface des grains de ciment et des agrégats. Ces particules peuvent coalescer et former un

film à la surface de certains grains, retardant ou inhibant ainsi la réaction d'hydratation de ces grains.

- A la troisième étape, les hydrates précipitent dans la phase interstitielle liquide, conduisant à la formation d'un composé mixte organique/inorganique.
- Les processus d'hydratation et de formation du film polymère se poursuivent dans la dernière étape : la fraction de particules polymères qui est encore présente dans la dispersion devient confinée au niveau des pores capillaires et à l'interface agrégats/matrice. C'est cette fraction qui contribue le plus à l'amélioration des propriétés mécanique du matériau.



**Figure 1. 1** Schéma du modèle simplifié expliquant la formation d'une matrice mixte polymère/ciment (Ohama, 1995).

### **3.3 Bétons à matrice organique «BMO» : polymer Concrete (PC)**

Dans ce béton, la matrice cimentaire ou le liant (ciment Portland/eau) dans le béton conventionnel, est remplacé par une matrice organique : un polymère. Le béton obtenu est connu sous la dénomination anglo-saxonne « Polymère Concrète PC ». Il est désigné par béton à matrice organique BMO ou « béton polymère ». Ce polymère est parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable. Lorsque la charge est constituée de sable, le composite obtenu est appelé mortier polymère.

Parmi les autres charges minérales figurent la pierre concassée, le gravier, le calcaire, la craie, le condensât de silice (poudre de silice, poussière de silice), le granit, le quartz, l'argile, le verre expansé et les fines particules métalliques. Comparé au béton de ciment Portland, ce composite possède une faible perméabilité et une meilleure résistance aux attaques chimiques (Ribeiro, 2006).

## Chapitre 1 .....Généralité sur les bétons et mortiers polymère

Ce béton polymère a été utilisé dans les années 50 essentiellement dans la fabrication du marbre synthétique et des sanitaires (comptoirs, lavabos, ...). Ses applications se sont ensuite diversifiées et ont énormément augmentées dans le domaine du génie civil.

Des efforts considérables ont été faits pour développer l'utilisation du BMO en tant que matériau de réparation pour béton. Son durcissement rapide, son excellente adhérence au béton, sa résistance mécanique élevée et sa durabilité en font un matériau de réparation très attractif.

De plus, le béton à matrice organique a permis la production d'une large gamme de produits préfabriqués y compris les égouts, les réservoirs pour acide, revêtement de tunnels, carrelage, des moulures architecturales, les barrières médianes d'autoroutes... Cette diversité de produits a été obtenue grâce : à la capacité de ce matériau à se mettre en œuvre sous des formes complexes, sa mouillabilité, son excellent amortissement des vibrations ainsi qu'à sa faible conductivité thermique. Ce produit, dont les propriétés sont très attractives, a été non seulement utilisé pour remplacer le béton mais aussi d'autres matériaux comme le métal par exemple la fonte pour les bases des machines.

La majeure partie des travaux sur les BMO a été réalisée avec les résines époxy, polyester et furane par la suite le Poly (métha-crylate de méthyle) a été utilisé ainsi que le styrène. Les considérations importantes dans le choix d'un système de résine sont le faible coût, la durabilité dans des conditions d'exposition prévues, l'adhérence aux agrégats, la facilité de mise en œuvre (ouvrabilité) ainsi que la rapidité de durcissement.

Quelques propriétés de bétons de résine courants sont comparées à celles du béton conventionnel au Tableau 1. 2. Le Tableau 1. 3 regroupe quelques caractéristiques générales et applications des bétons polymère.

**Tableau 1. 1** Caractéristique générale et application des bétons polymères

(Younus *et al.*)

| <b>Poly(méthacrylate de méthyle)</b> |   |
|--------------------------------------|---|
| Caractéristiques générales           | Faible tendance à absorber l'eau, haute résistance au gel-dégel, faible retrait pendant et après la prise, très bonne résistance à l'attaque chimique et une durabilité aux agressions environnementales.   |
| Applications                         | Utilisé dans la fabrication d'escaliers, des plaques de façade et des bordures de trottoir.   |
| <b>Résine polyester</b>              |   |
| Caractéristiques générales           | une bonne adhérence à d'autres matériaux, une bonne résistance au gel-dégel et aux attaques chimiques.  |
| Applications                         | En raison de son faible coût, il est largement utilisé dans les panneaux, pour les bâtiments publics et commerciaux, le carrelage, les tuyaux, les escaliers ainsi que pour la mise en œuvre de diverses pièces préfabriqués et coulés sur place dans des travaux de construction.                        |
| <b>Résine époxy</b>                  |   |
| Caractéristiques générales           | forte adhérence à la plupart des matériaux de construction; faible retrait, résistance chimique élevée, bonne résistance au fluage et à la fatigue et faible absorption d'eau.  |
| Applications                         | Les résines époxy sont relativement coûteuses; elles sont principalement utilisées dans des applications spéciales, y compris dans le mortier pour sols industriels, les revêtements antidérapants pour les autoroutes, les revêtements pour murs extérieurs et la réparation des structures détériorées. |
| <b>Résine furanique</b>              |   |
| Caractéristiques générales           | Ils sont des matériaux composites à haute résistance aux produits chimiques (milieu aqueux acide ou basique) ; ils ont une forte résistance aux liquides organiques polaires tels que les cétones, les hydrocarbures aromatiques et les composés chlorés.   |
| Applications                         | Les mortiers et les coulis de résine furanique sont utilisés pour la fabrication des briques, des planchers et des revêtements qui résistent aux produits chimiques, aux températures élevées et aux chocs thermiques.  |

#### **4. Ouvrabilité , comportement mécanique et durabilité des Mortiers/Bétons polymère**

##### **4.1 Ouvrabilité**

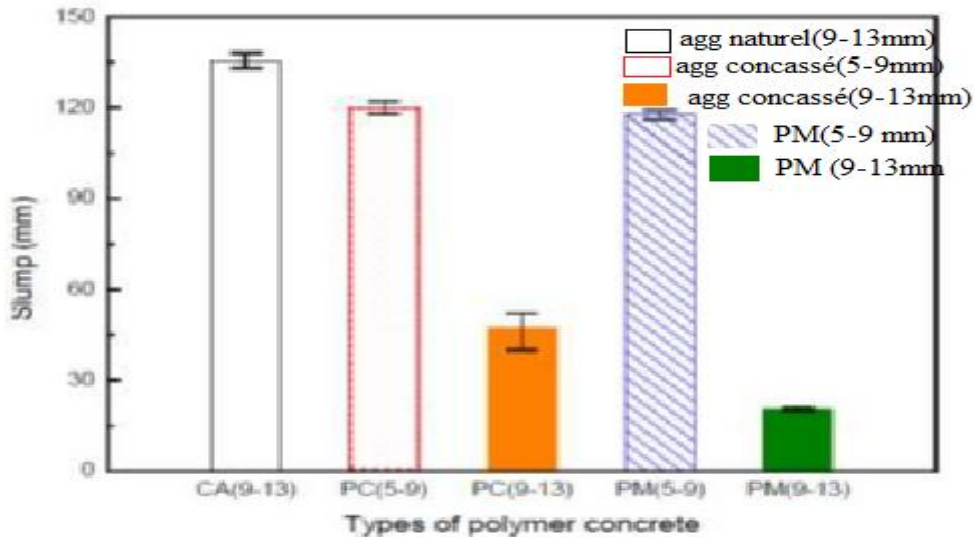
L'ouvrabilité est un terme général utilisé dans la description des propriétés du béton frais.

Elle est souvent définie comme étant la quantité de travail mécanique nécessaire pour le compactage du béton sans ségrégation. Cette définition est utile car la résistance finale du béton est largement influencée par le degré de compactage. Une légère augmentation de la teneur en vide à cause d'un compactage insuffisant peut conduire à une grande diminution de la résistance. Les principales caractéristiques de maniabilité sont la cohérence (ou fluidité) et la cohésion. La cohérence est utilisée pour mesurer la facilité d'écoulement du béton frais. Et la cohésion est utilisé pour décrire la capacité du béton frais pour contenir tous les ingrédients ensemble sans ségrégation et ressuage excessif.

Le coût élevé des résines a incité les chercheurs à trouver une solution pour réduire le taux du liant dans le béton tout en conservant une mise en œuvre aisée. L'addition de cendres volantes, sous-produit de la combustion du charbon, dans la composition des bétons résineux a été rapportée par plusieurs auteurs. Ils ont montré que ceci conduit non seulement à l'amélioration de l'ouvrabilité du béton polymère, mais provoque également un effet notable sur les propriétés mécaniques (Bedi *et al.*, 2013).

Les cendres volantes sont utilisées en tant que charge dans la composition des bétons et des mortiers polymère pour améliorer l'ouvrabilité à l'état frais ; les produits résultant ont une excellente finition de surface. Plusieurs études ont montré que la petite taille des particules sphériques contribue à un meilleur empilement du squelette granulaire. Ceci réduit la porosité et entrave la pénétration des agents agressifs, améliorant ainsi considérablement la résistance chimique du béton polymère (Gorninski *et al.*, 2007).

Rebeiz (Rebeiz, 1996) a également formulé un béton à base de polyester insaturé issu du recyclage du PET (polyéthylène téréphtalate). La composition de ce béton a été optimisée en tenant compte des caractéristiques d'ouvrabilité et de résistances mécaniques. Il a remarqué que l'ajout de cendres volantes améliore considérablement la mise en œuvre du béton frais ainsi que sa cohésion. Il a constaté, de plus, qu'une meilleure distribution granulaire est obtenue conduisant à un matériau caractérisé par des propriétés mécaniques élevées.



**Figure 1. 2** Affaissement de différents bétons polymère (Rebeiz, 1996)

#### 4.2 Comportement mécanique

Les travaux antérieurs portant sur les bétons et mortiers résineux avaient pour objectif d'optimiser leur formulation tout en aboutissant aux propriétés physiques et aux résistances mécaniques souhaitées. Les approches utilisées sont pour la plupart expérimentales. (Mirouzi *et al.*, 2013) ont optimisé la formulation de micro-bétons de résine polyester. Dans cette optimisation, ils ont utilisé une méthode empirique se basant sur le principe du point de saturation des sables avec la résine. La démarche consiste à déterminer une formule en utilisant deux types de sable, le premier est fin et le second est moyen, en partie égale (50% sable fin, 50% sable moyen). L'utilisation de deux types de sable a pour but l'amélioration du squelette granulaire. Pour obtenir la saturation du béton, ils ont fait varier le taux de résine par pas. Un taux de 13% de résine s'est avéré insuffisant car une non saturation du sable a été observée, en effet, une grande partie du sable n'a pas été mouillée. Le taux de résine a alors été augmenté jusqu'à 25%, la composition ainsi obtenue a encore montré une non saturation totale mais s'est révélée être un bon indicateur de référence pour arriver à l'optimisation. Ils ont procédé ensuite par pas de 5%. A 30% de taux de résine, une pâte très liquide a été obtenue indiquant une sursaturation. Ils ont donc opté de façon empirique pour une valeur moyenne se situant entre 25% et 30%. Finalement un taux moyen de 27 % a été adopté.

