

MODELISATION STATISTIQUE DES PROPRIETES PHYSICO - MECANIQUES DES MATERIAUX SABLO GYPSO-CALCAIRES DE LA REGION DE OUARGLA

KHELLOU Abderrezak¹, HAFSSI Abdelatif², KRIKER Abdelouahed¹

¹ *Laboratoire d'Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides*
Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie

² *Laboratoire des Travaux Publics du Sud Ouargla, Algérie*

*E-mail: Khellou11@yahoo.fr

ملخص: الرمل الجبسي الجيري المعروف بطف القشرة ، يعتبر من المواد المفضلة في بناء الطرق بمناطق الجنوب الجزائري . في الآونة الأخيرة أصبح الطلب على هذه المواد في تزايد مستمر وذلك للنمو التدريجي للتنمية الاقتصادية في هذه المناطق . غالبا ما يلجأ المهندسين إلى التجارب المخبرية لتحديد الخصائص الفيزيائية ، الميكانيكية والكيميائية للطف ، حيث يبدو أن هذه العملية طويلة ومكلفة ، ومن ثم فإن البحث عن وسيلة أخرى سريعة يصبح مقيدا للغاية .

تهدف هذه الدراسة في محاولة إيجاد طريقة صحيحة للتنبؤ مقدما على بعض الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للرمل الجبسي الجيري من خلال إنشاء نماذج إحصائية تساعدنا على تقييم جودة هذه المواد. نعتمد في البحث على النماذج على الأدوات الإحصائية الكلاسيكية (الانحدار البسيطة ، متعددة وكثيرة الحدود) ، وذلك اعتمادا على قاعدة البيانات المتوفرة لدى مخبر الأشغال العمومية للجنوب بورقلة . بعض النماذج المتحصل عليها مقبولة و لكن يستلزم تطويرها حتى تصبح دقيقة بحيث يمكن لنا استعمالها تطبيقيا .

الكلمات المفتاحية: الرمل الجبسي الجيري، الخصائص الفيزيائية، الميكانيكية، الكيميائية، ، النموذج الإحصائي.

RESUME : Les tufs d'encroûtement gypso-calcaires, sont considérés comme des matériaux de premier choix géotechnique routière des zones sud et sahariennes de l'Algérie. Ces matériaux locaux sont très utilisés vu le développement économique progressif dans ces régions. Pour les identifier les ingénieurs font appel aux essais expérimentaux. Cette opération d'analyse est un peu longue, car dans certaines situations de chantier, la connaissance rapide des performances de ces matériaux est indispensable pour une bonne réalisation des projets, surtout en matière de délais. C'est pour cela que la recherche d'un moyen de réduction du temps d'analyse est importante.

La présente étude a comme objectif la recherche de modèles pouvant prédire certaines propriétés des ces matériaux. Pour ce faire, la méthode de modélisation statistique a été utilisée. Elle est fondée sur les outils classiques de la statistique (régression simple, multiple et polynomiale).

Certains des modèles construits sont acceptables, mais, nécessitent encore des améliorations pour êtres appliqués avec une grande précision.

MOTS-CLES : Sable gypso-calcaire, propriété, physique, mécanique, chimique, modèle statistique.

ABSTRACT: Gypsum-limestone crusts Tuffs are considered like the first road on geotechnical materials at Algeria southern Saharan zones. These local materials are widely used for those economic developments in these regions. Some experimental tests are usually used by the engineers for identification. These analysis processes take lot time. However in some constructions, quick knowledge performance of these materials is essential for a successful project, especially in terms of deadlines. This is why finding a way to reduce the analysis time is important. The aim of this search is to find some models for predict certain properties of these materials. Then reduce the analyses time. The statistical method modeling was used. It is based on classical statistical tools (single, multiple and polynomial regression). The result show that some of the models built are acceptable, but still require improvements applied to beings with great precision.

KEYWORDS: Gypsum-limestone sand, property, physical, mechanical, chemical, statistical model

1. Introduction

Dans les régions Sud et particulièrement au Sud Est, les sables gypso-calcaires connus par les tufs d'encroûtements gypseux ou calcaires font partie des matériaux locaux disponibles en grande quantité, ils sont largement utilisés comme remblais et matériaux de construction routière.

Avant toute utilisation de ces matériaux, il est évident d'effectuer les essais d'indentification au laboratoire, à savoir : l'analyse granulométrique, l'analyse chimique, l'essai Proctor, l'essai de portance CBR, et l'essai de compression simple.

