

## FORMULATION ET MODELISATIONS MATHÉMATIQUES DES BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉS À BASE DE PURIN DE BOEUF

Ramiandrisoa Antsa Lalaina (1), Ranaivoniarivo Velomanatsoa Gabriely (1)  
Rakotoarivonizaka Ignace (1), Rajaona Rafihavanana Andrianaivoravelona (2)

(1) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

(2) Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Département de Chimie Minérale et Chimie Physique.  
Antananarivo 101.

E-mail: ramiandrisoa.antsalalaina@gmail.com

### Résumé

L'étude du comportement de brique de terre comprimée nécessite une connaissance particulière de l'influence des différents éléments qui le constituent.

Notre travail a pour but de déterminer à l'aide de la méthode des plans d'expériences, un ensemble de modèles prédictifs en fonction de la proportion des constituants des briques formulés à base de purin de bœuf.

Un plan factoriel a été donc utilisé pour modéliser, l'influence de cinq paramètres clés liés à la cohésion du mélange et à sa résistance. Les paramètres considérés dans cette étude sont : les teneurs en sol, en sucre, en sable, en urée ainsi que le temps de traitement.

Ces méthodes d'analyses des données permettent de collecter, de résumer et de présenter des données de façon à en tirer le maximum d'information pour la suite des expériences. La méthodologie des plans d'expériences aide l'expérimentateur à structurer sa recherche de manière différente, à valider ses propres hypothèses, à mieux comprendre les phénomènes étudiés et à solutionner les problèmes.

Pour mener une recherche expérimentale planifiée, l'établissement des formulations et des modèles mathématiques est utilisé, ils permettent de prédire la maniabilité de la brique ainsi que sa résistance tout en mettant en évidence les corrélations et les interactions qui existent entre les différents facteurs grâce au logiciel Minitab.

Mots Clés : brique de terre, stabilisation, purin de bœuf, formulation, modélisation, plans d'expériences, Minitab

### Summary

The study of the behaviour of compressed earth bricks requires special knowledge of the influence of the various elements that constitute it.

Our work aims to determine, using the design of experiments method, a set of predictive models according to the proportion of the constituents of the bricks formulated with beef manure.

A factorial design was therefore used to model the influence of five key parameters related to the cohesion of the mixture and its resistance. The parameters considered in this study are: the soil, sugar, sand and urea contents as well as the treatment time.

The interest of these methods of data analysis makes it possible to collect, summarize and present data in order to extract the maximum amount of information for subsequent experiments. The methodology of design of experiments helps the experimenter to structure his research in a different way, to validate his own hypotheses, to better understand the phenomena studied and to solve the problems.

To carry out a planned experimental research, the establishment of formulations and mathematical models are used; they make it possible to predict the workability of the brick as well as its resistance while highlighting the correlations and interactions that exist between the different constituents thanks to the Minitab software.

Keywords: clay brick, stabilization, formulation, beef manure, modelling, experimental designs, Minitab

## 1. INTRODUCTION

Les matériaux de constructions ont été développés depuis plusieurs années. La plupart des ingénieurs et techniciens améliorent leurs modes de construction ou leurs processus de production à partir des expériences. Malheureusement, les stratégies couramment utilisées pour mener ces expériences sont souvent coûteuses et peu performantes et elles conduisent à de nombreuses expériences difficiles à exploiter. Pour toutes ces raisons, de nombreux ingénieurs et techniciens font appel à la planification des expériences.

Les plans d'expériences sont des outils mathématiques permettant la détermination des conditions optimales dans une expérience ou une recherche scientifique ou des études industrielles [2]. Ils sont utilisés à la détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé, à l'optimisation des réglages d'un procédé de fabrication et à la prédiction par modélisation du comportement d'un procédé. Donc on utilise les plans d'expériences si on cherche un lien entre une grandeur d'intérêt  $y$  et des variables  $x_i$  selon la relation  $y = f(x_i)$ .

Pour étudier donc les modélisations mathématiques des comportements des briques de terre comprimée, nous avons choisis le logiciel Minitab 19.2. Grâce au logiciel, nous pouvons analyser l'influence des facteurs et interactions dans les modèles obtenus.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'articule en plusieurs étapes : nous commençons par les matériels et méthodes et l'étude de conception des plans d'expériences par le logiciel Minitab. Ensuite nous passons à la partie consacrée aux résultats et discussions suivie de la conclusion.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Les briques de terre comprimés

Dans notre travail, nous avons confectionné des briques de terre comprimée à base de purin de bœuf. Les différents paramètres dans cette étude sont : les teneurs en sol, en sucre, en sable, en urée ainsi que le temps de traitement.

Lors de la réalisation de formulation des briques, les formules et les résultats sont rappelés par les tableaux suivants :

- Le premier pour le traitement du sol avec du purin, du sucre sans urée.
- Le deuxième pour le traitement du sol avec du purin, du sucre à 10% et de l'urée.

Les quatre tableaux (tableaux 1, 2, 3, 4) présentent la formulation et les résultats obtenus, lors du traitement du sol.

#### 2.1.1 Le traitement sans urée

Tableau 1: Formulations utilisées pour le traitement des sols sans urée

Essais	Terre	Purin	Sucre	Sable
1- Témoin	100	Saturation	-	-
2- BCPSa5	95	Saturation	-	5
3- BCPSa5S5	90	Saturation	5	5
4- BCPSa5S10	85	Saturation	10	5
5- BCPSa5S15	80	Saturation	15	5

Tableau 2 : Résultats obtenus sur la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes « BCPSa5, BCPSa5S5, BCPSa5S10, BCPSa5S15 » en bar

Temps de réduction en semaine	2	4	6	8	10	12	14
BCPSa5	59,6	74,3	93,4	97,1	127,6	130,8	132,1
BCPSa5S5	61,05	75,03	102,1	123,6	135	137,7	138,6
BCPSa5S10	66,3	78,7	106,6	134,2	141,9	143,8	144
BCPSa5S15	60,6	73,1	102,9	124,1	132,1	137,8	138,2

#### 2.1.2 Le traitement avec urée

Tableau 3: Formulations utilisées pour le traitement des sols avec urée

Essais	Terre	Purin	Sucre	Sable	Urée
1- BCPSa5S10	100	Saturation	-	5	
2- BCPSa5S10U5	80	Saturation	10	5	5
3- BCPSa5S5U10	75	Saturation	10	5	10

Tableau 4: Résultats obtenues sur la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes «BCPSa5S10, BCPSa5S10U5, BCPSa5S5U10 » en bar

Temps de réduction en semaine	2	4	6	8	10	12	14
BCPSa5S10	66,3	78,7	106,6	134,2	141,9	143,8	144
BCPSa5S10U5	65,9	78,1	105,9	139,1	142,1	142,8	143
BCPSa5S5U10	50,5	63,2	86,9	90,3	120,1	130,8	136,2

Avec :

- BCPSa5S10 : Brique de terre comprimée à base de purin de bœuf et sable5%, Sucre 10%
- BCPSa5S5S10U5 : Brique de terre comprimée à base de purin, sable5% sucre10%, Urée 5%
- BCPSa5S10U10 : Brique de terre comprimée à base de purin, sable5%, sucre 10%, Urée 10%

Par la suite, on s'intéresse à la modification et à l'optimisation du procédé de purin de bœuf sur la brique confectionnée.

### 2.1.3 Plan adopté

Nous avons retenu un plan factoriel à deux niveaux.

Les conditions sont donc :

- Réalisons le mélange du sol saturé avec le purin de bœuf.
- Réalisons aussi le mélange des produits obtenus avec du sable 5%
- Additionnons le sucre petit à petit de 5%, 10%, 15%, et 20%. Les niveaux bas et haut de la quantité du sucre ont été fixés en égard à une estimation résultant des pratiques habituelles
- Fixons le taux du sucre à 10% et ajoutons le taux d'urée 5% et 10%
- Le sol traité est habituellement mis en œuvre dans le mélange.
- Nous avons choisi de mettre le niveau haut du facteur temps de traitement en 14 semaines et le niveau bas en 2 semaines pour suivre l'évolution du mélange dans le temps.

### 2.1.4 Facteurs

Les facteurs ciblés par cette recherche sont les taux des composants principaux nécessaires à la confection de brique de terre comprimée : Eau, sable, sucre, urée, purin, et le temps de traitement. Le tout en unité de pourcentage massique à l'état frais et le temps de traitement en semaine.

### 2.1.5 Niveaux des facteurs

Le choix des fourchettes d'étude des différents paramètres a été déterminé en se basant sur les formules des briques de terre comprimé présentées dans les tableaux 1 et 3 précédents. Une série de formulations a été donc effectuée. Le tableau 5 présente les niveaux de facteurs.

Tableau 5: Niveaux de facteurs

Facteurs	Niveaux	
Sol	80	-1
	95	+1
Sucre	5	-1
	15	+1
Eau	20	Pas de niveau
	20	
Sable	5	
	5	
Purin	Saturé	
	Saturé	
Urée	5	-1
	10	+1
Temps de traitement	2	-1
	14	+1

### 2.1.6 Réponses

Pour mesurer l'impact de liant sur le sol argileux, nous avons étudié les modifications apportées à la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes

### 2.1.7 Choix du plan d'expérience pour notre étude [1]

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 (figure 1) :

$$\begin{pmatrix} - & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} \\ + & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} \\ - & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} \\ + & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} \\ - & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} \\ + & \mathbf{1} & - & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} \\ - & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} \\ + & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} & + & \mathbf{1} \end{pmatrix}$$

Figure 1: Matrice des effets

### 2.1.8 Interactions

- D'ordre trois sans urée :

Pour le plan factoriel (So : sol, S : sucre, t : temps), les interactions sont les suivantes : So\*S, So\*t, S\*t, So\*S\*t.

Nous avons 4 interactions, 3 facteurs et 8 essais de formulation, d'où la matrice est une matrice à 8 lignes et à 7 colonnes (4 interactions + 3 facteurs).

- D'ordre trois avec urée :

Pour le plan factoriel (So : sol, U : Urée, t : temps), les interactions sont les suivantes : So\*U, So\*t, U\*t, So\*U\*t.

