

III.1 Introduction

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais réalisés sur le sol étudié et le sable de dune et leurs combinaisons et leur interprétation, il est organisé sous forme de deux parties :

Une première partie concernant le sol non traité et le sable de dunes, qui comporte les essais d'identification

* Sol

La granulométrie (par tamisage et par sédimentométrie), paramètres d'état (teneur en eau, poids volumique), limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène, les essais mécaniques (Proctor normal et modifié, la portance immédiat avant et après imbibition, les gonflement libre et le Cisaillement direct).

* Sable de dune

La granulométrie (par tamisage), poids volumique (apparente et absolues), Equivalent de sable.

Une deuxième partie portant sur le sol traité à différentes teneurs en sable de dune, qui regroupe les essais mécaniques (CBR immédiat et après imbibition et gonflement libre ainsi que le cisaillement direct).

Les interprétations des résultats seront décrites à la fin de chaque partie du sol traité.

III.2 Sol non traité :

Cette partie présente en premier lieu les résultats des essais d'identification (la granulométrie (par tamisage et par sédimentométrie), paramètres d'état (teneur en eau, poids volumique), limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène), la classification du sol étudié selon la classification LPC (Magnan, 1980), la norme française NF P11-300 et guide des travaux routiers (GTR), ensuite les résultats des essais mécaniques (Proctor normal et modifié, la portance immédiate avant et après imbibition, les gonflement libre et cisaillement direct).

III.2.1 : Essais d'identification :

III.2.1.1 : Paramètres d'état :

Le tableau III.1 Présente les résultats des essais de paramètres d'état (teneur en eau, poids volumique)

Tableau III.1 : Résultats des paramètres d'état

Volume du moule	25 cm ³		50 cm ³		100 cm ³		200 cm ³	
Numéro du moule	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B
Masse humide totale (g)	209	207	267	267	468,92	468,12	1142,9	1144,2
Masse sèche totale (g)	202,12	199,72	252,64	254,45	442,45	441,69	1091,26	1080,68
Masse du moule (g)	155,55	155,05	160,28	165,45	263,35	261,32	662,45	661,86
Masse du sol humide (g)	53,45	51,95	106,72	101,55	205,57	206,80	480,45	482,34
Masse du sol sec (g)	46,57	44,67	92,36	89,00	178,80	180,37	428,81	418,82
Teneur en eau W_{yat} (%)	14,77	16,30	15,55	14,10	14,97	14,65	12,04	15,17
Masse volumique humide γ_h (g/cm ³)	2,14	2,08	2,13	2,03	2,06	2,07	2,40	2,41
Masse volumique sèche γ_d (g/cm ³)	1,86	1,79	1,85	1,78	1,79	1,80	2,14	2,09
W_{nat} : moyenne (%)	14,69							
γ_d : moyenne (g/cm ³)	1,89							
γ_h : moyenne g/cm ³)	2,16							

III.2.1.2 : Analyse granulométrique :

Le tableau III.2 résumé les trois essais d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie.

Les tableaux (A-1 à A-7) et la figure A-1 qui sont joint en annexe présentent les détails des résultats les trois essais d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie.

III.2.1.3 : Les limites d'Atterberg :

Trois (3) séries d'essais ont été réalisés pour la détermination des limites d'Atterberg.

Le tableau III-2 présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de limites d'Atterberg.

Les tableaux A-8 à A-13, et les figures A-2 à A-4 qui sont joint en annexe présentent les détails des résultats les trois séries d'essais ont été réalisés pour la détermination des limites d'Atterberg.

Tableau III.2 : Résultats des essais analyse granulométrique

Tamis (mm)	Tamisât (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
5,000	94,83	92,83	94,20	93,96
2,500	94,47	92,57	93,63	93,56
1,250	94,47	92,23	93,63	93,44
0,630	94,40	92,17	93,57	93,38
0,315	94,33	92,07	93,50	93,30
0,080	94,27	92,03	93,40	93,23
0,068	93,58	91,35	92,71	92,55
0,048	92,83	91,35	91,97	92,05
0,034	91,71	90,99	91,60	91,43
0,020	89,83	89,53	90,86	90,07
0,014	87,96	85,87	88,26	87,37
0,010	84,22	80,39	81,59	82,07
0,007	72,99	73,08	74,17	73,41
0,005	44,92	62,12	61,19	56,08
0,003	29,94	29,23	29,67	29,62
0,001	18,72	18,27	18,54	18,51

La figure III.3Présente les courbes de trois essais d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie.

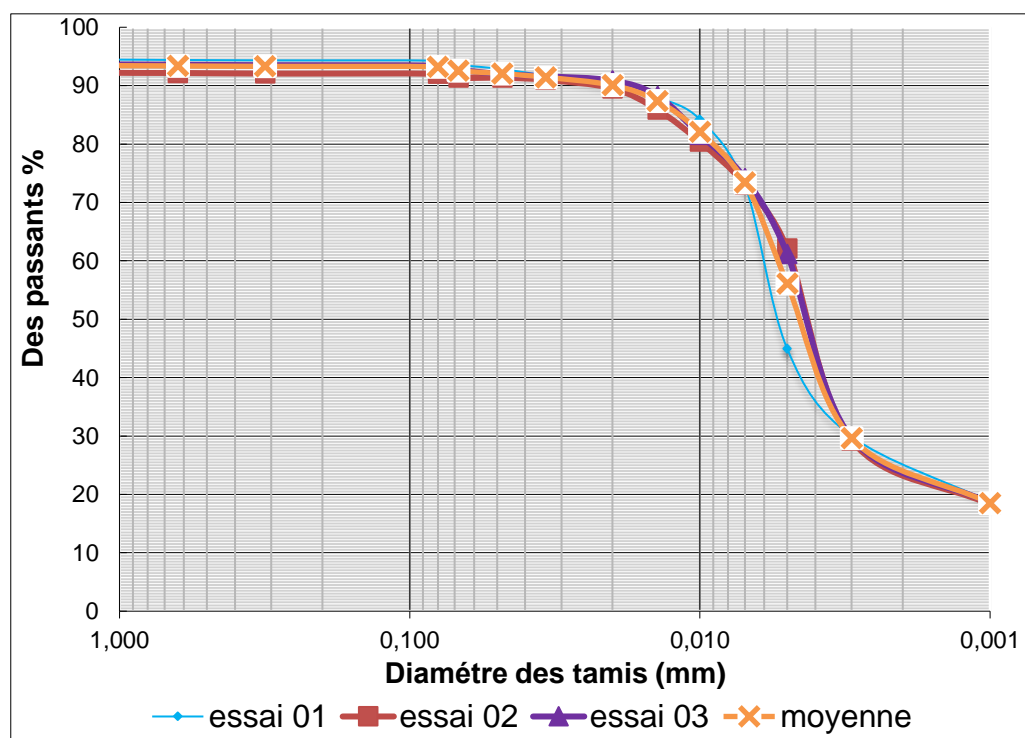


Figure III.1 : Courbe de l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie

Le tableau III.3 ci-dessous présente la récapitulation des résultats des essais des limites d'Atterberg.

Tableau III.3 résultats des essais des limites d'Atterberg.

Essai N°	W _L (%)	W _p (%)	I _p (%)	I _c = (W _L - W _{nat})/I _p	AC = I _p /C ₂	Acor = I _p / (C ₂ - 10)
1	81,49	31,33	50,16	1,33	2,08	3,57
2	74,02	30,24	43,78	1,35	1,82	3,11
3	81,09	31,40	49,69	1,33	2,07	3,53
Moyenne	78,87	30,99	47,88	1,33	1,99	3,41

La figure III.2 Présentée la classe de sols étudiée selon l'abaque de Casagrande.

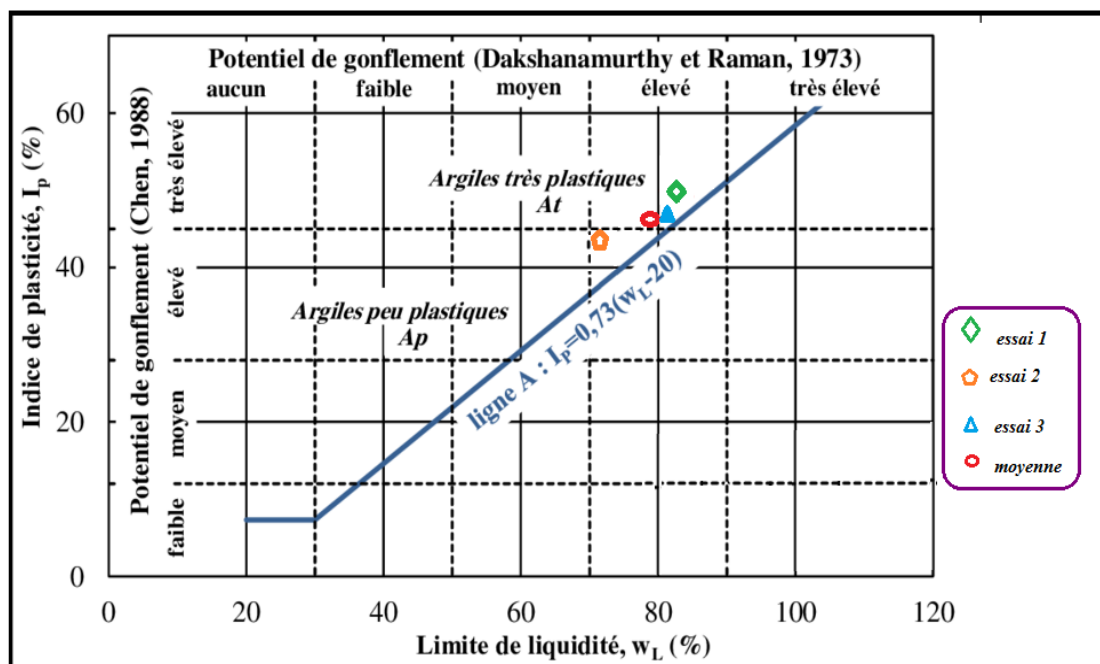


Figure III.2 : Diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert, 1997).

III.2.1.4 : L'essai au bleu de méthylène :

On a réalisé six (6) essais au bleu de méthylène, les résultats obtenus sont repris dans le tableau III.4

Tableau III.4 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène.

	Masse du sol (g)	Volume de la solution (cm ³)	VBS (g/cm ³)	Moyenne	La surface spécifique (m ² /g)	Moyenne
Essai 1	30	244	8,13	8,52	170,8	178,97
Essai 2	30	243	8,10		170,1	
Essai 3	30	245	8,17		171,5	
Essai 4	30	248	8,27		173,6	
Essai 5	30	249	8,30		174,3	
Essai 6	30	305	10,17		213,5	

Le tableau III.5 résume les caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau III.5 : Caractéristiques d'identification du sol témoin étudié.

Paramètres	Symbole	Valeurs
Profondeur (m)	/	1,95
Teneur en eau naturel (%)	W_{nat}	14,69
Masse volumique humide (g/cm^3)	γ_h	2,16
Masse volumique sèche (g/cm^3)	γ_d	1,89
Limite de liquidité (%)	W_L	78,87
Limite de plasticité (%)	W_p	30,99
Indice de plasticité (%)	I_p	47,88
Eléments inférieurs à 80 μ (%)	/	93,23
Eléments inférieurs à 2 μ (%)	C_2	24,06
Activité de la fraction argileuse (%)	A_c	1,99
Valeur du bleu de méthylène (%)	VB	8,52
Surface spécifique totale (%)	SST	178,97

Interprétation des résultats des essais d'identification :

Selon la courbe granulométrique, il s'agit d'argile très fine, puisque plus de 50% des éléments ont un diamètre $< 80\mu$, en plus le pourcentage d'éléments inférieurs à 2 μ est : 24,06%.

La limite de liquidité varie entre 74,02% à 81,49% avec une moyenne de 78,87% et l'indice de plasticité (I_p) varie entre 43,78% à 50,16% avec une moyenne de 47,88%.

Ces valeurs sont très peu dispersées pour le prélèvement exploré, elles semblent indiquer que le massif est homogène dans la zone étudiée.

En utilisant le diagramme de **Casagrande Dakshanamurphy et al. (1973) ET Chen (1988)** on remarque que l'argile étudiée se classe parmi les sols « très argileux très plastiques (At) », ET on remarque aussi, après comparaison d'activité argileuse, que l'argile se classe parmi la minérale montmorillonite calcique.

D'après les résultats obtenus, la valeur de bleu de l'argile est supérieure à 8,52 donc selon la classification de (Hang.1984) et la norme française NF P 11-300 il s'agit d'un sol très argileux, la surface spécifique totale 178,97 m^2/g dépasse largement les 100 m^2/g ce qui implique que notre

argile est constituée essentiellement de minéraux de type vermiculite qui sont des argiles gonflantes.

- **Mesure du potentiel de gonflement :**

Un nombre considérable d'approches empiriques introduites par différents auteurs, basées sur des caractéristiques du sol qui sont très simples à déterminer en laboratoire, sont utilisées pour l'évaluation du potentiel de gonflement.

