

# Plans d'expériences pour la stabilisation d'une argile gonflante du Bénin

**T.Y. KIKI, I.K. CISSÉ**

Laboratoire de matériaux  
mécanique et hydraulique  
BP A 10 Thiès (Sénégal)  
yvette\_kiki@yahoo.fr  
ikcisse@ucad.sn

**J.-L. FAVRE**

Laboratoire de mécanique  
des sols, structures  
et matériaux  
CNRS UMR 8579  
Grande Voie des Vignes  
92295 Châtenay-Malabry  
favre@mssmat.ecp.fr

## Résumé

Cet article présente les résultats de la stabilisation d'une argile gonflante traitée par des solutions de cosse de néré. Au préalable, des essais d'identification et de compressibilité ont été faits pour caractériser l'argile étudiée.

Cinq paramètres (valeur de bleu, pression de gonflement, amplitude de gonflement, indice de compression et indice de gonflement) ont été étudiés en faisant varier quatre facteurs (température, temps de macération, quantité de cosse, temps de cure). Les résultats expérimentaux ont été analysés par la méthode Taguchi des plans d'expériences.

Les trois premiers paramètres connaissent une réduction notable alors que l'indice de gonflement connaît une augmentation. Le facteur le plus significatif est le temps de macération.

*Mots-clés* : argiles gonflantes, stabilisation, essai œdométrique, plans d'expériences, méthode Taguchi.

# Experimental designs for the stabilization of an expansive soil from Benin

## Abstract

This paper presents the results of the stabilization of an expansive clay treated by solutions of husk of nere. Beforehand, identification and compressibility tests were made in order to characterize the studied clay.

Five parameters (value of blue, swelling pressure, swelling amplitude, compression index, swelling number) were studied by varying four factors (temperature, maceration time, pod quantity, cure time). The experimental results were analyzed by using the Taguchi method of experimental designs.

The first three parameters show a notable reduction of swelling whereas the swelling number shows an increase. The most significant factor is the maceration time.

*Key words* : expansive soils, stabilization, oedometer, experimental design, Taguchi method.

*NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1<sup>er</sup> septembre 2006.*

$\gamma_d$	: poids volumique sec
$V_B$	: valeur de bleu
$S_s$	: surface spécifique
$P_2$	: pourcentage de grains de diamètre inférieur à 2 $\mu\text{m}$
$P_{80}$	: pourcentage de grains de diamètre inférieur à 80 $\mu\text{m}$
$w_l$	: limite de liquidité (%)
$w_p$	: limite de plasticité (%)
$I_p$	: indice de plasticité (%)
$w_{Re}$	: limite de retrait effectif
$\sigma_g$	: pression de gonflement
$\epsilon_g$	: amplitude de gonflement
$C_c$	: indice de compression
$C_s$	: indice de gonflement
$E_A$	: effet du facteur A
$I_{AB}$	: effet de l'interaction AB
$n_A$	: nombre de niveaux du facteur A
$N$	: nombre d'expériences dans le plan d'expériences
$V_A$	: variance du facteur A
$V_{AB}$	: variance de l'interaction AB

## Le problème étudié

Les argiles gonflantes se trouvent dans la région de la Lama, au sud du Bénin, où elles créent des désordres sur les ouvrages.

La méthode la plus répandue concernant la stabilisation des argiles gonflantes est le traitement à la chaux. La stabilisation des sols gonflants par des sels est sujette à plusieurs études dont celle d'Hachichi et Fleureau (1999). Aussi, des études sommaires (Gomez et Mounirou, 1996 ; Akouete et Hounyo, 1997) ont montré que des solutions à base de cosse de néré (arbre de nom scientifique *Parkia biglobosa*) améliorent les paramètres géotechniques des sols gonflants. Ce produit existant en abondance en Afrique occidentale, nous avons mené une étude plus approfondie sur son influence sur les sols argileux expansifs.

Avant d'étudier l'influence proprement dite sur les paramètres de gonflement, nous avons examiné certains paramètres de nature et d'arrangement des « grains » (Biarez et Favre, 1975), et certains paramètres mécaniques du sol intact.

Pour l'organisation optimale de nos essais, nous avons utilisé la méthode Taguchi des plans d'expériences qui permet d'établir un plan d'expérimentation réduisant considérablement le nombre d'expériences à effectuer compte tenu des objectifs fixés ; elle facilite également l'exploitation des résultats expérimentaux et assure la meilleure précision possible aux résultats obtenus.

## Caractérisation de l'argile non traitée

Le sol étudié a été prélevé dans la région de la Lama à Onigbolo. La figure 1 présente l'image obtenue au microscope électronique à balayage (MEB) à un grossissement au 1/20 000. On y retrouve l'aspect caractéristique de la montmorillonite (Mitchell, 1976), reconnaissable à la nature alvéolaire et froissée des interfaces des strates.