Nous avons 4 interactions, 3 facteurs et 8 essais de formulation, d'où la matrice est une matrice à 8 lignes et à 7 colonnes (4 interactions + 3 facteurs).

La matrice des effets avec interactions est présentée par la figure 2 suivante :

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 \end{pmatrix}$$

Figure2 : Matrice des effets avec ses interactions

## 2.2 Le logiciel Minitab

### 2.2.1 Introduction :

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.

### 2.2.2 Création d'un plan d'expériences

Avant de pouvoir saisir ou analyser des données de mesure dans Minitab, nous devons d'abord créer un plan d'expériences et l'enregistrer dans une feuille de travail. En fonction des critères nécessaires pour l'expérience, il existe différents types de plan. Minitab facilite la sélection d'un plan en fournissant une liste de tous les plans disponibles.

Une fois que nous avons choisi un plan et ses caractéristiques, Minitab se charge de le créer automatiquement et de le mémoriser dans la feuille de travail. La démarche est présentée comme suit :

- Ouverture

Pour démarrer une session Minitab sous l'environnement windows, il suffit de " double-cliquer " sur l'icône bleue Minitab (figure 3).



Figure 3 : Logo Minitab

- Familiarisons-nous avec la configuration de Minitab [9]

Quand on ouvre Minitab pour la première fois, on tombe sur deux fenêtres principales (figure 4) : Session et Feuille de travail. La fenêtre Session affichera les résultats des analyses. Quant à la fenêtre Feuille de travail, elle sert à entrer nos données. Cette fenêtre ressemble beaucoup à une feuille de calcul d'Excel.

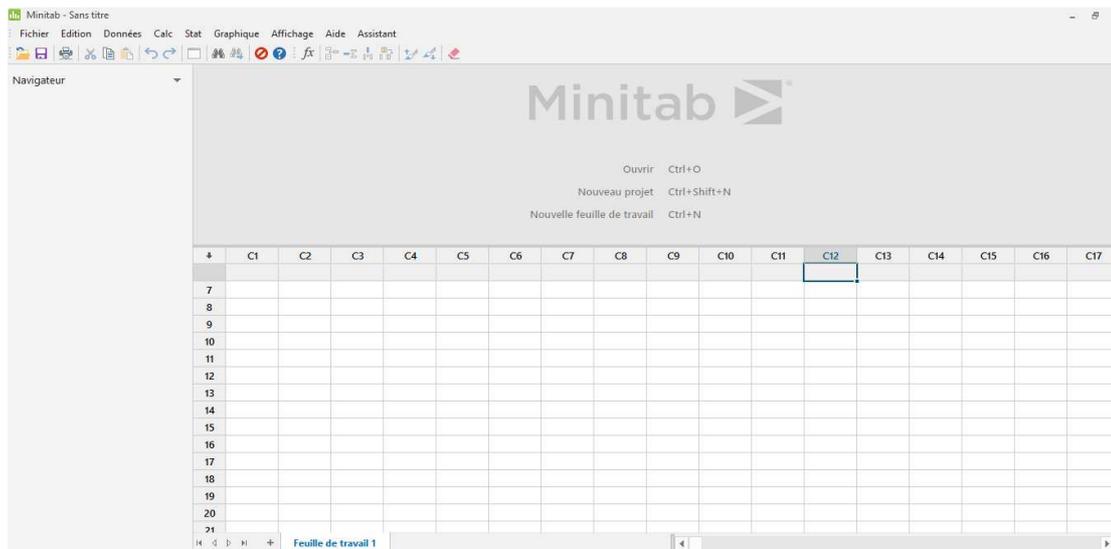


Figure 4: Fenêtre principale

- Entrer le nom de notre série de données sur la deuxième rangée de la feuille de travail

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, nous pouvons 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 que nous voulons.

- Entrer nos données dans les différentes colonnes comme sur la figure 5.

Après avoir étiqueté nos colonnes, nous pouvons entrer les données correspondantes. Après chaque donnée, il suffit d'appuyer sur la touche Entrée pour passer à la cellule inférieure.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	Sol	Sucre	Temps de maturation	Sable	Résistance sec			
1	95	0	2	5	59,60			
2	95	0	4	5	74,30			
3	95	0	6	5	93,40			
4	95	0	8	5	97,10			
5	95	0	10	5	127,60			
6	95	0	12	5	130,80			
7	95	0	14	5	132,10			
8	90	5	2	5	61,05			
9	90	5	4	5	75,03			
10	90	5	6	5	102,10			
11	90	5	8	5	123,60			
12	90	5	10	5	135,00			
13	90	5	12	5	137,70			
14	90	5	14	5	138,60			
15	85	10	2	5	66,30			
16	85	10	4	5	78,70			
17	85	10	6	5	106,60			
18	85	10	8	5	134,20			
19	85	10	10	5	141,90			
20	85	10	12	5	143,80			
21	85	10	14	5	144,00			
22	80	15	2	5	60,60			
23	80	15	4	5	73,10			
24	80	15	6	5	102,90			
25	80	15	8	5	124,10			

Figure 5: Fenêtre principale et les données

➤ Cliquer sur le menu *Stat*.

Une fois nos données entrées, cliquer sur le menu *Stat* qui se trouve en haut de la fenêtre. Passer le curseur de la souris au-dessous menu *stat*, faire notre choix.

a) Créer un plan factoriel [4]

Une fois nos données entrées, cliquer sur le menu *Stat* – (DOE (plan d’expériences) – plan factoriel – créer un plan factoriel (figure 6, 7).

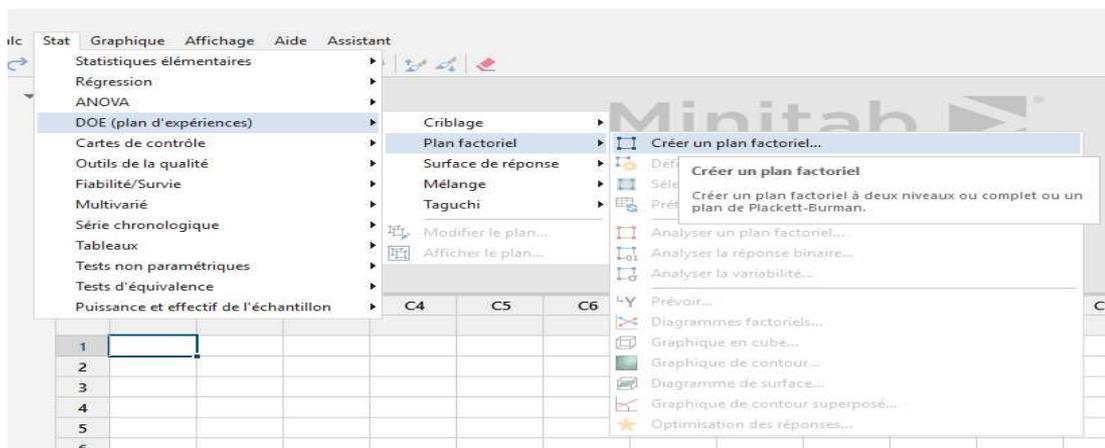


Figure 6 : Création des plans d’expériences

Une nouvelle fenêtre s’ouvre.

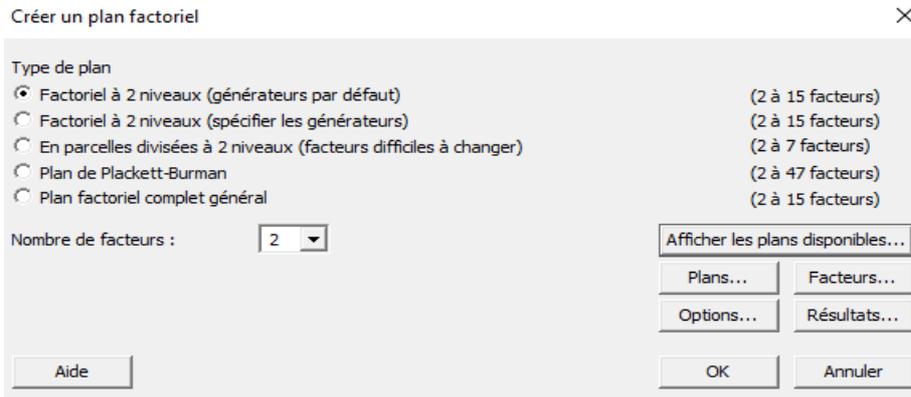


Figure 7 : Choix de nombre de facteur

➤ Afficher les plans disponibles  
 Cliquer sur afficher les plans disponibles, Minitab affiche tous les plans possibles et le nombre d'essai nécessaire dans la boîte de dialogue Afficher les plans disponibles (figure 8).

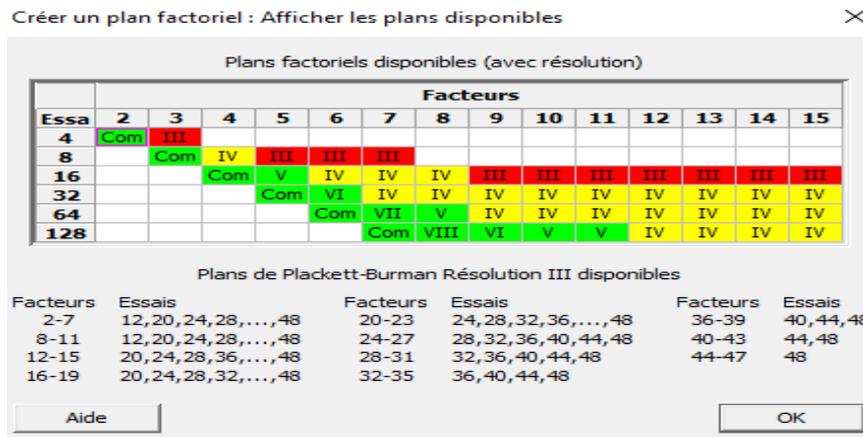


Figure 8 : Les plans disponibles

b) Analyser un plan factoriel [6]

Cliquer sur le menu *Stat* – (DOE (plan d'expériences) – plan factoriel – analyser un plan factoriel (figure 9,10).