Certaines approches sont basées sur un seul paramètre, et d'autres sur la combinaison de deux paramètres, et plus le nombre combiné est grand plus l'évaluation du potentiel de gonflement est meilleure.

Dans ce qui suit, nous allons considérer quelques classifications établies par différents auteurs, et utilisées pour évaluer le potentiel de gonflement des sols, d'après :

D'après ces classifications, on peut estimer le potentiel de gonflement de l'argile de Sidi hadjres.

Le tableau III.6 présente le potentiel de gonflement selon **Senthen (1980)**.

Tableau III.6 : Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980)

Ip	Potentiel de gonflement
>45	Très élevé
28 - 41	Elevé
15 - 25	Moyen
< 18	Faible
Notre échantillon $I_p > 47,88\%$ (Très élevé)	

Le tableau III.7 qui résume l'ensemble des résultats obtenus.

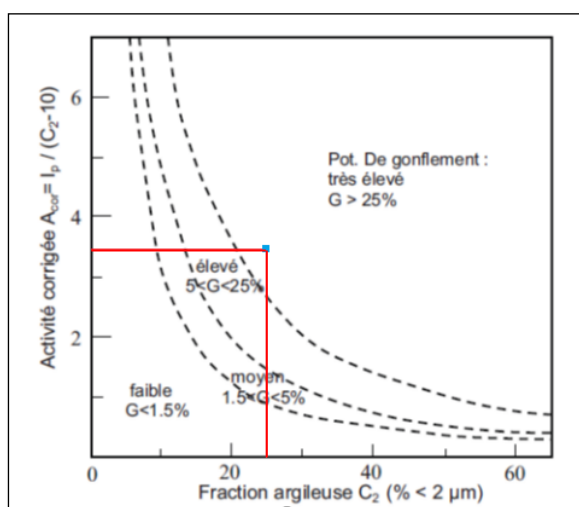
Tableau III. 7 : comparaison des potentiels de gonflement déterminés par différentes méthodes.

Classifications	Potentiel de gonflement
Classification de Snethen (1980).	Très élevé
Classification de Dakstana (1965).	Très élevé
Seed et al. (1962).	Élevé
Williams et Donaldson (1980).	Grand
L'établissement de recherche en bâtiment (1980).	(potentiel de retrait très élevé)
Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen(1988).	Fort

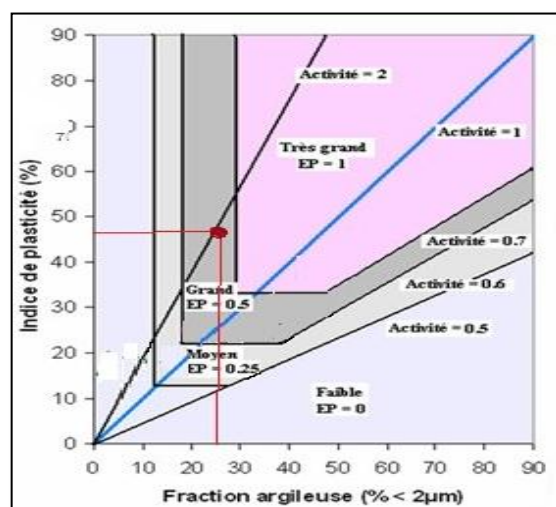
Le tableau III.8 présente le potentiel de gonflement selon Dakstana (1965).

Tableau III.8 : Classification de Dakstana (1965).

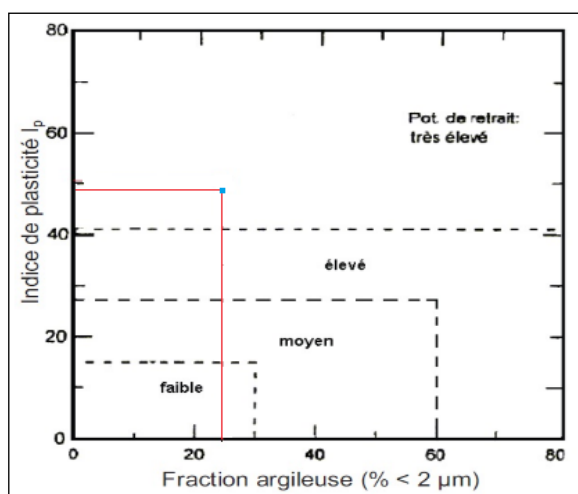
Limite de liquidité $W_L(\%)$	0-20	20-35	35-50	50-70	70-90	>90
Potentiel de gonflement (%)	Non gonflant	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé	Extrêmement élevé
Notre échantillon	$70 < W_L = 78,87\% < 90$					



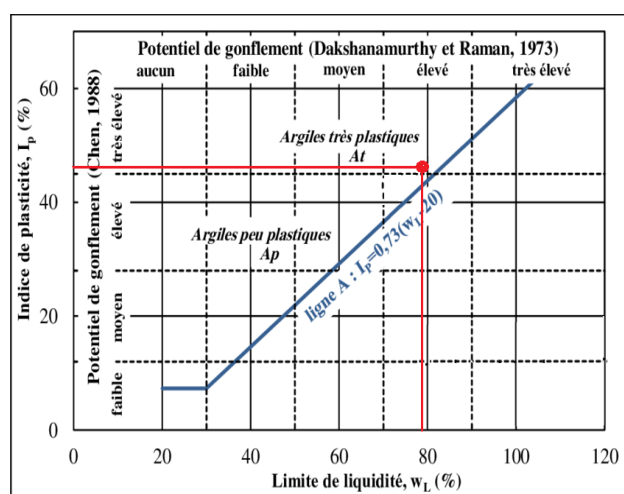
Seed et al. (1962)



Williams ET Donaldson (1980)



Building Research Establishment (1980)



Dakshanamurthy et al. (1973) ET Chen (1988)

Figure III.3 : Classification du sol étudié en fonction des paramètres d'identification.

III.2.2 : Essais mécaniques :

III.2.2.1 : Essais Proctor normal :

Le tableau III.9 résume les caractéristiques des essais du Proctor normal effectués sur le sol témoin étudié.

Les tableaux (A-14 à A-16) et les figures (A-5 et A-7) qui sont joint en annexe présentent les détails des résultats obtenus.

Tableau III.9 : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin.

Essai	W _{opt} (%)	γ_d max (g/cm ³)	S _r (%)
1	21,62	1,46	68,12
2	21,59	1,46	68,53
3	21,22	1,46	67,36
moyenne	21,48	1,46	68,33

La figure III.4 Présente les densités sèches en fonction des teneurs en eau (Proctor normal).

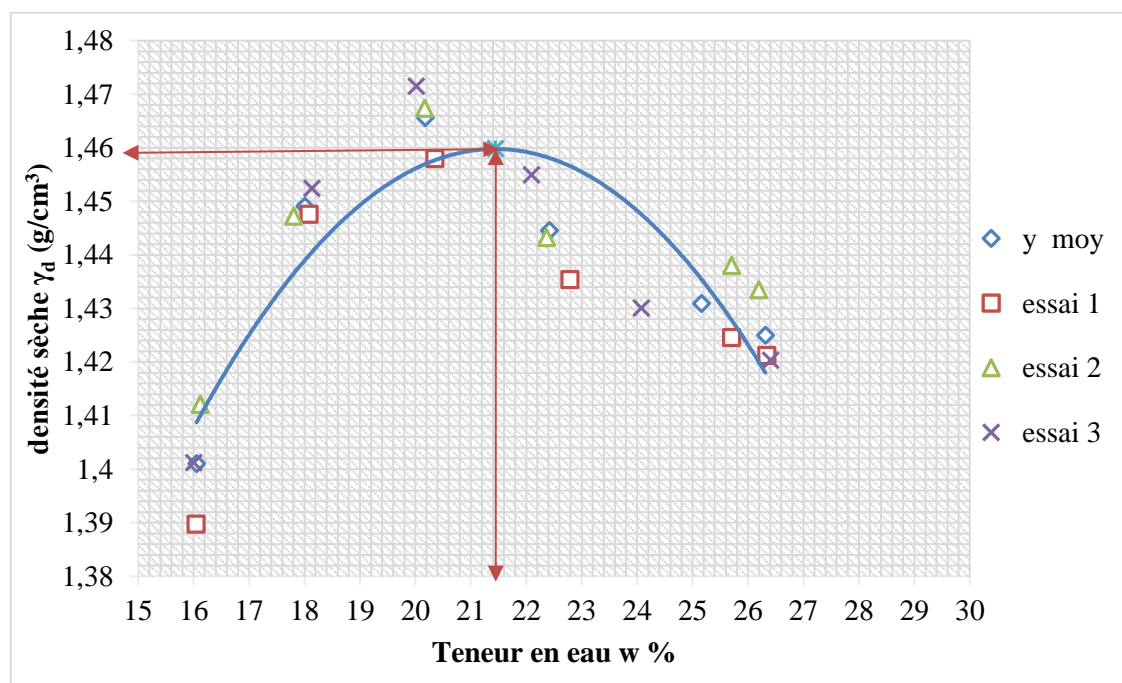


Figure III.4 : Résultats de trois essais Proctor normal.

La teneur en eau à l'optimum Proctor normal $W_{opt}=21,48$ % la masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal $\gamma_{dopt}= 1,46$ g/cm³ et un degré de saturation $S_r=68,33\%$

III.2.2.2 : Essais Proctor modifié :

Le tableau III.10 résume les caractéristiques des essais du Proctor modifié effectués sur le sol témoin étudié

Les tableaux (A-17 à A-19) et les figures (A-8 et A-10) qui sont joint en annexe présentent les détails des résultats obtenus

Tableau III.10 : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin.

Essais	$W_{opt}(\%)$	$\gamma_d \text{ max (g/cm}^3\text{)}$	$S_r (\%)$
1	15,28	1,86	91,83
2	14,88	1,85	87,44
3	15,62	1,85	91,48
moyenne	15,26	1,85	90,25

La figure III.5 Présente les densités sèches en fonction des teneurs en eau (Proctor modifié)

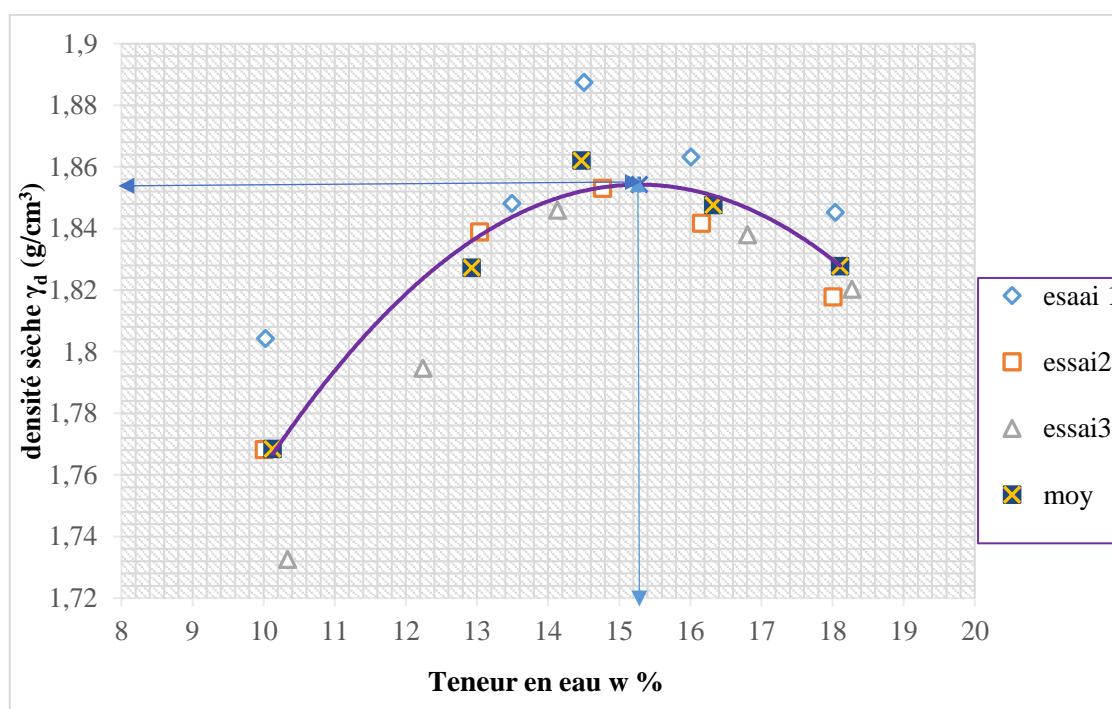


Figure III.5 : Résultats de trois essais Proctor modifié.

La teneur en eau à l'optimum Proctor modifié $W_{opt} = 15,26 \%$ la masse volumique sèche à l'optimum Proctor modifié $\gamma_{dopt} = 1,85 \text{ g/cm}^3$ et un degré de saturation $S_r = 90,25 \%$.

III.2.2.3 Essai C.B.R immédiat et après imbibition :

Les 3 séries essais ont été réalisées, la première pour l'essai C.B.R immédiat, et la seconde pour l'essai C.B.R après imbibition.

