

Chapitre III

Présentation et analyse des résultats d'essais

III.1 : Introduction :

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

Une première partie concernant le sol non traité, qui comporte les essais d'identification (analyses chimique, paramètres d'état, granularité, limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène), les essais de caractérisation (Proctor normal et modifié, l'indice de portance immédiat avant et après imbibition et enfin les mesures ultrasoniques).

Une deuxième partie portant sur le sol traité à différents dosages en ciment, qui regroupe des essais d'identification (bleu de méthylène, limites d'Atterberg) et des essais de caractérisation (Proctor normal et modifié, essai de CBR immédiat et après imbibition et enfin les mesures ultrasoniques).

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

III.2 : Sol non traité :

Cette partie présente en premier lieu les résultats des essais d'identification (analyse chimique, paramètres d'état, granularité, limites d'Atterberg et l'essai au bleu de méthylène), la classification du sol étudié selon la classification LCPC (Magnan, 1980), la norme française NF P11-300 et le guide de travaux routiers (GTR), ensuite les résultats des essais de caractérisation (Proctor normal et modifié, la portance immédiate avant et après imbibition enfin les mesures ultrasoniques).

III.2.1: Essais d'identification :

III.2.1.1 : Analyse chimique :

Les résultats de cette analyse sont représentés sur la figure III.1

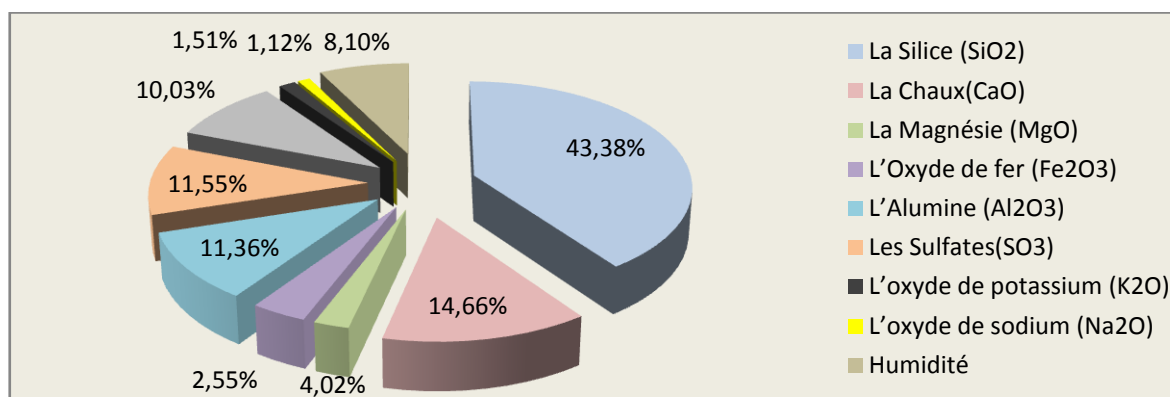


Figure III.1 : Analyse chimique de l'argile étudiée.

III.2.1.2 : Paramètres d'état:

Le tableau III.1 Présente les résultats des essais de paramètre d'état.

Volume du moule	25 cm ³		50 cm ³		100 cm ³	
Numéro du moule	1A	1B	2A	2B	3A	3B
Masse humide totale (g)	406.67	400.94	562.19	559.73	927.57	921.85
Masse sèche totale (g)	401.33	396.14	551.93	549.69	908.82	903.77
Masse du moule (g)	348.03	356.13	458.36	456.60	722.05	711.26
Masse du sol humide (g)	58.64	44.81	103.83	103.13	205.52	210.59
Masse du sol sec (g)	53.30	40.01	93.57	93.09	186.77	192.51
Teneur en eau W_{nat} (%)	10.01	11.99	10.96	10.78	10.03	9.39
Masse volumique humide γ_h (g/cm ³)	2.34	1.79	2.06	2.06	2.05	2.10
Masse volumique sèche γ_d (g/cm ³)	2.13	1.6	1.87	1.86	1.86	1.92
W_{nat} : moyenne (%)	10.52					
γ_d : moyenne (g/cm ³)	1.87					
γ_h : moyenne g/cm ³)	2.06					

Tableau III.1 : Résultats des paramètres d'état.

