

Manipulation Du Logiciel Minitab En Vue De L'optimisation Des Études De Formulation Des Adobes Confectionnés Avec De La Latérite, Des Poudres Fines Des Termitières Et Renforcés Par Des Fibres D'agave

Rakotomalala Zolimboahangy¹, Rakotomalala Miarintsoa Fetraniana¹, Ranaivoniarivo Velomanantsoa Gabriely¹, Ratsimbazafy Hery Mikaela², Rakotonirina Haritiana Jeannelle³

¹Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo, Mention Science et Ingénierie des Matériaux. BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

²Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil. BP 6294 Antananarivo 101 Madagascar

³Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo, Mention Génie des procédés et chimie industrielle. BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar



Résumé – Dans notre étude, nous cherchons à stabiliser les adobes avec de la termitière et les renforcer avec des fibres d'Agave. Nous avons étudié plusieurs formulations pour optimiser les résistances à la compression de ces adobes. Le premier lot de formulation est la stabilisation de la latérite avec de la termitière à 1/10 puis 2/10 puis 3/10 de son volume. Le deuxième consiste à ajouter des fibres, au mélange latérite + termitière, à 0,5 – 1- 1, 5 et 2 en pourcentage volumique. Les résultats de laboratoires obtenus seront ensuite traités dans le logiciel Minitab pour optimiser les différentes formulations étudiées. Les analyses au laboratoire ont évoqué que l'utilisation des nids en activité, constitués de matériaux résistants aux intempéries et compacts, donnent des bons résultats de stabilisation mieux que les nids effondrés, du point de vue résistance à la compression sèche et humide. À 35 jours d'âge, la résistance à la compression sèche Rc obtenue est de 2,88 MPa. Après l'immersion dans l'eau pendant 24h, la résistance de la Rci évaluée atteint 0,81 MPa. Aussi, l'ajout de 1% de fibres d'agaves découpées à 1.5cm dans le mélange, optimise l'augmentation de ces valeurs jusqu'à atteindre Rc36j 3,92 MPa et Rci 2,09 MPa. L'étude ne révèle pas des phénomènes de retrait-gonflement. Le recours à l'utilisation du logiciel Minitab optimise davantage ces résultats. Les plans d'expériences que nous avons adoptés par la manipulation du logiciel Minitab permet de réduire le nombre d'essais à ce qui est strictement nécessaire pour prendre une décision, ce qui peut épargner du temps, de l'argent et des vies. Un type de plan plus exhaustif est le plan factoriel consistant à choisir des valeurs pour chacun des facteurs en faisant varier simultanément tous les facteurs (de façon exhaustive ou non). Ces plans d'expériences permettent d'optimiser les formulations, dont la réponse Rc est maximisée, pour une valeur de désirabilité globale égale à 1. C'est tout en tenant compte des facteurs suivants : termitière 25 %, fibres 2 %, longueur des fibres 2cm et temps de cure 36 jours (âge optimal). Avec ce dosage, on pourra avoir une résistance en compression optimale jusqu'à 4,245 MPa.

Mots clés – *Stabilisation, Renforcement, Optimisation, Adobe, Termitière, Fibre D'agave.*

Abstract – In our research, we are investigating the possibility of stabilizing adobes with termite mounds and strengthening them with agave fibers. We have studied several formulations to optimize the compressive strengths of adobe. The first batch of formulation is the stabilization of the laterite with a termite nest at 1/10 then 2/10 then 3/10 of its volume. The second consists in adding fibers, to the laterite + termite mound mixture, at 0.5 - 1- 1, 5 and 2 in volume percentage. The results obtained in the laboratory will then be processed in the Minitab software to optimize the different formulations studied. Laboratory analyzes have suggested that the use of active nests, made of weatherproof and compact materials, gives good stabilization results, better than collapsed nests, in terms of dry and wet compressive

strength. At 35 days of age, the obtained dry compressive strength was 2.88 MPa. After immersion in water for 24 hours, the rated resistance R_{ci} reached 0.81 MPa. Also, the addition of 1% of agave fibers cut at 1.5 cm in the mixture, optimizes the increase of these values until reaching R_{c36j} 3.92 MPa and R_{ci} 2.09 MPa. The study did not reveal any shrinkage-swelling phenomenon. Using Minitab software can further optimize these results. The experimental designs we have adopted while working with Minitab software reduce the number of trials to what is necessary to plan, which can save time, money, and lives. A more exhaustive type of plan is the factorial plan which consists in choosing values for each of the factors by simultaneously varying all the factors (exhaustively or not). These experimental designs make it possible to optimize the formulations, for which the R_c response is maximized, for an overall desirability value equal to 1, while considering the following factors: termite mound 25%, fibers 2%, fiber length 2cm and time of cure 36 days (optimal age). With this dosage we can have an optimal compressive strength of up to 4.245 MPa.

Keywords – Stabilization, Strengthening, Optimization, Adobe, Termite Mound, Agave Fiber.

I. INTRODUCTION

Plusieurs travaux ont confirmé que l'utilisation des liants minéraux (ciment et chaux) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des adobes. De nombreuses études ont aussi été menées pour utiliser des fibres d'origine végétale dans le renforcement des matériaux de construction, en particulier dans les pays en voie de développement, en raison de leur disponibilité, de leur faible coût économique et énergétique ainsi que de la technicité relativement faible nécessaire à leur production. En tenant compte des dégradations de l'environnement, l'utilisation des matériaux dont leur extraction et leur transformation sans dépenses énergétiques contribuera à la limitation de la destruction de la couche d'ozone. Parmi ces matériaux, les latérites qui recouvrent une grande partie des pays en voie de développement, et largement utilisées dans divers domaines sont facilement exploitables et donnent des produits fiables, durables et esthétiques (BTC, tuiles, etc.). De notre part, nous présenterons dans cette étude la valorisation des termitières comme stabilisants de ces adobes et des fibres d'agave comme renforts. Les analyses minéralogiques des termitières que nous avons effectuées dans des études antérieures évoquent la présence d'une argile gonflante Montmorillonite dans les murailles mais qui se trouve en très faible teneur par rapport à l'argile stable Kaolinite. Ainsi, nous utilisons des fibres végétales pour renforcer les structures stabilisées pour réduire et éviter les risques de fissurations après séchage par phénomène de retrait-gonflement. Nous avons réalisé des lots d'essais et d'analyses aux laboratoires pour les caractérisations des matières premières utilisés dans cette étude et les produits finis. Pour déterminer le dosage des adobes de bonnes caractéristiques du point de vue résistance à la compression, nous avons établi différentes formulations pour la confection des éprouvettes. Les résultats ainsi obtenus seront introduits, traités et analysés dans le logiciel Minitab pour optimiser les réponses. C'est ainsi que notre étude s'intitule : « **Manipulation du logiciel Minitab en vue de l'optimisation des études de formulations des adobes confectionnés avec de la latérite, des poudres fines des termitières et renforcés par les fibres d'agave** ».