III.2.2.3.1 C.B.R immédiat :**a) Les valeurs de l'indice C.B.R (Proctor normal)**

Le tableau III.11 résume les résultats des essais du C.B.R immédiat effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau III.11 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R immédiat (Proctor normal)

$W_{opN}=21\%$	Indice C.B.R. immédiat à 2, 5mm(%)	Indice C.B.R. immédiat à 5mm(%)	Indice C.B.R. max(ù)
Essai 1	34,24	31,21	34,24
Essai 2	32,55	27,36	32,55
Essai 3	28,52	22,30	28,52
Moyenne	31,77	26,96	31,77

L'indice C.B.R immédiat maximum recherché qui correspond à l'indice de 2,5 mm d'enfoncement est égale à 31,77.

Le tableau A.20, et les figures A.11, qui sont joint en annexe présentent les détails des résultats les valeurs de C.B.R immédiat (Proctor normal).

b) Les valeurs de l'indice C.B.R (Proctor modifié).

Le tableau III.12, résume les résultats des essais du C.B.R immédiat effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau III.12 : Valeurs de l'indice C.B.R. immédiat (Proctor modifié)

$W_{opM}=15$	Indice C.B.R. immédiat à 2, 5mm(%)	Indice C.B.R. immédiat à 5mm(%)	Indice C.B.R. max(ù)
Essai 1	91,49	72,49	91,49
Essai 2	75,01	67,83	75,01
Essai 3	81,01	68,64	81,01
Moyenne	82,64	69,76	82,64

L'indice C.B.R immédiat maximum recherché qui correspond à l'indice de 2,5 mm d'enfoncement est égale à 82,64.

Le tableau A.21, et les figures A.12, qui sont joint en annexe présentent les détails des résultats les valeurs de CBR immédiat (Procter modifie).

III.2.2.3.2 C.B.R après imbibition :**a) Les valeurs de l'indice C.B.R (Proctor normal)**

Le tableau III.13 résume les résultats des essais du C.B.R imbibé effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau III.13 : Valeurs de l'indice C.B.R. après immersion (Proctor normal)

$W_{opN}=21\%$	Indice C.B.R. imbibé à 2,5mm(%)	Indice C.B.R. imbibé à 5mm(%)	Indice C.B.R. max(%)	Gonflement linéaire : G (%)
Essai 1	0,812	0,807	0,812	8,30
Essai 2	0,84	0,80	0,840	6,88
Moyenne	0,826	0,803	0,826	7,59

L'indice CBR après imbibition maximum recherché qui correspond à l'indice de 2.5 mm d'enfoncement est égal à 0.826, et un taux de gonflement linéaire égal à 7.59.

Les tableaux présentent les valeurs de l'effort de pénétration en fonction des enfoncements de l'éprouvette témoin confectionnée aux caractéristiques Proctor normal sont joints en annexe A-22.

Les courbes des efforts de pénétration en fonction des enfoncements des éprouvettes témoins sont données en annexe A-13.

b) Les valeurs de l'indice de C.B.R en (Proctor modifié).

Le tableau III.14 résume les résultats des essais du C.B.R immédiat effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau III.14 : Valeurs de l'indice C.B.R. après immersion (Proctor modifié)

$W_{opM}=15\%$	Indice C.B.R. imbibé à 2,5mm(%)	Indice C.B.R. imbibé à 5mm(%)	Indice C.B.R. max(%)	Gonflement linéaire : G (%)
Essai 1	0,49	0,53	0,53	14,30
Essai 2	0,59	0,60	0,60	14,28
Moyenne	0,54	0,56	0,56	14,29

L'indice CBR après imbibition maximum recherché qui correspond à l'indice de 2,5 mm d'enfoncement est égal à 0,56 et un taux de gonflement linéaire égal à 14,29.

Le tableau présente les valeurs de l'effort de pénétration en fonction des enfoncements de l'éprouvette témoin confectionnée aux caractéristiques Procter modifie sont joints en annexe A-23.

Les courbes des efforts de pénétration en fonction des enfoncements des éprouvettes témoins sont données en annexe A-14.

III.2.2.4 Gonflement libre :

Les courbes des résultats des essais de gonflement libre sont figurées en annexe (A-15 et A-16).

Les tableaux III.15, III.16 présente les résultats des essais de gonflement libre effectués sur deux échantillons.

Les courbes des résultats des essais de gonflement libre sont donnés en annexe de (A-15 à A-18).

Tableau III.15 : Résultats des essais de gonflement libre de l'échantillon (Proctor normal).

Profondeur	$\gamma_h(\text{g/cm}^3)$	W (%)	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	e_0 (mm)	e_f (mm)	$\varepsilon_g (\%) = (e_f - e_0)/e_0$	P_g (bar)
1,95	1,86	22,61	1,51	0,75	0,96	28,05	3,80

Tableau III.16 : Résultats des essais de gonflement libre de l'échantillon (Proctor modifié).

Profondeur	$\gamma_h(\text{g/cm}^3)$	W (%)	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	e_0 (mm)	e_f (mm)	$\varepsilon_g (\%) = (e_f - e_0)/e_0$	P_g (bar)
1,95	1,94	14,29	1,70	0,51	0,82	60,61	12,10

III.2.2.5 Résistance au cisaillement direct :

L'objectif de cette partie expérimentale, en premier, est la détermination des paramètres de résistance au cisaillement du sol témoin et qui sont l'angle de frottement interne et la cohésion.

a) Essai de cisaillement (Proctor normal) :

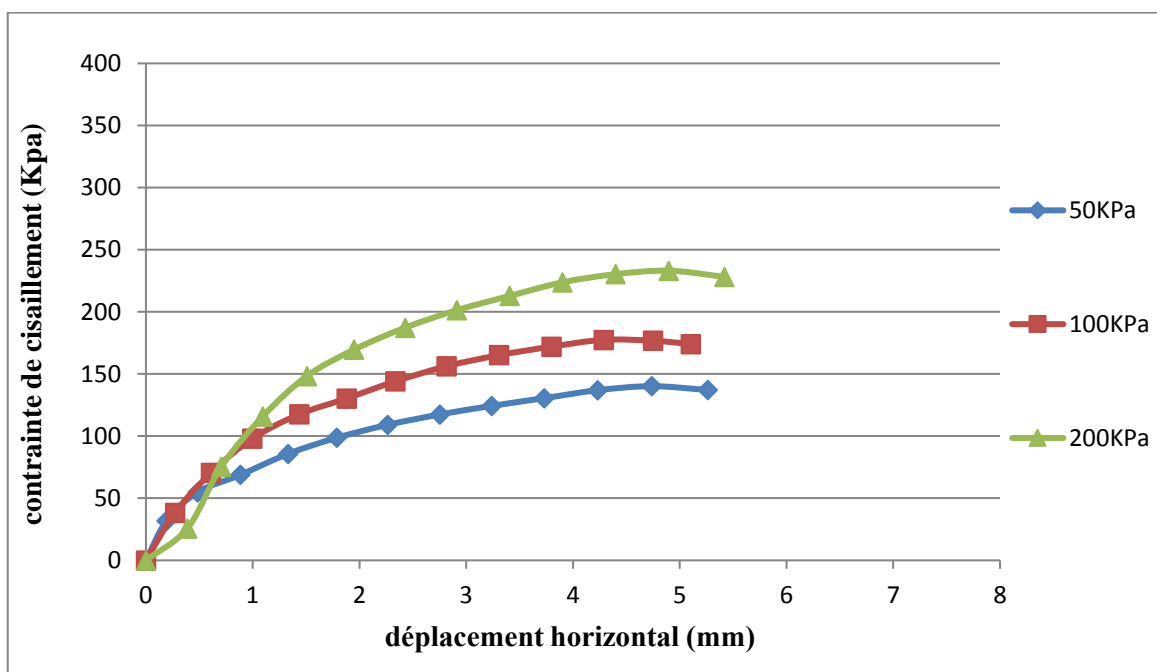
L'essai de cisaillement est effectué sur un échantillon compacté à l'optimum Proctor normal ($W_{opN}=21$) et à des contrainte vertical σ (kpa) de confinement de 50, 100 et 200.

Le tableau III-17 résume les résultats de l'essai de cisaillement correspondant à chaque couche.

Tableau III.17 : résultats des essais de cisaillement de l'échantillon témoin (Proctor normal).

contrainte verticale σ (kpa)	Essai N1	01	02	03
50	Contrainte de cisaillement τ (kpa)	108,61	168	145
	Effort de cisaillement (N)	391	608	522
	Déplacement horizontal (mm)	5,198	4,61	4,31
100	Contrainte de cisaillement τ (kpa)	163,1	219,7	156,4
	Effort de cisaillement (N)	587	797	563
	Déplacement horizontal (mm)	5,39	4,16	4,8
200	Contrainte de cisaillement τ (kpa)	168	224	222,5
	Effort de cisaillement (N)	944	806	801
	Déplacement horizontal (mm)	5,52	4,39	4,77
Moyenne	Cohésion (KN/m ²)	112,36		
	angle de frottement (φ°)	31,41		

Les figure (III.6 et III.7) présente les courbes des contrainte de cisaillement en fonction des déplacements horizontales- contraintes verticales du sol.

**Figure III.6 : Courbe Contrainte de cisaillement(τ) - déplacement horizontal du sol témoin**

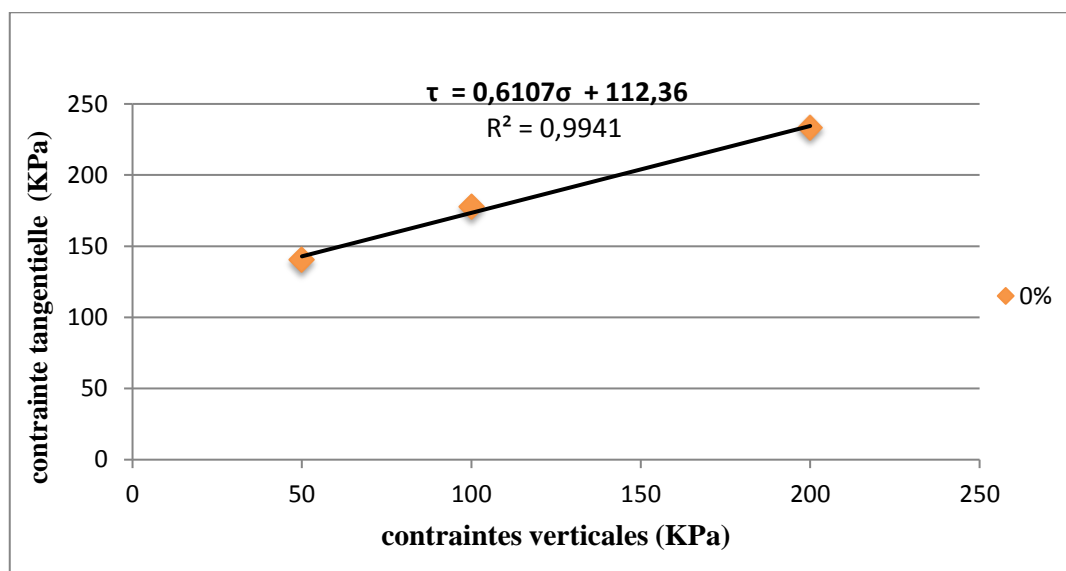


Figure III.7 : Contraintes de cisaillement en fonction des contraintes verticales du sol témoin.

b) Essai de cisaillement (Proctor modifié) :

L'essai de cisaillement est effectué sur un échantillon compacté à l'optimum Proctor modifié ($W_{op}=15\%$) et à des contraintes verticales σ (kPa) de confinement de 50, 100, 200 et 400.

Le tableau III.18 résume les résultats de l'essai de cisaillement correspondant à chaque couche.

Tableau III.18 : Résultats des essais de cisaillement de l'échantillon témoin (Proctor modifié)

contrainte vertical σ (kPa)	Essai N	01	02
50	Déplacement horizontal (mm)	5,11	5,33
	Effort de cisaillement (N)	728	749
	Contrainte tangentielle τ (kPa)	201,3	209,26
100	Déplacement horizontal (mm)	5,22	5,17
	Effort de cisaillement (N)	895	973
	Contrainte tangentielle τ (kPa)	264,4	246,15
200	Déplacement horizontal (mm)	5,16	5,56
	Effort de cisaillement (N)	1124	1268
	Contrainte de cisaillement τ (kPa)	327,7	336,74
400	Déplacement horizontal (mm)	5,41	5,58
	Effort de cisaillement (N)	1327	1381
	Contrainte de cisaillement τ (kPa)	358	395,88
Moyne	cohesion(kN/m ²) (C)	205,45	
	angle de frottement (φ°)	24.83	

La figure (III.8et III.9) présente les courbes des Contrainte de cisaillement en fonction des déplacements horizontales- contraintes verticales du sol.