III.2.1.3 : Analyse granulométrique :

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification (norme NF P 94-041 pour l'analyse par tamisage et norme NF P 94-057 pour l'analyse par sédimentométrie).

Le tableau III.2 est issu de trois essais d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie.

Tamis (mm)	Tamisats (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy
5	99.77	99.23	99.97	99.66
2	98.93	98.50	98.60	98.68
1	98.47	98.17	97.53	98.06
0,4	97.83	97.37	96.57	97.26
0.2	97.33	96.97	96.03	96.78
0,1	97.23	96.90	95.90	96.68
0,08	96.93	96.50	95.50	96.31
0.068	95.60	95.60	95.60	95.60
0.048	95.60	93.69	93.69	94.33
0.034	95.60	92.16	92.54	93.43
0.020	95.60	91.78	91.78	93.05
0.014	93.69	89.87	89.48	91.01
0.010	88.72	87.95	87.95	88.21
0.007	87.95	84.13	84.89	85.66
0.005	80.31	80.31	81.07	80.56
0.003	72.66	73.42	71.89	72.66
0.001	57.36	61.19	53.68	57.41

Tableau III.2 : Résultats des essais de l'analyse granulométrique.

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

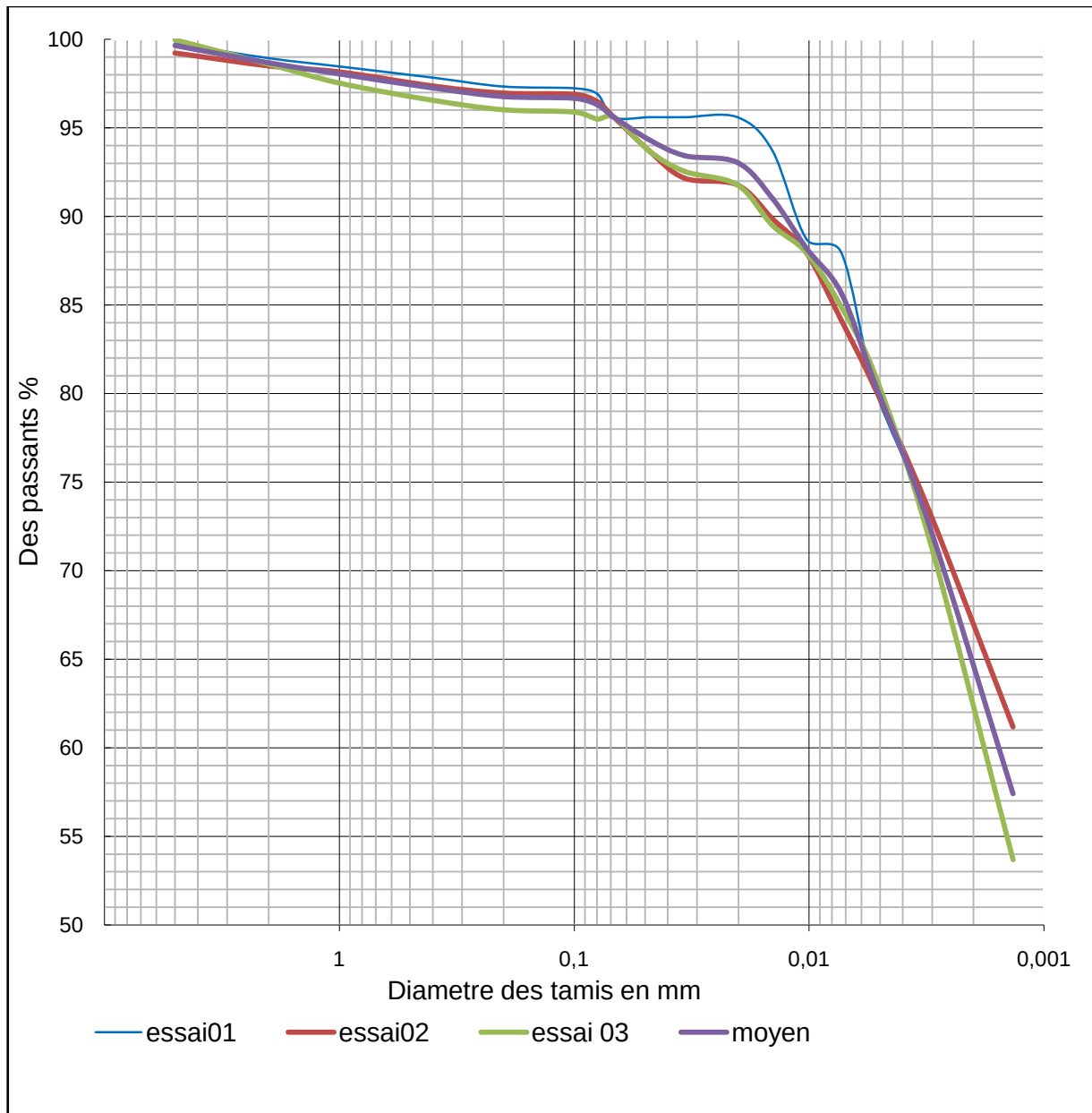


Figure III.2 : Courbe de l'Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.

III.2.1.4 : Les limites d'Atterberg :

Les limites de liquidité et de plasticité, dites limites d'Atterberg ou limites de consistance, sont des paramètres géotechniques destinés à identifier les sols, caractériser leur consistance et permettre de ce fait de les classer (NFP 94-051).

Les tableaux A.1 à A.6 qui présentent des valeurs des limites de liquidité, des limites de plasticité et des indices de plasticité cours pondant aux différents teneurs de ciment sont jointes en annexe.

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

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
Limite de liquidité %	76.58	74.02	78.37	76.32
Limite de plasticité %	29.15	30.23	31.45	30.28
Indice de plasticité	47.43	43.79	46.92	46.05