Avec la disponibilité d'une importante base de données au niveau du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS), constituée de centaines d'analyse de ces matériaux, on s'est proposé de réaliser une étude statistique dans l'objectif de rechercher les relations qui peuvent exister entre les différents paramètres (propriétés), en se basant sur les outils classiques de la statistique. Ces relations une fois déterminées, elles vont permettre la réduction du nombre d'essai, et par conséquent une identification rapide de ces matériaux.

La modélisation statistique des données expérimentales, que nous avons mené dans ce travail, est une tentative d'évaluer l'influence du taux de (sulfates + carbonate) et du pourcentage de fines, sur les propriétés physico mécaniques (densité sèche, indice CBR et résistance à la compression) des matériaux gypso- calcaires.

2. Définitions

En pédologie, les définitions les plus simples de la croûte et d'encroûtement sont :

" la Croûte" est la partie plus ou moins indurée d'une accumulation calcaire ; gypseuse ou saline à l'intérieur du sol, ou en surface [1].

"Encroûtement" est la partie plus ou moins cimentée d'une accumulation calcaire ou gypseuse s'étendant à l'ensemble d'un horizon mais moins dure qu'une croûte [1].

2.1. Encroûtement Gypseux

L'encroûtement gypseux est une formation dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plus d'un mètre parfois. De haut en bas on y distingue principalement deux horizons [2].

Le premier, de couleur blanchâtre, d'aspect massif présente une structure pulvérulente, très fine, comme du 'talc'. Il y a une certaine cohérence et une compacité dans cette masse amorphe car il est possible d'en prélever des mottes.

Le second horizon diffère très peu du précédent, Il y a une légère variation dans la coloration, a peine moins blanche à jaune très pâle. L'aspect général reste massif, la structure change à peine à l'apparence d'un limon pulvérulent. Parfois de petits cristaux sont visibles à l'œil nu.

2.2. Encroûtements calcaires

De nombreuses définitions ont été données aux croûtes, et aux encroûtements calcaires, celles-ci diffèrent selon la spécialité de l'auteur (géologue, pédologue ou géotechnicien). Parmi les définitions proposées, on peut retenir celles données par A. J. GOUDIE.

" La croûte calcaire est un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement de carbonates de calcium. Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré ; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus au moins grandes de sols, roche ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration" [3].

2.3. Encroûtements gypso calcaires (mixte)

Les encroûtements mixtes sont des formations de tufs calcaires gypsifiés ou de tufs gypseux calcifiés trouvés dans des zones climatiques subhumides et semi-arides.

Au-delà d'une certaine aridité, le développement des encroûtements calcaires est arrêté à la source, à cause de l'insuffisance des précipitations pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques ; et inversement, lorsqu'on passe du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols à cause de sa solubilité notable, les encroûtements gypseux sont relayés alors par les encroûtements calcaires [4].

3. Modélisation statistique des données

Dans les techniques de la modélisation statistique, les propriétés ou les paramètres faisant l'objet d'étude sont considérés comme des variables aléatoires, c'est-à-dire comme des grandeurs

non déterminées. Cette modélisation s'effectue au moyen des outils classiques de la statistique (régression simple, multiple et polynomiale).

3.1. Présentation des données

La source (ou base) de données exploitée dans cette étude est un ensemble d'environ 400 séries d'analyse physico-mécanique effectuées pendant les dernier dix ans au niveau du Laboratoire de Travaux Publics du Sud (LTPS), unité de OUARGLA, et ce, sur les matériaux type sable gypso-calcaires de la région Sud Est de l'Algérie.

La série d'essais comporte les essais suivants, effectués à la base des normes correspondants

- L'analyse granulométrique : NF P 94-056 Mars 1996 ;
- L'analyse chimique : NF P 15-461 ; BS 1377 ; NF P 94-048 ;
- L'essai Proctor : NF P 94-093 Sept.97 ;
- L'essai C B R : NF P 94-078 Mai 97 ;
- L'essai de compression simple. Mode Opérateur / LTPS.