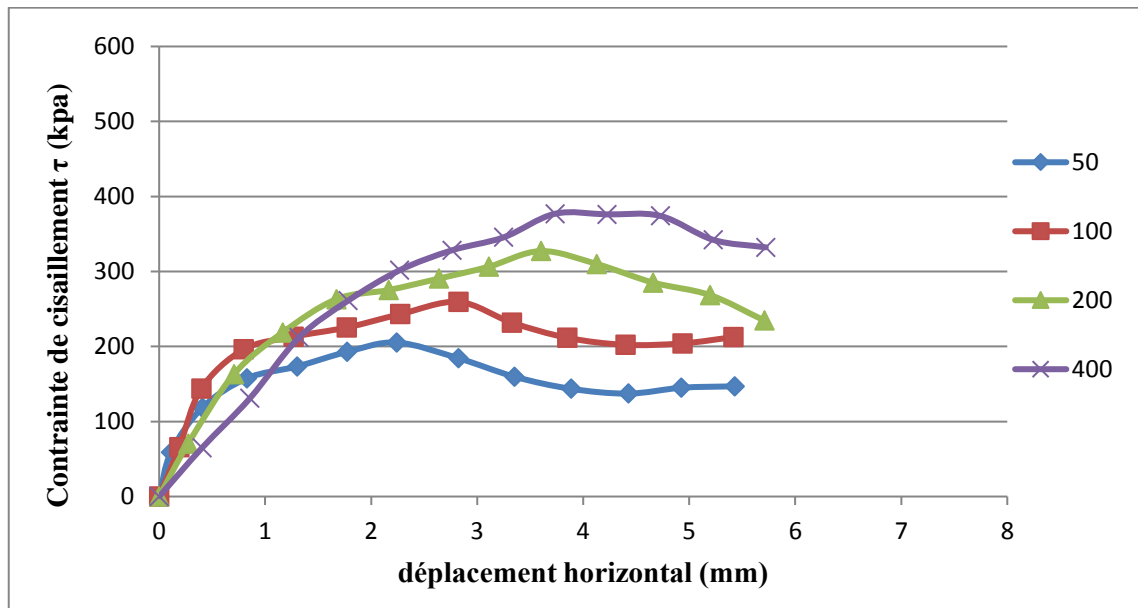


Figure III.8 : Courbe Contrainte de cisaillement(τ) - déplacement horizontal du sol témoin.

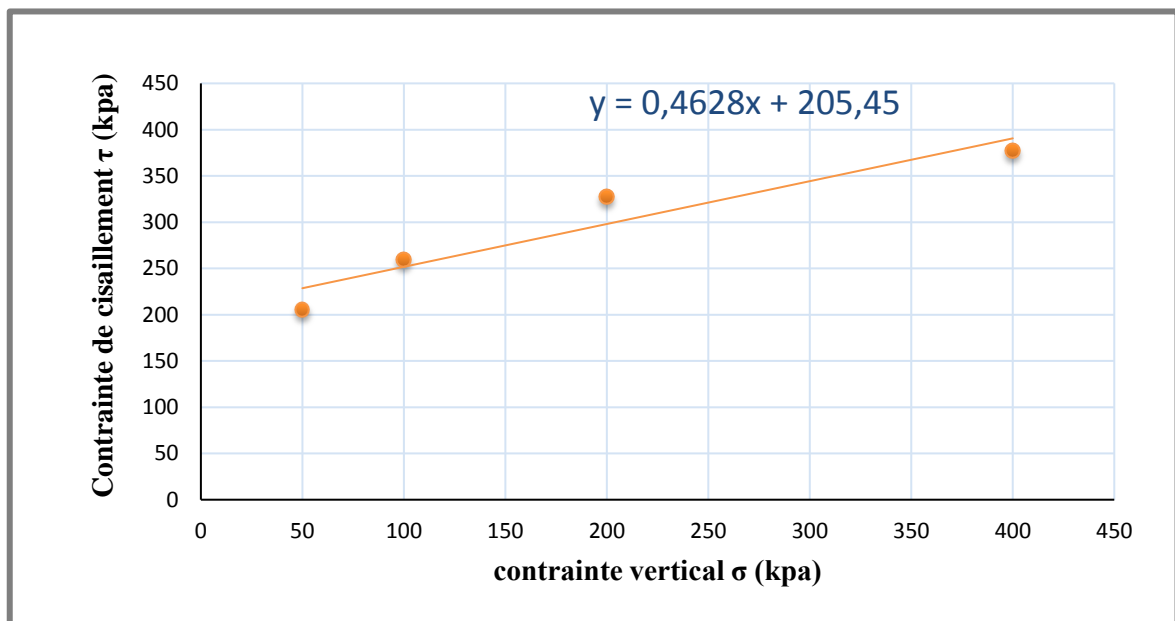


Figure III.9 : Effort de cisaillement en fonction des contraintes verticales du sol témoin.

III.3. Sable de dune :

III.3.1. Analyse granulométrique par tamisage

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau (III.19).

Le tableau A-8, et le figure A-2, qui sont joint en annexe présentent les détails des résultats Analyse granulométrique par tamisage.

Tableau III.19 : Résultats d'analyse granulométrique de sable de dune

Tamis (mm)	Tare (g)	Tare+refus (g)	Refus Partiels (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
				(g)	(%)	
5	627,9	628	0,1	0,1	0	100
2,5	596,8	596,8	0	0,1	0	100
1,25	505,9	506	0,1	0,2	0,01	99,99
0,63	500,4	503,7	3,3	3,5	0,18	99,82
0,315	469,5	1739,8	1270,3	1273,8	63,71	36,29
0,125	433,6	1082,1	648,5	1922,3	96,14	3,86
0,08	275	343,2	68,2	1990,5	99,55	0,45
Fond	454,2	463,1	8,9	1999,4	100	0

La figure III.10 : Présente courbe de l'analyse granulométrique par tamisage.

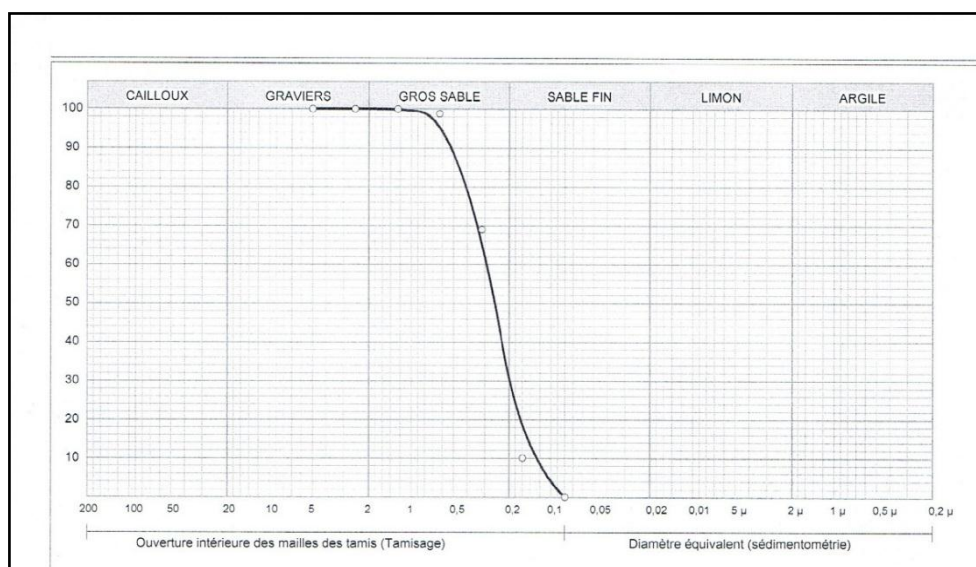


Figure III.10: Courbe de l'analyse granulométrique par tamisage.

III.3.2. Equivalent de sable (NF P 18-598).

Les résultats de l'équivalent de sable visuel et au piston représentés dans les tableaux (III.20) et (III.21) respectivement

Tableau III.20 : Equivalent de sable visuel.

N° d'essai	h1 (cm)	h2 (cm)	ESV(%)	ESV _{moy} (%)
1	8,5	7,3	85,88	86,46
2	8,4	7,3	86,90	
3	8,2	7,1	86,59	

Tableau III.21 : Equivalent de sable piston.

N° d'essai	h ₁ (cm)	h' ₂ (cm)	ESV(%)	Esp moy (%)
1	8,5	6,8	80	82,09
2	8,4	7	83,33	
3	8,2	6,8	82,93	

D'après les résultats obtenus, on peut dire que le sable de Boussaâda est très propre : absence presque total de fines argileuses.

III.3.3. La masse volumique

III.3.3.1. La masse volumique apparente

- **L'état lâche**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

- **L'état compact**

La masse volumique à l'état compact est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restants entre les grains, elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche. Même procédure que celle à l'état lâche après remplissage du récipient (avec compactage).

Les résultats représentés dans les tableaux suivants :

Tableau III.22 : La masse volumique apparente à l'état lâche.

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ_{app} (g/cm ³)	γ_{app} (g/cm ³)
1	114	1487	1,52	1,53
2	114	1500	1,54	
3	114	1500	1,54	

Tableau III.23 : La masse volumique apparente à l'état compact.

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ_{app} (g/cm ³)	γ_{app} (g/cm ³)
1	114	1604	1,65	1,65
2	114	1592	1,64	
3	114	1612	1,66	

III.3.3.2. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue est définie comme le rapport de la masse de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolue tous vides déduits).

Les résultats obtenus sont :

Tableau III.24 : La masse volumique absolue du sable siliceux.

N° d'essai	V ₁ (cm ³)	M(g)	V ₂ (cm ³)	γ_{app} (g/cm ³)	γ_{abs} moy (g/cm ³)
1	150	200	228	2,56	2,24
2	150	200	226	2,63	
3	150	200	226	2,63	

Le tableau III.25 résume les paramètres physiques de sable siliceux

Tableau III.25 : Paramètres physiques de sable siliceux.

Paramètres	Symbole	Valeurs
Diamètre correspondant à 60% des tamisât (mm)	d_{60}	0,4
Diamètre correspondant à 10% des tamisât (mm)	d_{10}	0,17
Diamètre correspondant à 30% des tamisât (mm)	d_{30}	0,28
Coefficient d'uniformité	C_u	1,42
Coefficient de courbure	Cc	1,15
Pourcentage des éléments à 2 mm (%)	/	100
Pourcentage des éléments à 0,08 mm (%)	/	0,45
Module de finesse	Mf	1,60
Equivalent de sable visuel (%)	E_{sv}	82,09
Equivalent de sable piston (%)	E_{sp}	82,09
masse volumique apparente (g/cm ³)	γ_{app}	1,53
masse volumique apparente à l'état compact (g/cm ³)	γ_{app}	1,65
masse volumique absolue (g/cm ³)	γ_{abs}	2,24

D'après les résultats obtenus à l'essai d'analyse granulométrique et selon la classification de L.P.C des sols grenus on a plus de 50% des éléments supérieurs à mm, moins de 5% des éléments inférieurs à 0,08 mm et $C_u < 6$ alors notre sable est un sable propre mal gradué.

III.4 Sol traité :

Dans cette partie on a regroupé l'ensemble des résultats de essais mécanique (, CBR immédiat et après imbibition et Gonflement libre et cisaillement direct) des échantillons obtenus à partir des éprouvettes traitées à différents teneurs en sable siliceux (Proctor normal et modifié).

III.4.1 C.B.R immédiat et après imbibition :

Cet essai est effectué sur des éprouvettes confectionnées selon les caractéristiques optimums ($W_{op}=21\%$ et $W_{op}=15\%$.) en variant la teneur en sable siliceux.

a) C.B.R immédiat :

Le tableau III-26 présentent l'ensemble des résultats l'indices C.B.R immédiats des éprouvettes traitées à différentes teneurs en sable siliceux.

Le tableau A-24 présentent l'ensemble des résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements sont jointes en annexe.

Tableau III.26 : Valeurs de l'indice C.B.R. immédiat.

Teneur en sable siliceux	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	28,52	20,86	14,47	14,52	11,82	11,49
Indice C.B.R. immédiat à 5mm	22,30	18,89	17,77	13,99	11,10	10,15
Indice C.B.R. max	28,52	20,86	17,77	14,52	11,82	11,49

La figure III.11 Présente les forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en sable siliceux.

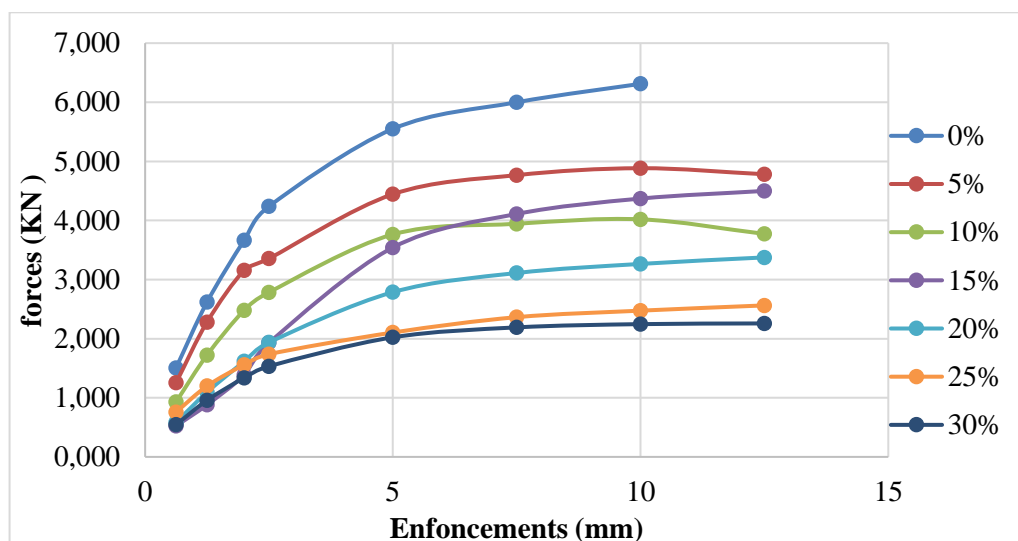


Figure III.11 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en sable siliceux (C.B.R. immédiat).