**Tableau 1. 2** Différents mélanges de béton polymère (Mirouzi et al., 2013).

| Composition (%) |             | I   | II  | III |
|-----------------|-------------|-----|-----|-----|
| Granulats       | Sable fin   | 40  | 50  | 60  |
|                 | Sable moyen | 60  | 50  | 40  |
| Liant           | Résine      | 27  | 27  | 27  |
|                 | Durcisseur  | 2.4 | 2.4 | 2.4 |

**Tableau 1. 3** Résistance à la compression et à la flexion de différents mélanges de polymère.

| Formulation       | I  | II | III |
|-------------------|----|----|-----|
| Flexion (MPa)     | 20 | 21 | 23  |
| Compression (MPa) | 51 | 58 | 70  |

Il a été constaté que les résistances à la flexion et à la compression augmentent avec le rapport G/S jusqu'à la valeur 1, puis diminuent progressivement au-delà de cette valeur. Il apparaît ainsi, que la résistance à la traction par flexion est plus faible lorsque le rapport G/S =2.

Pour un rapport G/S élevé, l'adhérence entre la résine et les granulats devient mauvaise ce qui confère au béton de résine une mauvaise qualité. Les meilleures résistances à la traction par flexion et à la compression sont obtenues pour le rapport G/S =1.

### 4.3 Durabilité

La durabilité d'un matériau est définie comme étant son aptitude à préserver ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques après son exposition à des conditions environnementales agressives. Plusieurs études ont été réalisées sur la durabilité du béton

Portland (Fattuhi and Hughes, 1988). Cependant, peu d'informations sont disponibles concernant la résistance des bétons polymère aux agressions environnementales alors que leur utilisation dans diverses applications connaît un grand essor. Il est alors important d'étudier l'éventuel changement de leurs propriétés lorsqu'ils sont soumis à de sévères conditions en particulier à : des cycles de gel-dégel, des cycles séchage-humidification, des changements cycliques de radiation solaire ou de température, conditions maritimes ...

(Hohlweg-Majert *et al.*, 2006) a étudié la résistance du béton de polyester à l'eau chaude. Des échantillons cylindriques ont été immergés dans l'eau bouillante pendant une année avant d'être testés en compression et en traction par fendage. Il a été conclu que la profondeur d'érosion dans ce béton augmente avec la durée d'immersion sans changement de masse apparente. (Ohama, 1998) ont également mesuré les effets de différents types de solutions chimiques sur la résistance à la compression d'un béton de poly (méthacrylate) de méthyle



après un mois d'immersion. Les résultats obtenus ont montré que ce matériau est sévèrement attaqué par l'acétone, le toluène, et légèrement par les acides. Cependant, ce béton montre une bonne résistance à l'eau potable, aux solutions basiques et salines ainsi qu'au kérosène et à l'huile de colza.

## **5. Conclusion**

D'après ces travaux antérieurs, il se dégage des points importants qui sont à l'origine de certains choix fixés au cours de ce travail :

- La formulation adéquate du béton et du mortier de résine dépend de la nature du liant et de sa composition. Les résines les plus utilisées sont le polyester et en particulier la résine époxy. Dans la littérature, les pourcentages massiques du liant varient généralement entre 5 et 25% selon la nature de la matrice organique et du type des granulats ajoutés. Ces bétons et mortiers résineux sont caractérisés par des résistances mécaniques beaucoup plus importantes que celles des hydrauliques.
- L'ouvrabilité du béton ou du mortier polymère à l'état frais a un impact très important sur sa structure poreuse une fois qu'il est durci et par conséquent sur leurs propriétés mécaniques et de durabilité.
- La durabilité de ces matériaux à matrice organique est influencée par la nature du liant ainsi que par la taille et la forme des granulats. Dans les travaux précédents, cette propriété a été étudiée en les exposants à différents agents chimiques et/ou à des conditions environnementales contrôlées en laboratoire (cycles gel-dégel, cycles séchage-humidification, cycles de températures, cycles d'irradiation UV...)

## ***CHAPITRE 2***

---

### ***Généralité sur les fibres***

---

## 1. Introduction

Les matériaux de construction, notamment les bétons et les mortiers renforcés par des fibres métallique, polypropylène ou de verre submergent maintenant l'industrie de bâtiment .Les fibres métalliques sont les plus répandues grâce à leur bas coût, et à leurs performances mécaniques. Cependant, ces fibres ont des inconvénients notables par rapport aux fibres naturelles. Le tableau 2. 1 rassemble une comparaison très exhaustive entre les propriétés des fibres naturelles et les fibres de verre.

**Tableau 2. 4** Comparaison entre les fibres naturelles et les fibres de verre (Wambua et al., 2003)

| Caractéristiques       | Les fibres naturelles FN | Les fibres de verre FV |
|------------------------|--------------------------|------------------------|
| Densité                | Basse                    | Double des FN          |
| Coût                   | Bas                      | Bas mais < que les FN  |
| Renouvelable           | Oui                      | Non                    |
| Recyclable             | Oui                      | Non                    |
| Consommation d'énergie | Basse                    | Haute                  |
| Distribution           | Large                    | Large                  |
| Neutralisation du CO2  | Oui                      | Non                    |
| Abrasion des machines  | Non                      | Oui                    |
| Risques sanitaires     | Non                      | Oui                    |
| Biodégradabilité       | Oui                      | Non                    |

## 2. Fibres végétales

### 2.1 Définition des fibres végétales

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, 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(Yahiaoui, 2018).

### 2.2 Origine des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont subdivisées en fonction de leurs origines, minérale, animale ou végétale. Les premières sont de longueur limitée, à l'exception des types particuliers tels que ceux de l'amiante, qui sont maintenant connus pour être dangereux pour la santé humaine (cancérogénicité). Les fibres animales telles que (la soie et la laine) sont destinées principalement au secteur du textile. Les fibres végétales sont des structures biologiques principalement composées de celluloses, d'hémicelluloses et de lignines. Dans une proportion beaucoup plus faible, elles peuvent contenir également de la pectine et des substances cireuses constituées de différents types d'alcools et de plusieurs acides (acide palmitique, acide stéarique, acide oléagineux) (Mohanty *et al.*, 2000). Elles sont d'origine diverse, et peuvent

provenir non-seulement des plantes très différentes mais aussi de différentes parties de la plante.

### **2.3 Classification des fibres végétales**

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance à s'avoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface( Abdessamed, 2006).

#### **✚ Les fibres de feuilles**

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, d'abaca.

#### **✚ Les fibres de tiges**

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie, de kenaf, et de chanvre.

#### **✚ Les fibres de bois**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes.

#### **✚ Les fibres de surface**

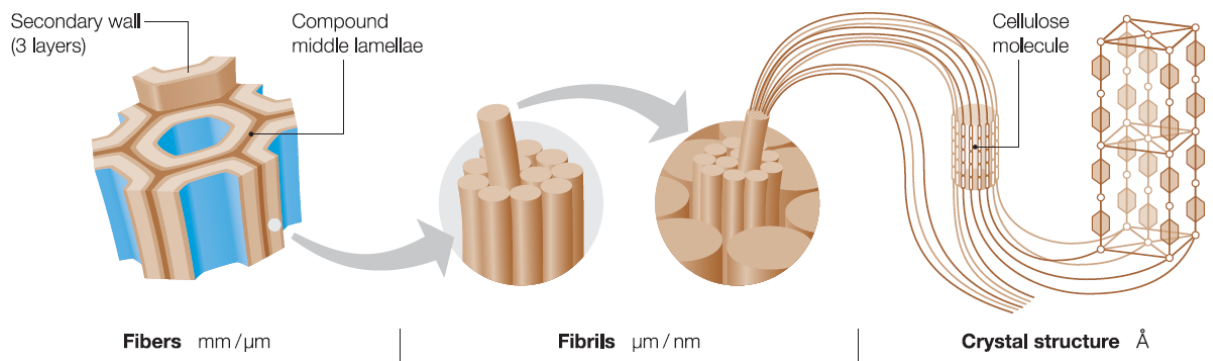
Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autres le coton et la noix de coco.

### **2.4 Constituants d'une fibre végétale**

Les fibres végétales sont des structures rigides micro fibrillaires(Zimmermann *et al.*, 2004).

Les principaux constituants de cette dernière sont (Figure 2.1) :

- Au niveau moléculaire, la paroi de la cellule est généralement composée (i) de la cellulose (structure de fibre), (ii) l'hémicellulose (la matrice), (iii) la lignine (accumule le vieillissement de la plante), et (iv) de la pectine (agissant en tant que liant ou une colle aux interfaces) ;
- Des cellules individuelles (appelées micro fibrilles ou fibrilles) avec un noyau creux (lumen) ;
- Réseaux cellulaires (faisceaux de fibres ou fibres techniques)



**Figure 2. 3:**Arrangement des micros fibrilles et de la cellulose dans la paroi cellulaire végétale(Zimmermann *et al.*, 2004).

Les quantités relatives des constituants dépendent d’une espèce à une autre, pour le même type de fibre la composition chimique dépend de la maturité de l’organe de provenance de la fibre, des conditions climatiques ainsi que des méthodes utilisées pour l’extraction de la fibre(Sofiane and Laurent, 2013). Mais dans chaque cas a prévalence de cellulose de sorte que ces fibres sont souvent désignées comme des fibres lignocellulosiques. Le tableau I.1 montre la composition chimique des principales fibres végétales et leurs principaux constituants. On peut noter aussi une forte hygroscopicité de toutes les fibres d’origines végétales avec une teneur en humidité dans laquelle il atteint des valeurs comprises dans l’intervalle de 8 à 12,6 % en poids. Ceci explique par la nature polaire de la macromolécule de cellulose, en raison de la présence de nombreux groupes hydroxyle (trois pour chaque unité monomère du glucoside) et des atomes d’oxygène.

La structure moléculaire des fibres végétales révèle deux régions distinctes (Figure I.3) : un bloc de molécules cristallines dense impénétrable. Les zones cristallines possèdent des densités plus élevées que celles amorphes et sont plus résistantes à l’eau(Walker, 2006)et une région amorphe où l’eau peut être absorbée. Les zones amorphes possèdent moins de liaisons hydroxyles inter-chaines et peuvent réagir avec les molécules de l’eau. L’absorption d’humidité oblige les molécules de cellulose de s’éloigner de plus et, par conséquent, la fibre gonfle lorsqu’elle est mouillée attribuant le caractère hydrophile à cette dernière. Ceci est une caractéristique importante des fibres végétales, car il en résulte que la performance d’un produit sera influencée par sa réaction à l’humidité.

## **2.5 Propriétés des fibres végétales**

### **✚ Les propriétés mécaniques des fibres naturelles**

Généralement, la résistance à la traction et le module de Young des fibres végétales augmentent avec l'augmentation de leur teneur en celluloses. La défaillance de la fibre s'effectue lorsqu'un élément matriciel perd son collage avec les fibrilles de renforcement et que la liaison hydrogène dans les micros fibrilles de cellulose est cassée. Par conséquent, plus la teneur en celluloses est faible, plus la résistance à la traction est faible (Komuraiah *et al.*, 2014).

Les propriétés mécaniques sont affectées par la présence du lumen qui est le plus souvent négligé considérant la section transversale pleine. En effet, quand le diamètre du lumen est important par rapport à celui de la fibre, la section réelle des parois de la fibre est plus faible, ce qui conduit à une sous-estimation des propriétés mécaniques. De même, l'eau absorbée par les fibres végétales s'infiltré dans les pores et les régions amorphes des fibres en réduisant la cohésion entre les microfibrilles et agit comme un plastifiant (Baley, 2002) (Joffe *et al.*, 2003) En transformant la matrice pectique en un gel presque fluide (Girault *et al.*, 1997). Par contre, l'absorption d'eau n'a que peu d'effet sur la cellulose et l'hémicellulose, la rigidité des régions cristallines n'est pas affectée par l'augmentation d'humidité. L'humidité provoque la formation de champignons à la surface de la fibre après 3 jours d'exposition, ce qui dégrade la fibre et diminue ses propriétés mécaniques (Stamboulis *et al.*, 2001). Les fibres lignocellulosiques présentent des propriétés mécaniques qui sont comparables ou même supérieures à celles de fibres de verre.