Dans notre étude nous avons intéressé par la fraction sableuse, c'est-à-dire, sur la fraction contenant plus de 50 % des éléments supérieurs à 0,08 mm, et ont un diamètre inférieure à 20 mm (selon la classification de LCPC)

Les données sont arrangées dans des intervalles de classes selon le taux de (sulfates + carbonate), de longueur 10%, chaque classe est représentée par sa valeur moyenne,

3.2 Ajustement du Modèle de Régression simple

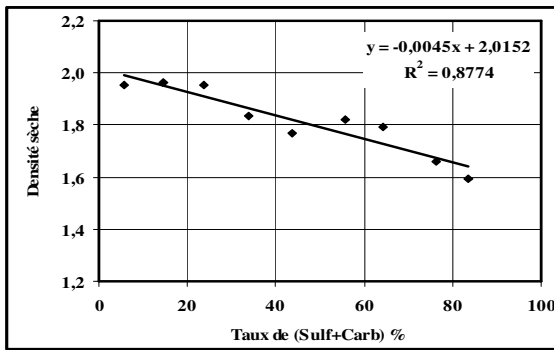


Figure 1: Relation entre la densité sèche et le taux de (sulf.+carb.)

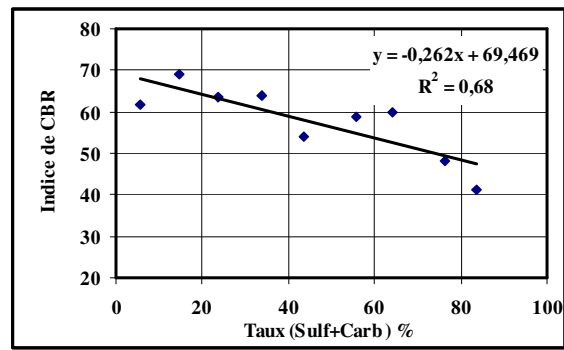


Figure 2: Relation entre l'indice de CBR et le taux (sulf.+carb.)

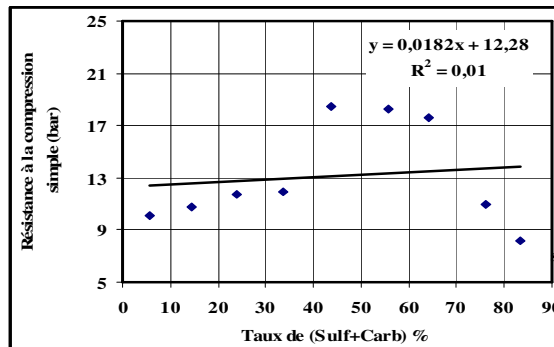


Figure 3 : Relation entre la résistance à la compression simple et le taux de (sulf.+carb.)

Les relations déduites de la régression sont résumées, avec le test de signification dans le tableau suivant :

Tableau 1 : les modèles de régression simple établis sous l'effet du taux de (sulf.+carb.) selon les valeurs moyennes

Modèles	R	R ²	Test de signification	
			Test global de Fisher	Test de Student Sur le coef. Associé à $T_{sulf+carb}$
$\gamma_d = -0,0045T_{sulf+carb} + 2,01$	-0.94	0,88	Significative	Significative
$I_{CBR} = -0.262T_{sulf+carb} + 69.46$	-0.83	0,68	Significative	Significative
$Rc = 0.0182T_{sulf+carb} + 12.28$	0.13	0,01	Significative	non Significative

γ_d : Densité sèche

I_{CBR} : Indice de CBR

Rc : Résistance à la compression simple

$T_{sulf+carb}$: Taux de (sulfates + carbonate)

Les deux modèles $\gamma_d = f(T_{carb+sulf})$ et $I_{CBR} = f(T_{carb+sulf})$ présentant des valeurs R² élevées sont par conséquent, statistiquement significative, donc ils peuvent être acceptés et adoptés pour notre étude, par contre, le modèle $Rc = f(T_{carb+sulf})$ ayant une faible valeur R², est considéré non représentatif.

3.3. Ajustement du Modèle de Régression multiple

L'ajustement du Modèle de Régression linéaire multiple par l'incorporation simultanément l'effet du taux de (sulfates + carbonate) et le pourcentage de fines donne les résultats suivants :

Tableau 2 : les modèles de régression multiple établis sous l'effet du taux de (sulf.+carb.) et du pourcentage de fines selon les valeurs moyennes

Modèles	R	R ²	Test de signification			
			Test global de Fisher	Test de Student Sur le coef. Associé à $T_{sulf+carb}$ et à F		
				$T_{sulf+carb}$	F	
$\gamma_d = -0,0039T_{sulf+carb} - 0,0033F + 2,04$	0,93	0,86	S	S	N.S	
$I_{CBR} = -0,1551T_{sulf+carb} - 0,7038F + 76,47$	0,85	0,72	S	N.S	N.S	
$Rc = -0,0560T_{sulf+carb} + 0,4888F + 7,41$	0,37	0,13	S	N.S	N.S	

F : pourcentage de fines

S: le test est significatif.