II. MATERIELS ET METHODES

2.1 Résultats des études antérieures (Source : Auteur)

2.1.1 Essais de formulation

Nous avons effectué des lots d'essais et d'analyses des éprouvettes d'expérimentation au laboratoire. Ces éprouvettes sont confectionnées avec de la latérite et des poudres fines issues des deux types de nids : nids en activité et nids effondrés selon différentes formulations. Les études au laboratoire ont trouvé que l'utilisation des poudres fines des nids en activités, comme stabilisants, donnent des meilleurs résultats qu'aux celles des nids effondrés. Donc, dans cette étude, nous ne présenterons que les formulations avec des nids en activités. La quantité d'eau des mélanges dépendra de la teneur en eau optimale définie lors de l'essai de compactage de la latérite pure. Selon des études bibliographiques complétées par nos études antérieures sur la stabilisation des terres crues, le stabilisant ne doit pas dépasser le 1/3 du volume de la latérite à stabiliser. Le dosage est raisonné en rapport volumique.

Tableau 1 : Formulations pour la stabilisation à la termitière (en volume)

Essais	Latérite (L)	Termitière (T)
1- Témoin	10	-
2- L.T.1	10	1
3- L.T.2	10	2
4- L.T.3	10	3

Les résultats obtenus au laboratoire lors des essais de caractérisations des adobes stabilisés avec de la poudre fine de termitière a montré que c'est la formulation N°4 L.T.3 qui donne de bons résultats du point de vue résistance à la compression.

Tableau 2 : Formulations pour la stabilisation avec renfort fibres (en volume)

Essais	Latérite + Termitière (%)	Fibre (%)
4- Témoin = L.T.3	100	0
5- L.T.3.1	99,5	0,5
6- L.T.3.2	99	1
7- L.T.3.3	98,5	1,5
8- L.T.3.4	98	2

2.1.2 Résultats des essais

Tableau 3 : Résultats sur la résistance à la compression des éprouvettes sans fibres

Essais	Rc ₂ MPa	Rc ₇ MPa	Rc ₁₄ MPa	Rc ₂₈ MPa	Rc ₃₆ MPa
1- Témoin	0,13	0,31	0,62	0,69	0,69
2- L.T.1	0,15	0,56	1,01	1,83	1,89
3- L.T.2	0,33	0,83	2,05	2,15	2,25
4- L.T.3	0,46	1,12	2,17	2,83	2,88

Tableau 4 : Résultats sur la résistance à la compression des éprouvettes avec fibres

Essais	Rc ₂ MPa	Rc ₇ MPa	Rc ₁₄ MPa	Rc ₂₈ MPa	Rc ₃₆ MPa
4- Témoin = L.T.3	0,46	1,12	2,17	2,83	2,88
5- L.T.3.1	1,08	1,85	2,56	3,02	3,12
6- L.T.3.2	1,17	1,88	3,01	3,58	3,58
7- L.T.3.3	1,13	2,16	2,87	3,29	3,92
8- L.T.3.4	1,17	2,24	3,39	3,76	3,73

2.2 Plan adopté

Nous avons retenu un plan factoriel à deux niveaux ; en prenant toujours le même pourcentage de chaque constituant d'adobe.

Le schéma méthodologique est la suivante :

- Mélanger la latérite avec de la termitière selon le tableau 5.1 ;
- Fixer le volume du mélange Latérite-Termitière ;
- Ajouter les fibres à 0,5%, 1%, 1,5% et 2% ;
- Fixer le pourcentage des fibres à 1,5% du volume total ;
- Varier les longueurs des fibres à 1cm, 1,5cm et 2cm.

Nous avons choisi de mettre le niveau haut du facteur temps de cure en 36 jours et le niveau bas en 2 jours pour suivre l'évolution du mélange dans le temps.

2.3 Facteurs

Les facteurs ciblés par cette recherche sont les composants principaux nécessaires à la stabilisation de l'adobe : latérite, termitière, fibres (le tout par unité de volume en pourcentage) et le temps de cure en jours.

Niveaux des facteurs : le choix des fourchettes d'étude des différents paramètres a été déterminé en se basant sur les formulations dans le tableau 5.

Tableau 5 : Niveaux de facteurs

Facteurs	Niveaux	
	70	-1
Latérite (%)	100	+1
	10	-1
Termitière (%)	30	+1
	0,5	-1
Fibres (%)	2	+1
	1	-1
Longueur des fibres (cm)	2	+1
	2	-1
Temps de cure (jours)	36	+1

2.4 Réponses

Pour mesurer l'impact du stabilisant et/ou renfort (Termitières et/ou Fibres) sur l'adobe, nous avons étudié les modifications apportées à la résistance à la compression à l'état frais puis sec des éprouvettes.

2.5 Choix du plan d'expérience

Le choix de plan d'expérience permet de considérer les trois facteurs à deux niveaux, nous avons un nombre d'essai égal à $2^3 = 8$. Vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire, un plan factoriel complet s'avère le mieux adapté pour cette étude, car il est plus précis.

Plan factoriel complet 2^3 (trois facteurs à deux niveaux)

La matrice des effets selon le plan factoriel choisi est comme suit :

—	1	—	1	—	1
+	1	—	1	—	1
—	1	+	1	—	1
+	1	+	1	—	1
—	1	—	1	+	1
+	1	—	1	+	1
—	1	+	1	+	1
+	1	+	1	+	1

Figure 1 : Matrice des effets

Interactions

- D'ordre trois sans fibres :

Pour le plan factoriel (L : latérite, T : termitières, t : temps), les interactions sont les suivants :

$$L*T - L*t - T*t - L*T*t$$

Nous avons 4 interactions, 3 facteurs et 4 essais de formulations

- D'ordre cinq avec fibres :

Pour le plan factoriel (L : latérite, T : termitières, F : Fibres, l : longueur des fibres, t : temps), les interactions sont les suivantes :

$$L*T - L*l - L*t - T*l - T*t - L*T*l - L*T*t*l.$$

Nous avons 7 interactions, 5 facteurs et 4 essais de formulations.

2.6 Le Logiciel Minitab

Minitab est un logiciel statistique mis au point, à l'origine, par le Département de Statistique de l'Université de Pennsylvanie (U.S.A.). Il est particulièrement bien adapté à l'analyse statistique de petits tableaux de données bien structurés : statistique descriptive, analyse de la variance, méthodes relatives à la corrélation et à la régression simple et multiple, séries chronologiques, tests d'indépendance, méthodes non paramétriques, analyse en composantes principales, analyse discriminante, contrôle statistique de la qualité, plans expérimentaux, etc. L'interface graphique WINDOWS apporte à ce logiciel une plus grande souplesse d'utilisation et une meilleure présentation des résultats. L'emploi des boîtes de dialogue, via la barre de menus, évite à l'utilisateur de devoir connaître la syntaxe.



Figure 2 : Icône de Minitab dans Windows

Au démarrage de Minitab, deux fenêtres principales s'ouvrent : Session et Feuille de travail. La fenêtre Session affichera les résultats des analyses (2). Quant à la fenêtre Feuille de travail, elle sert à entrer les données (4). Cette fenêtre ressemble beaucoup à une feuille de calcul d'Excel.