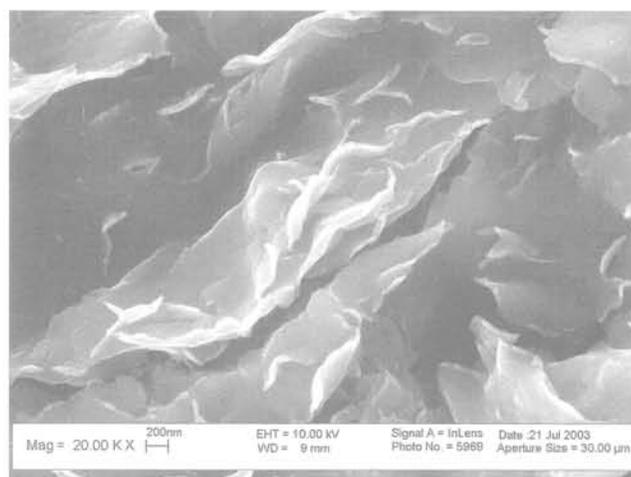


FIG. 1 Observation au microscope électronique à balayage.

Observation in the scanning electron microscope.

### Paramètres de nature des grains

#### a) Valeur de bleu et surface spécifique

La surface spécifique est déterminée à partir de la formule proposée par Tran Ngoc (1977) :

$$S_s = 21 V_B \cdot P_2 \quad (1)$$

— la valeur du bleu de l'échantillon ayant été déterminée par l'essai au bleu suivant la norme NF P 94-068. La valeur de bleu du sol étudié est de 13,5 et la surface spécifique atteint 215  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Ces valeurs indiquent une proportion importante de smectite dans le sol étudié.

#### b) Limites d'Atterberg

La limite de liquidité du sol est de 82, la limite de plasticité est de 34, ce qui confère au sol un indice de plasticité de 48, le positionnant sur le diagramme de plasticité de Casagrande parmi les limons argileux très plastiques.

L'indice de consistance de l'échantillon *in situ* est de 0,98. L'échantillon se trouve donc à l'état plastique avec une consistance très ferme.

#### c) Retrait linéaire effectif

La limite de retrait effectif  $w_{Re}$  a été déterminée par l'essai de retrait linéaire selon la norme XP P94-060-2. Elle est de 17 % pour le sol étudié.

Le tableau I récapitule les paramètres de nature et d'arrangement des grains du sol intact.

**TABLEAU I Paramètres d'état et d'arrangement du sol intact étudié.**  
Parameters of state and arrangement of the studied intact ground.

Désignation	Valeur
Poids volumique apparent $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,96
Poids volumique sec $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,06
$P_2$ (%)	57
Indice des vides (e)	0,93
Porosité (n)	0,48
Teneur en eau naturelle (%)	34,8
Indice de consistance	0,98
Indice de plasticité $I_p$ (%)	48
Limite de liquidité $w_l$ (%)	82
Limite de plasticité $w_p$ (%)	34
Poids volumique des particules solides (kN/m <sup>3</sup> )	27,14
Valeur de bleu de méthylène ( $V_B$ )	13,5
Limite de retrait effectif $w_{re}$ (%)	17

## 2.2

### Paramètres mécaniques du sol

Sur l'échantillon intact ont été réalisées deux séries d'essais de gonflement à l'œdomètre (par incréments de charge) et de compressibilité. Les moyennes des résultats de ces essais sont résumées dans le tableau II.

**TABLEAU II Paramètres de compressibilité du sol étudié.**  
Parameters of compressibility.

Désignation	Valeur
Pression de gonflement (kPa) $w = 34,8 \%$	72
Pression de préconsolidation (kPa) (échantillon prélevé à 2,5 m)	248
Indice de compression $C_c$	0,429
Indice de gonflement $C_s$	0,094
Indice des vides initial $e_0$	0,934
Module œdométrique moyen (MPa)	9,93

## 2.3

### Cohérence des données

La relation (2), proposée par Favre (2004) pour les sols normalement consolidés :

$$C_c = \frac{I_p}{81} \quad (2)$$

fournit une valeur de 0,59, supérieure à celle obtenue (0,43) pour l'argile étudiée ; en revanche, la valeur obtenue pour l'indice de gonflement (0,094) est proche de celle donnée par la relation :

$$C_s = \frac{C_c}{4} \quad (3)$$

$$\text{La corrélation } E_{oed} = \frac{2,3 [1 + e(\sigma)] \cdot \sigma}{C_c} \quad (4)$$

donne une valeur de 2,6 MPa, largement inférieure à celle obtenue – 9,9 MPa – ; cette grande différence peut s'expliquer par le fait que la relation a été établie pour des argiles remaniées, alors que nous sommes en présence d'un sol surconsolidé.

Il existe quelques différences entre nos résultats et ceux obtenus en utilisant les corrélations établies. Il est à noter que nous avons travaillé avec une argile intacte, donc non remaniée, et dont le prélèvement a eu lieu peu après l'hivernage, d'où la faible pression de gonflement décelée.