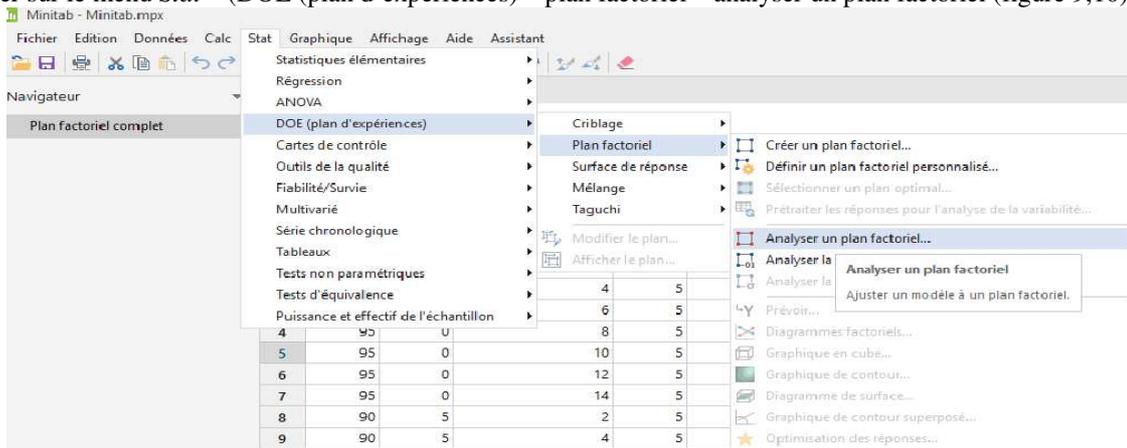


Figure 9 : Choix d'analyse d'un plan factoriel

Une nouvelle fenêtre s'ouvre.

À gauche, faire un double-clic sur les variables que nous voulons analyser. Cette variable apparaît alors dans le cadre facteurs. Cliquer ok dans chaque boîte de dialogue.

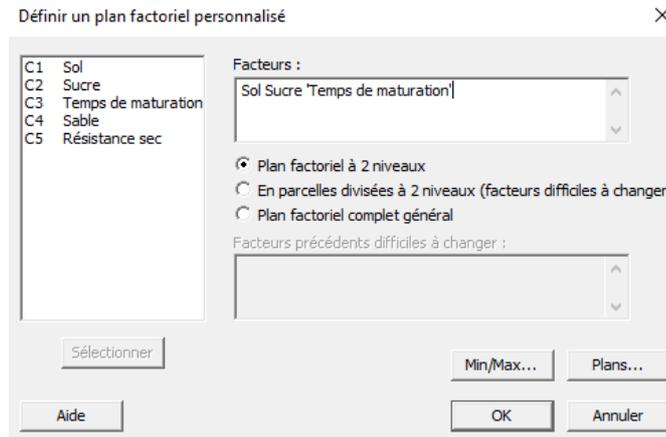


Figure 10 : Définir un plan factoriel

➤ Afficher la valeur Minimum et maximum  
 Cliquer sur Min/Max, Minitab affiche les valeurs minimum et maximum des facteurs, puis cliquer ok (figure 11)

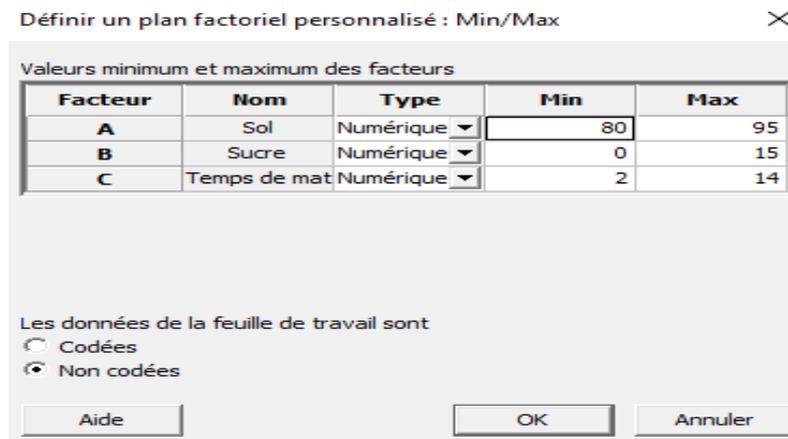


Figure 11 : Insertion de valeur maximum et minimum

➤ Affichez les réponses.  
 À gauche, faire un double-clic sur la réponse « résistance sec ». Cette variable apparaît alors dans le cadre réponses. Cliquer ok (figure 12)

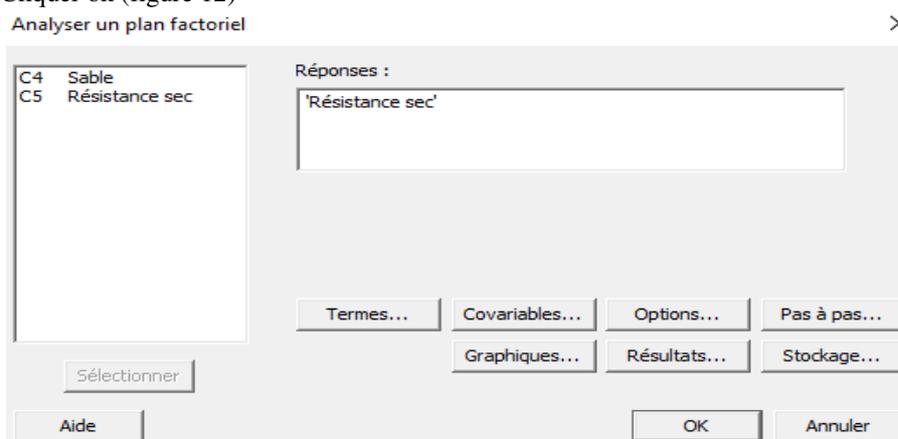


Figure 12 : Analyse d'un plan factoriel

c) Diagramme factoriel [6]  
 Pour établir le diagramme factoriel, on procède comme suit (figure 13, 14, 15)

Une fois nos données entrées, cliquer sur le menu *Stat* – (DOE (plan d'expériences) – plan factoriel – diagrammes factoriels.

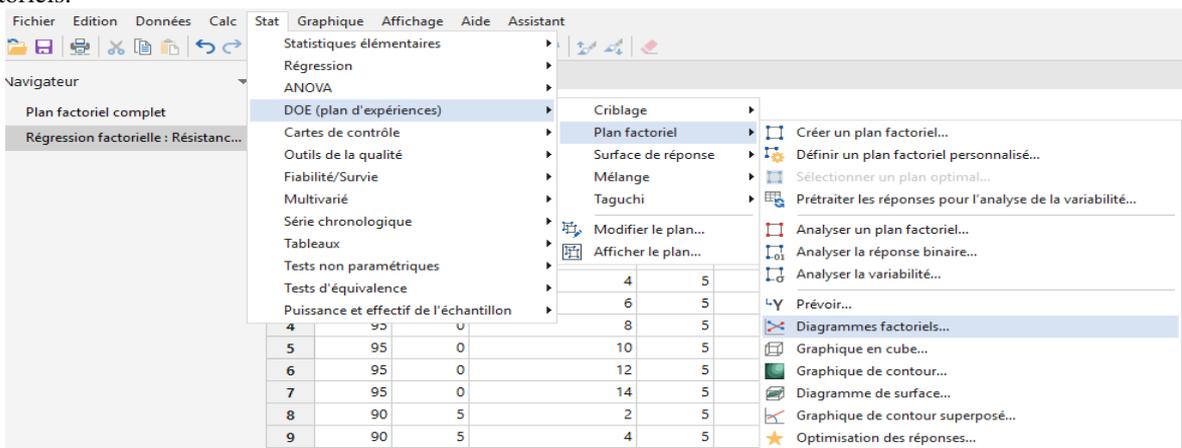


Figure 13 : Diagramme factoriel

La fenêtre diagrammes factoriels s'ouvre, puis cliquer ok.

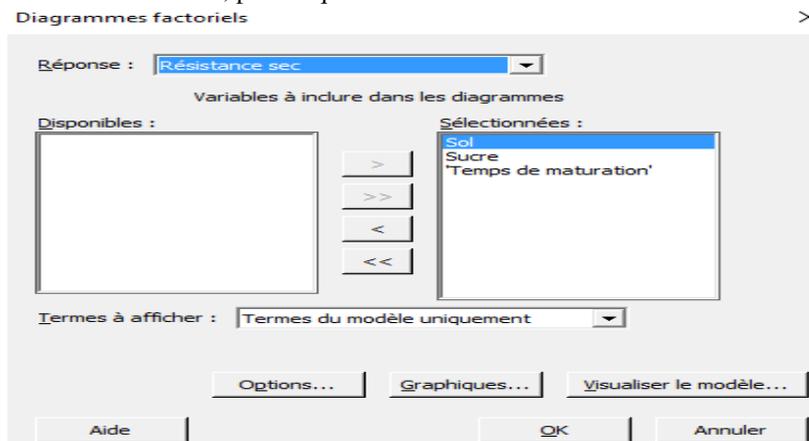


Figure 14 : Choix des facteurs

➤ Visualiser le modèle

Cliquer sur visualiser le modèle, Minitab affiche la réponse « résistance sec » et il affiche tous les facteurs et les interactions possibles entre les facteurs

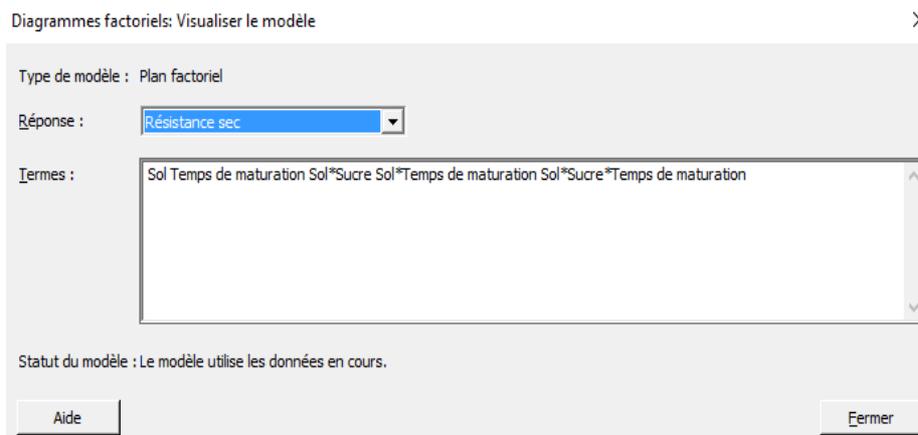


Figure 15 : Visualisation du modèle

d) Optimisations des réponses [7] (figure 16,17)

Cliquer sur le menu *Stat* – (DOE (plan d'expériences) – plan factoriel – optimisation des réponses.