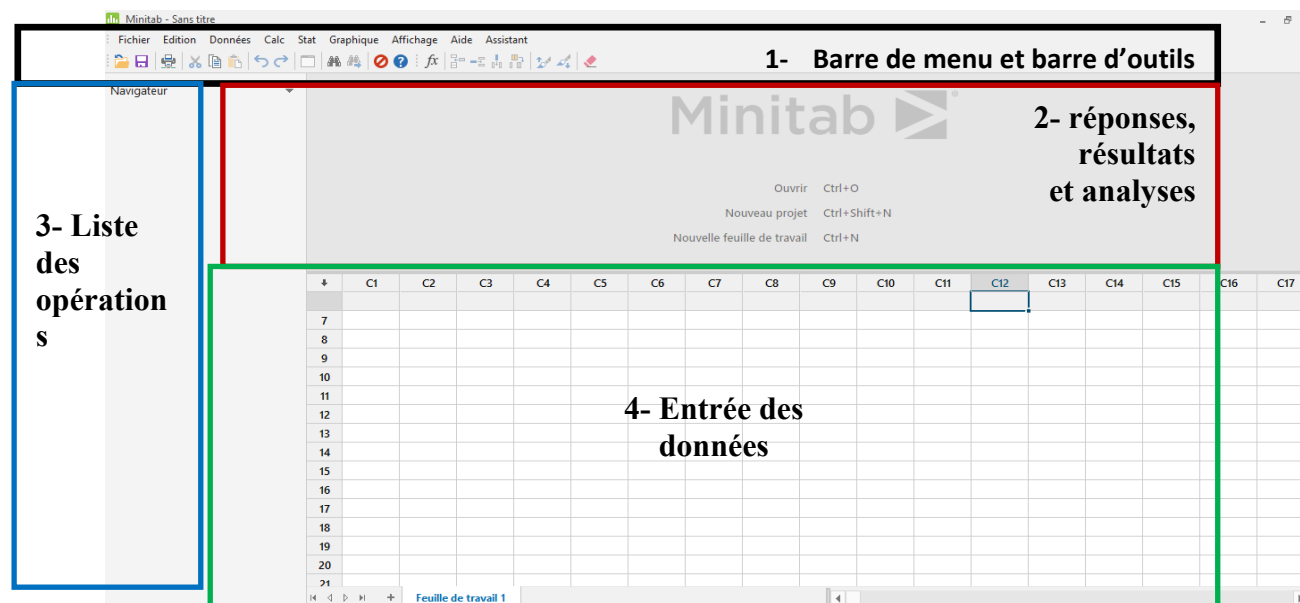


Figure 3 : Interface de Minitab

La barre de menu (1) donne accès aux différentes fonctionnalités de Minitab. Les entrées du menu de niveau supérieur et un résumé de certaines options, avec les icônes des outils correspondants dans la barre d'outils.

La barre d'outils (1) fournit un accès à la majorité des fonctions des menus en plus d'outils additionnels destinés à interagir avec les réponses.

La fenêtre Navigation ou Liste des opérations (3) montre tous les historiques et les opérations que l'on a effectuées pendant la manipulation d'un projet.

Les séries de données sont entrées dans le tableur de la **fenêtre Feuille de travail (4)**. La première rangée de la feuille de travail est réservée par le logiciel et contient les références C1, C2, C3, etc. dont se sert Minitab. La deuxième rangée nous appartient, on peut y taper les noms de nos séries de données. Pour remplir une cellule de cette rangée, il suffit de l'activer en cliquant dessus, puis de taper ce qu'on veut.

Les réponses et analyses seront affichées dans la **fenêtre Session (2)**

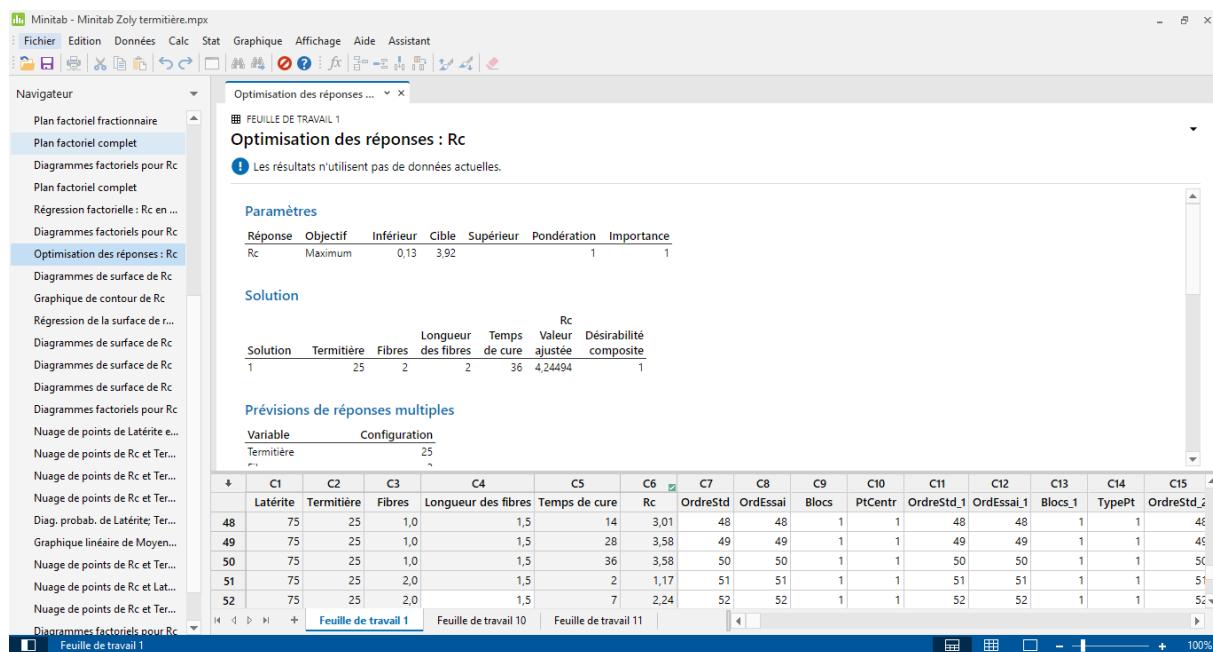


Figure 4 : Exemple de traitement des données

III. RESULTATS

3.1 Coefficients codés

Le tableau qui affiche les coefficients codés est donné par le logiciel Minitab qui permet de déterminer les effets qui sont importants dans la formulation. Les effets sont considérés comme significatifs d'un point de vue statistique lorsque leur valeur de p dans le tableau coefficients codés est inférieure à 0.05 et un R^2 proche de 100%.

Tableau 6 : Coefficients codés

Terme	Effet	Coeff	Coef Er T	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante		1,638	0,124	13,17	0,000	
Latérite	2,7	0,521	0,113	7,48	0,000	2,56
Termitière	1,502	0,751	0,111	6,78	0,000	2,25
Fibres	0,384	0,192	0,110	1,74	0,088	2,87
Longueur des fibres	0,5069	0,2535	0,0961	2,64	0,011	3,34
Temps de cure	0,887	0,444	0,167	2,65	0,011	6,89
Termitière*Temps de cure	0,929	0,465	0,146	3,18	0,003	4,38
Fibres*Longueur des fibres	0,291	0,146	0,118	1,23	0,224	1,67
Fibres*Temps de cure	-0,400	-0,200	0,150	-1,34	0,188	3,13
Longueur des fibres*Temps de cure	0,275	0,137	0,130	1,05	0,298	3,56
Fibres*Longueur des fibres*Temps de cure	0,575	0,287	0,159	1,81	0,077	3,30

Equation de régression en unités non codées

$$R_c = 151,41 - 8,37 \text{ Latérite} + 10,521 \text{ Termitière} + 0,192 \text{ Fibres} + 8,2535 \text{ Longueur des fibres} + 0,444 \text{ Temps de cure} + 28,37 \text{ Latérite} * \text{Termitière} + 2,465 \text{ Termitière} * \text{Temps de cure} + 0,146 \text{ Fibres} * \text{Longueur des fibres} - 0,200 \text{ Fibres} * \text{Temps de cure} + 2,137 \text{ Longueur des fibres} * \text{Temps de cure} + 0,287 \text{ Fibres} * \text{Longueur des fibres} * \text{Temps de cure}$$