N.S : le test est non significatif

L'influence simultanée du taux de (sulf.+carb.) et pourcentage de fines sur les propriétés physico-mécaniques n'a pas amélioré les valeurs de R². De plus, la non signification du test de Student pour les deux derniers cas (indice CBR et la compression simple) diminue leurs chances d'être acceptés.

Par conséquent, un autre type d'ajustement doit être recherché afin d'aboutir au meilleur modèle possible.

3.4. Ajustement du Modèle de Régression polynomiale

L'ajustement du modèle linéaire de la résistance à la compression simple en fonction du taux de (sulf.+carb.) et du pourcentage de fines ont donné de faibles modèles qui ne seront pas fiables et précis. Ceci, nous imposons un autre type d'ajustement.

A cet effet, la distribution du nuage des points sur la figure 4, semble donner un ajustement acceptable avec une corrélation à base polynomiale.

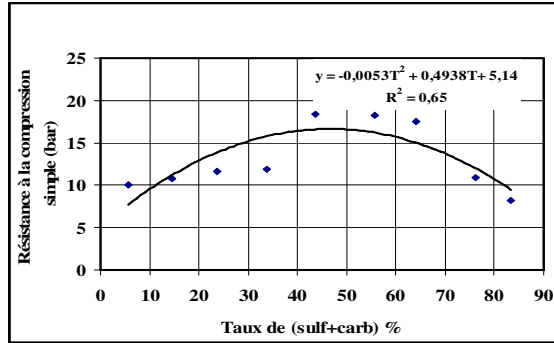


Figure 4: Relation entre la résistance à la compression simple Sous l'effet du taux (sulf.+carb.).

Tableau 3 : les modèles établis par la régression polynomiale sous l'effet du taux de (sulf.+carb.) selon les valeurs moyennes

Modèle	R	R ²	Test de signification		
			Test global de Fisher	Test de Student	
				T _{sulf+carb}	T ² _{sulf+carb}
$Rc = -0,0053T_{sulf+carb}^2 + 0,4938T_{sulf+carb} + 5,14$	0,80	0,64	S	S	S

D'après les résultats du tableau 3, on déduit que l'ajustement au modèle polynomiale de la compression simple en fonction du taux de (sulf.+carb.) donne des résultats acceptables, car justifié par un coefficient de détermination (0.64) qui est supérieure à la moyenne, et par la signification des tests (Fisher et Student).

4. Discussion

Nous rappelons que l'objectif principal de notre étude est de pouvoir apprécier et prédire les propriétés physico-mécaniques des matériaux sablo gypso-calcaires à la base de modèles représentatifs, et ceci dans le but de juger, et de décider rapidement de la qualité des ces matériaux en vue de leurs utilisation dans les projets de construction routières et de plates formes.

Au terme de cette étude, nous avons pu construire trois modèles que nous pensons être représentatifs, nous les présentons dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Récapitulatif des modèles adoptés

Propriété	Effet du taux de (sulf.+carb.)
Densité sèche	$\gamma_d = -0,0045T_{sulf+carb} + 2,01$
Indice de CBR	$I_{CBR} = -0.262T_{sulf+carb} + 69.46$
Résistance à la compression simple	$Rc = -0,0053T_{sulf+carb}^2 + 0,4938T_{sulf+carb} + 5,14$

Notons enfin, que le temps d'essai pour la détermination au laboratoire de la densité sèche, de l'indice CBR, du taux de sulfate et de carbonate, ainsi que le taux de fine est de 24 heures, tandis que, la résistance à la compression simple demande quatre jours.

Par conséquent, si le modèle liant la résistance a la compression simple à un des paramètres (ex : taux de (sulf.+carb.) ou % fine) s'avère acceptable après validation, ce modèle sera adopté, et une fois appliqué on gagnera beaucoup de temps dans l' analyse de ces matériaux.

5. Validation des modèles

La validation est le processus consistant à évaluer les performances d'un modèle qui vient d'être construit, par rapport à un nouveau jeu de données, appelé "données de validation". On dit aussi que l'on évalue ses capacités de généralisation.