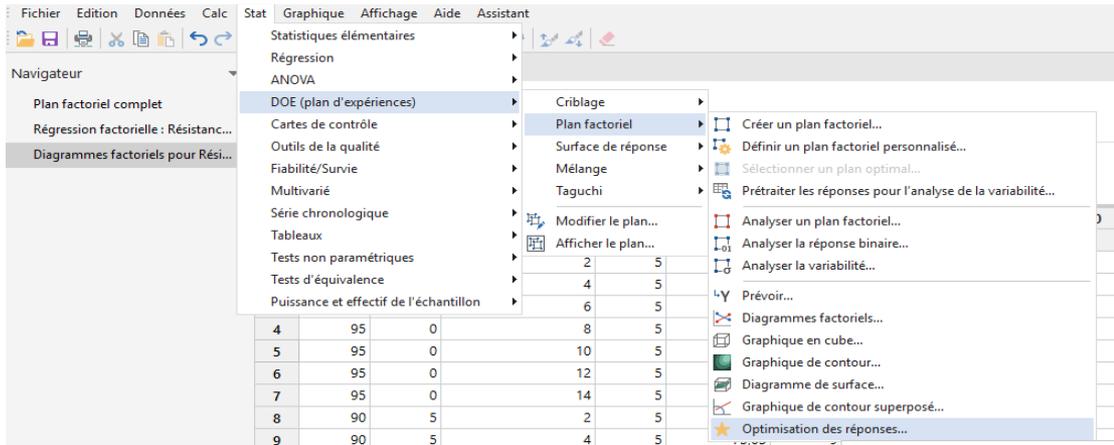


Figure 16 : Création d'optimisation des réponses

La fenêtre optimisation des réponses s'ouvre, choisir le choix Maximiser, puis ok

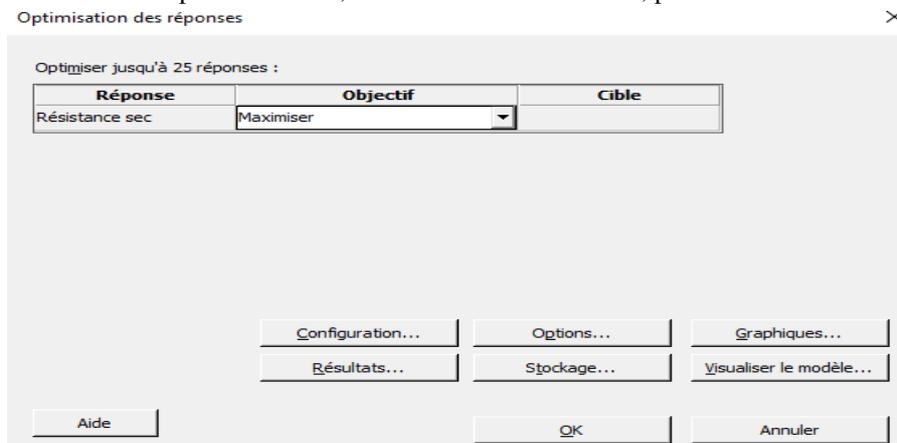


Figure 17 : Optimisation des réponses

e) Diagramme de surface

Les trois figures suivantes (figure 18, 19, 20) présentent, la création et le choix du diagramme de surface

Cliquez sur le menu *Graphique* –Diagramme de surface en 3D

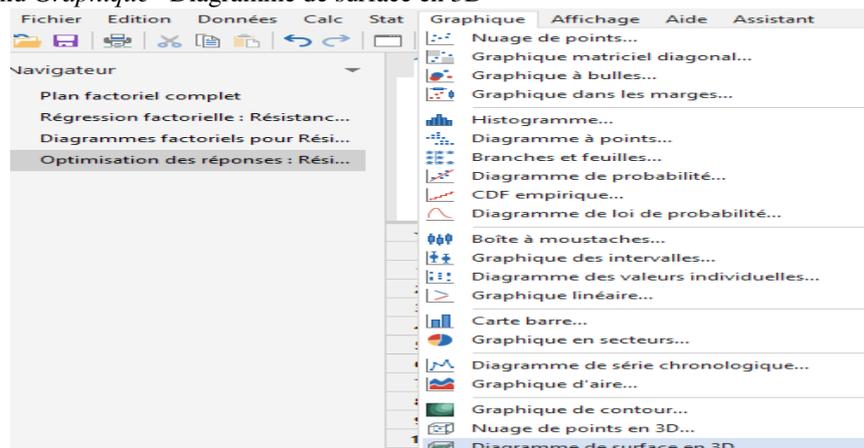


Figure 18: Création du diagramme de surface en 3D

Choisir le diagramme en surface, puis cliquer ok

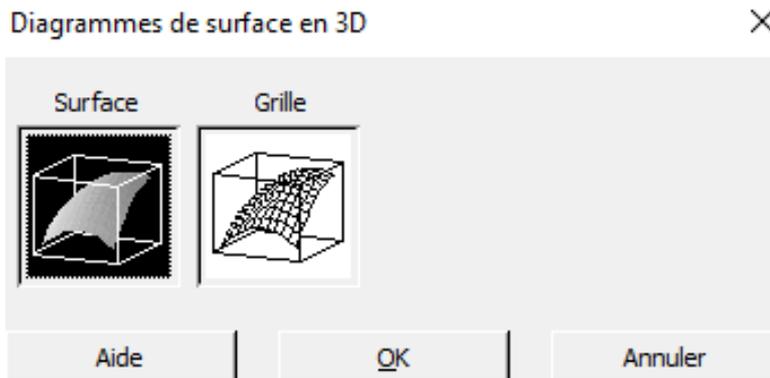


Figure 19 : Choix du diagramme en surface

À gauche, faire un double-clic sur les facteurs étudiés. Ces facteurs apparaissent alors dans le cadre variables Z, Y, X. Cliquer ok

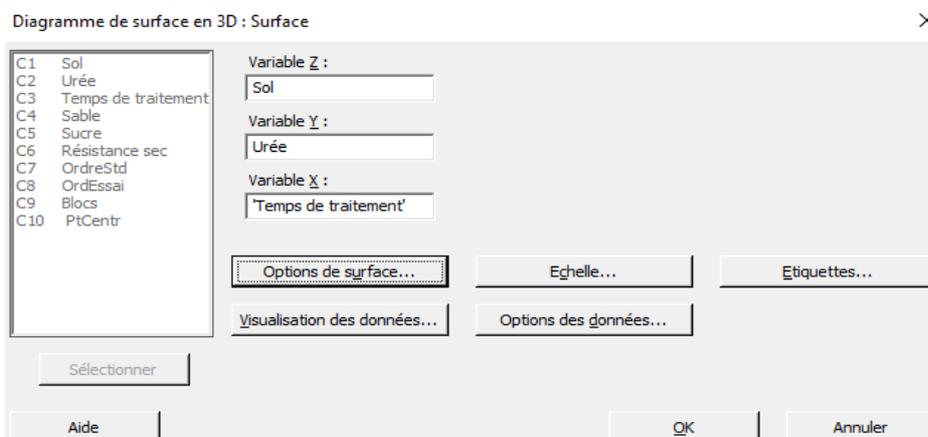


Figure 20 : Choix des variables

f) Nuage de points

Les trois figures (figure 21, 22, 23) présentent la création et le choix du nuage de points suivante  
Cliquez sur le menu *Graphique* – nuage de points

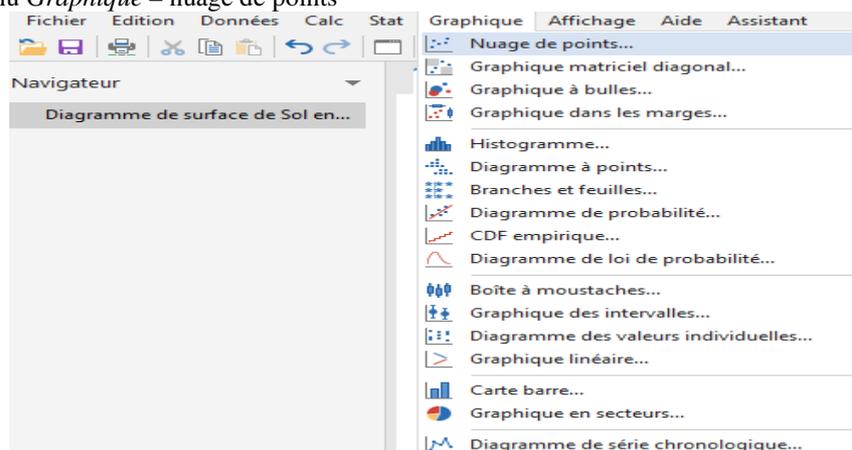


Figure 21 : Création de nuage de points

Choisir nuage de points avec régression, puis cliquer ok

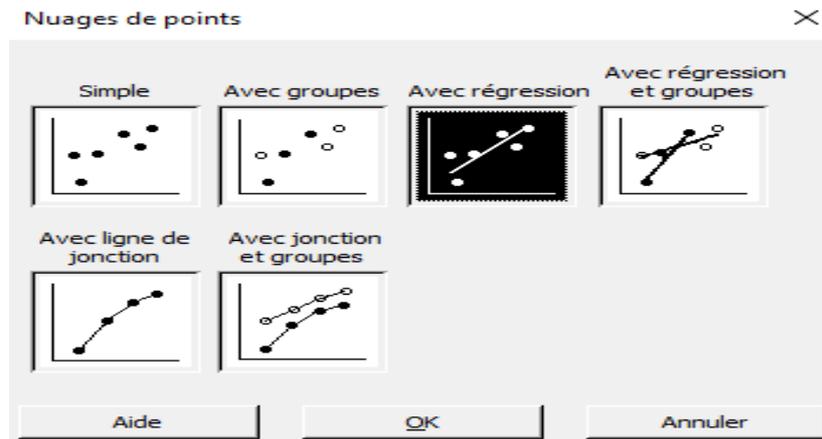


Figure 22 : Choix de nuage de points

À gauche, faire un double-clic sur la réponse « résistance sec » et sur les facteurs étudiés. Cette réponse apparaît alors dans le cadre variables Y et ces facteurs dans le cadre variables X. Cliquer ok