## 3

### Analyse par plans d'expériences du gonflement de l'argile traitée

#### 3.1

#### Les plans d'expériences et la méthode Taguchi

La méthode des plans d'expériences est un outil d'aide à l'amélioration de la qualité. Elle sert à mettre en évidence et à quantifier l'influence des facteurs pris en compte lors de la mise en œuvre d'une série d'essais. C'est une méthode qui consiste à établir un plan d'expérimentation comportant le minimum d'expériences compte tenu des résultats souhaités, la finalité étant de tester le maximum de facteurs avec les meilleurs intervalles de confiance.

Soit le paramètre  $z$  à expliquer avec  $p$  paramètres  $x_i$ . On cherche une dépendance linéaire qui s'écrit sous forme matricielle (Favre, 2004) :

$$z = X\alpha + \varepsilon \quad (5)$$

les vecteurs colonnes de la matrice  $X$  étant des vecteurs booléens composés de 0 et 1 suivant la réalisation ou non de la modalité.  $\varepsilon$  est le vecteur des résidus.

Le rang de la matrice  $X$  fixe le nombre minimal d'observations (Favre, 2004).

$$n \geq rgX \quad (6)$$

L'ajustement des moindres carrés :

$$z = Xa + e \quad (7)$$

donne avec  $X'$  transposée de  $X$

$$a = (X'.X)^{-1}X'z \quad (8)$$

et :

$$e'e = z'(I - X(X'.X)^{-1}X')z \quad (9)$$

Sous quelques hypothèses sur les résidus  $\varepsilon_i$  (espérance nulle, même variance –  $\sigma^2$  –, indépendance),  $a$  étant l'estimateur de  $\alpha$ , on montre que  $\text{Var}(a)$  est minimale et a pour expression :

$$\text{Var}(a) = \sigma^2(X'.X)^{-1} \quad (10)$$

La méthode mise au point par Taguchi est basée sur une représentation graphique du modèle que l'on souhaite identifier et sur l'utilisation de quelques tables standard (Pillet, 1997). La réalisation du test de Fisher-Snedecor permet l'analyse de l'influence des facteurs (Dugué et Girault, 1969).

## Les facteurs étudiés et le plan adopté

La stabilisation par le néré est une méthode récente. Le facteur essentiellement étudié a été la concentration de la solution (quantité de cosse par litre d'eau) et les résultats ont montré une amélioration de certains paramètres en fonction de l'importance de ce facteur : amplitude et pression de gonflement, limite de liquidité, indice de plasticité (Gomez et Mounirou, 1996 ; Akouete et Hounyo, 1997).

### a) Les facteurs

Pour mesurer l'impact de la solution de la cosse de fruits de néré sur le sol argileux d'Onigbolo, nous avons étudié les modifications apportées à :

- la valeur de bleu ( $V_B$ ) ;
- la pression de gonflement ( $\sigma_g$ ) ;
- l'amplitude de gonflement ( $\epsilon_g$ ) ;
- l'indice de compression ( $C_c$ ) ;
- l'indice de gonflement ( $C_s$ ).

Le processus de stabilisation nécessite le mélange du sol avec une même quantité de solution de cosse : pour cela, le temps de cure du mélange (solution + argile) doit être défini. La solution dépend des conditions de préparation qui sont essentiellement le dosage en quantité de cosse, le temps de macération des cosses et la température de l'eau entrant dans la préparation de la solution.

Ainsi, nous avons retenu les quatre facteurs ci-après :

- la température facteur A
- le temps de macération facteur B
- la quantité de cosse par litre d'eau facteur C
- le temps de cure du mélange (solution + sol) facteur D

TABLEAU III Niveau des facteurs étudiés.  
Level of factors.

Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
(A) Température de l'eau (°C)	30	90
(B) Temps de décoction (h)	24	72
(C) Quantité de cosse (g/l)	25	100
(D) Temps de cure (j)	1	15

### b) Le plan adopté

Nous avons retenu deux niveaux par facteur, les valeurs des paramètres mis à l'étude pour les valeurs intermédiaires pouvant être déterminées à partir du modèle que nous obtiendrons, sous l'hypothèse d'une linéarité des influences.

La température moyenne ambiante dans la région est de 30 °C ; l'eau chaude étant utilisée dans la pratique, nous avons pris comme niveau haut 90 °C.

Le temps de macération minimale est de 24 heures ; nous avons pris le niveau haut à 72 heures pour voir l'évolution au cours du temps.

Les niveaux bas et haut de la quantité de cosse ont été fixés eu égard à une estimation résultant des pratiques habituelles.

Le sol traité est habituellement mis en œuvre dans les heures qui suivent le mélange ; nous avons choisi

de mettre le niveau haut du facteur *temps de cure* à 15 jours pour suivre l'évolution du mélange dans le temps.