Plusieurs approches permettent l'évaluation du taux d'exactitude d'un modèle. Parmi ces approches, on trouve la méthode de validation croisée [5], celle-ci repose sur l'idée d'un découpage (aléatoire) des données en deux (non nécessairement égales), dont la première partie contient les données de prédiction (ayant servi à la construction du modèle) et l'autre, contient les données de validation.

La performance du modèle est alors estimée à la base des données qui n'ont pas été utilisées lors de sa construction (données de validation), une fois introduit dans le modèle, les résultats obtenus sont ensuite comparés avec les résultats prédits par le modèle.

Dans notre approche nous avons pris la mesure de la racine carrée moyenne des carrés des erreurs relatives (en anglais *Relative Root Mean Squared Error* : *RRMSE*) comme critère statistique de comparaison et de vérification entre les deux parties de données [6].

- la formule de *RRMSE* est définie comme suit :

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}}{\bar{y}} \quad (1)$$

RMSE : Racine carrée moyenne des carrés des erreurs.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

\bar{y} : Valeur moyenne de la variable *Y* ($\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_1^n y_i$)

y_i : Valeur observée de la variable *Y*

\hat{y} : Valeur prédite ou estimé de la variable *Y*

n : Nombre d'observation ou de mesure

- *RRMSE* est toujours positif, plus il est faible plus le modèle est précis.

- *RRMSE* doit être inférieur de 1, dans le cas contraire la prévision ou le modèle élaboré n'explique rien [6].

5.1 Résultats de validation

Les modèles que nous avons adopté précédemment (voir tableau 4), et qu'on a jugé acceptables après qu'ils aient passé les tests de signification (test de Fisher et Student) sont maintenant soumis a un test de validation par l'utilisation de nouvelles données issues de l'expérience.

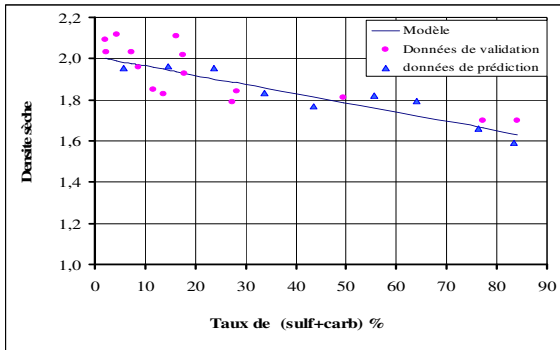


Figure 5 : Dispersion des données de prédiction et des données de validation par rapport à la courbe du modèle

$$\gamma_d = f(T_{sulf+carb})$$

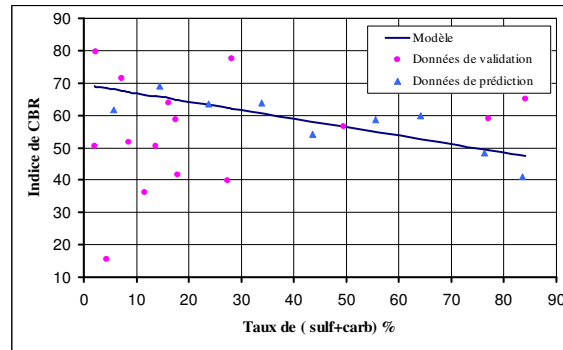


Figure 6: Dispersion des données de prédiction et des données de validation par rapport à la courbe du modèle

$$I_{CBR} = f(T_{sulf+carb})$$

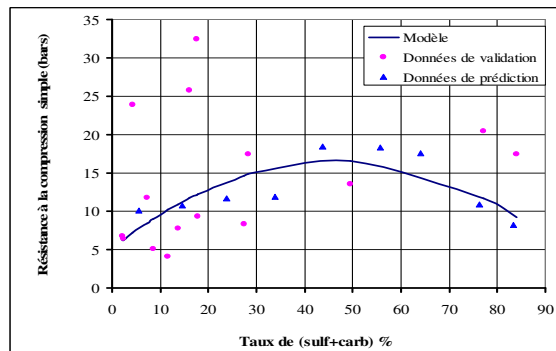


Figure 7 : Dispersion des données de prédiction et des données de validation par rapport à la courbe du modèle

$$Rc = f(T_{sulf+carb})$$

Tableau 5: Valeurs de RMSE et RRMSE pour Modèles de variation des propriétés physico-mécaniques avec le taux (sulf.+carb.)