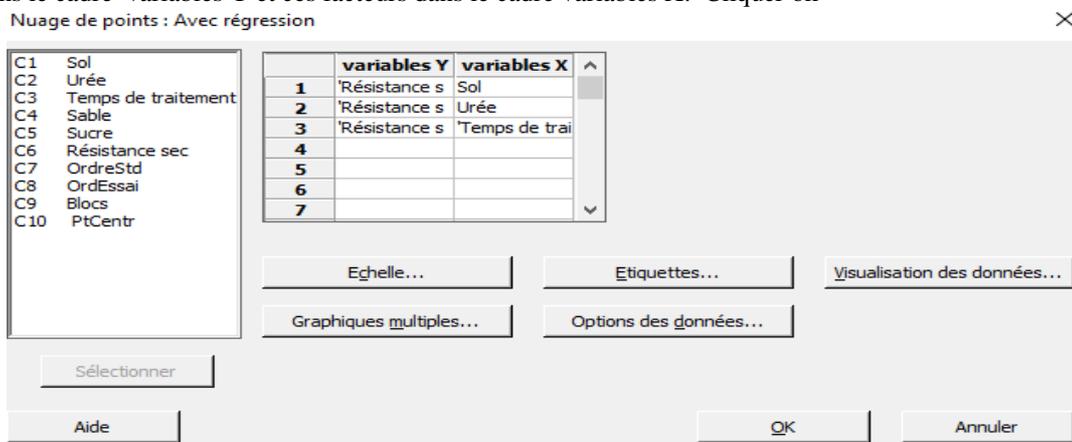


Figure 23 : Choix des variables de nuage de points

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 3.1 Résistance à la compression à l'état sec des essais sans urée

Les paramètres opératoires étudiés sont le sucre, le temps de maturation et le sol.

##### 3.1.1 Régression factorielle :

Les coefficients codés, le récapitulatif du modèle, l'analyse de la variance et l'équation de régression sont obtenus à l'aide d'une régression factoriel exécutée sur le logiciel d'analyse statistique Minitab [6]. Selon ce logiciel, les résultats sont représentés comme suit (tableau 6,7) :

##### ➤ Coefficients codés

Tableau 6:Tableau d' Anova donnant les coefficients  $A_i, A_{ij}, A_{ijk}$  du modèle préliminaire

Terme	Effets	Coefficients
Sol	-8,75	-4,37
Temps de maturation	85,04	42,52
Sol*Sucré	16,86	8,43
Sol*Temps de maturation	-2,82	-1,41
Sol*Sucré*Temps de maturation	4,02	2,01

##### ➤ Récapitulatif du modèle

Le coefficient de corrélation linéaire  $R^2 = 90,07\%$

➤ Analyse de la variance

Tableau 7 : Analyse de la variance

Y Source	Valeur F << VV	Valeur de p
Modèle	39,93	0,000
Linéaires	41,10	0,000
Sol	2,70	0,115
Temps de maturation	79,51	0,000
Interactions à 2 facteur(s)	1,84	0,182
Sol*Sucré	3,56	0,073
Sol*Temps de maturation	0,12	0,727
Interactions à 3 facteur(s)	0,09	0,767
Sol*Sucré*Temps de maturation	0,09	0,767

Avec Valeur de p : Valeur significatif des modèles

➤ Equation de régression en unités codées

$$\begin{aligned} \text{Résistance sec} = & 114,41 - 4,37 \text{ Sol} + 42,52 \text{ Temps de maturation} + 8,43 \text{ Sol*Sucré} \\ & - 1,41 \text{ Sol*Temps de maturation} + 2,01 \text{ Sol*Sucré*Temps de maturation} \end{aligned}$$

Discussion :

D'après les résultats obtenus des coefficients, on peut déduire à la première vue l'effet positif du temps de maturation, nous avons eu les meilleurs résultats, la quantité du sucre rajouté influence positivement la résistance mécanique du sol pour un temps de traitement élevé.

Puis, afin de déterminer les effets des 3 facteurs sur la réponse, ainsi que la valeur de p value qui permet de juger si les facteurs ont une influence statistiquement significative sur la réponse  $p < 0,05$  :

- le facteur temps de maturation ( $p=0,00$ ) a une influence statistiquement significative sur la réponse ;
- alors que le facteur sol ( $p=0,11$ ) n'en a pas.

Ensuite, la valeur du coefficient de corrélation linéaire  $R^2=0,90$  nous permet d'affirmer que la modélisation est adéquate, le modèle est de bonne qualité.

Enfin, les analyses de régression nous permettent de tirer une conclusion que le temps de maturation, l'interaction sol\*sucré, l'interaction sol\*sucré\*temps de maturation ont les trois premiers coefficients les plus élevés dans l'équation de régression. Ce qui signifie qu'ils agissent positivement sur la résistance en compression des briques de terre comprimée.

➤ La figure 24 montre le diagramme de Pareto des effets normalisés (réponse= Résistance sec ;  $\alpha=0,05$ )

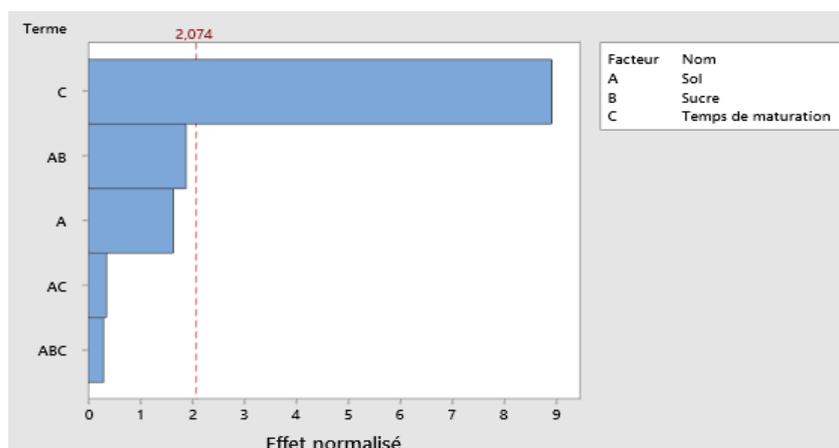


Figure 24 : Diagramme de Pareto

Discussion :

A partir du modèle et du diagramme de Pareto, on constate que l'augmentation de la résistance est conditionnée d'abord par l'accroissement du temps de maturation, suivie de l'effet de sol\* sucre.

Nous pouvons aussi remarquer que les paramètres B et BC, c'est-à-dire sucre et sucre\*temps de traitement n'apparaissent pas parmi les facteurs influençant, ce qui nous amène à conclure que les paramètres sucre seul et l'interaction sucre\*temps de maturation n'influent pas sur la résistance dans le domaine étudié. Les colonnes qui dépassent le trait en pointillé rouge sont considérées comme étant statistiquement significatives ; dans notre cas le temps de maturation.

### 3.1.2 Diagrammes factoriels pour Résistance sec

- La figure 25 présente le graphique des effets principaux pour la résistance

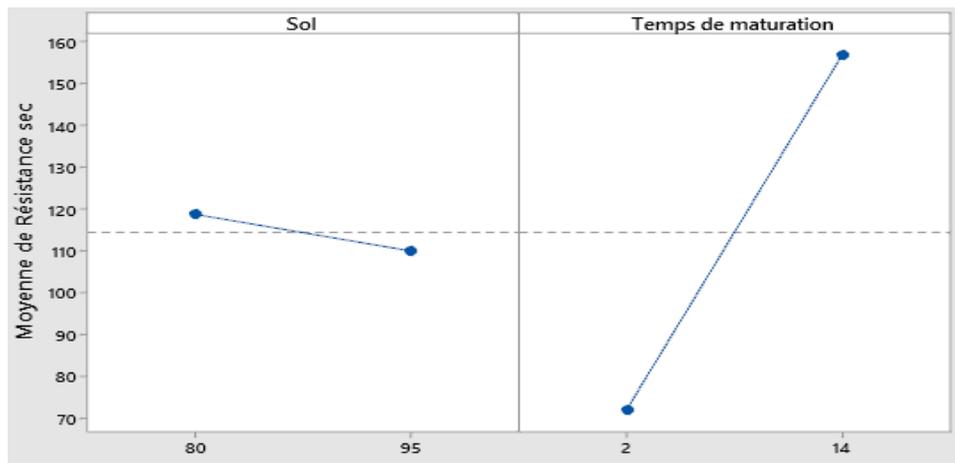


Figure 25: Graphique des effets principaux pour la résistance

Discussion :

Ce graphe montre que l'augmentation du temps de maturation permet d'améliorer la résistance en compression, nous avons une droite ascendante de 70bar jusqu'au point final 157bar. On peut dire que le facteur temps de maturation présente une grande variation positive pour la résistance à la compression. Par contre la présence du sol dans le modèle présente une petite variation pour la résistance, car le domaine d'étude est court et cette variation est négative.