Tableau 7 : Récapitulatif du modèle

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,231060	96,42%	95,39%	93,81%

Tableau 8 : Analyse de la variance

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur de F	Valeur de p
Modèle	9	56,9136	16,3237	50,16	0,000
Linéaires	3	23,8238	25,9560	47,24	0,000
Termitière	1	25,7913	15,7913	45,94	0,000
Fibres	1	20,3831	10,3831	30,04	0,088
Longueur des fibres	1	20,8777	10,8777	36,96	0,011
Temps de cure	1	10,8864	10,8864	47,03	0,011
Interactions à 2 facteurs	4	8,0006	8,5001	20,97	0,008
Termitière*Temps de cure	1	8,2727	8,2727	20,10	0,003
Fibres*Longueur des fibres	1	7,1912	7,1912	21,52	0,024
Fibres*Temps de cure	1	7,2252	7,2252	21,79	0,008
Longueur des fibres*Temps de cure	1	8,1399	8,1399	21,11	0,008
Interactions à 3 facteurs	1	6,4116	6,4116	33,27	0,007
Fibres*Longueur des fibres*Temps de cure	1	5,4116	5,4116	33,27	0,007
Erreur	15	5,6734	0,1261		
Total	24	62,5870			

Toutes les valeurs de p pour chaque système se trouve inférieure à 0,05 à l'exception du facteur Fibres (p = 0,08). La valeur de p < 0,05 montre une réponse significative.

Les coefficients et les effets sont positifs pour l'ensemble du système, à l'exception l'interaction Fibres*Temps de cure qui est négatif. Ceci montre des meilleurs résultats sur la résistance mécanique de l'adobe.

D'une manière générale, le coefficient de corrélation linéaire qui s'approche de 1 indique une modélisation de bonne qualité. Le récapitulatif du modèle donne un $R^2 = 0,96$, nous pouvons dire que la modélisation est adéquate.

Compte tenu de l'équation de régression, les interactions Latérite*Termitière, Termitière*Temps de cure, Longueur des fibres*Temps de cure ont les coefficients plus élevés. Ce qui signifie qu'ils agissent sur la résistance en compression des adobes.

3.2 Diagramme de Pareto

Le diagramme de Pareto permet de connaître les effets qui influent sur la réponse Rc.

Tableau 9 : Structure des alias

Facteur	Nom
A	Latérite
B	Termitière
C	Fibres
D	Longueur des fibres
E	Temps de cure

Alias

I - AC - AD + BC + BD - ABC - ABD + ACD - BCD + ABCD

A - AC - AD + ACD

B - BC - BD + BCD

C - AC + BC - ABC

D - AD + BD - ABD

E - ACE - ADE + BCE + BDE - ABCE - ABDE + ACDE - BCDE
+ ABCDE

AB - ABC - ABD + ABCD

AE - ACE - ADE + ACDE

BE - BCE - BDE + BCDE

CD - ACD + BCD - ABCD

CE - ACE + BCE - ABCE

DE - ADE + BDE - ABDE

ABE - ABCE - ABDE + ABCDE

CDE - ACDE + BCDE - ABCDE

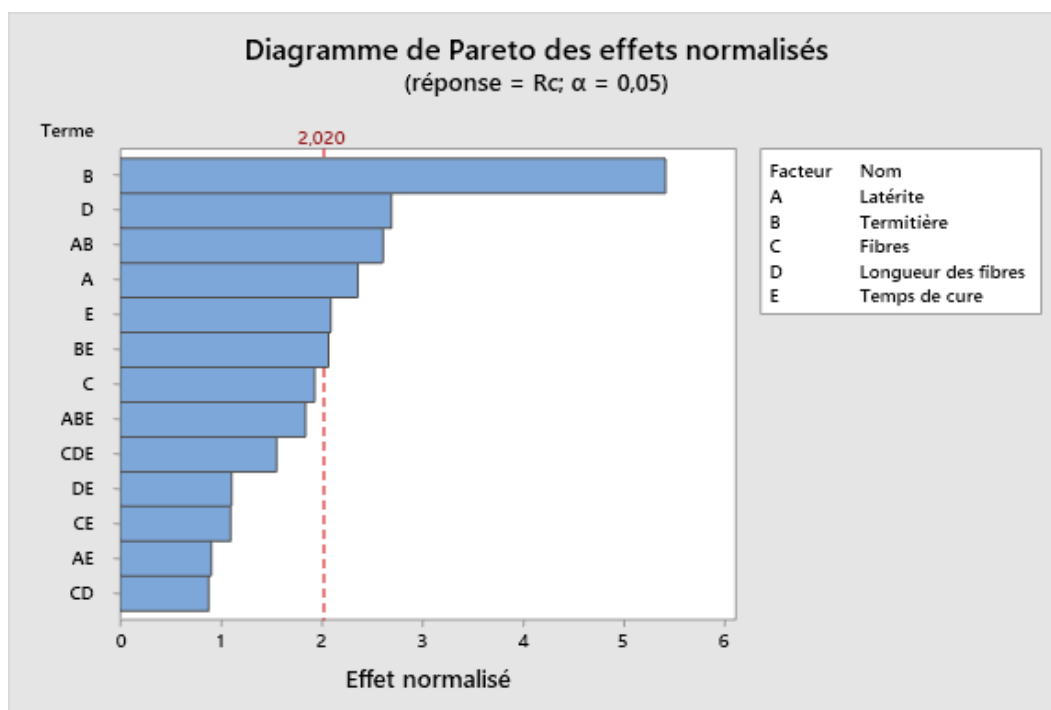


Figure 5 : Diagramme de Pareto des effets normalisés

Dans ce diagramme, Minitab affiche la valeur absolue des effets du diagramme de Pareto. Tous les effets allant au-delà de la ligne de référence sont significatifs. Les termes latérites (A), Termitières (B), Longueur des fibres (D), temps de cure (E), Système Latérite-Termitière (AB), Système Termitière-Temps de cure (BE) sont significatifs. Nous pouvons dire que l'amélioration des résistances des adobes est influencée directement par l'ajout de la termitière dans la latérite. Ces résistances évoluent aussi selon les temps de cure.