Le Tableau 2.2 montre les propriétés mécaniques de quelques fibres lignocellulosiques et synthétiques usuelles reportées dans la littérature.

**Tableau 2. 5** Valeurs caractéristiques pour la densité, le diamètre et les propriétés mécaniques de Fibres végétales et synthétiques ( Stamboulis *et al.*, 2001).

| Type de fibre                 | Diamètre (µm) | Densité (g / cm <sup>3</sup> ) | σ (MPa)   | E (GPa)    | ε (%)       |
|-------------------------------|---------------|--------------------------------|-----------|------------|-------------|
| lin                           | 16.8±2.7      | 1.38                           | 94.5±200  | 52.5±8.6   | 2.07±0.45   |
| chanvre                       | 42            | 1.07                           | 285       | 14.4       | 2.2         |
| jute                          | -             | 1.35-1.45                      | 393-773   | 25-55      | 1.4-3.1     |
| kenaf                         | -             | 1.19-1.2                       | 470-785   | 25.1       | 1.75-1.9    |
| CQ stem                       | 770-870       | 1.22                           | 2300-5479 | 56-234     | 3.75-11.14  |
| CQ root                       | 610-725       | 1.51                           | 1857-5330 | 68-203     | 3.57-8.37   |
| <i>Lygeum spartum L.</i>      | 180-433       | 1.4997                         | 64.63-280 | 4.47-13.27 | 1.49-3.74   |
| Arundo donax                  | -             | 1.168                          | 248       | 9.4        | 3.24        |
| Figue                         | 50-200        | 0.870                          | 200       | 8-12       | 4.6         |
| Arichaut                      | 300           | 1.579                          | 182       | 10.7       | 2.8         |
| Feuille d'ananas              |               | 1.07                           | 126.6     | 4.405      | 2.2         |
| <i>Phoenix dactylifera L.</i> | 577±83        | -                              | 117±35    | 4.3±1.4    | 3.13±0.7    |
| Agave                         | 239±68        | -                              | 132±66    | 1.83±0.94  | 33.29±13.55 |
| feuille de palmier            |               | -                              | 97-196    | 2.5-4.7    | 2-4.5       |
| Oil palm empty fruit bunch    | 330-340       | -                              | 49        | 2.76       | 7           |
| Verre -E                      | -             | 2.5                            | 2000-3500 | 70         | 2.5         |
| Carbone                       | -             | 1.7-1.9                        | 4000      | 230-240    | 1.4-1.8     |
| Aramid                        | -             | 1.4                            | 2800-3600 | 80-190     | 2-7         |

### **Propriétés physiques**

Les propriétés mécaniques des fibres cellulosiques dépendent également des propriétés physiques de ces fibres telles que le diamètre de la fibre, la longueur, la densité, le gain d'humidité et l'angle de microfibril... etc.

La structure hiérarchique des fibres végétales naturelles confère au matériau fibreux une excellente performance de propriétés. Les molécules d'hémicellulose sont liées avec une liaison d'hydrogène à la cellulose et agissent comme une matrice de cimentation entre les microfibrilles de cellulose, formant le réseau cellulose/hémicellulose, qui est considéré comme le principal composant structurel de la cellule fibreuse( Lampke *et al.*, 2005). Certains éléments physiques importants doivent être connus sur chaque fibre végétale avant qu'elle soit utilisée pour atteindre le potentiel maximal( Rowell *et al.*, 1997), tel que la forme, taille, l'angle fibrillaire, épaisseur des parois cellulaires, le taux de cristallinité. La présence du lumen diminue la densité apparente de la fibre et agit comme isolant acoustique et thermique.

Les dimensions des cellules individuelles des fibres lignocellulosiques dépendent des espèces, de la maturité et de l'emplacement des fibres dans la plante et aussi sur les conditions d'extraction des fibres( Jawaid and Khalil, 2011).

### **Composition chimique de la fibre végétale**

Les différents constituants des fibres végétales sont :

- La Cellulose : La cellulose est le principal composant dans le quasi-totalité des fibres végétales et représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre (plus de 50 % de la biomasse)( Dallel, 2012). C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne des fibres en cellulose( Abdessamed, 2006).
- Hémicellulose : Les hémicelluloses représentent le 3ème composant principal juste après la cellulose et la lignine, avec une proportion en poids à peu près 25% de la biomasse( Dallel, 2012).L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres (Abdessamed, 2006).
- Lignine : La lignine forme avec la cellulose et l'hémicellulose la grande majorité de la biomasse, elle est 2ème après la cellulose en termes d'abondance. Ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition (barrière



de protection biologique)( Yahiaoui, 2018).La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel( Abdessamed, 2006).

- 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)( Yahiaoui, 2018).
- 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 (Yahiaoui, 2018).

**Tableau 2. 6** Illustre Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales (Yahiaoui, 2018).

| <b>Fibres</b>  | <b>Cellulose</b> | <b>Hémicelluloses</b> | <b>Lignine</b> | <b>Pectine</b> | <b>Cire</b> |
|----------------|------------------|-----------------------|----------------|----------------|-------------|
| <b>Coton</b>   | 85-90            | 5,7                   | 0,7-1,6        | 0-1            | 0,6         |
| <b>Lin</b>     | 71               | 18,6-20,6             | 2,2            | 2,3            | 1,7         |
| <b>Chanvre</b> | 70-74            | 17,9-22,4             | 3,7-5,7        | 0,9            | 0,8         |
| <b>Jute</b>    | 61,1-71,5        | 13,6-20,4             | 12-13          | 0,2            | 0,5         |
| <b>Ramie</b>   | 68,6-76,2        | 13,1-16,7             | 0,6-0,7        | 1,9            | 0,3         |
| <b>Sisal</b>   | 66-78            | 10-14                 | 10-14          | 10             | 2           |
| <b>Coco</b>    | 32-43            | 0,15-0,25             | 40-45          | 3-4            | -           |
| <b>Alfa</b>    | 45               | 24                    | 24             | 5              | 2           |

### **3 Effet des fibres végétale sur le comportement des BAP**

#### **3.1 Introduction**

L'objectif de ce travail, c'est la valorisation des ressources naturelles telles que les fibres végétales en les utilisant comme renfort du béton polymère. Pour réduire l'impact environnemental et améliorer le comportement mécanique du béton à la flexion, compression et rupture. Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'effet de l'introduction des fibres végétales dans un béton polymère.

### **3.2 Résumé des travaux antérieurs sur l'effet des fibres végétales sur le comportement des polymères**

Lors des deux dernières décennies les scientifiques se sont intéressés à l'étude des fibres naturelles comme renforts dans les composites à matrice polymère. Le lecteur pourra trouver plus de détails sur la classification de ces fibres en lisant le travail de review de Bledzki et Gassan (Bledzki and Gassan, 1999). Ces fibres naturelles présentent des avantages par rapport aux fibres synthétiques, comme par exemple de bonnes propriétés spécifiques, moins denses, moins chères. Cependant leur température de mise en forme nettement inférieure à celle des renforts synthétiques ou inorganiques( Hatakeyama and Hatakeyama, 2006)impose de les insérer dans une matrice thermoplastique de nature polyoléfine. Le débat sur l'utilisation de ces renforts comme alternative aux fibres synthétiques est toujours ouvert (Bodros *et al.*, 2007). En effet, comme pour les fibres synthétiques, il est nécessaire de traiter les fibres naturelles avant l'élaboration du composite. Différentes méthodes sont possibles (Beckermann and Pickering, 2008), la compatibilisation peut être effectuée par un agent extérieur (chimique ou physique) ou par une compatibilisation mécanique. D'un point de vue environnemental l'ajout d'un agent extérieur chimique peut faire perdre l'intérêt d'utiliser du naturel. De plus la performance finale de nos composites est directement liée à la bonne compatibilisation, en effet celle-ci conditionne l'évolution de l'endommagement.

(GEHRING et al, 2011) on fait une étude sur le comportement mécanique et l'endommagement de polypropylène (PP) renforcé par des fibres courtes de chanvre en s'intéressant particulièrement aux influences de la vitesse de déformation, de la température et de la fraction massique de chanvre. Les premiers essais, présentés ici montrent que l'ajout de fibres de chanvre dans une matrice polypropylène tend à augmenter ces propriétés mécaniques. L'influence de la vitesse de déformation, de la température initiale et du taux de chanvre est clairement analysée. L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation spatiale du comportement thermomécanique du composite en modélisant finement la microstructure afin d'avoir une approche locale des mécanismes d'endommagement localisés à l'interface fibres-matrice de ce matériau. La connaissance de la cinétique et des mécanismes d'endommagement est cruciale pour améliorer les performances de ces composites. Des observations post-mortem du faciès de rupture au MEB environnementalont permis de lister les principaux mécanismes d'endommagement de nos composites. La figure 2.2 présente les principaux mécanismes d'endommagement liés aux fibres courtes. Ces mécanismes sont conformes à ceux cités dans la littérature sur les fibres courtes

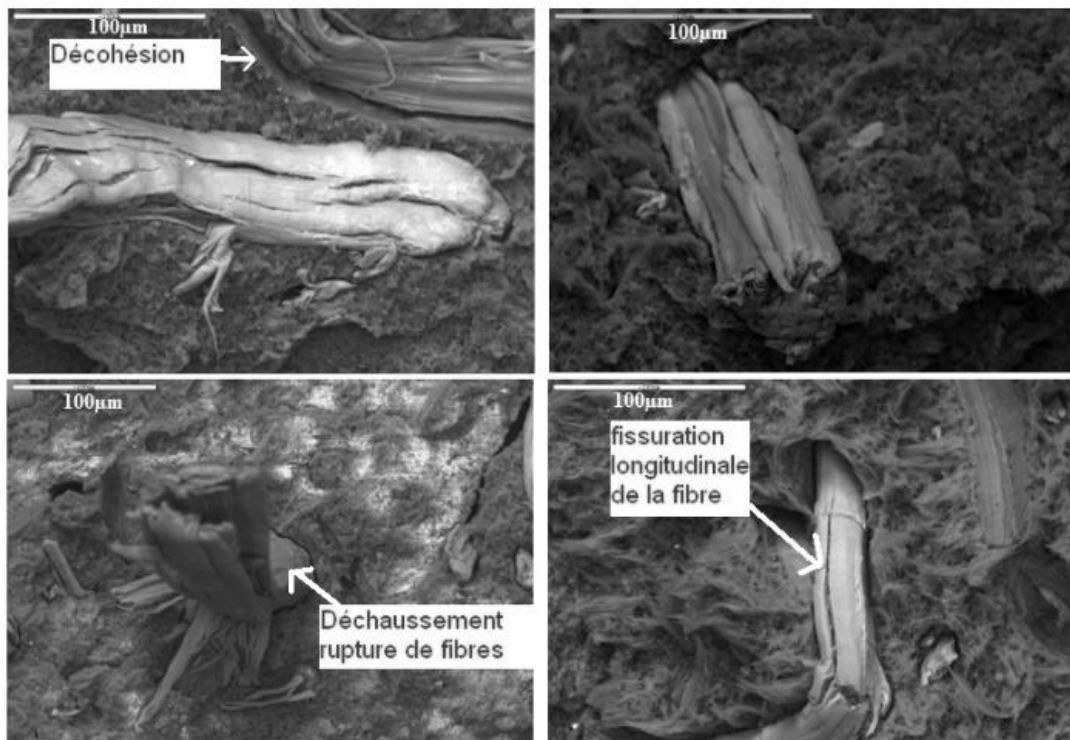


Figure 2. 4 Mécanismes d'endommagement des composites à fibres courtes

#### 4 Conclusion

Les fibres végétales présentent un regain d'intérêt dans les dernières années. En effet, ces fibres peuvent représenter une alternative aux fibres traditionnelles utilisées dans les matériaux de construction, telles que les fibres polypropylènes. Le développement durable exige des matériaux respectueux de l'environnement donc des matériaux naturels. En ce sens, les fibres végétales utilisées comme renfort pour les matériaux cimentaires constituent une option très intéressante pour l'industrie de la construction. S'agissant des fibres végétales, leur introduction dans les bétons polymères est restée timide malgré les multiples avantages économiques, écologiques et techniques qu'elles pourraient procurer.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre recherche qui a pour objectif d'établir un plan expérimental relatif à l'utilisation de différentes fibres végétales dans les bétons et les polymères.