- La figure 26 montre le diagramme des interactions pour la résistance sec

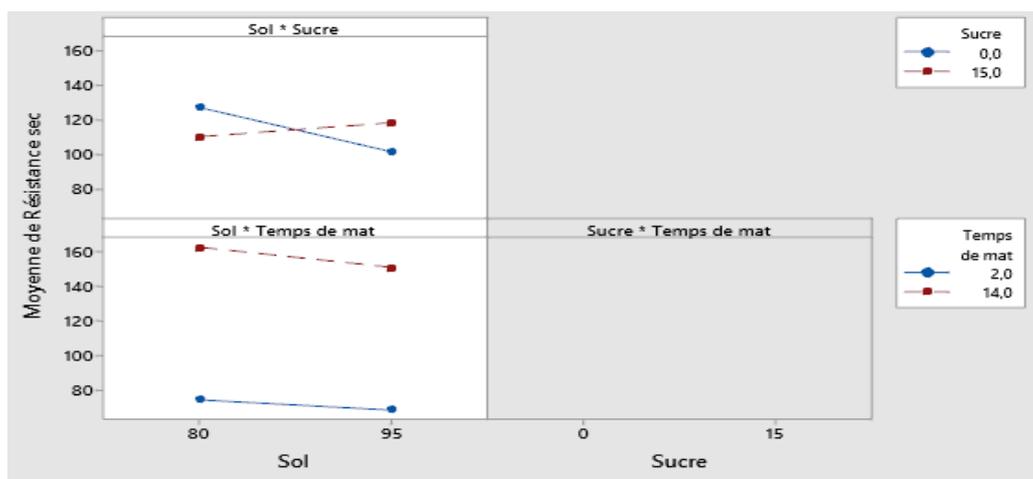


Figure 26: Diagramme des interactions

Discussion

Ce diagramme va nous permettre de mesurer les interactions entre le sol, le sucre et le temps de maturation.

Pareilles que pour le graphe des effets de facteurs, les interactions sol\*sucre ont une grande influence sur l'augmentation de la résistance en compression des briques. Tandis que les interactions sol \* temps de maturation sont faibles. On observe aussi que les interactions sucre\*temps de maturation a un effet significatif négatif sur la résistance, on n'a pas pu obtenu ce graphe.

### 3.1.3 Optimisation des réponses : Résistance sec

Le graphique affiché ci-dessous est le fruit de l'optimisation des réponses (figure 27).

#### ➤ Prévisions de réponses multiples

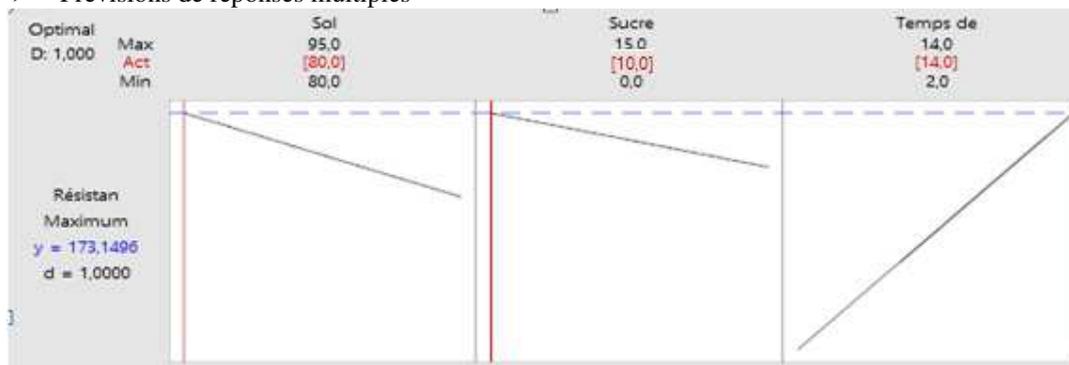


Figure 27 : Diagramme de prévisions de réponses

#### Discussion :

Cette partie a pour but de déterminer analytiquement les valeurs optimales des paramètres opératoires ayant une influence sur la résistance mécanique du matériau. Le graphe optimisation est affiché ci-dessus (figure 27). En rouge apparaissent les valeurs optimales des facteurs. En bleu, la réponse prévue concernant les résistances conçues avec ces paramètres.

D'après cette figure, on peut interpréter que pour avoir une résistance en compression à 14 semaines d'âge optimale, il suffit d'utiliser les valeurs colorées en rouge c'est-à-dire 80% pour le sol et 10% pour le sucre pour ces constituants de la brique. Ces dosages respectifs des constituants nous permettent d'avoir une résistance optimale de  $R_c = 173,15$  bar.

### 3.1.4 Diagramme de surface de Sol en fonction de Sucre et Temps de maturation

Le diagramme de surface limite le domaine d'étude pour les facteurs étudiés (figure 28)

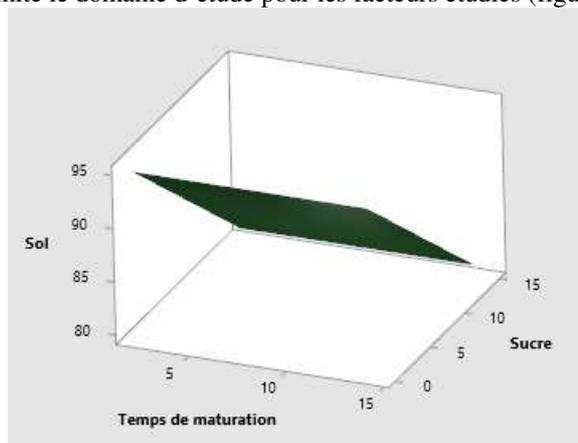


Figure 28 : Diagramme de surface

#### Discussion

Nous allons interpréter la synthèse numérique des variables à l'aide de la représentation de diagramme de surface. Sur les domaines d'études colorés en vert, nous allons étudier tout particulièrement les trois facteurs (sol, sucre et

temps de maturation). Nous avons donc utilisé le tracé des courbes diagrammes de surface en vert pour visualiser l'optimum.

Ce qui signifie que les domaines choisis pour chaque variable correspondent à ceux de la surface en vert : dans ce domaine, on peut travailler. Ce domaine est construit et limité pour satisfaire la demande des consommateurs afin de délimiter les zones d'intérêt. Si on choisit de se mettre au milieu de cette zone on trouve un résultat répondant parfaitement aux objectifs de l'étude, c'est à dire l'optimum sera atteint.

### 3.1.5 Nuage de points

Les figures affichées ci-dessous présentent le nuage de points de la résistance sec, sol, sucre et temps de traitement (figure 29, 30, 31).

- Nuage de points de la résistance sec et le sol

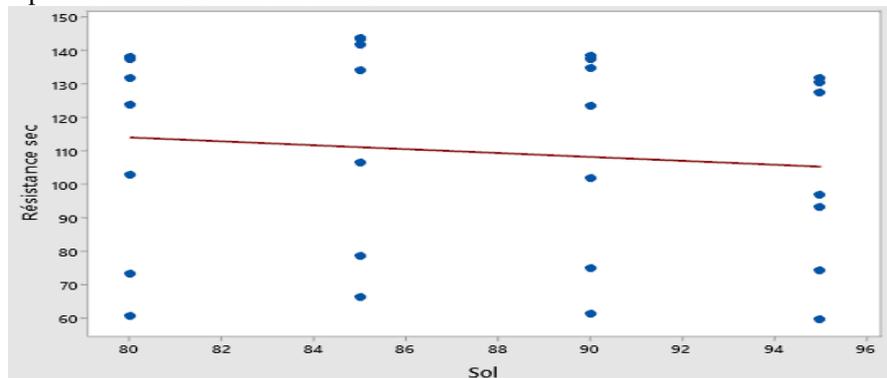


Figure 29: Nuage de points de la résistance et sol

- Nuage de points de la résistance sec et le sucre

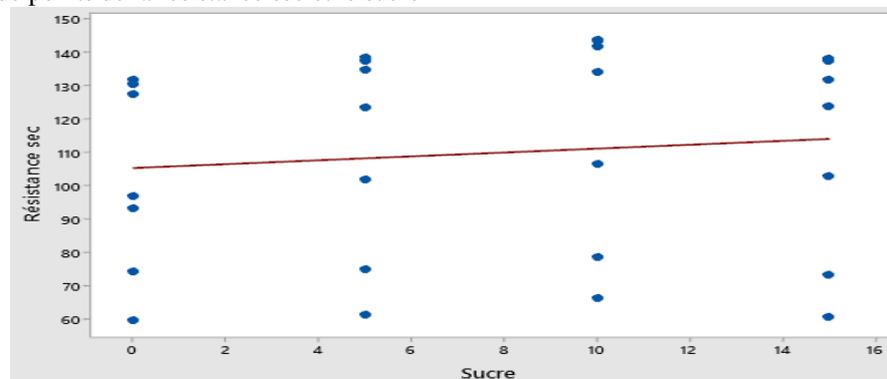


Figure 30 : Nuage de points de la résistance et sucre

- Nuage de points de la résistance sec et temps de maturation

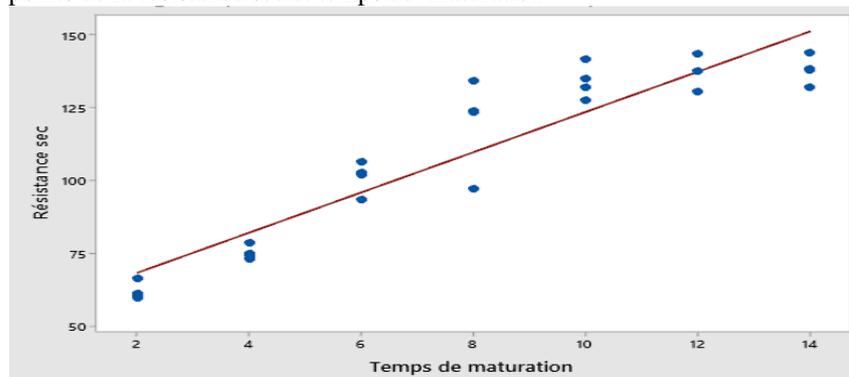


Figure 31: Nuage de points de la résistance et temps de maturation

### Discussion

Pour les nuages de points de la résistance et sol puis la résistance et sucre, les individus se répartissent de manière hétérogène. Mais pour celle de la résistance et temps de maturation, on trouve des points qui ne sont pas très éloignées de la droite de régression linéaire. Les deux modèles nous ont permis d'exprimer que le facteur temps de maturation a une influence significative sur le procédé. L'analyse statistique du modèle témoigne de l'effet du temps de maturation positif avec la droite de régression linéaire.

## 3.2 Résistance à la compression à l'état sec des essais avec urée

Les paramètres opératoires étudiés sont l'urée, le temps de traitement et le sol.