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

La figure III.4 Présentée la classe de sols étudiée selon l'abaque de Casagrande

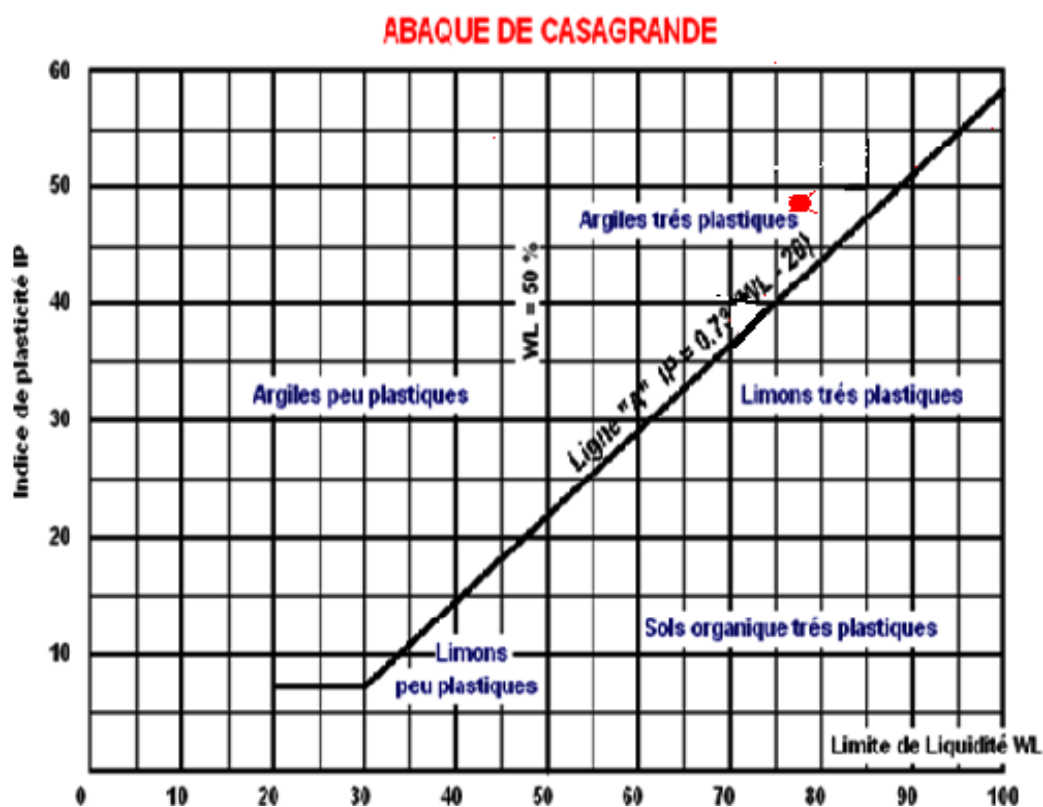


Figure III.3 : Diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert.1997).

III.2.1.5: L'essai au bleu de méthylène :

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse (NF P 94-068).

	Essai 01	Essai 02	Essai 03
Volume de la solution (cm³)	240.00	243.00	239.00
VBS (cm³/g)	8.00	8.10	7.97
Moyenne	8.02		
La surface spécifique (m²/g)	168.00	170.10	167.37
Moyenne	168.42		

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

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

Profondeur (m)	2.50-3.00
Teneur en eau naturel $W_{nat}(\%)$	10.52
Poids volumique humide $\gamma_h(g/cm^3)$	2.06
Poids volumique sec $\gamma_d(g/cm^3)$	1.87
Limite de liquidité w_L	76.32
Limite de plasticité w_p	30.28
Indice de plasticité I_p	46.05
Valeur de Bleu de méthylène VBS	8.02
la surface spécifique (m ² /g)	168.42
Passants à 2mm (%)	98.68
Passants à 0,2mm (%)	96.78
Passants à 80µm (%)	96.31
Passants à 2µm (%)	65.03
Indice de consistance I_c : $I_c = (w_L - w)/I_p$	1.42
Activité de la fraction argileuse (A_c) $A_c = I_p/C_2$	0.71

Tableau III.5 : Récapitulatif des caractéristiques d'identification du sol témoin étudié.

III.2.2: Interprétation des résultats des essais d'identification :

D'après les résultats de l'analyse chimique nous remarquons que les éléments prépondérants sont la silice et l'alumine, ces deux éléments constituent la structure des argiles, donc il s'agit d'argile avec la présence d'impuretés comme l'oxyde de fer, les sulfates et la chaux.

La teneur en Silice (< 50%), reflète la faible présence de sable cette teneur en Silice reste inférieure à 80%, qui est la frontière entre les sols gonflants et non gonflants.

Selon la courbe de l'essai analyse granulométrique plus de 50% des éléments ici 96.31% ont un diamètre < a 80 μm , en plus le pourcentage d'est éléments inférieurs a 2 μm est 65%. Donc il s'agit une argile très fine. la limite de liquidité supérieure a 75% et l'indice de plasticité I_p est de 46.05%

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

Selon la classification LCPC en vigueur (Magnan;1980), il s'agit d'une argile très plastique très consistante avec une activité importante de sa fraction argileuse qui indique la présence de montmorillonite calcique. Les modifications de la teneur en eau de ce type de sol sont généralement accompagnées de retrait ou gonflement considérable.

D'après les résultats obtenus la valeur de bleu de l'argile est supérieure à 8 donc cette argile se classe parmi les sols très argileux selon la norme française NF P 11-300.

La surface spécifique est de 168.42 dépasse largement 100 m^2/g ce qui implique que notre argile est constituée essentiellement de minéraux de type vermiculite, qui sont des argiles gonflantes.