# ***CHAPITRE 3***

---

## ***Les Plans d'expériences***

---

## 1. Introduction

Les conceptions expérimentales permettent l'organisation de tests à effectuer soutient la recherche scientifique ou les études industrielles. Les ingénieurs sont souvent amenés à rechercher des valeurs de paramètres qui définissent les produits ou des paramètres de modification des moyens de production afin d'obtenir les performances souhaitées. Pour cela, nous utilisons la technique de conception expérimentale, qui est une série de tests entièrement pré-organisés qui déterminent, dans le nombre minimum de tests et avec la plus grande précision, l'influence de divers facteurs possibles, afin d'améliorer les performances du système étudié.

## 2. Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres (facteurs) tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Elle permet d'extraire le maximum d'informations avec un minimum de résultats. La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié (Vigier, 1988).

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais.
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions entre facteurs.
- Modélisation des réponses étudiées.
- Une précision optimum des résultats. (Frédéric, 1995)

**Le facteur** : On qualifie de facteur toute variable, obligatoirement contrôlable, susceptible d'influer sur la réponse observée. La différence fondamentale entre la notion classique de variable et celle de facteur tient donc dans le fait que tout facteur doit pouvoir être modifié sans difficulté ( Tinsson , 2010). Chaque facteur peut être :

- 1- Facteur quantitative ; Ses valeurs sont alors des nombres exprimant une quantité et sur lesquels les opérations arithmétiques (somme, soustraction, etc....) ont un sens. Le facteur peut alors être discret ou continue selon la nature de l'ensemble des valeurs qu'elle est susceptible de prendre (valeurs isolées ou intervalle).
- 2- Facteur qualitative : Ses valeurs sont dans ce cas des modalités, ou catégories,

exprimées sous forme littérale ou au moyen d'un codage numérique et sur lesquelles des opérations arithmétiques n'ont aucun sens. On distingue des variables qualitatives ordinales et nominales, selon que les modalités peuvent être naturellement ordonnées ou pas.

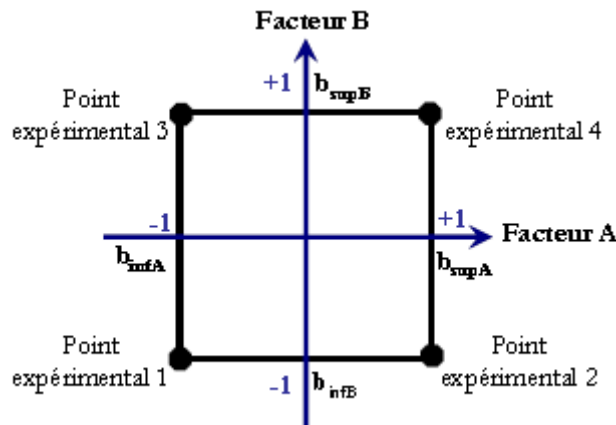
**La réponse :** la grandeur mesurée afin de connaître les effets des facteurs sur le système. Il convient bien sûr que la réponse soit représentative du phénomène observé.

La réponse expérimentale peut être le résultat d'une expérience réelle mais aussi le résultat d'une simulation numérique (VIVIER 2002)

**3. Domaine expérimental**

Pour chaque étude, l'expérimentateur choisit une partie d'espace expérimental pour effectuer leur recherche. Cette zone spéciale de l'espace expérimental est le domaine expérimental. Le domaine expérimental ou Domaine d'étude peut être défini comme l'ensemble de tous les points de la surface délimitée par les niveaux bas et haut de chaque facteur,

Lorsque  $k = 2$ , un carré est obtenu pour le DE. Les points expérimentaux sont alors situés aux quatre sommets du carré Figure (3. 1)



**Figure 3.1 :** Domaine d'étude d'un plan  $2^2$

Lorsque  $k = 3$ , nous obtenons un cube dont les huit sommets représentent les huit essais du plan (Figure3.2).

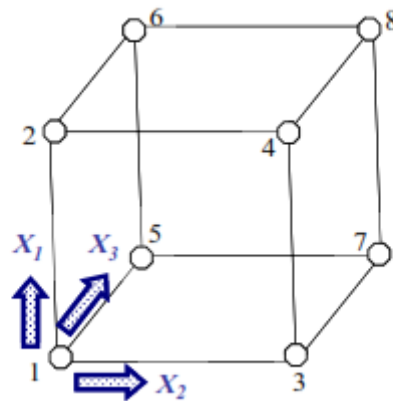


Figure 3.2 Domaine d'étude d'un plan  $2^3$

#### 4. Démarche méthodologique d'un plan d'expériences

L'élaboration d'un plan d'expériences peut-être décomposée en différentes étape (Expérim 2005) (Pill1999).

##### 4.1. La recherche des facteurs influents

C'est de loin l'étape la plus importante dans la conduite d'un Plan d'Expériences. Cette étape nécessite préalablement une Sélection des paramètres, un choix des modalités et des interactions à étudier.il faut aussi Fixer le domaine d'étude pour chacun des facteurs.

##### 4.2. Définition du domaine expérimental

La définition du domaine expérimental suit directement de l'étape précédente, à savoir de la définition des facteurs et de leurs modalités. Il s'agit donc de l'espace des expériences réalisables.

##### 4.3. Définition du modèle empirique

Cette étape revient à choisir une forme de modèle adaptée aux objectifs de l'étude ainsi que chercher quelle est l'équation mathématique régissant.

Le modèle retenu doit bien présenter représenter la réponse expérimentale étudiée dans le domaine expérimental d'intérêt. Et aussi aboutir pour la valeur de la réponse étudiée à une estimation de qualité acceptable.

## 5. Types de plan d'expériences

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en trois grandes familles

### 5.1 Plans factoriels complets

Un plan factoriel ou plan complet est obtenu lorsqu'au moins un essai pour chaque combinaison de facteur est réalisé.

#### 5.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans permettent l'étude de  $k$  facteurs à raison de deux niveaux (-1, +1) par facteur. Ils renferment toutes les combinaisons possibles des  $k$  facteurs à leurs deux niveaux. Le nombre d'expériences à réaliser se calcule par : le nombre d'expériences =  $2^k$  \* nombre de facteur.

#### 5.1.2 Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres

Il est parfois nécessaire d'augmenter le nombre de niveaux d'un facteur afin de mieux maîtriser l'action de ce facteur. Dans ce cas il faut être prudent, car le nombre d'expériences augmente rapidement. Le nombre d'expériences =  $N^p$

### 5.2 Plans fractionnaires

Les plans fractionnaires sont très utiles et mettent en évidence l'intérêt primordial de la méthode des plans d'expériences, qui est de permettre de diminuer considérablement le nombre d'expériences nécessaires à la construction d'un modèle. Mais cependant, il est prudent de garder un certain esprit critique face aux résultats que fournissent les plans fractionnaires, car ils nécessitent une certaine maîtrise de leur construction et de l'interprétation des résultats.

#### 5.2.1 Plans fractionnaires à deux niveaux

Les plans fractionnaires à deux niveaux sont des plans optimaux, permettant de réduire la charge expérimentale, proposée par un plan factoriel complet, en focalisant sur les effets les plus intéressants.

La solution proposée par les plans fractionnaires consiste à utiliser pour l'étude de  $k$  facteurs les matrices des effets des plans complets  $2^{k-p}$ . L'avantage de ces plans est évident : la charge expérimentale est divisée par  $2^p$  par rapport aux premiers plans,  $p$



est le nombre de facteurs aliasés « confondus » délibérément, c'est-à-dire qui ont des niveaux de même alternance dans la matrice des expériences (Vigier 1988).

**5.2.2 Plan fractionnaire à n niveaux et p paramètres**

Les plans fractionnaires nécessitent moins d'expériences qu'un plan factoriel.

Le nombre d'expériences =  $n^{p-k}$

La matrice d'expériences est donc divisée k fois.

**6. Analyse des résultats**

**6.1 Analyse de régression**

L'analyse de régression permet d'établir le coefficient de détermination R a partir de la relation suivante :

$$R^2 = \frac{SCM}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT} \dots\dots\dots 1$$

SCE : Somme des carrés des écarts

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, mesure l'intensité du lien linéaire entre les valeurs observées et prévues. La valeur du coefficient de corrélation est comprise entre -1 et 1.

Pour estimer la qualité descriptive du modèle, dans le cas de plusieurs variables explicatives, il faut obligatoirement utiliser le coefficient de détermination ajusté  $R^2_{ajusté}$ , et éviter d'utiliser le coefficient de détermination  $R^2$ .

Le coefficient de détermination ajusté  $R^2_{ajusté}$  calculer par la relation suivante :

$$R^2_{ajusté} = 1 - \frac{\frac{SCE}{N - p}}{\frac{SCT}{N - 1}} \dots\dots\dots 2$$

SCE : Somme des carrés des écarts

Plus les valeurs de  $R^2$  et  $R^2_{ajusté}$  sont proches de 1, plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante (GOUP 1996).

**6.2 Analyse de la variance**

L'analyse de la variance (ANOVA ou **ANALYSE OF VARIANCE**) dans la littérature anglo-saxonne. Cette méthode nous permet de déterminer à partir de quel seuil un effet peut être considéré comme significatif et aussi d'estimer si les effets calculés sont significatifs ou si ces effets proviennent de facteurs non contrôlés (non étudiés dans le plan) (Sche 1959).

On définit trois notions très importantes de sommes classiques suivantes :

(la notation SS venant de l'anglais Sum of Squares) :

- 1) On appelle somme totale des carrés (centrés) la quantité :

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i^*)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \dots\dots\dots 3$$

- 2) On appelle somme des carrés due à l'erreur la quantité :

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \dots\dots\dots 4$$

- 3) On appelle somme des carrés due à la régression la quantité :

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \dots\dots\dots 5$$

En particulier, le test de SNEDECOR-FISHER, permet de déterminer si un facteur a des chances d'être significatif. Ce test repose sur le calcul de la variance résiduelle (Vr) et de la variance entre échantillon pour un facteur (VA). Le rapport VA/Vr suit une loi de F (FISHER) à A et r degrés de liberté, où.

$$Vr = \frac{\sum r^2}{ddlresids} \dots\dots\dots 6$$

$$VA = \frac{\sum A_i^2}{ddlfacteurA} \dots\dots\dots 7$$

Le test consiste donc à comparer le rapport VA/Vr avec la valeur théorique de la table de SNEDECOR définie pour des niveaux de significations de 5% et 1%. Ces tables se trouvent dans de nombreux ouvrages statistiques. Si F expérimental (VA/Vr) est supérieur à F théorique (table), alors l'effet est significatif.