La figure III.12 Présente les courbes de variation des forces de pénétration en fonction des teneurs en sable siliceux correspondant à chaque enfoncements.

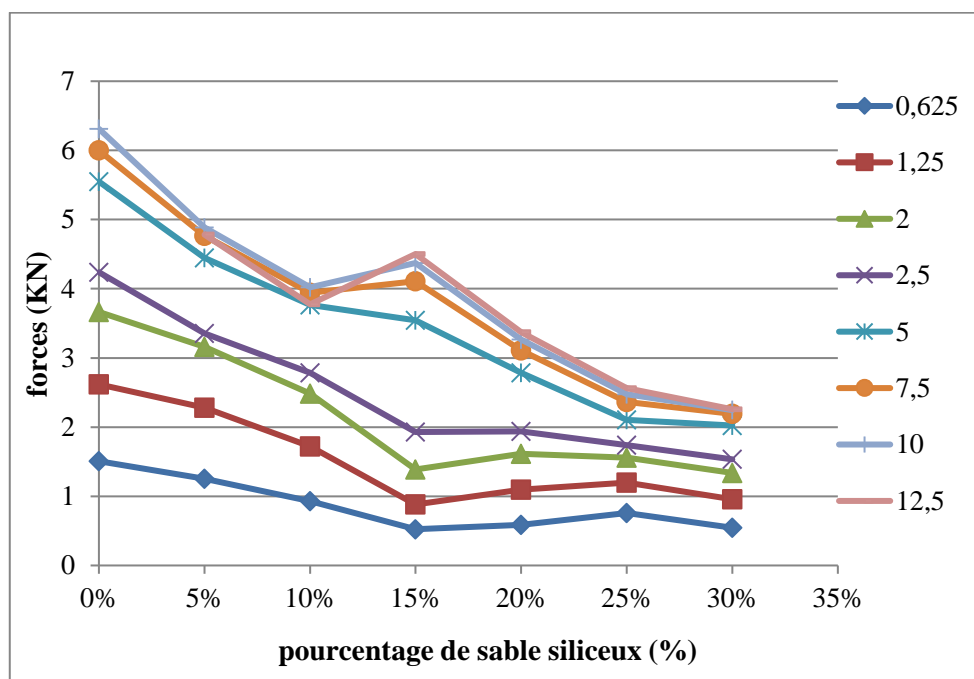


Figure III.12 : Courbes des forces en fonction des teneurs en sable siliceux de chaque enfoncement (C.B.R. immédiat)

La figure III.13 Présente Les indices C.B.R immédiat en fonction des teneurs en sable siliceux correspondant aux résultats présentés dans le tableau III.26.

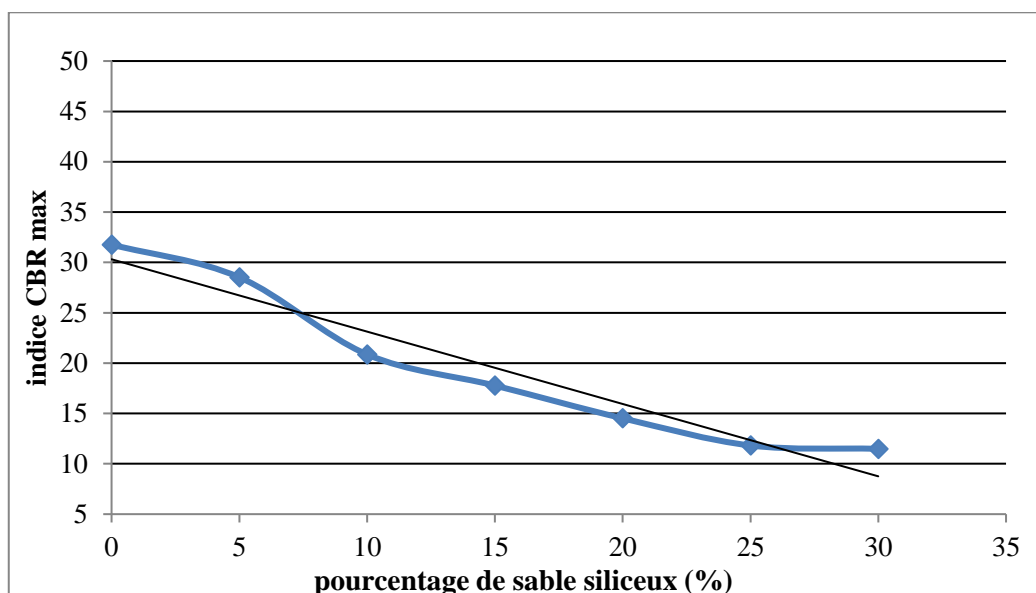


Figure III.13 : Indices C.B.R. immédiats en fonction des teneurs en sable siliceux et leur droite moyenne.

b) Essai C.B.R immédiat :

Le tableau A-25 présentent l'ensemble des résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements est jointe en annexe.

Le tableau III.27 Présentent l'ensemble des résultats des forces de pénétration en fonction, les indices C.B.R immédiats des éprouvettes traitées à différentes teneurs en sable siliceux $W_{op}=15\%$

Tableau III.27 : Valeurs de l'indice C.B.R. immédiat.

$W_{op}=15\%$	Essai 01	Essai 02	Moyenne
Pourcentage de sable siliceux	Indice C.B.R. max	Indice C.B.R. max	Indice C.B.R. max
0	91,49	71,32	81,41
5	77,42	70,77	74,10
10	84,03	74,1	79,07
15	71,55	65,65	68,60
20	68,88	66,91	67,90
25	57,49	63,15	60,32
30	52,53	61,17	56,85

Les figures III.14 Illustre les forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en sable siliceux.

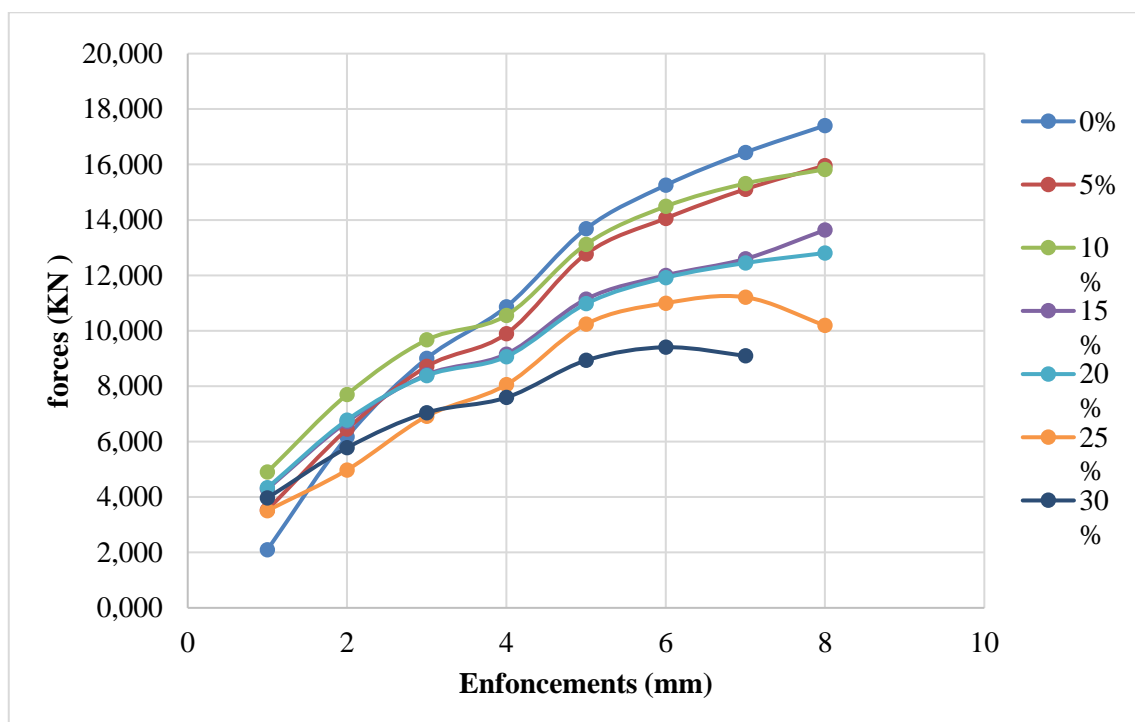


Figure III.14 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en sable siliceux (C.B.R. immédiat).

La figure III.15 Présente les courbes de variation des forces de pénétration en fonction des teneurs en sable siliceux correspondant à chaque enfoncements.

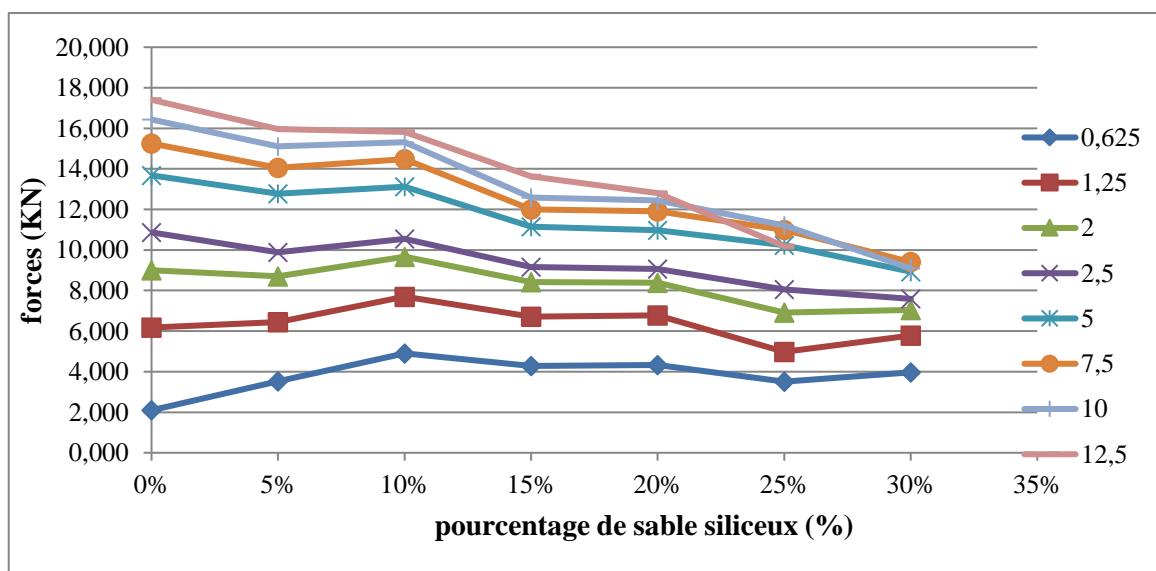


Figure III.15 : Courbes des forces en fonction des teneurs en sable de dune de chaque enfoncement (C.B.R. immédiat)

La figure III.16 Présente Les indices C.B.R immédiat en fonction des teneurs en sable siliceux correspondant aux résultats présentés dans le tableau III.27.

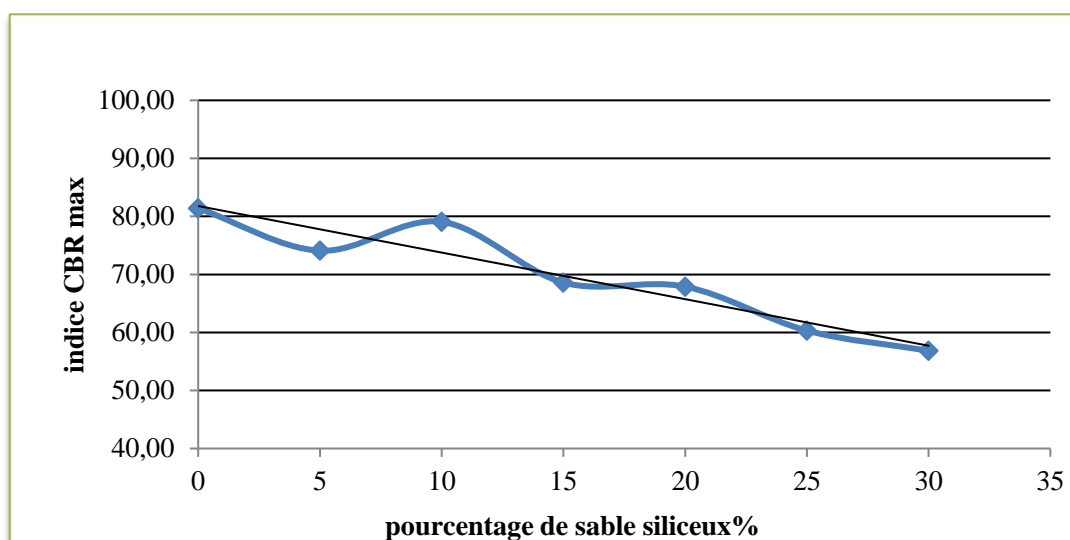


Figure III.16 : Indices C.B.R. immédiats en fonction des teneurs en sable siliceux et leur droite moyenne.