3.3 Diagramme des interactions

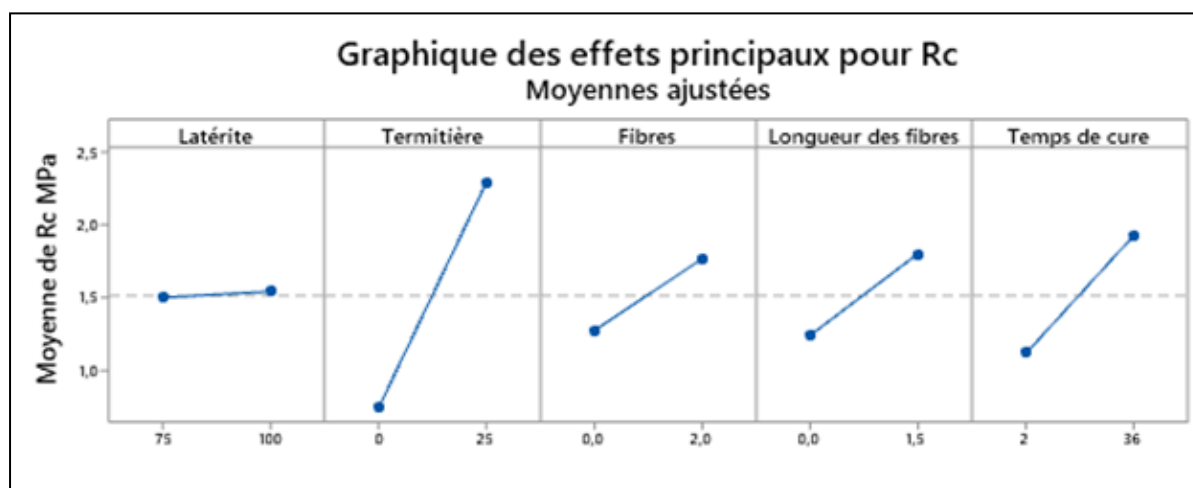


Figure 6 : Graphique des effets principaux pour Rc

La ligne en tireté indique la Rc moyenne pour tous les essais de l'expérience et chaque point représente la Rc moyenne pour un niveau de facteur. Ce graphe montre que l'augmentation du pourcentage en termitière et en fibres permet d'améliorer la résistance en compression, nous avons une droite ascendante qui prend de l'origine de 1,0 jusqu'au point final de 2,4. On peut dire que le facteur termitière présente une grande amélioration dans la résistance à la compression. On ne trouve pas d'interaction significative

entre les facteurs, le diagramme des interactions que nous présentons ci-après montre les effets principaux qui présentent correctement des relations entre chaque facteur et la réponse.

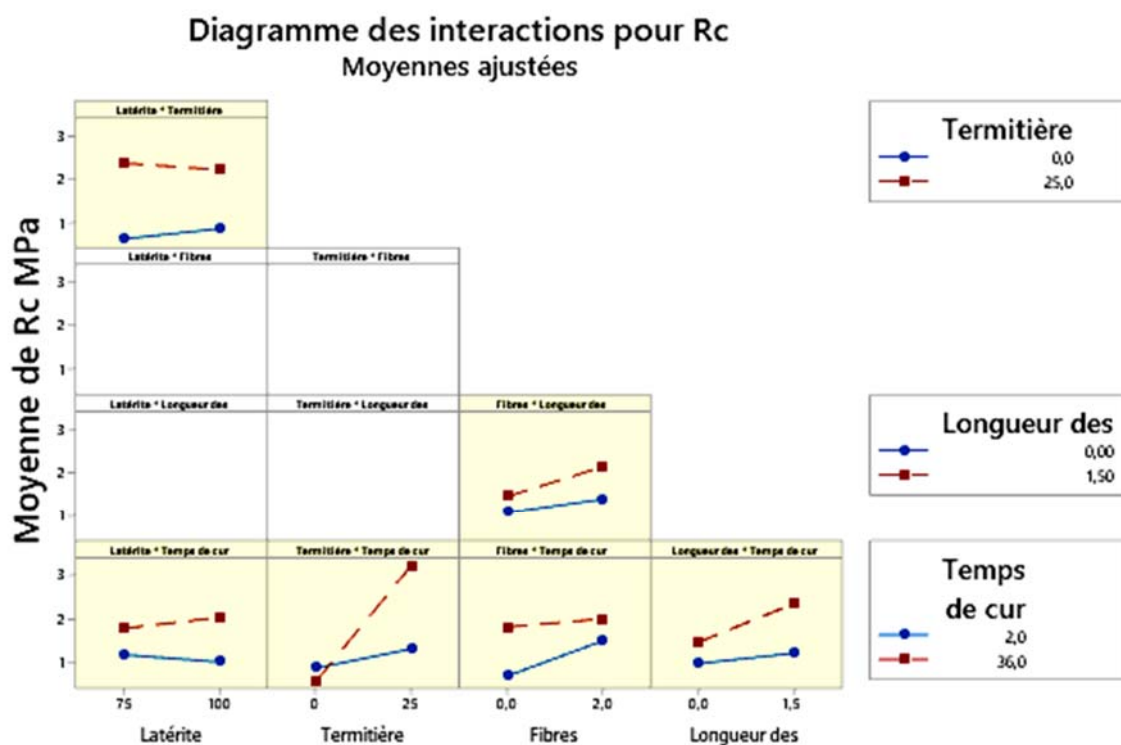


Figure 7 : Diagramme des interactions

3.4 Diagramme de surface

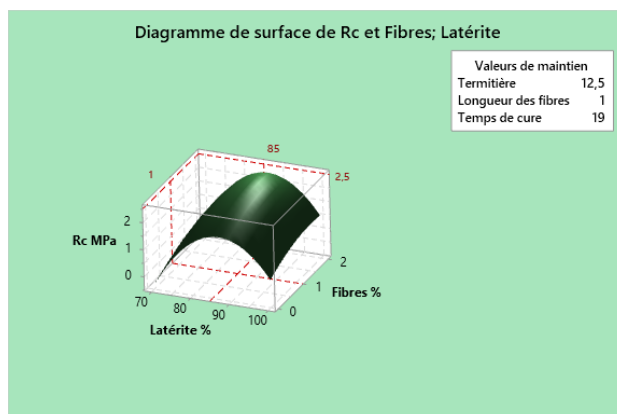
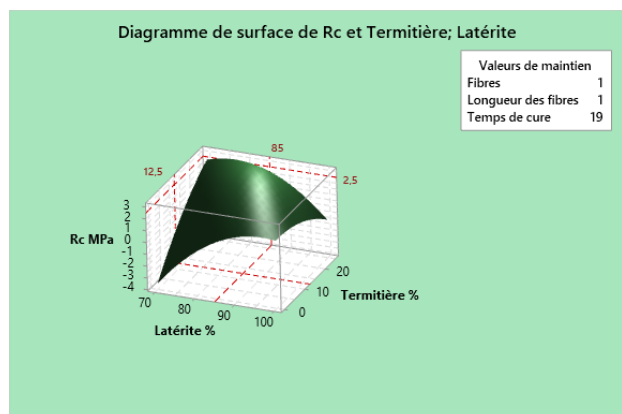