**6.2.1 Calcul du carré moyen des facteurs et des interactions**

La variance des facteurs s'obtient en calculant la somme des carrés des écarts (SCE) que l'on divise par le nombre de degré de liberté (ddl) associés au facteur f considéré.

- Pour les facteurs :

Le nombre de ddl associés à un facteur f correspond à son nombre de modalité (nombre de valeurs distinctes que l'on prend lors de la réalisation du plan) minoré de 1, soit :

$$ddl_f = Nn_f - 1$$

Avec  $Nn_f$  le nombre de modalité du facteur f.

La somme des carrés des écarts associés au facteur f vaut :

$$SCE_f = \gamma_f \sum_{i=1}^{Nn_f} (E_{f|f} Nn_f)^2 = \gamma_f \sum_{i=1}^{Nn_f} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \dots \dots \dots 8$$

Avec :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \text{La moyenne de réponses.}$$

$\gamma_f = \frac{N}{Nn_f}$  Le nombre d'expériences pour lesquelles le facteur f prend un de ses  $Nn_f$  niveaux.

$\bar{y}_i$  la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur f prend son  $i^{ème}$  niveau.

• Pour les interactions :

Le nombre de ddl associés à une interaction de facteur correspond au produit des ddl des facteurs mis en jeu dans cette interaction, soit :

$$ddl_{f_g \dots i} = ddl_f \times ddl_g \times \dots \times ddl_i$$

Pour les interactions mettant en jeu 2 facteurs f et g, la somme des carrés des écarts vaut :

$$SCE_{fg} = \delta_{fg} \sum_{i=1}^{Nn_i} \sum_{j=1}^{Nn_j} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2 \dots \dots \dots 9$$

Avec :

$$\delta_{fg} = \frac{N}{Nn_f \cdot Nn_g}$$

Le nombre d'expériences pour lesquelles le facteur f prend un de ces  $Nn_f$  niveaux et lorsque le facteur g adopte un de ces  $Nn_g$  niveaux,

$\bar{y}_{ij}$  la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur f prend son  $i^{ème}$  niveau et où le facteur g prend son  $j^{ème}$  niveau,

La généralisation aux interactions d'ordre supérieur se fait de la même façon. Par exemple pour une interaction d'ordre 3 mettant en jeu les facteurs  $f, g$  et  $l$ , on aura :

$$SCE_{fgl} = \phi_{fgl} \sum_{i=1}^{Nn_i} \sum_{j=1}^{Nn_j} \sum_{k=1}^{Nn_k} (\bar{y}_{ijl} + \bar{y}_i + \bar{y}_j + \bar{y}_l - \bar{y}_{lj} - \bar{y}_{il} - \bar{y}_{jl} - \bar{y})^2 \dots\dots\dots 10$$

SCE : Somme des carrés des écarts

On déduit alors la valeur des carrés moyens, associés au facteur ou à l'interaction considéré(e)  $x$ , comme étant :

$$CM_x = \frac{SCE_x}{ddl_x} \dots\dots\dots 11$$

CM<sub>x</sub> : Carrés moyens

Pour 2 facteurs on peut écrire la décomposition suivante :

$$y_{ij} - \bar{y} = (\bar{y}_i - \bar{y}) + (\bar{y}_j - \bar{y}) + (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y}) \dots\dots\dots 12$$

On réalise alors une somme sur  $i$  et  $j$ , des deux côtés de l'égalité mis préalablement au carré. La somme se fait ainsi sur les niveaux de tous les facteurs. On aboutit alors à l'équation de variance, démontrant l'additivité des sommes des carrés des écarts (membres de droite) :

$$SCE_t = \sum_{i=1}^{Nn_i} \sum_{j=1}^{Nn_j} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum SCE_x \dots\dots\dots 13$$

Avec :

$SCE_t$  la somme totale des carrés des écarts ;

$SCE_x$  la somme factorielle des carrés ( $x$  désignant un facteur ou une interaction).

Enfin notons la relation donnant entre autre la valeur de  $ddl_t$  (le nombre total de degrés de liberté) :

$$ddl_t = \sum_{\text{facteur}} ddl_i + \sum_{\text{interaction}} ddl_{ij} \dots\dots\dots 14$$

On a donc également additivité des degrés de liberté.

**6.2.2 Calcul de la variance résiduelle**

Lorsqu'il existe une erreur expérimentale non nulle, l'équation de variance fait apparaître un nouveau terme appelé communément variance résiduelle ( $SCE_r$ ) :

$$SCE_t = \sum SCE_x + SCE_r \dots\dots\dots 15$$

C'est à cette variance résiduelle  $SCE_r$  que les  $SCE_x$  sont comparés afin de déterminer les caractères significatifs des facteurs et des interactions  $x$ . La variance résiduelle est un point de comparaison. Elle doit traduire une variation des valeurs de réponse, dont l'amplitude est arbitrairement considérée comme faible. Tout facteur influent doit donc posséder des caractéristiques fortement différenciées de celles de cette composante.

Dans le cas des expérimentations réelles, la variation résiduelle est prise comme étant un estimateur de la variance expérimentale, qui traduit la variabilité inhérente des résultats sur plusieurs réalisations d'expériences identiques. L'utilisation d'expériences virtuelles exclut donc cette possibilité (STEP 2007).

La variance résiduelle est le plus souvent calculée comme étant la somme des carrés des résidus, i.e. des écarts entre les réponses mesurées ( $y$ ) et les réponses correspondantes, calculées grâce au modèle ( $y_{mod}$ ) (SCHI 1998).

$$SCE_r = \sum_{i=1}^N (y(iX) - y_{mod}(iX))^2 \dots\dots\dots 16$$

Avec  $iX$  le vecteur des coordonnées du  $i$ ème point d'expérience du plan.

Le nombre de degrés de liberté ddlr associé vaut  $N-p$ . On comprend en effet que les résidus n'existent que grâce aux  $N-p$  ( $>0$ ) expériences réalisées en plus des  $p$  simulations absolument nécessaires au calcul des  $p$  coefficients du modèle.

On calcul alors un carré moyen résiduel tel que :

$$CM_r = \frac{SCE_r}{ddl_r} = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (y(iX) - y_{mod}(iX))^2 \dots\dots\dots 17$$

Calculer le  $SCE_r$  de cette façon permet, en définitive, de tester le caractère significatif des facteurs et des interactions et dans le même temps d'évaluer la qualité du modèle utilisé ( $y_{mod}$ ) (STEP 2007).

Cette solution n'est pas applicable dans le cas de plans saturés. Dans ces cas précis, certains auteurs (DROE 1997), (GOUP 1996) et (SAPO 1990) proposent la construction de la variance résiduelle à partir des interactions dont les variances (carrés moyens) sont les plus faibles ; leurs valeurs devant être du même ordre de grandeur.

**6.2.3 Tableau d'analyse de la variance**

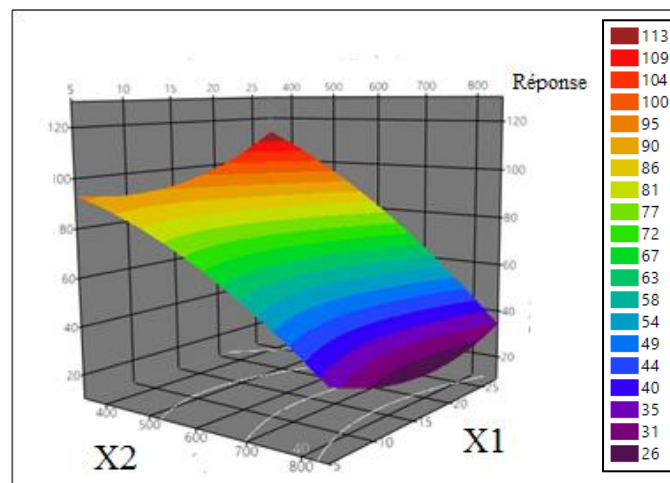
Le tableau de variation donne un résumé des calculs effectués pour l'analyse de variance.

**Tableau 3. 1 :** Tableau d'analyse de variance .

| Source de variation  | ddl               | Somme des carrés des écarts | Carrés moyens                   | F <sub>obs</sub> | F <sub>ecrit</sub>             | Conclusion                                    |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------|---|
| Facteur1             | ddl <sub>1</sub>  | SCE <sub>1</sub>            | $CM_1 = SCE_1 / ddl_1$          | $CM_1 / CM_r$    | $F_{1-\alpha/2}(ddl_x; ddl_r)$ | Source influente ?<br>$F_{obs} > F_{ecrit} ?$ |
| ...                  | ...               | ...                         | ...                             | ...              |                                |   |
| Facteur k            | ddl <sub>k</sub>  | SCE <sub>k</sub>            | $CM_k = SCE_k / ddl_k$          | $CM_k / CM_r$    |                                |   |
| Interaction fg ...   | ddl <sub>fg</sub> | SCE <sub>fg</sub>           | $CM_{fg} = SCE_{fg} / ddl_{fg}$ | $CM_{fg} / CM_r$ |                                |   |
| Variation résiduelle | ddl <sub>r</sub>  | SCE <sub>r</sub>            | $CM_r = SCE_r / ddl_r$          |                  |                                |   |
| Totaux               | ddl <sub>t</sub>  | SCE <sub>t</sub>            |                                 |                  |                                |   |

**6.3. Analyse graphique des résultats**

Permis les grands avantages des plans d'expériences est la présentation des résultats sous forme graphique figure 3.3



**Figure 3.3** courbe de surface de reponce

### **7. Méthode des surfaces de réponse**

La méthode des surfaces de réponse constitue le second volet intéressant de la méthode des plans d'expérience. Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative (VIVIER 2002) Dans cette méthode, les modélisations de la fonction réponse peuvent également servir de base à la recherche de conditions optimales. On parle alors d'optimisation indirecte .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 .La modélisation d'une surface de réponse s'appuie sur l'analyse de la variation des résultats d'essais obtenus suite à un plan d'expérience. La surface de régression ainsi obtenue doit posséder une qualité descriptive et prédictive devant être le meilleur possible au sein du domaine expérimental.

### **8. Conclusion**

L'approche des plans d'expériences, consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant plusieurs outils et tests statistiques. L'utilisation des plans d'expériences conduit à établir un plan, comportant le maximum de précision dans les résultats avec un minimum d'expériences. Utilisation la conception d'expériences conduit à un plan, avec une précision maximale dans des résultats avec moins d'expérience .Il permet à chacun de connaître le produit qu'un concepteur pourrait avoir dans les étapes initiales, fournit un cadre rigoureux pour la modélisation, et sa mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires.

# **CHAPITRE 4**

---

## ***Résultats et discussions***

---



**1. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons regrouper des résultats expérimentaux de plusieurs chercheurs traitées la même problématique proposer dans notre étude ; puis une modélisation statistique a été réalisée par la méthode de plan d'expériences.

**2. Résistance à la compression**

Le **tableau 4.1** présente les résultats de la résistance à la compression trouvée par ( Quan Liuquan a ; 2009).