• **Interprétation des résultats :**

On remarque que dans notre cas diminution des efforts de pénétration en fonction des enfoncements est notable et s'accroît avec la teneur de sable siliceux ajoutée.

On remarque que la force de pénétration diminue en fonction des déférents sable siliceux.

Les indices de portance immédiate diminuée avec l'augmentation de la teneur de sable siliceux, donc l'efficacité du traitement est mauvaise.

III.4.1.2 : Essai C.B.R après imbibition

Le tableau III.28 Présentent les résultats d'indice C.B.R des éprouvettes traitées à différentes teneurs en sable siliceux après leur imbibition.

Tableau III .28: Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différentes teneurs en sable siliceux.

$W_{opt}=21\%$ teneurs en sable siliceux (%)	Indice C.B.R. imbibé à 2,5mm(%)	Indice C.B.R. imbibé à 5mm(%)	Indice C.B.R. max(%)
0	0,812	0,807	0,812
5	1,190	1,019	1,19
10	1,631	1,288	1,631
15	1,660	1,540	1,66
20	1,694	1,404	1,694
25	2,123	2,340	2,34
30	2,663	2,169	2,663

Les figures III.17, III.18 et III.19 Présentent respectivement les courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en sable siliceux, des forces de

pénétration en fonction des teneurs sable siliceux de chaque enfoncement et des indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en sable siliceux Correspondant aux tableaux III.28.

Le tableau A-26 présentent l'ensemble des résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements est jointe en annexe.

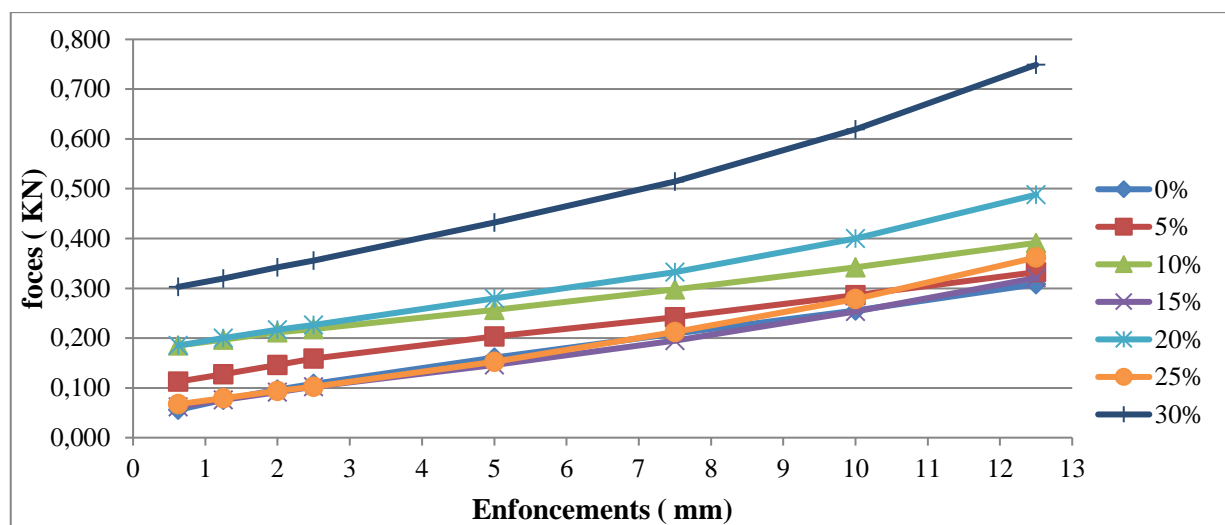


Figure III.17 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs sable siliceux (après imbibition).

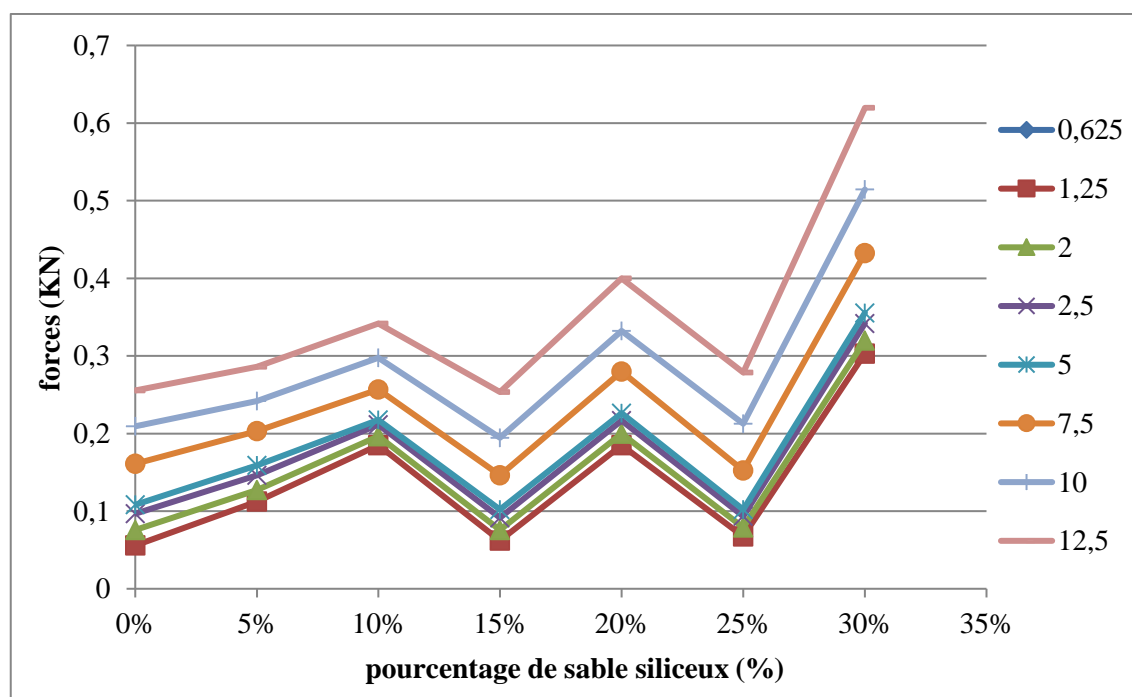


Figure III.18 : courbes des forces en fonction des teneurs en sable siliceux de chaque enfoncement (après imbibition).

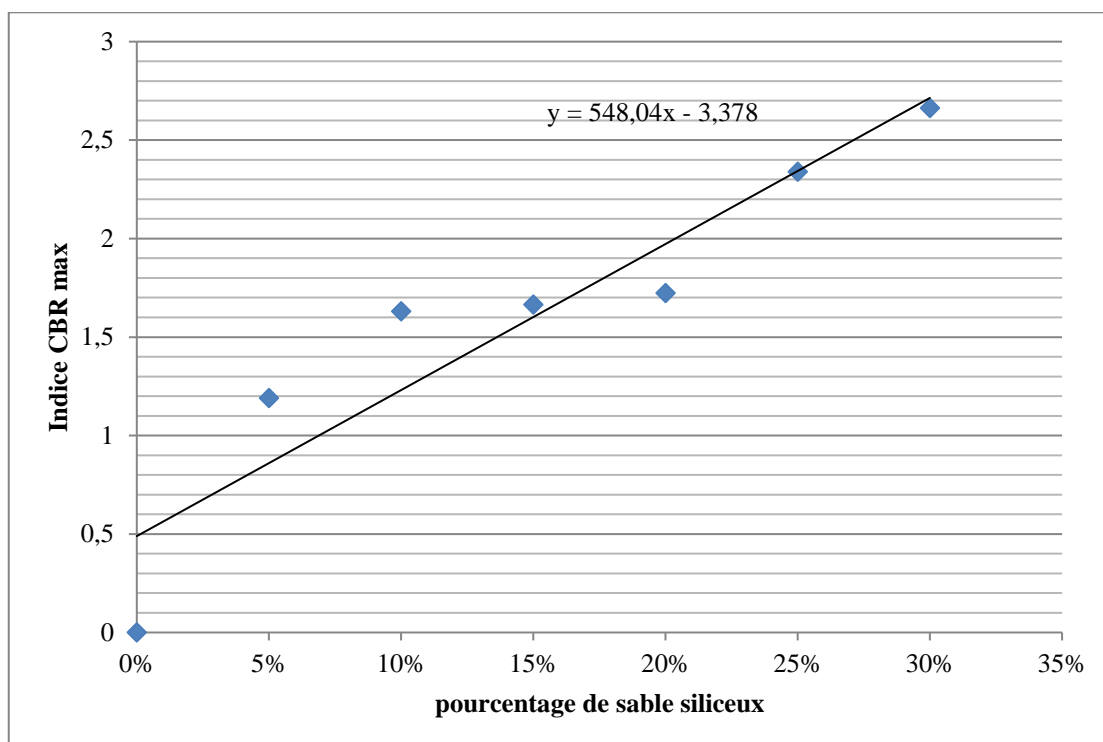


Figure III.19 : Indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en sable siliceux et leur droite moyenne.

Le tableau III.29 Suivant présente les gonflements linéaires après imbibition des éprouvettes traitées à différentes teneurs en sable siliceux après leur imbibition.

Tableau III .29 : Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différentes teneurs en sable siliceux.

Teneur en sable siliceux	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
le gonflement	8,3	7.498	6,52	6,43	5,98	4,48	3,93

La figure III.20 présente le gonflement linéaire et la teneur en eau après imbibition en fonction des teneurs sable siliceux d'après les résultats qui figurent sur le tableau III.29.

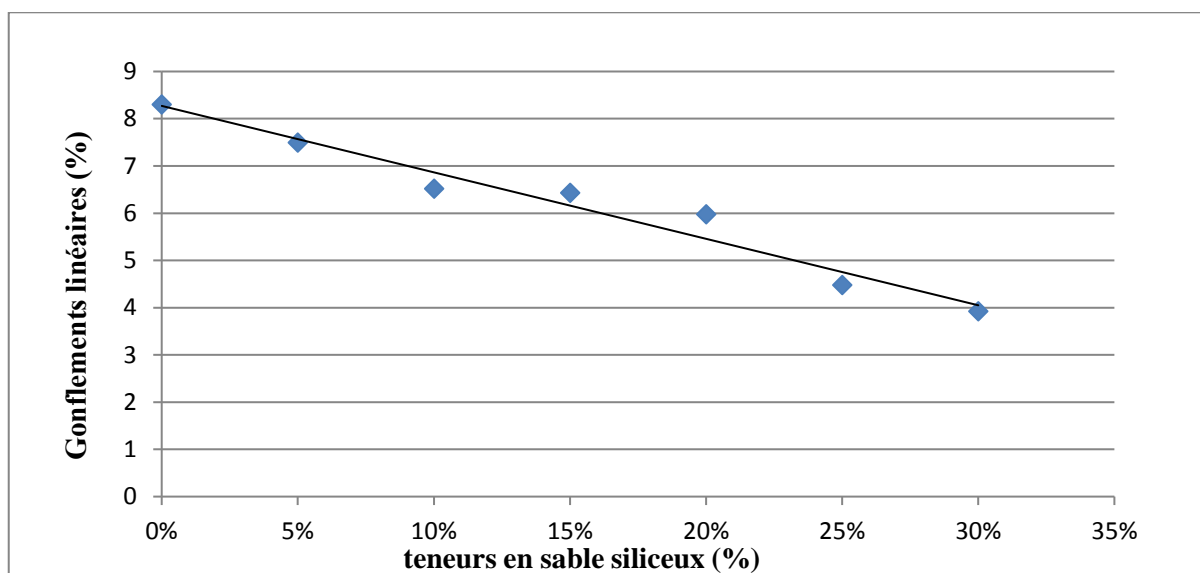


Figure III.20 : Gonflement linéaires en fonction des teneurs en sable siliceux (%) et leur droite moyenne.

Le tableau III.30 présentent les résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements et les indices C.B.R des éprouvettes traitées à différentes teneurs en sable siliceux après leur imbibition.

Tableau III.30: Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différentes teneur en sable siliceux.

teneurs sable siliceux $W_{opt15\%}$	Indice C.B.R. imbibé à 2,5mm(%)	Indice C.B.R. imbibé à 5mm(%)	Indice C.B.R. max(%)
0%	0.826	0.803	0.826
5%	1,229	1,098	1,229
10%	1,426	1,214	1,426
15%	1,497	1,288	1,497
20%	1,473	1,267	1,473
25%	2,529	2,143	2,529
30%	2,868	2,195	2,868

Les figures III.21, III.22 et III.23 Présentent respectivement les courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en sable siliceux, des forces de pénétration en fonction des teneurs en sable siliceux de chaque enfoncement et des indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en sable siliceux correspondant aux tableaux III.30.