La cosse de néré est une matière organique contenant (Kerharo, 1974), de la parquine (un dérivé aminé), et 27 à 44 % de tannin (Hall *et al.*, 1997). Or cette molécule organique (le tannin) donne, avec les polymères composés d'acides aminés, des complexes insolubles très résistants (Bassène, 2001). Ainsi l'essentiel du phénomène se produirait lors de la phase de préparation de la solution au cours de laquelle il y aura libération des éléments actifs, après le mélange, l'objectif serait d'étudier le facteur D (temps mis par les constituants de la solution pour agir sur les particules argileuses). Sur cette base, nous avons mis un accent particulier sur l'étude des interactions entre les facteurs intervenant jusqu'à l'obtention de la solution de cosse. Ainsi, nous avons retenu comme interactions :

- la température de l'eau et le temps de macération (AB) ;
- la température de l'eau et la quantité de cosse (AC) ;
- le temps de macération et la quantité de cosse (BC).

Le modèle retenu est le suivant :

$$Y = M + [E_{A1} E_{A2}] A + [E_{B1} E_{B2}] B + [E_{C1} E_{C2}] C + [E_{D1} E_{D2}] D \\ + {}^tA \begin{bmatrix} I_{A1B1} & I_{A1B2} \\ I_{A2B1} & I_{A2B2} \end{bmatrix} B + {}^tA \begin{bmatrix} I_{A1C1} & I_{A1C2} \\ I_{A2C1} & I_{A2C2} \end{bmatrix} C \\ + {}^tB \begin{bmatrix} I_{B1C1} & I_{B1C2} \\ I_{B2C1} & I_{B2C2} \end{bmatrix} C \quad (11)$$

où  $A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ , si le facteur A est au niveau 1, et  $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ , s'il est au niveau 2.  ${}^tA$  est le transposé de A.

Les conditions du modèle exigent un plan comportant au moins huit expériences. La table orthogonale de Taguchi  $L_8(2^7)$  permet de considérer les quatre facteurs et les trois interactions par le biais de huit expériences au lieu de  $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$  pour le plan complet. En effet, le nombre minimal d'expériences est  $1 + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) + (2 - 1) = 8$  pour les quatre facteurs et les trois interactions ; les tables classiques de Taguchi, pour les facteurs à deux modalités, étant des tables de 4, 8 et 16 expériences, nous avons pris la table à 8 expériences.

Dans la représentation graphique de la méthode Taguchi (Fig. 2a, notre modèle ; Fig. 2b, celui de Taguchi), les facteurs sont représentés par des symboles en fonction de leur aptitude à subir des modifications. Ainsi les facteurs les plus difficiles à modifier sont représentés par  $\bigcirc$  ; ceux un peu plus facile par  $\odot$  et ceux encore plus facile par  $\bullet$ .

Les interactions entre deux facteurs sont représentées par un trait entre les deux facteurs.

Le plan d'expérience à utiliser (plan avec répétition  $2 \times 8$  expériences) est présenté au tableau IV.

Les résultats sont interprétés au moyen du calcul des effets et des variances. L'analyse de la variance par le test de Fisher Snedecor nous renseigne sur la signification des effets.

$E_A$  désignant l'effet du facteur A (variation de la réponse due au facteur A seul quand on passe du centre du domaine d'étude au niveau supérieur de ce facteur) ;

$n_a$  le nombre de niveaux du facteur A ;

N le nombre d'expériences.

**TABEAU IV** Plans d'expériences retenus.  
Experimental designs.

N°	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	2	1	2
4	1	2	2	1
5	2	1	1	2
6	2	1	2	1
7	2	2	1	1
8	2	2	2	2

La variance expliquée par le facteur A est donnée par :

$$V_A = \frac{N}{n_a} \frac{\sum (E_A)^2}{n_a - 1} \quad (12)$$

La variance expliquée par l'interaction AB est donnée par :

$$V_{AB} = \frac{N}{n_a \times n_b} \frac{\sum (1_{AB})^2}{(n_a - 1)(n_b - 1)} \quad (13)$$

La variance sur les résidus (différence entre les réponses expérimentale et calculée) par :

$$V_R = \frac{\sum r^2}{N - ddl_{modèle}} \quad (14)$$

$$F_{exp(A)} = \frac{V_A}{V_R} \quad (15)$$

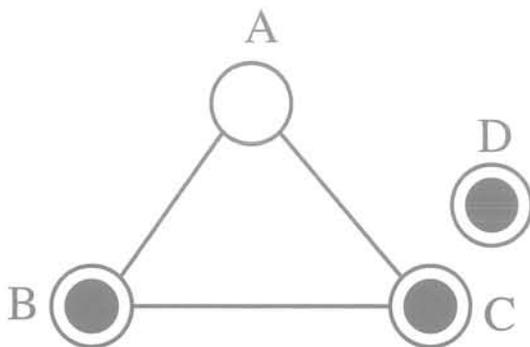
$F_{théo}$  est donné par les tables de Snedecor. Le seuil retenu pour l'analyse des variances par le test de Fisher Snedecor est de 5 %. Si  $F_{exp} < F_{théo}$ , on rejette l'hypothèse de l'influence du facteur (ou de l'interaction) avec moins de 5 % de chances de se tromper.