Diagramme de surface de Rc et Longueur des fibres; Latérite

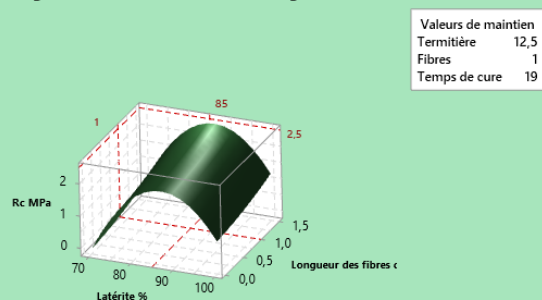


Diagramme de surface de Rc et Temps de cure; Latérite

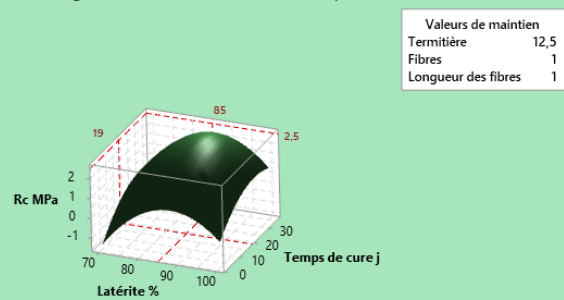


Diagramme de surface de Rc et Fibres; Termitière

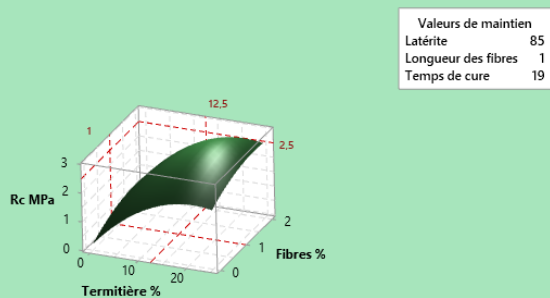


Diagramme de surface de Rc et Longueur des fibres; Termitière

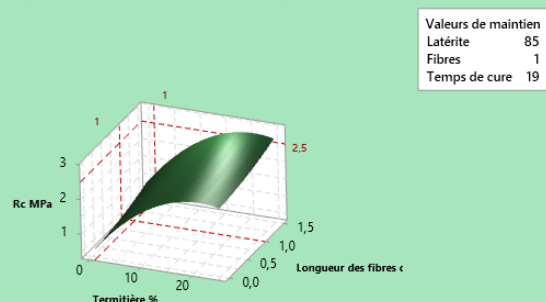


Diagramme de surface de Rc et Temps de cure; Termitière

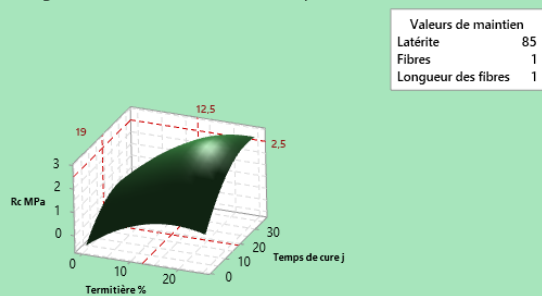
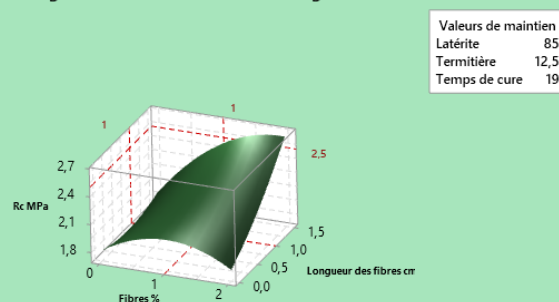