Le tableau A-27 présentent l'ensemble des résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements est jointe en annexe.

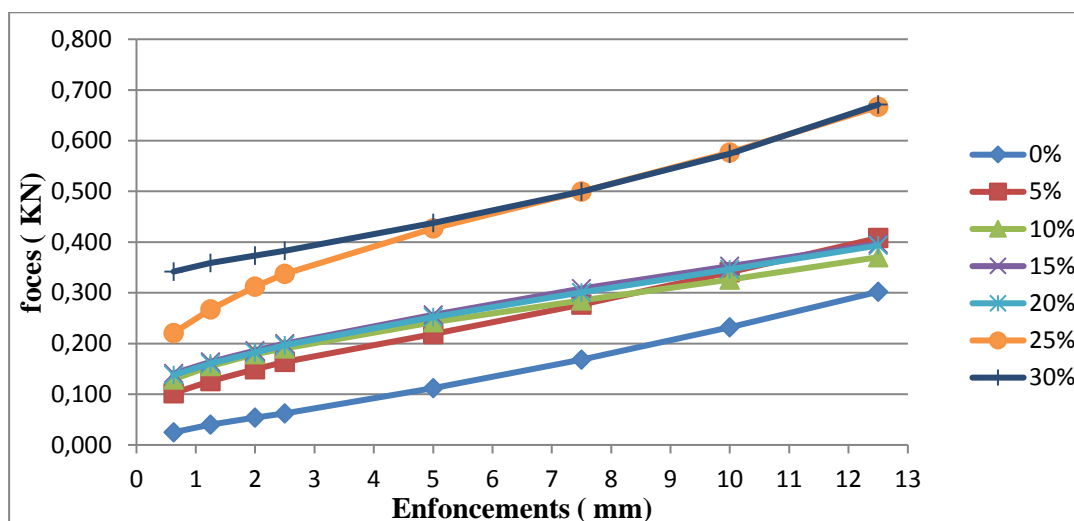


Figure III.21 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en sable siliceux (après imbibition).

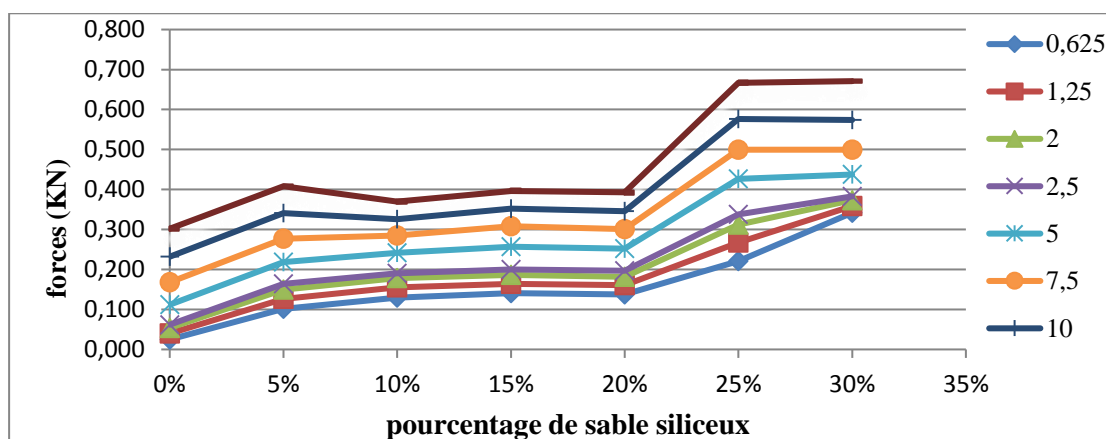


Figure III.22 : courbes des forces en fonction des teneurs en sable siliceux de chaque enfoncement (après imbibition).

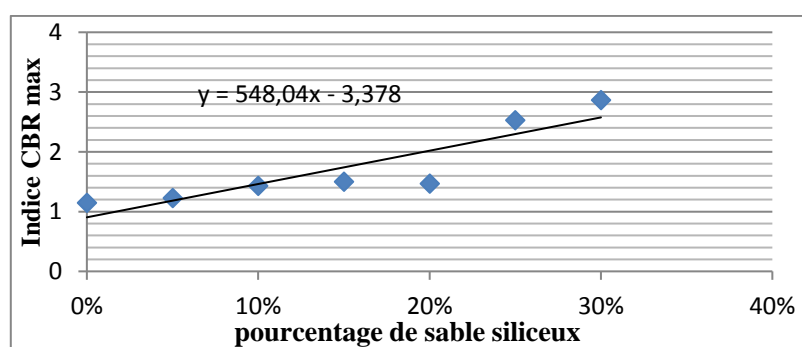


Figure III.23 : Indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en sable siliceux et leur Droite moyenne.

Le tableau III.31 Suivant présente les gonflements linéaires après imbibition des éprouvettes traitées à différentes teneurs en sable siliceux.

Tableau III.31 : Résultats des gonflements linéaires après imbibition pour différentes teneurs en sable siliceux.

Teneur en sable siliceux	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
le gonflement	13,77	10,69	10,35	8,05	8,35	8,78	7,92

La figure III.24 Présente le gonflement linéaire et la teneur en eau après imbibition en fonction des teneurs sable siliceux d'après les résultats qui figurent sur le tableau III.30.

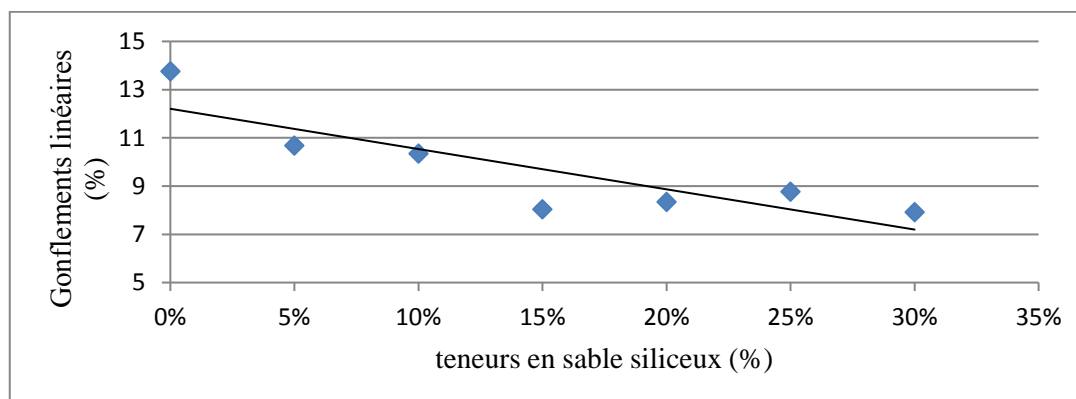


Figure III.24 : Gonflement linéaires en fonction des teneurs en sable siliceux et leur droite moyenne.

- Interprétation des résultats :**

On remarque que l'augmentation des efforts de pénétration en fonction des enfoncements est notable et s'accroît avec la teneur en sable siliceux ajoutée.

On observe une augmentation notable de l'indice de portance après imbibition due au traitement du sol qui varie de 0,812 pour le sol non traité à 2,663 pour le sol traité à 30 % de sable siliceux dans le cas du Procter normal et de 0,826 pour le sol non traité à 2,868 pour le sol traité à 30 % de sable siliceux dans le cas du Procter modifié.

On remarque que le gonflement diminue en effet avec l'augmentation de la teneur en sable siliceux qui commence de 8,3% pour le sol non traité et arrive à 3,93% pour une teneur en sable siliceux de 30% et puis il diminue en 13,77% à 7,92% dans les deux cas ($W_{opt15\%}$ $W_{opt21\%}$) respectivement, cette diminution est due au l'excès de sable siliceux, ce qui justifie l'efficacité du traitement.

III.4.2. Gonflement libre :

Le tableau III.32 présente les résultats des essais de gonflement libre effectués sur teneurs en sable siliceux.

Les courbes des résultats des essais de gonflement libre sont figurées (A-19 à A-30) en annexe.

Tableau III.32 : Résultats des essais de gonflement pour différentes teneurs en sable siliceux (Proctor normal)

Echantillon	Profondeur	γ_h (g/cm ³)	W (%)	γ_d (g/cm ³)	e_0 (mm)	e_f (mm)	ε_g (%) = ($e_f - e_0$)/ e_0	P_g (kpa)
0%	1,95	1,86	22,61	1,51	0,75	0,96	28,05	380
5%	1,95	1,88	18,95	1,58	0,68	0,85	25,98	320
10%	1,95	1,77	22,61	1,44	0,83	1,03	23,98	280
15%	1,95	1,72	19,44	1,44	0,84	1,03	22,83	265
20%	1,95	1,91	21,84	1,57	0,69	0,83	20,75	245
25%	1,95	1,91	21,30	1,58	0,68	0,80	17,90	220
30%	1,95	1,78	23,17	1,44	0,83	0,98	17,04	212

La figure III.25 Présente de l'amplitude de gonflement pour différentes teneurs en sable siliceux.

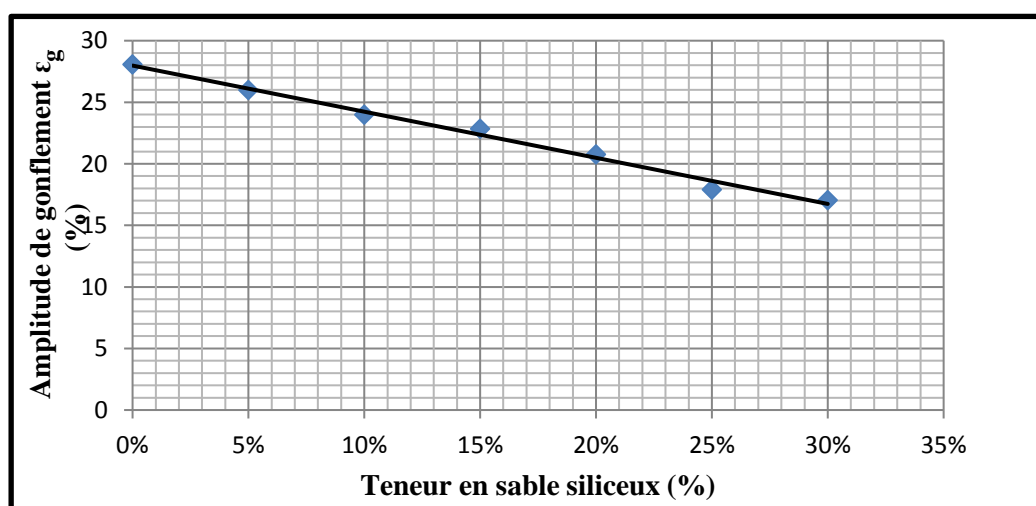


Figure III.25 : Courbes Amplitude de gonflement pour différentes teneurs en sable siliceux.

La figure III.26 Présente Pression de gonflement pour différentes teneurs en sable siliceux.

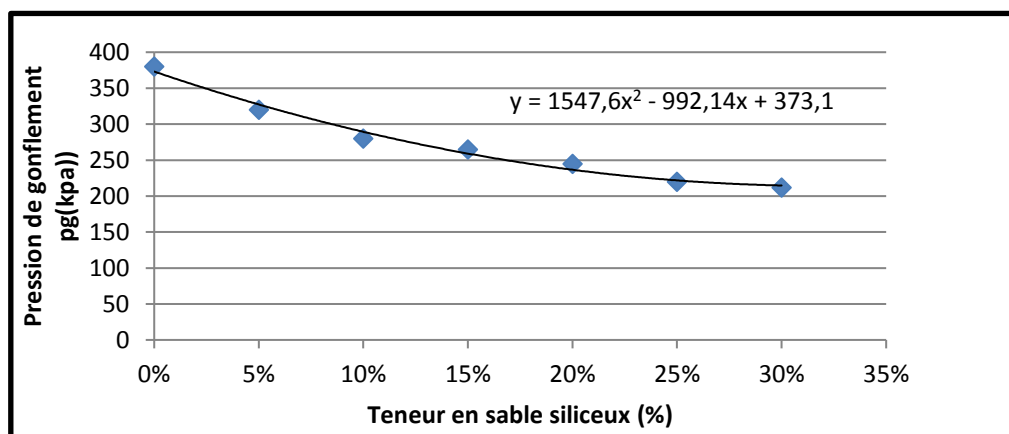


Figure III.26 : Courbes pression de gonflement pour différentes teneurs en sable siliceux.

Interprétation des résultats :

On peut noter que la pression de gonflement de cette argile et le gonflement libre correspondant diminuent d'une manière appréciable avec le dosage en sable siliceux. Cette cependant, pour cette argile, les relations de Nayak et de Christensen (1974) et de Seed et al. (1962) semblent être les mieux adaptées pour calculer respectivement la pression de gonflement et le gonflement linéaire correspondant (ce tableau se trouve dans la page 13) ainsi selon la classification de Seed et al. (1962), le gonflement linéaire passe de très élevé ($\varepsilon_g > 28\%$) à moyen ($\varepsilon_g < 17,5\%$).