**Tableau 4.1** présente les résultats de la résistance à la compression trouvée

| Numéro de série | Agent expansif en poids (%) | Lignine cellulose en poids (%) | Poids des cendres volantes (%) | Consistance (cm) | Resistance a la flexion (Mpa) | Resistance a la Compression (Mpa) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| M1              | 5                           | 0.1                            | 20                             | 48.55            | 4.35                          | 19.69                             |
| M2              | 5                           | 0.2                            | 50                             | 37.16            | 3.26                          | 15.38                             |
| M3              | 5                           | 0.3                            | 35                             | 38.12            | 4.17                          | 18.44                             |
| M4              | 10                          | 0.1                            | 50                             | 60.12            | 2.50                          | 10.75                             |
| M5              | 10                          | 0.2                            | 35                             | 29.81            | 3.68                          | 15.56                             |
| M6              | 10                          | 0.3                            | 20                             | 51.84            | 3.75                          | 15.69                             |
| M7              | 15                          | 0.1                            | 35                             | 65.58            | 2.72                          | 11.25                             |
| M8              | 15                          | 0.2                            | 20                             | 46.18            | 3.18                          | 14.88                             |
| M9              | 15                          | 0.3                            | 50                             | 49.97            | 2.70                          | 10.38                             |

**3. Modélisation statistique**

Dans cette partie on va voir l'effet du dosage de **cendre volante (%)**, d'**Agent expansif** et de **Lignine cellulose (%)** sur la rhéologie et le comportement mécanique d'un mortier de polymère modifié.

**3.1. Modèle de la résistance à la compression à 28jour**

✓ *Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :*

La **figure 4. 2** présentes les valeurs observées en fonction des valeurs prévues du modèle de la résistance à la compression à 28 jours. On constate que les points sont moins dispersés et proche au 1<sup>ere</sup> bissectrice qui est souhaitable. Ceci traduit par une valeur de R carre proche de 1(  $R^2=0.983913$  )**Tableau (4.2)**.

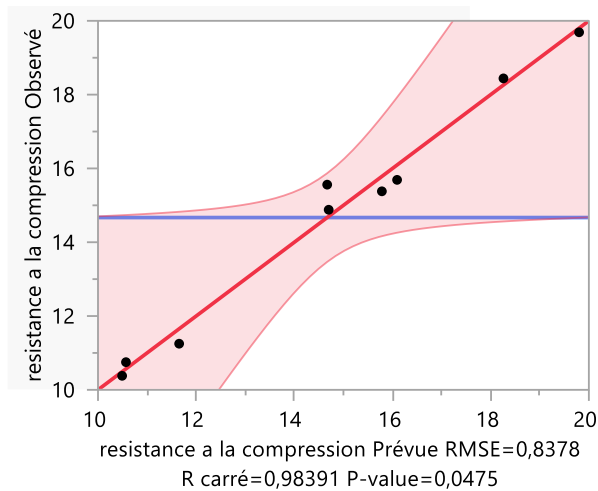


Figure 4.1: Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jour.

Tableau 4.2. Résumé de l'ajustement

|  |          |
|--|----------|
| R carré                                | 0,983913 |
| R carré ajusté                         | 0,935652 |
| Racine de l'erreur quadratique moyenne | 0,837781 |
| Moyenne de la réponse                  | 14,66889 |
| Observations (ou sommes pondérées)     | 9        |

✓ *L'analyse des effets :*

D'après le tableau 4. 3 on remarque que le poids de l'Agent expansif en (%) et Poids de cendre volantes (%) jouent un rôle prépondérant sur la résistance mécanique a la compression à 28jours) comparativement au rapport autres effets.

Tableau 4. 3 : l'analyse des effets de différents paramètres

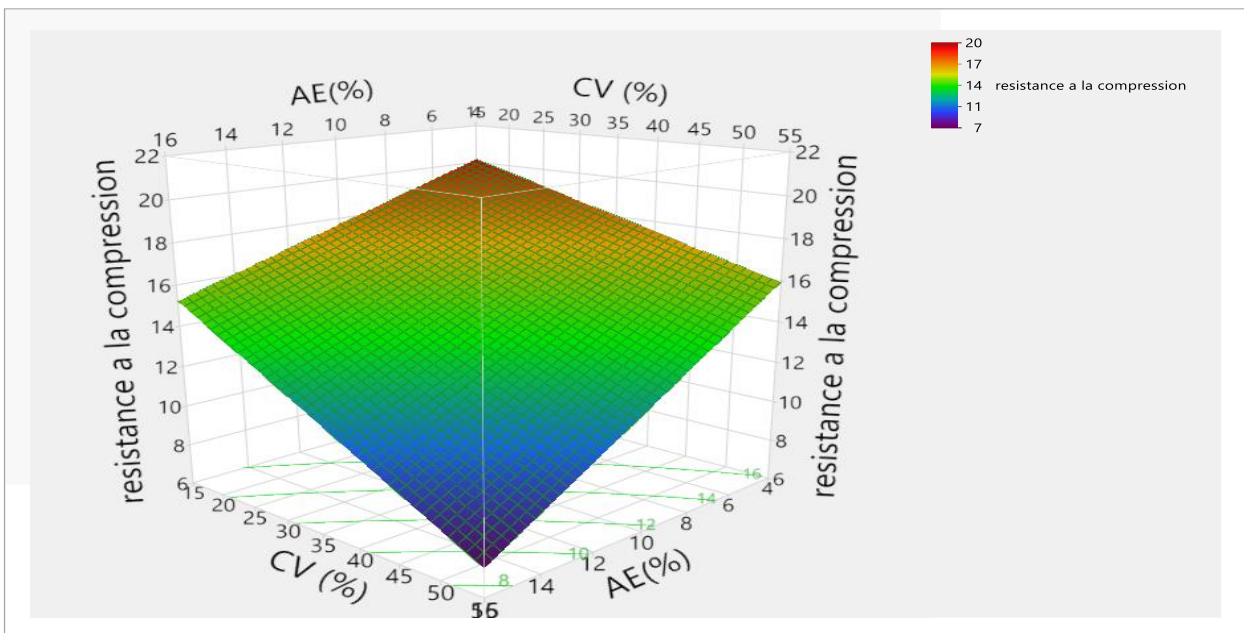
| Terme  | Estimation | Erreur standard | t ratio | Prob. >  t |
|--|------------|-----------------|---------|------------|
| Agent expansif en poids (%)                                  | -2,833333  | 0,342023        | -8,28   | 0,0143*    |
| Poids des cendres volantes (%)                               | -2,291667  | 0,342023        | -6,70   | 0,0216*    |
| Poids des cendres volantes (%)*Lignine cellulose en poids(%) | 1,3375     | 0,513034        | 2,61    | 0,1210     |
| Lignine cellulose en poids(%)                                | 0,47       | 0,342023        | 1,37    | 0,3031     |
| Agent expansif en poids(%)*Poids des cendres volantes (%)    | -0,5725    | 0,513034        | -1,12   | 0,3806     |
| Agent expansif en poids(%)*Lignine cellulose en poids(%)     | -0,2875    | 0,513034        | -0,56   | 0,6316     |

✓ *Modèle mathématique :*

Le modèle mathématique de la résistance à la compression en fonction du rapport **Poids de cendre volante (%)**, **Poids de Agent expansif** et **Lignine cellulosique (%)** est déterminé

$$Rc(MPa) = 14,68 + -2,83 \times \left(\frac{(AE\%-10)}{5}\right) + -2,29 \times \left(\frac{(CV\%-35)}{15}\right) + 0,47 \times \left(\frac{(LC\%-0,2)}{0,1}\right) + \left(\frac{(AE\%-10)}{5}\right) \times \left(\frac{(CV\%-35)}{15}\right) \times -0,57 + \left(\frac{(AE\%-10)}{5}\right) \times \left(\frac{(LC\%-0,2)}{0,1}\right) \times -0,29 + \left(\frac{(CV\%-35)}{15}\right) \times \left(\frac{(LC\%-0,2)}{0,1}\right) \times 1,34$$

✓ *Représentation graphique de surface de réponse :*



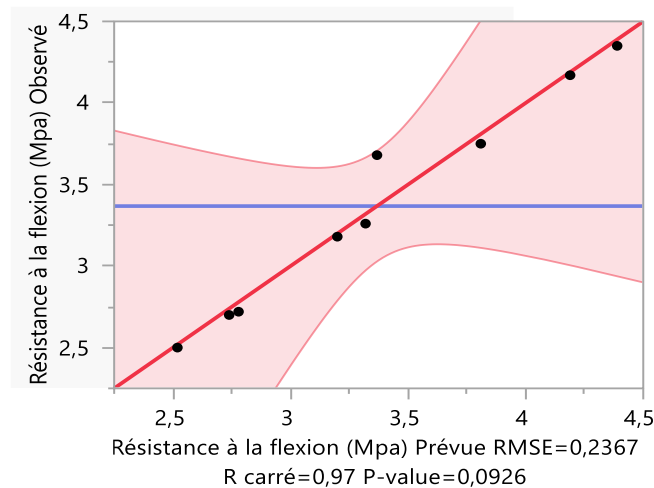
**Figure 4.2.** L'évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de Poids de cendre volante (%)

La figure 4. 2 représente l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du Poids de cendre volante (%) et le Poids de Agent expansif. On peut observer que la résistance à la compression diminue progressivement avec l'augmentation de Poids de cendre volante (%) et le Poids de Agent expansif.

### 3.2. Modèle de la résistance à flexion à 28jours

✓ *Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :*

La figure 4. 3 présentes les valeurs observées en fonction des valeurs prévues du modèle de la résistance à la flexion à28 jours. On constate que les points sont moins dispersés avec un coefficient de régression R carre égale à0.9968139.



**Figure 4.3:** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

✓ *Résumé de l'ajustement :*

**Tableau 4.4.** Résumé de l'ajustement

|  |          |
|--|----------|
| R carré                                | 0,968139 |
| R carré ajusté                         | 0,872554 |
| Racine de l'erreur quadratique moyenne | 0,236715 |
| Moyenne de la réponse                  | 3,367778 |
| Observations (ou sommes pondérées)     | 9        |

✓ *Estimations des coefficients :*

Le tableau 4.5 présente le test des effets qui influence sur la repense étudiée, on peut constater que :

Le poids de l'agent expansif et le poids des cendres volantes sont les facteurs les plus significatif qu'influe sur la résistance à la flexion a28jours : par contre les autres paramètres et interaction ne présente aucune influence.