Diagramme de surface de Rc et Longueur des fibres; Fibres



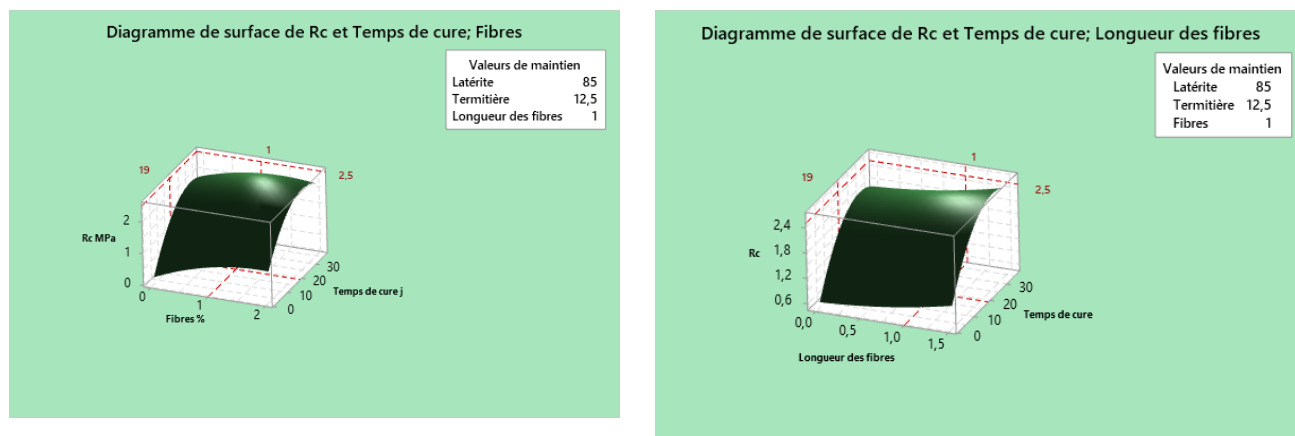


Figure 8 : Diagrammes de surface

3.5 Nuage des points

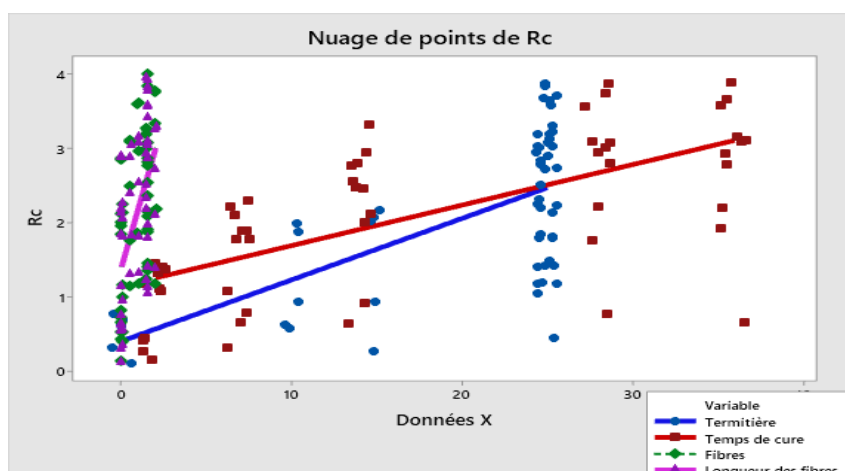


Figure 9 : Nuage de points de Rc en fonction des différents facteurs

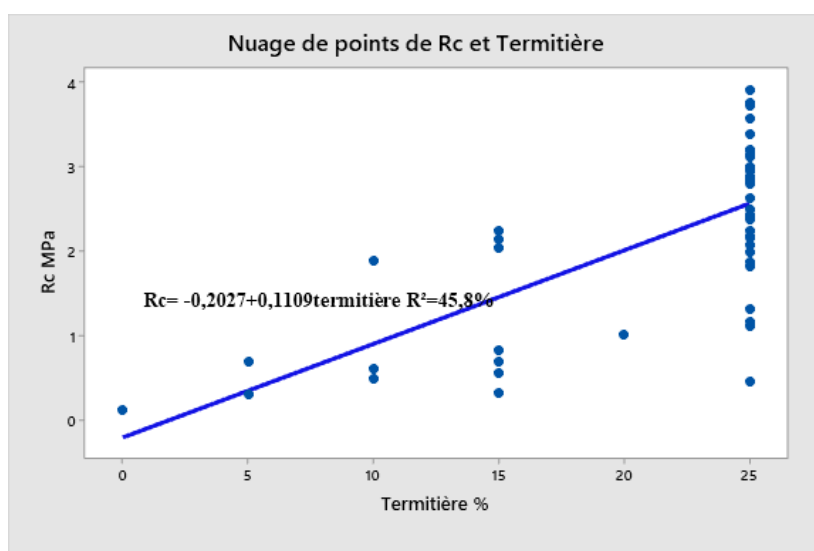


Figure 10 : Variation de Rc en fonction du pourcentage en termitière

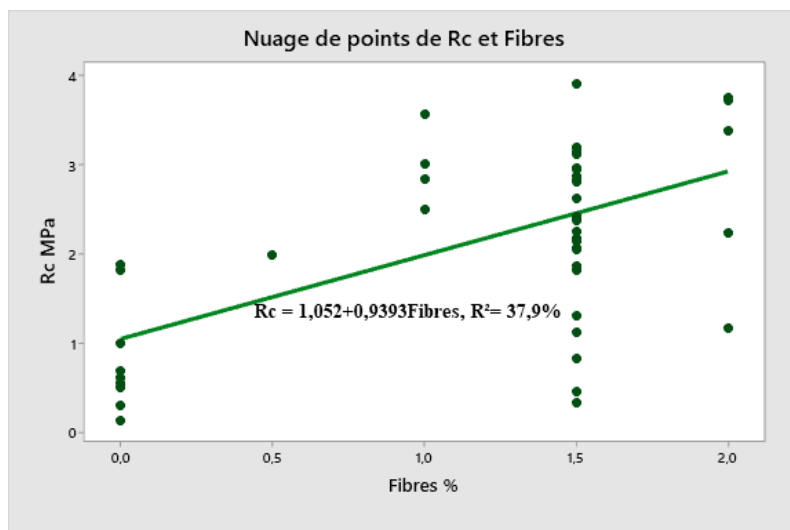


Figure 11 : Variation de Rc en fonction du pourcentage en fibres

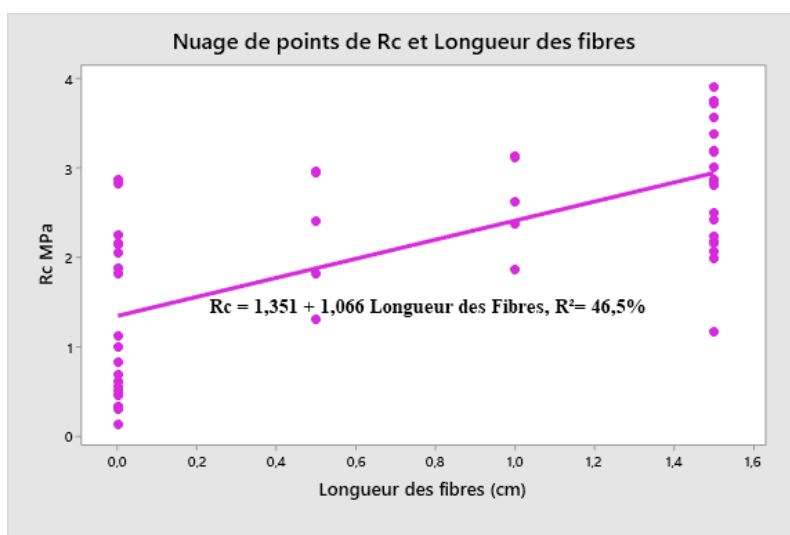


Figure 12 : Variation de Rc en fonction de la longueur des fibres

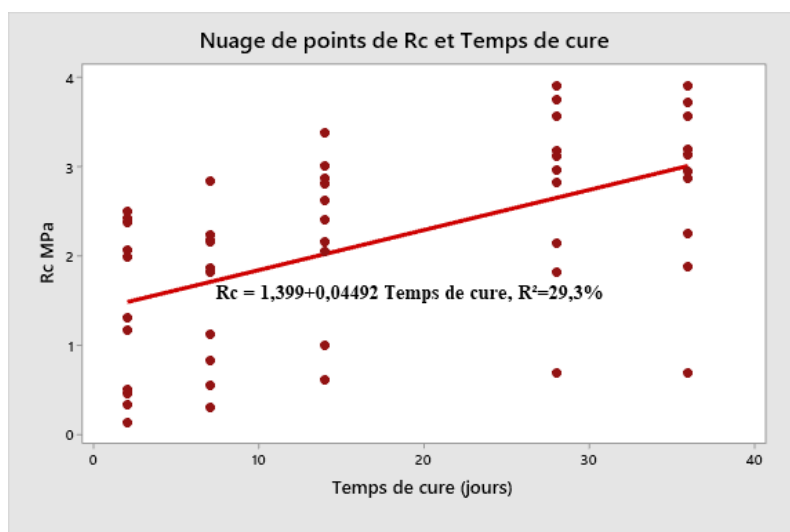


Figure 13 : Variation de Rc en fonction du temps de cure

IV. DISCUSSIONS

Les diagrammes des interactions établissent un plan. Ceci va nous permettre de mesurer la liaison entre les différents constituants. Étant donné que si les signes ne sont pas parallèles, cela signifie qu'il y a interaction entre les deux facteurs. La droite plus inclinée a un effet plus grand. Comptes tenus des graphes données par Minitab, les interactions Latérite*Termitière, Latérite*temps de cure, Termitière*temps de cure, Fibres*temps de cure, Fibres*longueur des fibres, longueur des fibres*temps de cure ont une influence sur l'augmentation de la résistance en compression des adobes. Toutefois, les interactions Termitières*fibres, Latérite*Fibres, Latérite*longueur des fibres, Termitière*longueur donnent des effets significatifs négatifs sur la résistance.

Les diagrammes de surface affichent la relation tridimensionnelle en deux dimensions, les variables étant représentées sur les axes des X et des Y, et la variable de réponse (Z) par une surface lisse. A mesure que la couleur s'assombrit, la réponse augmente. En observant ces diagrammes, les interactions suivantes donnent des améliorations sur la réponse Rc.

En analysant les diagrammes de surface, la Rc maximale à 19 jours de cure atteint une valeur supérieure à 2MPa si on considère les compositions en pourcentage volumique suivantes : 85%L + 12,5%T (ajusté à 14%) + 1%F découpées à 1cm de longueur.

Le nuage de points indique une relation linéaire négative entre tous les facteurs. Tous les points sont hétérogènes et se trouvent très éloignés des lignes de références. Tous les R^2 sont éloignés de 1. L'utilisation des nuages de points par Minitab donne une réponse non significative sur le modèle.

La fonction optimisation des réponses permet de déterminer les paramètres optimaux pour les prédicateurs en fonction des paramètres qu'on a indiqués dans les feuilles de travail de Minitab. Le diagramme d'optimisation indique l'incidence des variables sur les réponses prévues.

Tableau 10 : Paramètres

Réponse	Objectif	Inférieur	Cible	Supérieur	Pondération	Importance
Rc	Maximum	0,13	3,92		1	1

Tableau 11 : Solutions

Solution	Termitière	Fibres	Longueur des fibres	Temps de cure	Rc Valeur ajustée	Désirabilité composite
1	25%	2%	2cm	36j	4,24494MPa	1

Réponse	Valeur ajustée	ErT ajust	IC à 95 %	IP à 95 %
Rc MPa	4,245	0,317	(3,606; 4,884)	(3,258; 5,232)

Tableau 12 : Prévisions de réponses multiples

Variable	Configuration
Termitière (%)	25
Fibres (%)	2
Longueur des fibres (cm)	2
Temps de cure (j)	36

La valeur ajustée (également appelée valeur prévue) pour ces paramètres est de 4,245MPa.

L'intervalle de confiance IC à 95% désigne l'étendue des valeurs probables pour les Rc, les valeurs de Rc pourront se trouver entre 3,606 et 4,884MPa avec une optimisation.

L'intervalle de prévision (IP) est une étendue ayant de fortes chances de contenir une réponse future pour une combinaison de paramètres de variables spécifiée.