III 4.3.1 : Essai de cisaillement :

L'essai de cisaillement est effectué sur un échantillon compacté à l'optimum Proctor normal ($W_{op}=21$) et à des contraintes verticales σ (KPa) de confinement de 50, 100 et 200.

Les courbes des résultats des essais de cisaillement direct sont figurées (A-31 à A-33) en annexe.

L'influence de l'ajout de sable de dune sur les paramètres mécaniques est importante, on peut tirer des constatations de la figure 27.

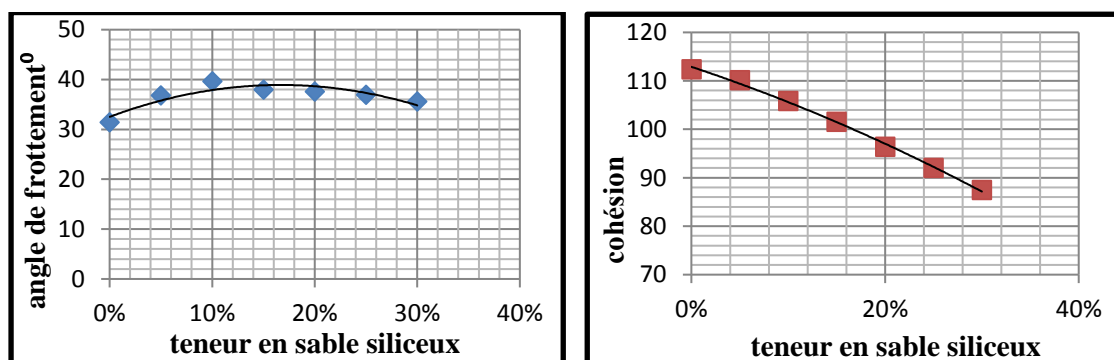


Figure III.27 : Influence de l'ajout de sable siliceux sur les paramètres mécaniques.

Le tableau III.33 regroupe les résultats des essais de résistance au cisaillement des du sol.

Tableau III.33 : résultats des essais de cisaillement de pour différentes teneurs en sable siliceux

Contrainte verticale σ (kpa)	Teneur en sable siliceux %	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
50	d_h (mm)	4,73	3,72	5,28	3,8	4,95	3,22	3,72
	N (N)	504,66	502	663	464	473	501	461
	τ (KPa)	140,18	220	231,38	196,94	147,22	210	152
100	d_h (mm)	4,28	5,007	4,99	4,29	3,172	3,87	4,05
	N (N)	639	792	833	709	530	757	547
	τ (KPa)	177,5	139,44	184,16	128,88	131,38	139	128
200	d_h (mm)	4,89	3,72	4,47	4,28	3,66	3,41	3,72
	N (N)	439,16	937	1289	906	782	945	839
	τ (KPa)	233,14	260,27	358,05	251,66	217,22	263	233
Moyenne	C (kN/m ²)	112,36	110,1	105,87	101,53	96,38	92,1	87,5
	ϕ°	31,41	36,79	39,57	37,94	37,56	36,9	35,6

La figure III.28 présente la variation de l'effort de cisaillement maximal des trois couches étudiées en fonction de la teneur en sable siliceux.

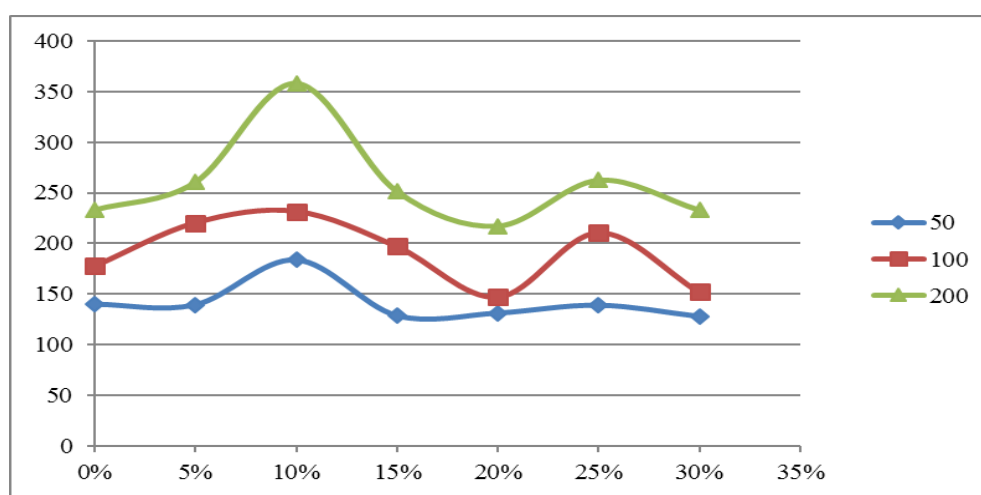


Figure III.28 : contrainte tangentielle de cisaillement maximal de différente contrainte verticale pour différentes teneurs en sable siliceux.

III 4.3.2 : Essai de cisaillement :

L'essai de cisaillement est effectué sur un échantillon compacté à l'optimum Proctor modifié ($W_{op}=15\%$) et à des contraintes verticales σ (kpa) de confinement de 50, 100, 200 et 400

Les courbes des résultats des essais de gonflement libre sont figurées (A-34 à A-37) en annexe.

Le tableau III.34 regroupe les résultats des essais de résistance au cisaillement des sols.

Tableau III-34 : Résultats des efforts et contrainte tangentielle de cisaillement maximaux et les paramètres mécaniques pour différentes teneurs en sable siliceux.

σ (kpa)	Teneur en sable siliceux%	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
50	d_h (mm)	4,12	3,34	3,41	3,06	2,23	3,19	5,05
	N (N)	525	677	716	665	713	809	527
	τ (kpa)	205,3	188,05	204,16	184,72	198,88	224,72	156,94
100	d_h (mm)	3,24	3,307	3,29	3,03	2,02	3,048	4,76
	N (N)	886,5	945	890	1021	958	944	814
	τ (kpa)	259,44	262,5	266,66	283,61	247,22	262,22	205,27
200	d_h (mm)	3,82	3,77	3,07	3	3,9	3,36	5,05
	N (N)	1120,5	1043	978	1120	1123	1147	1187
	τ (kpa)	332,22	289,72	271,66	311,94	271,66	318,61	329,72
400	d_h (mm)	4,12	2,3	4,12	4,17	4,01	2,82	3,88
	N (N)	1377,5	1396	1483	11734	1819	1620	1547
	τ (kpa)	376,94	380,27	411,94	497,77	450,83	450	429,72
moyenne	C (kN/m ²)	205,45	187,26	168,13	164,05	162,13	161,15	144,57
	ϕ°	24,83	26,35	39,00	39,65	40,16	34,94	36,95

L'influence de l'ajout de sable siliceux sur les paramètres mécaniques est importante, on peut tirer des constatations de la figure III.29.

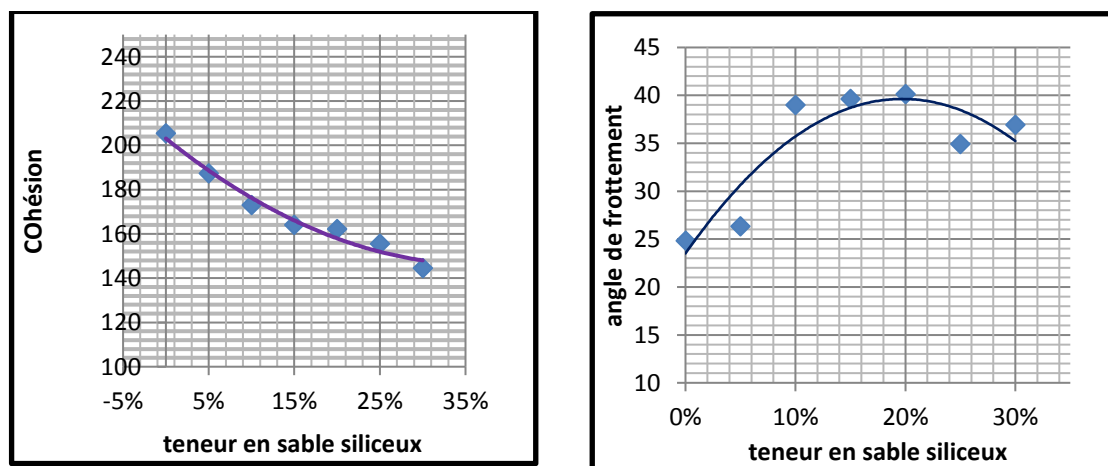


Figure III.29 : Influence de l'ajout de sable siliceux sur les paramètres mécaniques.

La figure III.30 présente la variation de contrainte tangentielle de cisaillement maximal des quatre contraintes vertical étudiées en fonction de sable siliceux.

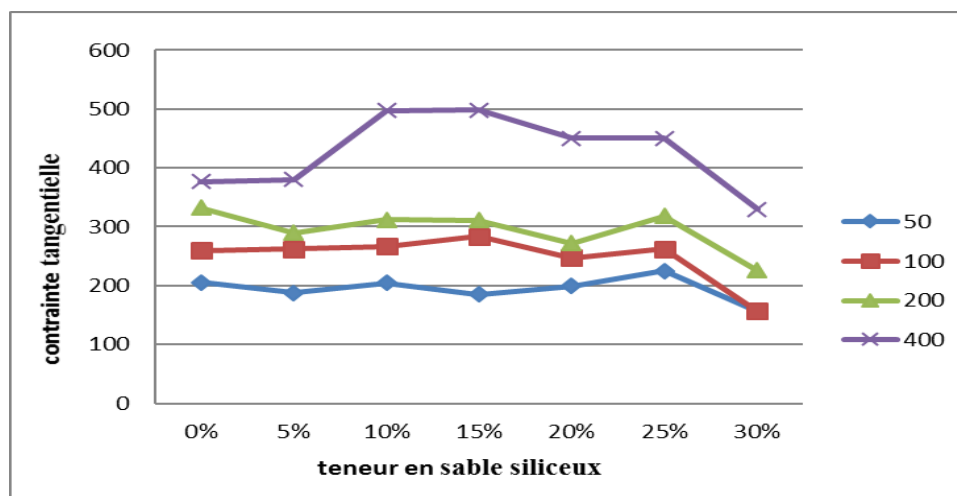


Figure III.30: contrainte tangentielle de cisaillement maximal de différente contrainte verticale pour différents teneurs en sable siliceux.

Interprétation des résultats :

On peut noter que la résistance du cisaillement non drainée de l'argile traitée au sable siliceux puis compactée aux conditions de l'optimum Proctor, augmentation avec le dosage en stabilisant. Cette augmentation se traduit par une nette amélioration de son angle de frottement interne qui passe de 31,41 pour l'argile non traité à 37,94 pour 15% de stabilisant et 112,36 une diminution de la cohésion qui passe de 112,36 kn/m^2 .

Dans le cas du sol témoin à 87,5 kn/m^2 pour 30% de sable siliceux dans le cas du Proctor normal, par contre dans le cas du Proctor modifié l'angle de frottement passe à 40,16 pour 20% de stabilisant et la cohésion diminue jusqu'à une valeur de 144,57 kn/m^2 pour 30% de sable siliceux.

Synthèse

L'étude effectuée avait pour finalité de caractériser le comportement en laboratoire d'une argile naturelle expansive traitée par ajout de sable siliceux en vue de son utilisation en construction. Le choix du site urbain de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila) a été motivé en raison de son extension vers des zones à risque où d'importants désordres apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voiries et réseaux divers et dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur.

Le sol testé a été identifié comme une argile marneuse très plastique. Les différentes classifications basées sur les propriétés géotechniques montrent que cette argile naturelle est caractérisée par des potentiels de gonflement et de retrait élevés à très élevé ; le gonflement et le retrait étant pour partie dûs à la structure minéralogique des sols (teneur élevée en montmorillonite) et aux variations de leur teneur en eau (cycles de dessiccation-humidification des sols).

Le traitement de cette argile été effectué en utilisant un sable siliceux provenant des dunes de Bou-saada) . Les résultats d'essais obtenus permettent de conclure que le traitement conduit à une amélioration sensible des propriétés mécaniques de l'argile expansive compactée aux conditions de l'optimum Proctor. Les résultats obtenus semblent indiquer que les traitements permettent :

- de diminuer l'indice de plasticité, la valeur de bleu du sol, la pression de gonflement et le gonflement libre correspondant : l'argile devient non expansive et mieux compactable ;
- d'accroître les indices de portance (indices CBR immédiat et imbibé), permettant d'accroître la portance de l'argile en place comme en laboratoire et de réduire de ce fait son expansibilité ;
- d'augmenter la résistance au cisaillement de l'argile, donc de sa capacité portante.

Les performances acquises par cette argile expansive traitée par ajout de sable siliceux lui procurent stabilité, durabilité et meilleure résistance.