III.2.3 : Classification selon le potentiel de gonflement :

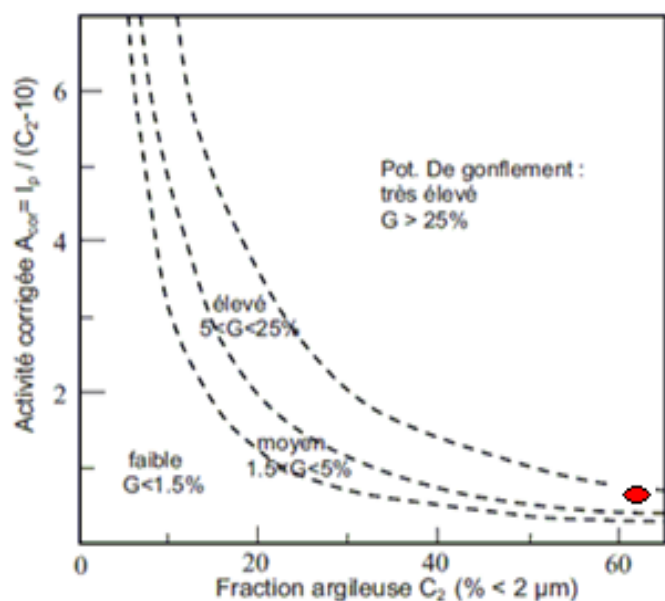
On peut classer aussi l'argile étudiée selon le potentiel de gonflement en se basant sur les résultats trouvés par Benhamidouche et al. (2012), on a adopté pour cela:

- La classification seed et al, 1962
- La classification de Williams et Donaldson, 1980
- Dakshanamurthy et raman. (1973) et Chen (1988).
- La classification de Building Research Establishment BRE (1980).
- La classification de Bigot et Zerhouni, 2000

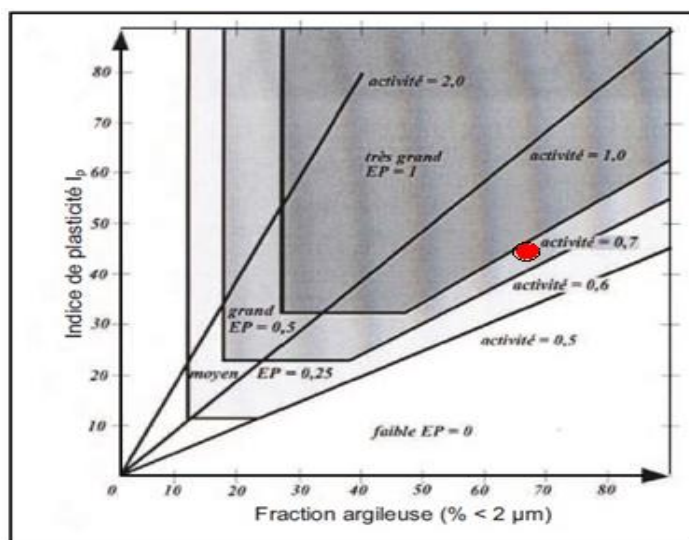
La figure III.4 et les tableaux III.6, III.7 donnent classification du sol étudié en fonction des paramètres d'identification

IP (%)	% < 80 μ m	VBS	Susceptibilité de variation de volume du sol
(46.05) > 30	(96.31) > 90	(8,02) > 6	Fort
15 < IP < 30	> 50	2 > VBS > 6	Moyen
< 15	< 50	< 2	Faible