**Tableau 4. 5 :** l’analyse des effets de différents paramètres.

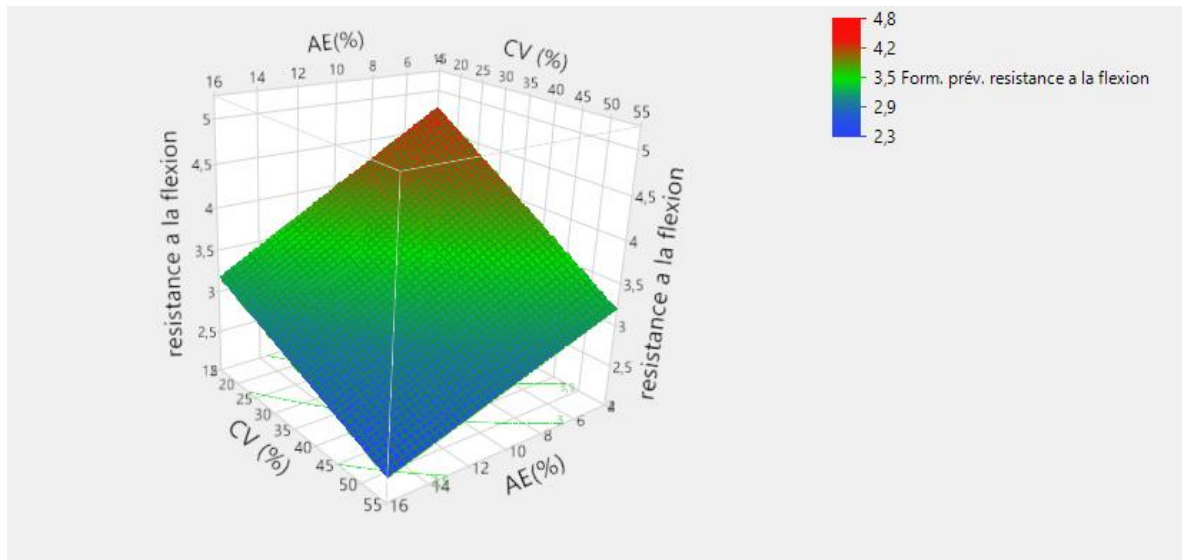
| Terme   | Estimation | Erreur standard | t ratio | Prob. >  t |
|---|------------|-----------------|---------|------------|
| Agent expansif en poids(%)                                | -0,53      | 0,096639        | -5,48   | 0,0317*    |
| Poids des cendres volantes (20,50)                        | -0,47      | 0,096639        | -4,86   | 0,0398*    |
| Lignine cellulose en poids(0,1,0,3)                       | 0,175      | 0,096639        | 1,81    | 0,2119     |
| Poids des cendres volantes)*Lignine cellulose en poids(%) | 0,20375    | 0,144958        | 1,41    | 0,2951     |
| Agent expansif en poids(%)*Lignine cellulose en poids(%)  | -0,11625   | 0,144958        | -0,80   | 0,5067     |
| Agent expansif en poids(%)*Poids des cendres volantes (%) | 0,10875    | 0,144958        | 0,75    | 0,5314     |

✓ **Modèle mathématique :**

Le modèle mathématique de la résistance à la flexion a 28 jours en fonction poids de cendre volante (%), Poids de Agent expansif et Lignine cellulose (%) est déterminé par :

$$\begin{aligned}
 RF(MPa) = & 3,37 + -0,53 \times \left( \frac{(AE\% - 10)}{5} \right) + -0,47 \times \left( \frac{(CV\% - 35)}{15} \right) + 0,175 \\
 & \times \left( \frac{(LC\% - 0,2)}{0,1} \right) + \left( \frac{(AE\% - 10)}{5} \right) \times \left( \left( \frac{(CV\% - 35)}{15} \right) \times 0,11 \right) \\
 & + \left( \frac{(AE\% - 10)}{5} \right) \times \left( \left( \frac{(LC\% - 0,2)}{0,1} \right) \times -0,12 \right) + \left( \frac{(CV\% - 35)}{15} \right) \\
 & \times \left( \left( \frac{(LC\% - 0,2)}{0,1} \right) \times 0,20 \right)
 \end{aligned}$$

✓ Représentation graphique de surface de réponse :



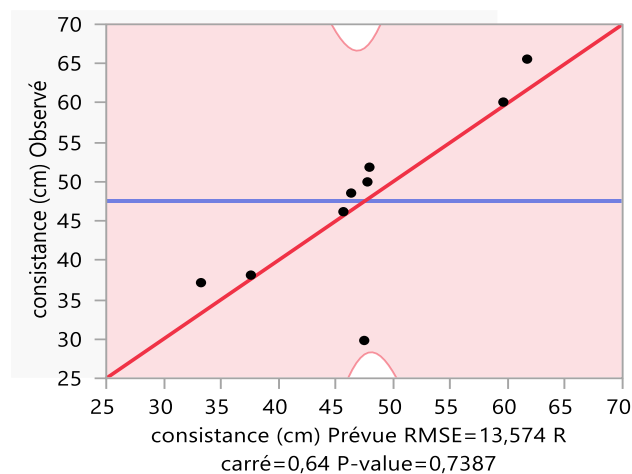
**Figure 4.4.** L'évolution de la résistance à la flexion a 28 jours en fonction de poids de cendre volante (%), Poids de Agent expansif

D'après la figure 4.4 qui présente la surface de réponse du modèle de résistance à la flexion a 28jours en fonction de poids de cendre volante (%), Poids de Agent expansif. On constate que la tendance de variation est identique à celle de la résistance à la compression.

**3.3. Modèle de la consistance**

✓ *Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :*

D'après la figure 4.5 on constate que le nuage des points, est moins dispersé. On conclut qu'il y a une **bonne** corrélation entre les résultats de l'expérimentation et ceux de la simulation ( $R \approx 1$ ). Le tableau 4.4 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement.



**Figure 4.5.** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

**Tableau 4.6.** Résumé de l'ajustement.

|  |          |
|--|----------|
| R carré                                | 0,639344 |
| R carré ajusté                         | -0,44262 |
| Racine de l'erreur quadratique moyenne | 13,57398 |
| Moyenne de la réponse                  | 47,48111 |
| Observations (ou sommes pondérées)     | 9        |

✓ **Estimations des coefficients :**

D'après le tableau 4.7, on remarque un faible influence de tous les effets sur la consistance propose de ce modèle.

**Tableau 4.7.** Estimations des coefficients.

| <b>Terme</b>   | <b>Estimation</b> | <b>Erreur standard</b> | <b>t ratio</b> | <b>Prob. &gt;  t </b> |
|--|-------------------|------------------------|----------------|-----------------------|
| Agent expansif en poids(5,15)                                | 6,3166667         | 5,541555               | 1,14           | 0,3725                |
| Lignine cellulose en poids(0,1,0,3)                          | -5,72             | 5,541555               | -1,03          | 0,4105                |
| Agent expansif en poids(%)*Poids des cendres volantes (%)    | 8,02              | 8,312332               | 0,96           | 0,4364                |
| Poids des cendres volantes (%)*Lignine cellulose en poids(%) | -6,29             | 8,312332               | -0,76          | 0,5282                |
| Agent expansif en poids(%)*Lignine cellulose en poids(%)     | -2,16             | 8,312332               | -0,26          | 0,8193                |
| Poids des cendres volantes (20,50)                           | 0,1133333         | 5,541555               | 0,02           | 0,9855                |

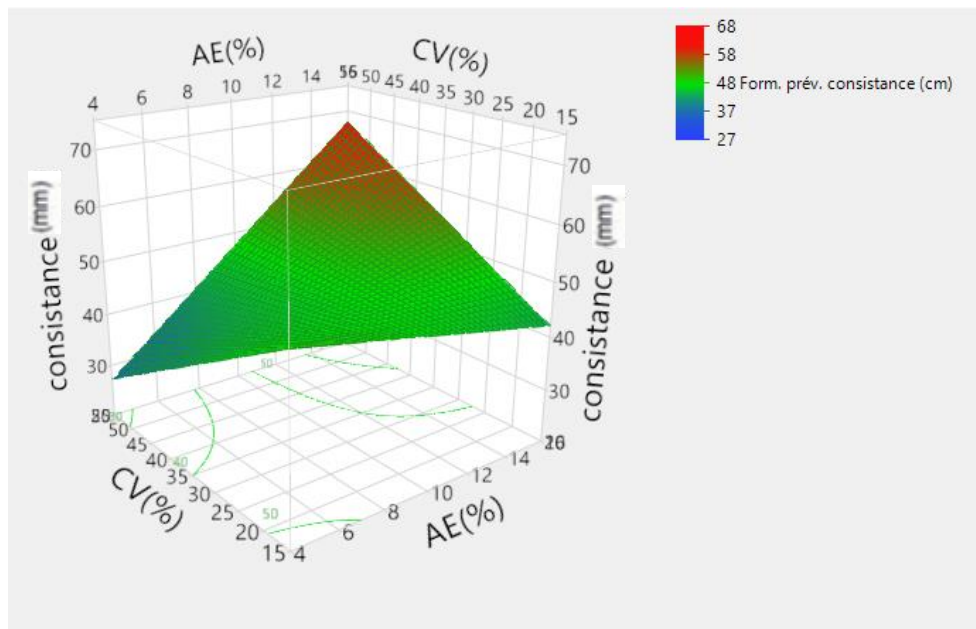
✓ **Modèle mathématique :**

Le modèle mathématique de la consistance en fonction poids de cendre volante (%), Poids de Agent expansif et Lignine cellulose (%) est déterminé par l'équation suivante :

consistance (cm)

$$\begin{aligned}
 &= 7,48 + 6,32 \times \left( \frac{(AE\% - 10)}{5} \right) + 0,11 \times \left( \frac{(CV\% - 35)}{15} \right) + -5,72 \\
 &\times \left( \frac{(LC\% - 0,2)}{0,1} \right) + \left( \frac{(AE\% - 10)}{5} \right) \times \left( \left( \frac{(CV\% - 35)}{15} \right) \times 8,02 \right) \\
 &+ \left( \frac{(AE\% - 10)}{5} \right) \times \left( \left( \frac{(LC\% - 0,2)}{0,1} \right) \times -2,16 \right) + \left( \frac{(CV\% - 35)}{15} \right) \\
 &\times \left( \left( \frac{(LC\% - 0,2)}{0,1} \right) \times -6,29 \right)
 \end{aligned}$$

✓ Représentation graphique de surface de réponse :



**Figure 4.6 :** L'évolution de la résistance à la consistance en fonction d'en fonction poids de cendre volante (%) et le Poids de Agent expansif

D'après la figure 4.6 qui présente la surface de réponse du modèle de la consistance en fonction de poids de cendre volante (%), Poids de Agent expansif.

On constate que l'augmentation de la quantité du Poids de Agent expansif provoque une augmentation de la consistance pour les taux élevé de cendre volante par contre pour les faibles taux on constate une légère diminution de consistance avec l'augmentation de l'agent expansif.

#### 4. Conclusion



## ***Chapitre 4 .....Résultats et discussions***

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer la résistance à la compression d'un mortier polymère avec des différents dosages d'agents expansifs (AE) et de cendre volante (CV). L'utilisation du plan d'expérience nous permet d'avoir des lois de comportement qui rassemble différents paramètres de formulation dosages d'agents expansifs (AE) et de cendre volante (CV) ainsi que lignine cellulose présente dans le mélange.

---

# *Conclusion générale*

---

## *Conclusion générale*

---

La recherche actuelle s'oriente vers la possibilité de remplacer les fibres minérales ou synthétiques par des fibres naturelles, c'est-à-dire des fibres végétales biodégradables et renouvelables.

Les fibres végétales sont une option très intéressante pour l'industrie de la construction car les fibres végétales sont largement utilisées dans le secteur de la construction tels que (maisons...Etc.).

Le but de notre mémoire est de valoriser l'utilisation des fibres végétales et d'étudier leur effet sur les propriétés à l'état frais et durci du béton polymère.

Le premier volet s'intéresse aux performances mécaniques et à la durabilité des bétons polymères. Les résultats obtenus dans cette partie, montre que la formulation adéquate du béton et du mortier de résine dépend de la nature du liant et de sa composition. Les résines les plus utilisées sont le polyester et en particulier la résine époxy. Dans la littérature, les pourcentages massiques du liant varient généralement entre 5 et 25% selon la nature de la matrice organique et du type des granulats ajoutés. Ces bétons et mortiers résineux sont caractérisés par des résistances mécaniques beaucoup plus importantes que celles des hydrauliques.