Ainsi la variance totale  $V_t$  se décompose en variance expliquée par le modèle  $V_e$  (la somme des variances significatives des facteurs et de leurs interactions) et en variance résiduelle  $V_r$ .

$$V_t = V_e + V_r \quad (16)$$

avec un taux d'explication du modèle

$$\tau = V_e / V_t \quad (17)$$



**FIG. 2A** Graphe linéaire du modèle.  
Linear graph of the model.

### 3.3

## Conduite des essais

### a) Traitement des sols

Pour chaque combinaison de facteurs, le sol est saturé par la solution préparée correspondante et malaxé avec celle-ci. Le mélange est laissé en cure suivant le temps prévu ; à la fin du temps de cure, le sol traité est séché pendant 24 heures à l'étuve, réduit en poudre dans un mortier en agate puis soumis aux différents essais.

### b) Essais au bleu de méthylène

Les essais ont été réalisés suivant la norme NF 94-068.

### c) Essais à l'œdomètre

Tous les essais œdométriques (gonflement libre, déformation empêchée...) ont été menés sur des échantillons traités, reconstitués et compactés ayant un poids volumique sec  $\gamma_d$  de 14 kN/m<sup>3</sup> et une teneur en eau initiale sensiblement égale à la limite de retrait effectif ( $w_l = 15\%$ ).

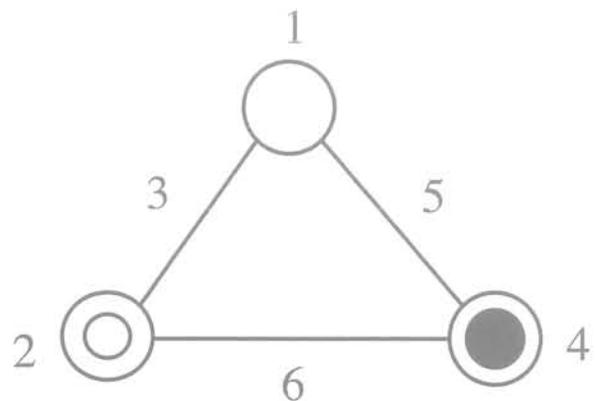
Après mise à la teneur en eau désirée pour l'essai, le matériau est mélangé jusqu'à homogénéisation ; le mélange est placé dans un récipient hermétique pendant 48 heures pour homogénéiser la teneur en eau. Les échantillons sont ensuite compactés directement dans les anneaux œdométriques pour éviter le remaniement dû au carottage. Les dimensions des échantillons testés sont de 70 mm de diamètre et de 24 mm de hauteur.

Afin d'éviter tout relâchement, le lancement des essais s'effectue juste après le compactage.

Avant de placer l'échantillon dans la cellule œdométrique, les pierres poreuses sont soigneusement séchées afin d'éviter tout gonflement au début de l'essai. Les parois sont préalablement graissées, afin de réduire le frottement latéral.

La série d'essais de gonflement libre sur chemin œdométrique a été réalisée sous charge très faible (celle du piston et de la pierre poreuse, environ 5 kPa).

L'essai à déformation empêchée (par incréments de charge) permet, d'une part, de déterminer la valeur de la pression de gonflement  $\sigma_g$  à partir de l'essai œdométrique classique, d'autre part, de poursuivre la réalisation de l'essai pour déterminer les indices de compression  $C_c$  et de gonflement  $C_s$ .



**FIG. 2B** Graphe linéaire de la table  $L_8(2^7)$  de Taguchi.  
Linear Graph of the table  $L_8(2^7)$  of Taguchi.

## Résultats

Les résultats des différents essais sont résumés dans le tableau V.

## 4.1

### Influence globale

Les résultats de l'essai au bleu de méthylène montrent une diminution par rapport à la valeur de bleu de l'échantillon non traité. En faisant la moyenne, on obtient une diminution relative moyenne de 49 %.

L'amplitude de gonflement évolue dans le même sens avec une diminution relative moyenne de 44,40 %. La pression de gonflement connaît une diminution plus faible (24 %). Ceci est conforme aux résultats des travaux de Gomez et Mounirou (1996), et d'Akouete et Hounyo (1997) qui ont porté sur ces trois paramètres.

Par contre, l'indice de gonflement a connu plutôt une augmentation relative moyenne de 16 % et si l'indice de compression a connu une diminution relative, celle-ci n'est que de 5,3 % donc très faible, voire insignifiante.

Ainsi nous constatons une diminution du gonflement issu d'une imbibition (par apport d'eau) mais un accroissement du gonflement issu d'une diminution des contraintes en place. Ceci pourrait s'expliquer par l'aspect plus grenu que présente l'échantillon après traitement.