### 3.2.1 Régression factorielle :

Les coefficients codés, le récapitulatif du modèle, l'analyse de la variance et l'équation de régression sont obtenus à l'aide d'une régression factoriel exécutée sur le logiciel d'analyse statistique Minitab. La résistance sec est en fonction de Sol; Urée; Temps de traitement (selon les tableaux 8,9).

#### ➤ Coefficients codés

Tableau 8 : Tableau d'Anova donnant les coefficients  $A_i$ ,  $A_{ij}$ ,  $A_{ijk}$  du modèle préliminaire

Terme	Effet	Coefficient
Constante		116,70
Sol	19,64	9,82
Temps de traitement	85,05	42,53
Sol*Urée	20,04	10,02
Sol*Temps de traitement	-2,88	-1,44
Sol*Urée*Temps de traitement	-3,25	-1,62

#### ➤ Récapitulatif du modèle

Le coefficient de corrélation linéaire  $R^2 = 90,27\%$

#### ➤ Analyse de la variance

Tableau 9 : Analyse de la variance

Source	Valeur F	Valeur de p
Modèle	27,83	0,000
Linéaires	24,78	0,000
Sol	9,59	0,007
Temps de traitement	39,97	0,000
Interactions à 2 facteur(s)	1,71	0,214
Sol*Urée	3,33	0,088
Sol*Temps de traitement	0,09	0,766
Interactions à 3 facteur(s)	0,04	0,846
Sol*Urée*Temps de traitement	0,04	0,846

#### ➤ Equation de régression en unités codées

$$\text{Résistance sec} = 116,70 + 9,82 \text{ Sol} + 42,53 \text{ Temps de traitement} + 10,02 \text{ Sol*Urée} - 1,44 \text{ Sol*Temps de traitement} - 1,62 \text{ Sol*Urée*Temps de traitement}$$

### Discussion

D'après les résultats obtenus des coefficients, on peut déduire à la première vue l'effet positif du temps de maturation, nous avons eu les meilleurs résultats, tandis que la quantité d'urée rajoutée influence négativement la résistance mécanique du sol car on n'a pas eu la valeur de coefficient du facteur urée.

Puis, afin de déterminer les effets des 3 facteurs sur la réponse, ainsi que la valeur de p value qui permet de juger si les facteurs ont une influence statistiquement significative sur la réponse  $p < 0,05$ , alors on peut dire que les facteurs sol ( $p=0,007$ ) et temps de maturations ( $p=0,00$ ) ont une influence statistiquement significative sur la réponse. Ensuite, la valeur  $R^2 = 0,9$  du coefficient de détermination pour la réponse témoigne de la bonne qualité du modèle. Enfin, les analyses de régression nous permettent de tirer une conclusion que le facteur qui a une influence statistiquement le plus significative est le temps de traitement ; le deuxième est l'interaction sol\*urée et le troisième le sol. Ce qui nous permet de tirer en conclusion que le temps de maturation, le sol et l'interaction sol\*urée sont les facteurs qui agissent sur la résistance en compression des briques de terre comprimée.

➤ La figure 32 montre le diagramme de Pareto des effets normalisés

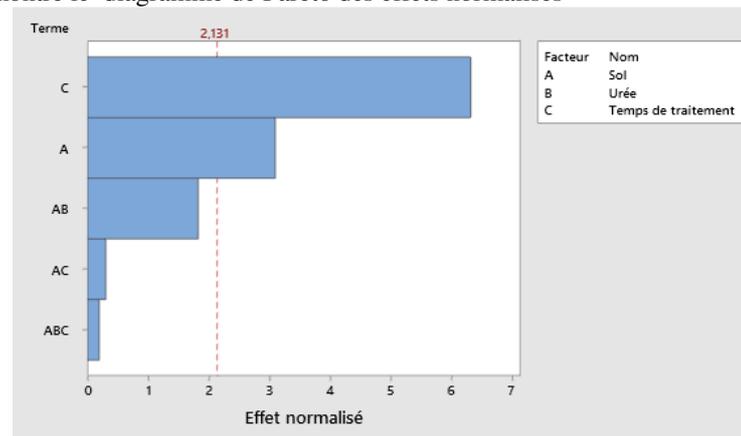


Figure 32 : Diagramme de Pareto

Discussion :

A partir du modèle et du diagramme de Pareto, on constate que l'augmentation de la résistance est conditionnée d'abord par l'accroissement du temps de maturation, suivie de l'effet du sol. On a remarqué aussi que les effets des interactions entre les facteurs sur les réponses étudiées ne sont pas statistiquement significatifs.

### 3.2.2 Diagrammes factoriels pour Résistance sec

➤ La figure 33 présente le graphique des effets principaux pour la résistance

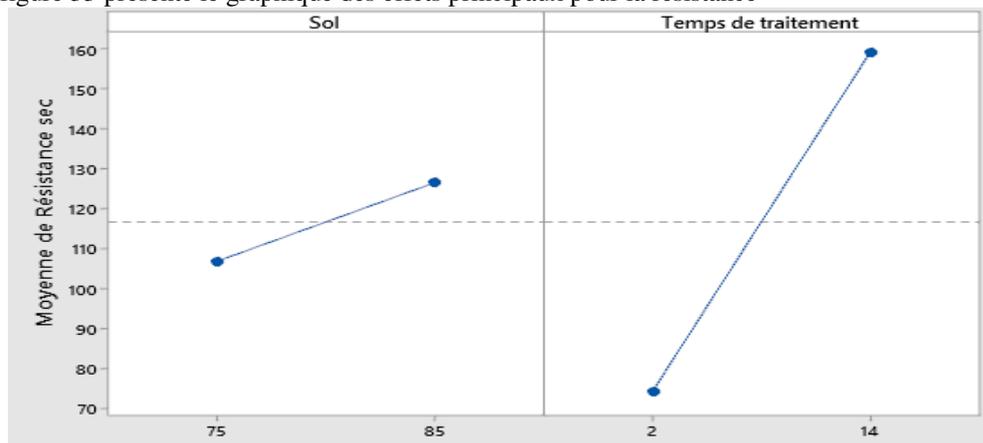


Figure 33: Graphique des effets principaux pour la résistance

Discussion

Ce graphe montre que l'augmentation du temps de maturation permet d'améliorer la résistance en compression ; nous avons une droite ascendante de 70bar jusqu'à 157bar. On peut dire que le facteur temps de maturation présente une grande variation de la résistance à la compression. Par contre la présence du sol dans le modèle présente une petite variation de la résistance car le domaine d'étude est court. On peut conclure que l'évolution du résultat dépend fortement du facteur temps de traitements.

➤ Diagramme des interactions pour la résistance sec

La figure 34 affiche le diagramme des interactions pour la résistance sec

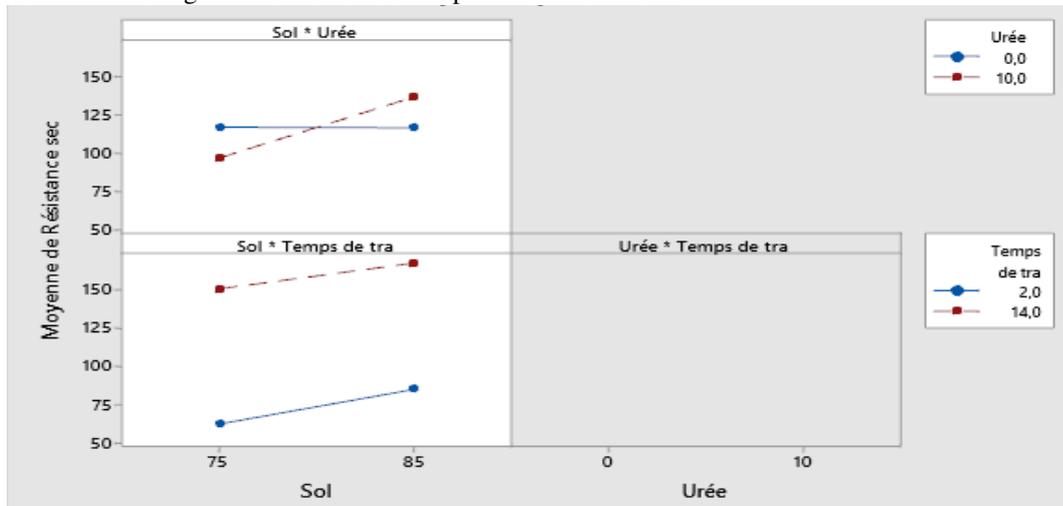


Figure 34 : Diagramme des interactions

Discussion

Ce graphe va nous permettre de mesurer la liaison entre les facteurs sol, urée et temps de maturation. Pour le graphe des effets de facteurs, l'interaction sol\*urée a une forte influence sur l'augmentation de la résistance en compression des briques. Tandis que l'effet de l'interaction sol\*temps est faible. Enfin pour l'interaction urée\*temps de traitement, ils ne peuvent pas être ensemble car on n'a pas pu obtenir le graphe correspondant.

3.2.3 Optimisation des réponses : Résistance sec

Le graphique ci-dessous est le fruit de l'optimisation des réponses (figure 35).

➤ Paramètres

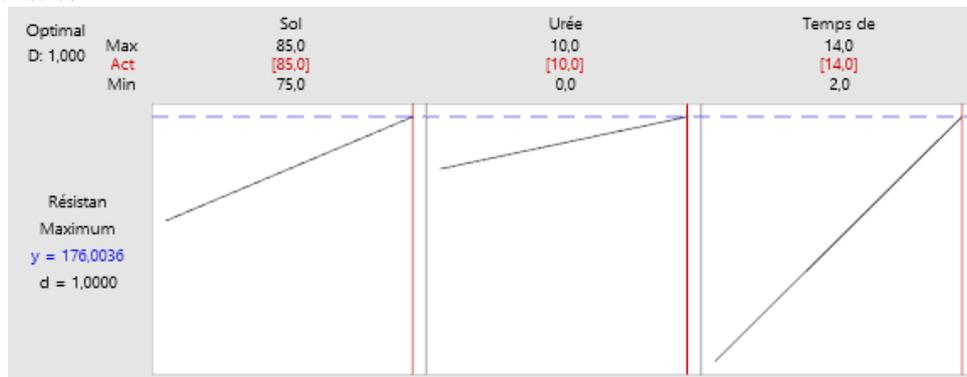


Figure 35 : Diagramme de prévisions de réponses

Cette partie a pour but de déterminer analytiquement les valeurs optimales des paramètres opératoires ayant une influence sur le procédé de la résistance mécanique du matériau. L'optimisation produit le graphique affiché ci-dessus (figure 35). En rouge apparaissent les paramètres de facteurs optimaux. En bleu, la réponse prévue concernant les résistances conçues avec ces paramètres.