Le deuxième volet s'intéresse aux performances mécaniques et de la durabilité des mortiers à base de polymères renforcés par des fibres végétales. Les essais montrent que l'ajout de fibres de chanvre dans une matrice polypropylène tend à augmenter ces propriétés mécaniques. L'influence de la vitesse de déformation, de la température initiale et du taux de chanvre est clairement analysée.

Enfin, cette étude a permis de mettre en évidence le rôle important des fibres végétales sur le comportement mécanique et les propriétés des mortiers polymères. C'est dans ce contexte que on a établi un plan expérimental relatif à l'utilisation des fibres végétales dans les bétons et les polymères.

Nous avons été satisfaits de notre travail car nous avons traversé quelques difficultés en cette saison 2019/2020 en raison de la dangereuse épidémie qui a arrêté le monde entier. Notre laboratoire a été fermé pour la sécurité des étudiants. Nous n'avons pas beaucoup travaillé en laboratoire à cause de la dangereuse épidémie pour obtenir de très bons résultats et ajouter plus d'informations.

- 1) **Amianti, M. and Botaro, V.R.** (2008), "Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP)", *Cement and concrete composites*, Vol. 30 No. 1, pp. 23-28.
- 1) **Abdessamed, M.** (2006), "Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier", université Ouargla, thèse de magister.
- 2) **Bedi, R., Chandra, R. and Singh, S.** (2013), "Mechanical properties of polymer concrete", *Journal of Composites*, Vol. 2013.
- 3) **Baley, C.** (2002), "Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33 No. 7, pp. 939-48.
- 4) **Beckermann, G. and Pickering, K.L.** (2008), "Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites: fibre treatment and matrix modification", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39 No. 6, pp. 979-88.
- 5) **Bledzki, A. and Gassan, J.** (1999), "Composites reinforced with cellulose based fibres", *Progress in polymer science*, Vol. 24 No. 2, pp. 221-74.
- 6) **Bodros, E., Pillin, I., Montrelay, N. and Baley, C.** (2007), "Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?", *Composites Science and Technology*, Vol. 67 No. 3-4, pp. 462-70.
- 7) **Chen, C.-H., Huang, R., Wu, J. and Chen, C.-H.** (2006), "Influence of soaking and polymerization conditions on the properties of polymer concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 20 No. 9, pp. 706-12.
- 8) **Dallel, M.** (2012). Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil.
- 9) **(DROE 1997)** J.J. Droesbeke J. Fine G. Saporta, "Plan d'expériences – Application à l'entreprise", Ed. Technip, 1997.
- 10) **(Expérim 2005)** Témoignage de l'association Expérimentique [1996-2005]; sous la coordination de François LOUVET et Luc DELPLANQUE « Design of experiments : une approche pragmatique et illustrée : the French touch », Orléans : Expérimentique, DL 2005 ISBN : 2-9525126-0-4.
- 11) **Fattuhi, N.I. and Hughes, B.P.** (1988), "Ordinary Portland cement mixes with selected admixtures subjected to sulfuric acid attack", *Materials Journal*, Vol. 85 No. 6, pp. 512-18.

## *Référence*

---

- 12) (**Frédéric, 1995**) G. Frédéric ; modélisation et optimisation par plan d'expérience d'un moteur a commutation électronique". Thèse de doctorat de l'université des science et technologie de Lille, janvier 1995.
- 13) **Gorninski, J., Dal Molin, D. and Kazmierczak, C.** (2007), "Strength degradation of polymer concrete in acidic environments", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29 No. 8, pp. 637-45.
- 14) **GEHRING, F., BOUCHART, V., DINZART, F. and CHEVRIER, P.** "Etude expérimentale et modélisation du comportement de polymères thermoplastiques renforcés: polypropylène chargé de fibres de chanvre". Congrès français de mécanique 2011, AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc, 92400 Courbevoie, France ....
- 15) **Girault, R., Bert, F., Rihouey, C., Jauneau, A., Morvan, C. and Jarvis, M.** (1997), "Galactans and cellulose in flax fibres: putative contributions to the tensile strength", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 21 No. 1-2, pp. 179-88.
- 16) (**GOUP 1996**) J. Goupy, "La méthode des plans d'expériences – Optimisation du choix des essais et de l'interprétation des résultats", Ed. Dunod, 1996.
- 17) **Hohlweg-Majert, B., Schmelzeisen, R., Pfeiffer, B. and Schneider, E.** (2006), "Significance of osteoporosis in craniomaxillofacial surgery: A review of the literature", *Osteoporosis international*, Vol. 17 No. 2, pp. 167-79.
- 18) **Hatakeyama, T. and Hatakeyama, H.** (2006). *Thermal properties of green polymers and biocomposites*. Springer Science & Business Media.
- 19) **Jawaid, M. and Khalil, H.A.** (2011), "Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review", *Carbohydrate polymers*, Vol. 86 No. 1, pp. 1-18.
- 20) **Joffe, R., Andersons, J. and Wallström, L.** (2003), "Strength and adhesion characteristics of elementary flax fibres with different surface treatments", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34 No. 7, pp. 603-12.
- 21) **Komuraiah, A., Kumar, N.S. and Prasad, B.D.** (2014), "Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties", *Mechanics of composite materials*, Vol. 50 No. 3, pp. 359-76.
- 22) **Lefebure, V.** (1924), "Improvements in or relating to concrete, cements, plasters and the like", *British patent*, Vol. 217 No. 279, p. 5.
- 23) **Lampke, T., Mishra, S. and Bismarck, A.** (2005). *Plant fibers as reinforcement for green composites. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC Press.

## *Référence*

---

- 24) **Mirouzi, G., Redjel, B. and Jauberthie, R.** (2013), "Formulation et comportement mécanique de micro-bétons à matrice de résine polyester", *Nature & Technology*, No. 9, p. 19.
- 25) **Mirza, J., Mirza, M. and Lapointe, R.** (2002), "Laboratory and field performance of polymer-modified cement-based repair mortars in cold climates", *Construction and Building Materials*, Vol. 16 No. 6, pp. 365-74.
- 26) **Mohanty, A., Misra, M.a. and Hinrichsen, G.** (2000), "Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview", *Macromolecular materials and Engineering*, Vol. 276 No. 1, pp. 1-24.
- 27) **Ohama, Y.** (1995). *Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology*. William Andrew.
- 28) **Ohama, Y.** (1998), "Polymer-based admixtures", *Cement and concrete composites*, Vol. 20 No. 2-3, pp. 189-212.
- 29) **Pascal, S., Alliche, A. and Pilvin, P.** (2004), "Mechanical behaviour of polymer modified mortars", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 380 No. 1-2, pp. 1-8.
- 30) **(Pill 1999)** Maurice PILLET « Les plans d'expériences par la méthode Taguchi » Paris : Les Ed. d'Organisation, 1999, c1997, ISBN : 2-7081-2031-X.
- 31) **(QuanLiuquan a ; 2009)**QuanLiuquana ,LiDongxu a , Li Zogjin b (2009), "Effects of lignin cellulose and expansive agent on microstructure and macro-property of polymer-modified mortar containing fly ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2467- 2471.
- 32) **Rebeiz, K.** (1996), "Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste", *Construction and Building Materials*, Vol. 10 No. 3, pp. 215-20.
- 33) **Ribeiro, M.C.d.S.** (2006), "New polymer mortar formulations: development, characterization and application forms".
- 34) **Rowell, R., Young, R. and Rowell, J.** (1997), "Paper and composites from agro-based resources CRC Press Inc", Madison, WI.
- 35) **Sakai, E. and Sugita, J.** (1995), "Composite mechanism of polymer modified cement", *Cement and concrete research*, Vol. 25 No. 1, pp. 127-35.
- 36) **Schulze, J.** (1999), "Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars", *Cement and concrete research*, Vol. 29 No. 6, pp. 909-15.
- 37) **Shaker, F., El-Dieb, A. and Reda, M.** (1997), "Durability of styrene-butadiene latex modified concrete", *Cement and concrete research*, Vol. 27 No. 5, pp. 711-20.

## *Référence*

---

- 38) **Shaw, I.M.** (1989). Interactions between organic polymers and cement hydration products. Aston University.
- 39) **Sofiane, A. and Laurent, A.** (2013). Les bétons de granulats d'origine végétale: Application au béton de chanvre. Lavoisier.
- 40) **Stamboulis, A., Baillie, C. and Peijs, T.** (2001), "Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 32 No. 8, pp. 1105-15.
- 41) (**Sche 1959**) Scheffe H. The analysis of variance. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics (1959).
- 42) (**SAPO 1990**) G. Sapora, "Probabilité, analyse des données statistiques", EdsTechnip, 1990.
- 43) (**STEP 2007**) V. stéphane, vauquelinaurélien, vilain jean-paul; configuration d'une structure « halbach » par plans d'expériences treillis, Conférence EF 2007 ENSEEIHT, Toulouse, 6-7 Septembre 2007.
- 44) (**SCHI 1998**) P. Schimmerling, J. Claude Sisson, Ali Zaidi "Pratique des plans d'expériences" Editeur Lavoisier – Tec & Doc -1998.
- 45) (**TINS 2010**) W Tinsson : Plans d'expérience : constructions et analyses statistiques, MATH ÉMATIQUES & APPLICATIONS, Springer Heidelberg Dordrecht London New York ;2010.
- 46) (**Vigier, 1988**) M. Vigier ; pratique des plans d'expériences : méthodologie Taguchi. Les éditions d'organisation, 1988.
- 47) (**VIVIER 1988**) Stéphane VIVIER « Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis » Doctorat délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille – préparée au L2EP et soutenue le 11/07/2002.
- 48) **Vipulanandan, C. and Dharmarajan, N.** (1989). Fracture properties of epoxy polymer concrete. *Fracture of Concrete and Rock*. Springer.
- 49) **Wang, R. and Wang, P.-M.** (2011), "Action of redispersible vinyl acetate and versate copolymer powder in cement mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 25 No. 11, pp. 4210-14.
- 50) **Walker, J.C.** (2006). Basic wood chemistry and cell wall ultrastructure. *Primary Wood Processing*. Springer.

## *Référence*

---

- 51) **Wambua, P., Ivens, J. and Verpoest, I.** (2003), "Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?", *Composites science and technology*, Vol. 63 No. 9, pp. 1259-64.
- 52) **Yang, Z., Shi, X., Creighton, A.T. and Peterson, M.M.** (2009), "Effect of styrene–butadiene rubber latex on the chloride permeability and microstructure of Portland cement mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 23 No. 6, pp. 2283-90.
- 53) **Younus, S.J., Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Mermerdaşa, K. and İpeka, S.** "Resistance of Natural Rubber Latex Modified Lightweight Concrete to Chloride Ingress". 7th Asian Symposium on Polymers in Concrete.
- 54) **Yuill, M.B.** (2017), "FUNCTIONAL INTERACTIONS BETWEEN OPIOIDS AND A CANNABINOID RECEPTOR 2 AGONIST IN INFLAMMATORY PAIN".
- 55) **Yahiaoui, L.** (2018). *Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales* (Diss).
- 56) **Zimmermann, T., Pöhler, E. and Geiger, T.** (2004), "Cellulose fibrils for polymer reinforcement", *Advanced engineering materials*, Vol. 6 No. 9, pp. 754-61.