Le graphe ci-dessus permet de déterminer analytiquement les valeurs optimales des paramètres opératoires ayant une influence sur le procédé d'optimisation de la résistance mécanique du matériau. En rouge apparaissent les paramètres de facteurs optimaux. En bleu, la réponse prévue concernant les résistances conçues avec ces paramètres.

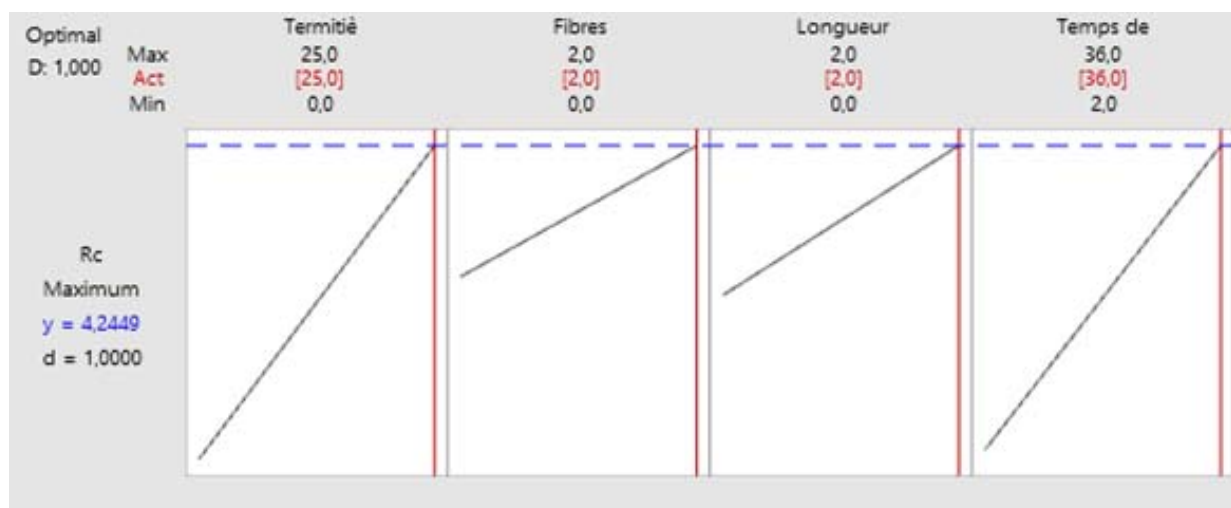


Figure 14 : Optimisation des réponses

Le diagramme d'optimisation illustre l'effet de la position de chaque composant ou facteur (colonnes) sur la réponse Rc (ligne). Les lignes verticales rouges et les chiffres correspondants indiquent les niveaux des facteurs optimaux. La ligne horizontale bleue et les chiffres correspondants représentent la valeur moyenne par rapport aux niveaux des facteurs optimaux trouvés. Le diagramme indique que la réponse Rc est maximisée, pour une valeur de désirabilité globale égale à 1, lorsque les facteurs sont définis sur les valeurs données en rouge.

D'après cette figure, on peut interpréter que pour avoir une résistance en compression à 36 jours (âge optimale), il suffit d'utiliser les valeurs colorées en rouge c'est-à-dire avec le dosage en termitière 25%, fibres 2%, longueur des fibres 2cm et temps de cure 36 jours. Ces dosages nous permettent d'avoir une résistance optimale de $R_c = 4,245\text{MPa}$.

V. CONCLUSION

Notre étude consiste en le contrôle de la régularité de la qualité des adobes stabilisés et renforcés. La première étape est le traitement de la latérite avec des poudres fines de termitières. La seconde est l'incorporation de fibres d'agave dans la structure stabilisée. Ce travail a été réalisé en utilisant le plan d'expériences qui nous a permis d'optimiser la résistance à la compression des adobes. Leur utilisation est très utile en pratique et permet de rectifier la composition des adobes. Le logiciel Minitab est un logiciel statistique dans lequel nous entrons les données, qui peuvent ensuite être analysées et traitées sous différents angles. La vérification des modèles ajustés a été effectuée par le coefficient de régression R^2 . Selon les conceptions expérimentales, les facteurs étudiés sont la latérite, les termitières, la longueur des fibres, les pourcentages de fibres et le temps de durcissement. Les facteurs sont à deux niveaux (minimum, maximum) afin d'identifier les facteurs ayant une influence statistiquement significative sur le processus. Ces schémas expérimentaux permettent d'optimiser les formulations, dont la réponse Rc est maximisée, pour une valeur de désirabilité globale égale à 1. Ceci en tenant compte des facteurs suivants : termite 25%, fibres 2%, longueur de fibre 2cm et temps de cure 36 jours (âge optimal). Avec ce dosage, il sera possible d'avoir une résistance à la compression optimale jusqu'à 4,245 MPa.

Enfin il serait intéressant de valider les facteurs nécessaires d'un point de vue expérimental, le premier facteur qui a une influence significative est le temps de cure. Le Rc maximum à 19 jours de cure atteint une valeur supérieure à 2MPa si l'on considère les compositions suivantes en pourcentage volumique : 85%L + 12.5%T (ajusté à 14%) + 1%F coupé à 1cm de longueur.

Prendre en considération d'autres paramètres comme les fibres (longueur et pourcentages), donnent des effets significatifs négatifs sur la résistance si on considère les interactions Termitières*fibres, Latérite*Fibres, Latérite*longueur des fibres, Termitière*longueur. L'utilisation du facteur fibres donne un effet faible pour le mélange.

REFERENCES

- [1] Ayad Mohamed et Barka Yassine, 2005 : Modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expériences, Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master en Ingénieries des structures, Génie Civil, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, faculté de technologie, département de Génie Civil.
- [2] Cachan P., 1949 : Les Termites de Madagascar. Mem. Insf. Scient. Madagascar : A, III, p. 157-275.
- [3] Goupy Jacques, Creighton Lee, 2006 : Introduction aux plans d'expériences, les mélanges, Dunod, Paris, 2001, 2006, 304 p.
- [4] Jehanne P., 2015 : Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou. Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées
- [5] Petit M., 1994 : Termites et termitières dans le sud-ouest malgache (Termites and termitaries in the south-west of Malagasy Island, some geographical aspects). In : Bulletin de l'Association de géographes français, 71e année, doi : <https://doi.org/10.3406/bagf.1994.1774> ; https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1994_num_71_4_1774
- [6] Rakotomalala Zolimboahangy et al, 2021. « Études des caractéristiques et classification des termitières pour être valorisées et utilisées comme stabilisants des matériaux en terre crue », MADA-HARY, ISSN 2410-0315, vol. 10, 2021, pp 169 – 182, <http://madarevues.recherches.gov.mg>.
- [7] Rakotomalala Zolimboahangy et al, 2021 « Numérisation et stockage des données sur les caractéristiques des terres rouges de quelques sites de la région Analamanga dans le logiciel QGIS, MADA-HARY, ISSN 2410-0315, vol. 11, 2021, pp 23 – 38, <http://madarevues.recherches.gov.mg>.

- [8] Randrianofidina A, 2012 : Les exopolysaccharides des bactéries associées au tube digestif des termites et leurs implications dans le phénomène d'agrégation du sol Mémoire de DEA en sciences de la vie - option : biotechnologie- microbiologie, Faculté des Sciences - Université Antananarivo.
- [9] Sado G. et Sado M.C., 1991: Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité, Afnor Technique Ed., Paris.