## 4.2

### Analyse détaillée des facteurs par la méthodologie Taguchi

Les modèles obtenus sont :

$$V_B = 7,1 [1 + [+0,04 - 0,04] A + [+0,09 - 0,09] B + [+0,04 - 0,04] C] + \epsilon_r$$

avec  $\sigma_r = 0,44$  soit  $CV \approx 6 \%$  et  $\tau = 0,98$  (18)

$$\epsilon_g = 5,2 [1 + [-0,13 + 0,13] A + [+0,18 - 0,18] B + [+0,11 - 0,11] C] + \epsilon_r$$

avec  $\sigma_r = 0,85$  soit  $CV \approx 16 \%$  et  $\tau = 0,97$  (19)

$$P_g \text{ (kPa)} = 134 [1 + [+0,02 - 0,02] A + [+0,12 - 0,12] B + [+0,04 - 0,04] C] + \epsilon_r$$

avec  $\sigma_r = 5,66$ , soit  $CV \approx 4 \%$  et  $\tau = 0,99$  (20)

$$C_c = 0,365 [1 + [-0,04 + 0,04] B] + \epsilon_r$$

avec  $\sigma_r = 0,02$ , soit  $CV \approx 6 \%$  et  $\tau = 0,87$  (21)

$$C_s = 0,049 [1 + [-0,11 + 0,11] B] + \epsilon_r$$

avec  $\sigma_r = 0,01$ , soit  $CV \approx 17 \%$  et  $\tau = 0,83$  (22)

TABEAU V Récapitulatif des résultats.  
Summary of the results.

		Paramètres de gonflement			Paramètres de compressibilité	
		$V_B$	$\epsilon_g$	$\epsilon_0$	$C_c$	$C_s$
$E_0$	1 <sup>er</sup> essai	13,81	9,36	173	0,385	0,0426
	2 <sup>e</sup> essai	13,69	9,40	181	0,387	0,0424
$E_1$	1 <sup>er</sup> essai	8,15	6,92	160	0,351	0,0422
	2 <sup>e</sup> essai	8,52	6,86	164	0,354	0,0431
$E_2$	1 <sup>er</sup> essai	7,45	3,98	146	0,351	0,0455
	2 <sup>e</sup> essai	7,55	4,06	144	0,353	0,0471
$E_3$	1 <sup>er</sup> essai	7,05	3,87	124	0,389	0,0612
	2 <sup>e</sup> essai	6,95	3,93	120	0,408	0,0684
$E_4$	1 <sup>er</sup> essai	6,55	3,38	128	0,389	0,0536
	2 <sup>e</sup> essai	6,80	3,32	118	0,389	0,0513
$E_5$	1 <sup>er</sup> essai	8,00	6,84	150	0,357	0,0418
	2 <sup>e</sup> essai	7,83	6,76	148	0,349	0,0440
$E_6$	1 <sup>er</sup> essai	7,00	6,93	140	0,351	0,0429
	2 <sup>e</sup> essai	7,15	7,03	144	0,345	0,0425
$E_7$	1 <sup>er</sup> essai	6,35	5,65	120	0,359	0,0459
	2 <sup>e</sup> essai	6,15	5,53	124	0,355	0,0447
$E_8$	1 <sup>er</sup> essai	5,75	4,08	110	0,370	0,0549
	2 <sup>e</sup> essai	5,90	4,28	106	0,374	0,0560
Moyenne		7,073	5,214	134	0,365	0,0491
Variation relative (%)		48,56	44,41	24,08	5,34	-15,56

Remarque :

- $E_i$  représente l'échantillon traité selon l'état des facteurs au niveau  $i$  ;
- la moyenne est celle obtenue sur les 8 échantillons traités ;
- la variation relative est obtenue par rapport à la valeur moyenne de l'échantillon non traité  $E_0$ .

Pour chacun des paramètres étudiés, les corrélations entre les résultats théoriques et expérimentaux sont illustrées sur les figures 3a à 3e. Les résultats théoriques sont assez proches des résultats prédits pour les

trois premiers paramètres. Pour les indices de compression et de gonflement, on observe une forte non-linéarité dans la corrélation remettant en cause ce premier modèle adopté.