Modèles	R ²	Données de Prédiction (p)		Donnée de Validation (v)		ERREUR errer ER
		RMSEp	RRMSEp	RMSEv	RRMSEv	
$\gamma_d = f(T_{sulf+carb})$	0,88	0,04	0,02	0,09	0,04	0.02
$I_{CBR} = f(T_{sulf+carb})$	0,68	4,59	0,08	20,60	0,38	0.30
$Rc = f(T_{sulf+carb})$	0,64	1,47	0,11	8,83	0,63	0.52

Une première analyse du tableau 5, indique que toutes les valeurs de RRMSE sont inférieures à 1 pour les deux types de données, ce résultat nous permet de déduire que la qualité de l'ajustement pour le premier modèle $\gamma_d = f(T_{sulf+carb})$ peut être considérée comme assez bonne. Aussi, la précision du modèle est acceptable, vu la faible différence, ou erreur entre les valeurs de RRMSEp (égale à 0.02) et de RRMSEv (égale à 0.04).

Pour le modèle $I_{CBR} = f(T_{sulf+carb})$, les résultats de l'analyse des écarts indiquent une performance moyenne de modèle, à la vue des valeurs de RRMSEp (égale à 0.08) et de RRMSEv (égale 0.38), car plus cette différence tend vers zéro, le modèle est d'une grande précision.

Pour le dernier modèle $R_c = f(T_{sulf+carb})$, il est d'une qualité médiocre, vu l'écart un peu élevé entre les données de prédiction RRMSEp (égale à 0.11) de validation RRMSEv (égale à 0.63).

D'autre part, on retrouve les mêmes conclusions dans la représentation graphique des résultats, à savoir, la bonne correspondance entre la prédiction du modèle $\gamma_d = f(T_{sulf+carb})$ et la validation.

6. Conclusion

L'objectif fixé par notre étude étant de construire des modèles permettant la prédiction des propriétés des tufs d'encroûtement, et par conséquent une évaluation rapide de certains de leur paramètre. En effet, ce travail a été réalisé et des résultats ont été obtenus.

Les modèles établis pour la densité sèche, semblent représentatifs puisque les valeurs obtenues sont assez voisines de celles observées directement. Par conséquent, ils peuvent donc servir pour déduire des valeurs approchées de la densité sèche.

Pour l'indice CBR et la résistance compression simple, les modèles obtenus sont relativement moins bons, à cause des écarts constatés entre les valeurs observées (mesurées) et celles calculées (prédites). Par conséquent, ces modèles peuvent faire objet à d'éventuelles améliorations.

En ce qui concerne l'impact de ces résultats sur la prospection des tufs, nous ne pouvons pas encore mettre en application ces modèles, ils nécessitent encore, d'autres améliorations pour qu'ils soient d'une précision acceptable.

Au terme de cette étude, nous soulignons que, malgré la simplicité de l'application des outils de modélisation statistique, il n'est pas facile d'atteindre des modèles parfaits applicables à tout genre de tufs, provenant de sites différents, et à granulométries diverses, c'est pour cette raison que les modèles établis sont limités seulement à la fraction sableuse.

Références

- [1] M. Carpenter ; " Terminologie de la pédologie français-anglais " SFT. ; Société française des traducteurs, France (1997).
- [2] P. Bureau et P. Roederer ; "Contribution a l'étude des sols gypseux du Sud Tunisien croûtes et encroûtements gypseux de la partie Sud du Golfe de Gabes" ; Cah .Pédol ORSTOM (1960).
- [3] G. Colombier ; " Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières – Synthèse" ; ISTED, (1988).
- [4] Z. Améraoui ; " Les tufs d'encroûtements, utilisation dans la géotechnique routière" ; Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger ,2007.
- [5] A. Sylvain ; " Reéchantillonnage et Sélection de modèles"; thèse de doctorat, université Paris Sud 11.(2007).
- [6] L. Matthieu ; " économétrie du cycle Européen " ; thèse de doctorat IEP de Paris (2006).
- [7] LTP- Sud ;" Recueil de normes pour la réalisation des essais sur chantier " ; Ouargla (1996).
- [8] R. Bourbonnais ; "Econométrie" ; 6^{ème} édition DUNOD, Paris (2005)
- [9] J. Confais et M. Le Guen ; " Premiers Pas En Régression Linéaire" ; Revue MODULAD Numéro 35, (2006)
- [10] D. Borcard ; "Cours de Régression Polynomiale " Dép. de sciences biologiques ; Université de Montréal (2009).
- [11] M. Morsli ; "Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharienne" ; thèse de doctorat d'état école nationale polytechnique, Alger (2007).