D'après cette figure, on peut interpréter que pour avoir une résistance en compression à 14 semaines d'âge optimale, il suffit d'utiliser les valeurs coloré en rouge c'est-à-dire les dosages de 85% de sol et 10% d'urée pour les constituants de la brique. Ces dosages des constituants nous permettent d'avoir une résistance à sec optimale de  $R_c = 176,00$  bar.

On peut prétendre qu'il y a une possibilité que l'optimum soit obtenu à des valeurs proches de ces combinaisons des facteurs.

### 3.2.4 Diagramme de surface de Sol en fonction d'urée et Temps de traitement

Le diagramme de surface limite le domaine d'étude pour les facteurs étudiés (figure 36)

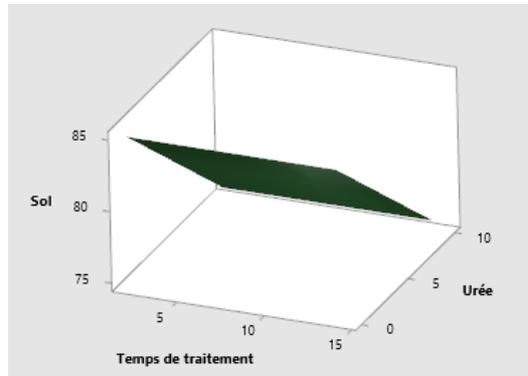


Figure 36 : Diagramme de surface

#### Discussion

Les surfaces de réponses « vertes » représentent la variation de la résistance en fonction du pourcentage de sol, du temps de traitements et de la quantité d'urée rajoutée. On note un effet positif des trois facteurs sur la réponse. En dehors du domaine de la surface de réponse, on ne peut pas avoir un effet significatif sur le résultat. Si on choisit de se mettre au milieu de cette zone on trouve un résultat répondant parfaitement aux objectifs de l'étude, c'est à dire l'optimum sera atteint.

### 3.2.5 Nuage de points de Résistance sec et Sol; Urée; Temps de traitement

Les figures affichées ci-dessous présentent le nuage de points de la résistance sec, sol, urée et temps de traitement (figure 37, 38, 39).

- Nuage de points de la résistance sec et sol

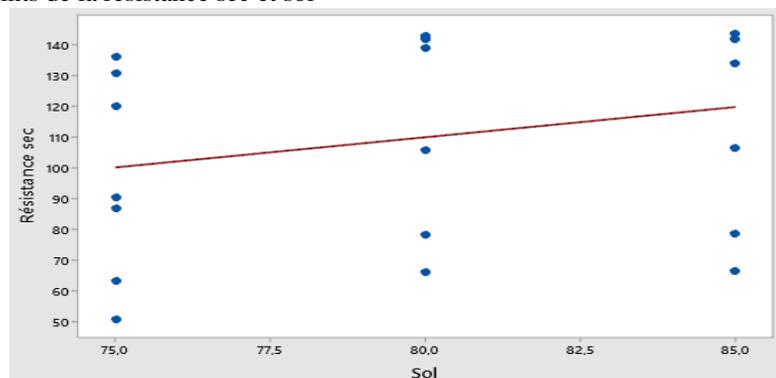


Figure 37 : Nuage de points de la résistance et sol

- Nuage de points de la résistance sec et urée

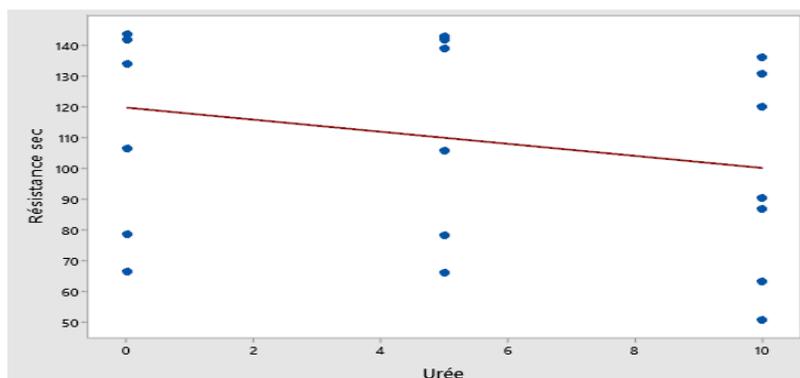


Figure 38: Nuage de points de la résistance et urée

➤ Nuage de points de la résistance sec et temps de traitement

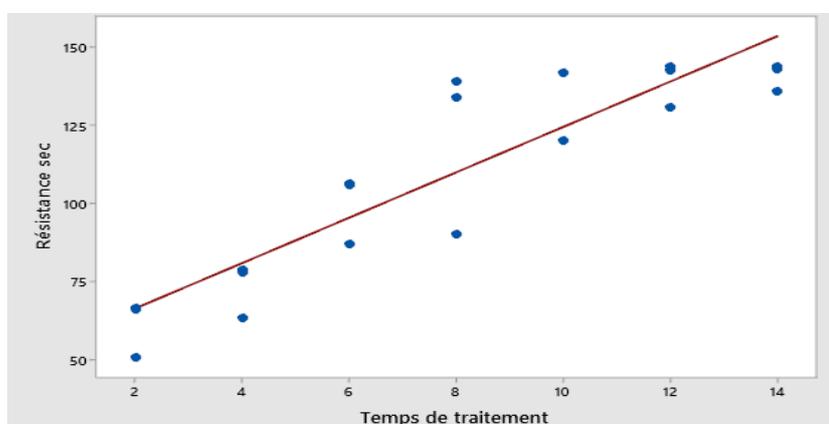


Figure 39 : Nuage de points de la résistance et temps de maturation

Discussion :

Pour les nuages de points de résistance-sol et résistance-sucre, les individus se répartissent de manière hétérogène. Mais pour celui de résistance - temps de maturation, on trouve des points qui ne sont pas très éloignés de la droite de régression linéaire. Les deux modèles nous ont permis d'exprimer que le premier facteur qui a une influence statistiquement la plus significative est le temps de traitement.

## 5. CONCLUSION

Pour conclure, cette recherche a pour but la maîtrise de la régularité de la qualité de la brique de terre comprimée. Le premier est le traitement du sol avec du purin, du sucre sans urée. Le deuxième est le traitement du sol avec du purin, du sucre 10% et d'urée.

Ce travail a été réalisé par l'utilisation des plans d'expériences qui nous a permis d'obtenir la résistance en compression optimale. Leur utilisation s'avère très utile en pratique et nous a aidés dans l'appréciation de la composition de la brique de terre comprimée.

Selon les plans d'expériences, les facteurs étudiés sont le sol, le sucre, l'urée et le temps de traitement. Ils ont été mélangés pendant la confection des briquettes. Les facteurs sont à deux niveaux (minimum, maximum) afin d'identifier les paramètres ayant une influence statistiquement significative sur le procédé.

Aussi le logiciel Minitab a permis, par régression linéaire, de trouver les modèles mathématiques adéquats pour la stabilisation au purin des briques de terre compressée. La vérification des modèles ajustés a donné dans les deux cas (sans et avec urée) des coefficients de régression  $R^2$  d'environ 0,9 qui témoignent de la qualité des modèles.

Enfin il serait intéressant de valider les facteurs à tenir en compte du point de vue expérimental pour le traitement du sol avec le purin. Le premier facteur qui a une influence la plus significative est le temps de maturation. Mais peut aussi prendre en considération d'autres paramètres comme les proportions de sucre et de sol. Le facteur urée a un effet faible sur le comportement du mélange.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Goupy J. Creighton L, (2006) : Introduction aux plans d'expériences, les mélanges, Dunod, Paris,304 p.
- [2]. Sado G. et Sado M.C., (1991): Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité, Afnor Technique Ed., Paris. 52p, 53p, 54p.
- [3]. Ghomari F, (2005): Matériaux de construction ; université aboubekrbelk faculté de technologie ; département de génie civil. 25p, 28p, 51p.
- [4]. Ayad M et Barka Y, (2006) : 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 BekrBelkaid – Tlemcen, faculté de technologie, département de Génie Civil. 17p, 19p.
- [5] Andrianasolomahefa R.S , (2005): Etude géotechnique en laboratoire: analyse, interprétation, et utilisation des résultats, Mémoire de fin d'études en vue d'obtention de diplôme d'ingénieur Matériaux, ESPA Université d'Antananarivo, Madagascar, 21p,22p.

## WEBOGRAPHIE

- [6] Olivier .S, (2018) : minitab plans d'expériences factoriels et surfaces de réponse, site <https://logging-formation.com/formations/minitab-plans-d-experiences-factoriels-et-surfaces-de-reponse>, consulté le 03 Novembre 2020.
- [7] Bob . S, (2010) : Phases d'un plan d'expériences, Site <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/basics/phases-of-a-designed-experiment/>, consulté le 03 Novembre 2020.
- [8] Rabier. F, (2007) : Application de la méthodologie des plans d'expériences, site <https://oatao.univ-toulouse.fr/7104/>, consulté le 10 Décembre 2020.
- [9] Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. et Wasserman, W, (1996): Plan d'expérience DOE, site [https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/Assistant\\_Plans\\_d'exp%C3%A9riences\\_DOE.pdf](https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/Assistant_Plans_d'exp%C3%A9riences_DOE.pdf), consulté le 10 Décembre 2020.
- [10]Groupe. A, (2018) : Plans d'expériences Application avec MiniTab, site [https://www.groupearkesys.com/sites/default/files/public/fiche\\_technique/prog\\_plans\\_d\\_experiences\\_application\\_avec\\_minitab-thiant-2.pdf](https://www.groupearkesys.com/sites/default/files/public/fiche_technique/prog_plans_d_experiences_application_avec_minitab-thiant-2.pdf), consulté le 10 Décembre 2020.