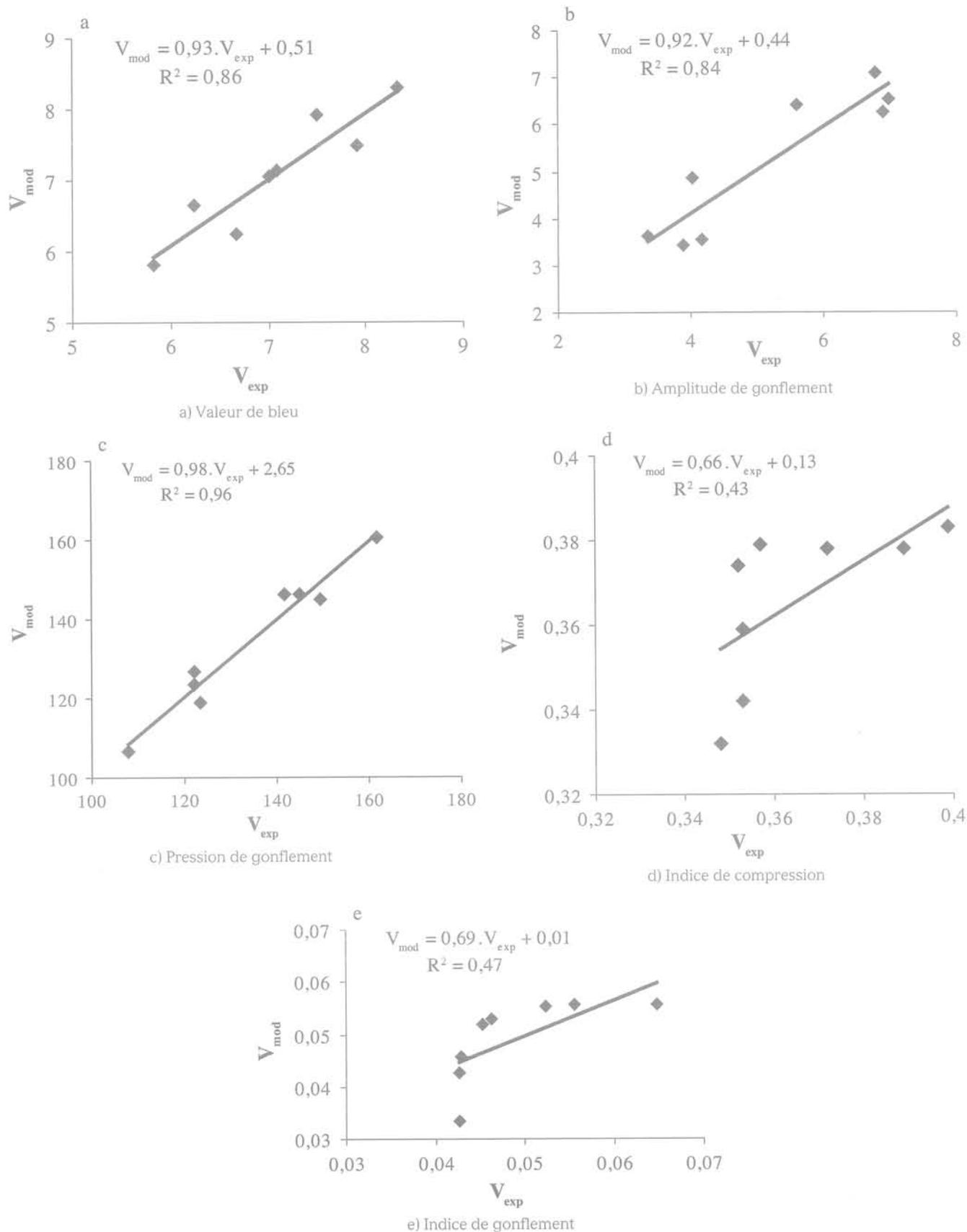


FIG. 3 Corrélations entre valeurs expérimentales et valeurs prédites par le modèle.  
 Correlations between experimental values and values predicted by the model.

Les tableaux VIa à VIe présentent le test de Fisher-Snedecor, et montrent la signification des effets pour les cinq paramètres.

Au vu des résultats, nous notons l'indépendance des facteurs (aucune interaction n'est à retenir). Le temps de cure (facteur D) n'étant pas significatif, on peut tirer comme conclusion que la réaction minéraux argileux/éléments actifs de la cosse se produit juste après le mélange et ne connaît pas une évolution dans le temps.

De plus, le facteur le plus significatif est le temps de macération (facteur B) qui indique que, plus le temps est important, plus il y a libération de principe actif et une baisse des paramètres du gonflement.

Aussi, pour les paramètres de gonflement, trois facteurs (température de l'eau, temps de macération, quantité de cosse) sont significatifs, alors que, pour les paramètres de compressibilité déterminés après consolidation, seul le temps de macération (facteur B) est significatif.

**TABLEAU VIa** Analyse de la variance valeur de bleu.  
Analyze variance value of blue.

	Effet	Variance	F <sub>exp.</sub>	F <sub>théo.</sub>	Significatif
A	-0,302	1,460	7,374		oui
B	-0,635	6,460	32,629		oui
C	-0,302	1,460	7,374		oui
D	-0,010	0,002	0,008	5,32	non
AB	0,094	0,141	0,710		non
AC	0,010	0,002	0,009		non
BC	-0,115	0,210	1,061		non
Résidus		0,198			

**TABLEAU VIb** Analyse de la variance de l'amplitude de gonflement.  
Analyze variance of the swelling amplitude.

	Effet	Variance	F <sub>exp.</sub>	F <sub>théo.</sub>	Significatif
A	0,674	7,275	10,114		oui
B	-0,958	14,706	20,444		oui
C	-0,581	5,398	7,505		oui
D	-0,489	3,824	5,317	5,32	non
AB	0,042	0,028	0,039		non
AC	-0,273	1,195	1,661		non
BC	-0,092	0,136	0,189		non
Résidus		0,719			

**TABLEAU VIc** Analyse de la variance la pression de gonflement.  
Analyze variance the pressure of swelling.

	Effet	Variance	F <sub>exp.</sub>	F <sub>théo.</sub>	Significatif
A	-3,09	243,31	7,58		oui
B	-16,09	3732,54	116,39		oui
C	-5,52	355,26	11,08		oui
D	-2,27	152,49	4,75	5,32	non
AB	-0,81	0,00	1E-29		non
AC	0,00	10,56	0,33		non
BC	-0,65	34,22	1,07		non
Résidus		32,07			

**TABLEAU VI d** Analyse de la variance l'indice de compression.  
Analyze variance of compression index.

	Effet	Variance	F <sub>exp.</sub>	F <sub>théo.</sub>	Significatif
A	-0,0078	0,00098	2,011		non
B	0,0139	0,00309	6,378		oui
C	-0,0001	0,00000	0,000		non
D	0,0037	0,00022	0,451	5,32	non
AB	0,0069	0,00076	1,577		non
AC	-0,0025	0,00010	0,219		non
BC	-0,0014	0,00003	0,066		non
Résidus		0,00048			

**TABLEAU VIe** Analyse de la variance de l'indice de gonflement.  
Analyze variance of the swelling number.

	Effet	Variance	F <sub>exp.</sub>	F <sub>théo.</sub>	Significatif
A	-0,0025	0,0001	1,330		non
B	0,0054	0,0005	6,418		oui
C	0,0001	0,0000	0,005		non
D	0,0033	0,0002	2,385	5,32	non
AB	0,0016	0,0001	0,582		non
AC	-0,0024	0,0001	1,197		non
BC	0,0007	0,0001	0,105		non
Résidus		0,0001			

## Conclusion

Afin de minimiser les risques auxquels sont soumis les ouvrages réalisés sur sols gonflants nous nous sommes intéressés à l'aspect stabilisation. Ainsi nous avons étudié la stabilisation d'une argile gonflante par la cosse de néré. Pour cela nous avons mis au point un plan d'expériences basé sur la méthodologie Taguchi. Les essais ont porté sur l'effet de solutions de cosse de néré à différentes concentrations sur les paramètres de gonflement et de compressibilité du sol.

Cette étude a donné des résultats satisfaisants permettant de conclure que le traitement du sol argileux, étudié par la solution de cosse de néré, permet d'amoinrir de façon notable le gonflement issu d'une imbibition (par apport d'eau) et accroît celui issu d'une diminution des contraintes en place.

De l'interprétation des résultats par la méthode Taguchi, nous notons :

- l'influence des facteurs retenus sur les paramètres de gonflement et de compressibilité ;
- que trois des quatre facteurs retenus pour l'étude influencent les paramètres de gonflement, alors que les paramètres de compressibilité ne sont influencés que par le temps de macération (facteur B) ;
- qu'aucune interaction n'est significative ;
- que le facteur le plus significatif est le temps de macération (facteur B), puis la température (facteur A) et la quantité de cosse (facteur C) ;
- une efficacité optimale aux limites supérieures du domaine d'étude.

L'étude en laboratoire de la stabilisation du sol par la cosse de néré ayant été concluante, une amélioration des modèles établis sera étudiée, puis suivra une étude en vraie grandeur afin de contribuer à supprimer les risques de dégradation des constructions sur sols gonflants.

## Bibliographie

- Akouete J., Hounyo L. - *Contribution à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols expansifs : cas d'Onigbolo*. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur des travaux au Collège polytechnique universitaire du Bénin, 1997, p. 43-85.
- Bassène E. - *Plantes à tannins*. Cours de pharmacognosie 3<sup>e</sup> année, faculté de pharmacie, université Cheikh Anta Diop, Sénégal, 2001.
- Biarez J., Favre J.-L. - Parameters filing and statistical analysis of data in soils mechanics. *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Applic. Stat Prob. soils struct. eng.*, Aachen, edit. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbaue, vol. 2, 1975, p. 249-264.
- Dugué D., Girault M. - *Analyse de variance et plans d'expérience*. Dunod, 1969.
- Favre J.-L. - *Sécurité des ouvrages en terre. Risques : modélisation de l'incertain, fiabilité, analyse de risques*. Ellipses, Collection TechnoSup, 2004, 320 p.
- Gomez C., Mounirou S. - *Contribution à l'établissement des dispositifs constructifs dans la région d'Issaba et d'Adja-Ouère*. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur des travaux au Collège polytechnique universitaire du Bénin, 1996.
- Hachichi A., Fleureau J.-M. - Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. *Revue française de géotechnique* 86, 1999, p. 37-51.
- Hall John B., Tomlinson Helen F., Oni Peter I. - *Parkia biglobosa. A monograph School of Agricultural and Forest Sciences*. University of Wales Bangor U.K, 1997, p. 77-78.
- Kerharo J. - *La pharmacopée sénégalaise traditionnelle. Plantes médicinales et toxiques*. Vigot frères, 1974.
- Mitchell J.K. - *Fundamental of Soil Behaviour. Series in Soils Engineering*. John Wiley & Sons Inc., 1976, 422 p.
- Pillet M. - *Les plans d'expériences par la méthode Taguchi*. Les Éditions d'organisation, 1997.
- Tran Ngoc L. - Un nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* 88, 1977, p. 136-137.