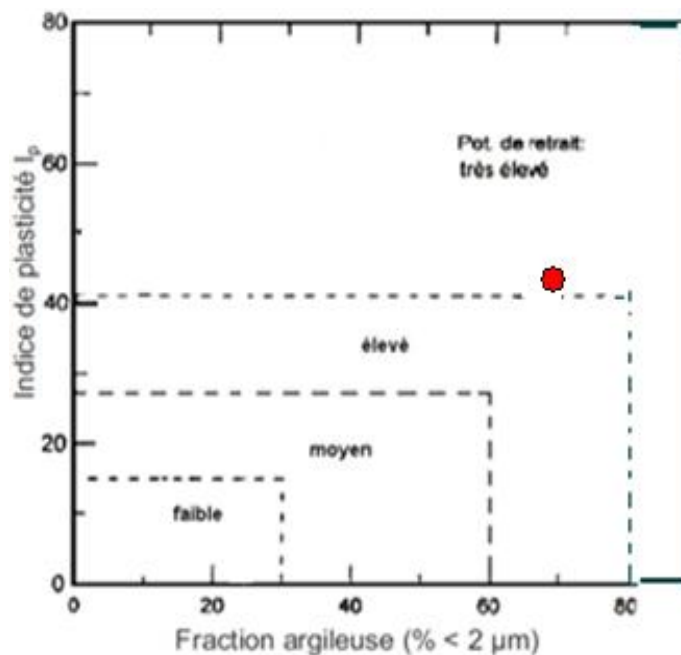
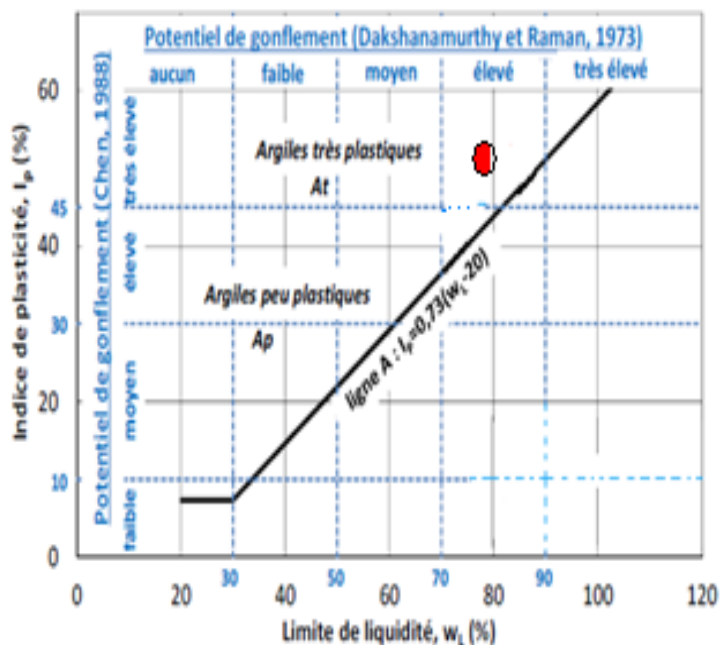
Tableau III.6 : Bigot et Zerhouni (2000).



Seed et al. (1962) ... (1)



Williams et Donaldson (1980) ... (2)



Dakshanamurthy et raman. (1973) et Chen (1988). (3) Building Research Establishment (1980). (4)

Figure III.4 : Classification du sol étudié en fonction des paramètres d'identification.

Le tableau III.7 présente les résultats de classification par les méthodes qui ont été proposés dans la littérature pour évaluer à priori le potentiel de gonflement d'un sol à partir de la mesure des paramètres d'identification.

Classification	Potentiel de gonflement	Potentiel de retrait
seed et al, 1962 (diagramme)	élevé	
Williams et Donaldson (1980)	Très Grand	
Dakshanamurthy et raman. (1973) et Chen (1988)	élevé très plastique	
Building Research Establishment BRE (1980)		Très à élevé
Bigot et Zerhouni (2000)	Fort	

Tableau III.7: Classification selon le potentiel de gonflement.

III.2.4 : Essais de caractérisation :

III.2.4.1-1: Essais Proctor normal :

Le tableau III.8 Présente les densités sèches en fonction des teneurs en eau à différentes teneur en eau.

Les tableaux A.7 à A.11, qui sont joints en annexe présentent les détails des résultats obtenus

	Essai 1				
Masse volumique sèche γ_d	1.51	1.54	1.55	1.55	1.53
Teneur en eau w(%)	16.76	18.47	21.71	22.89	25.00
	Essai 2				
Masse volumique sèche γ_d	1.52	1.55	1.56	1.54	1.53
Teneur en eau w(%)	16.12	18.45	20.19	23.97	24.61
	Essai 3				
Masse volumique sèche γ_d	1.50	1.52	1.54	1.54	1.53
Teneur en eau w (%)	16.51	18.60	21.15	22.65	24.61

Tableau III.8 : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin.

La figure III.5 Présente les masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau.

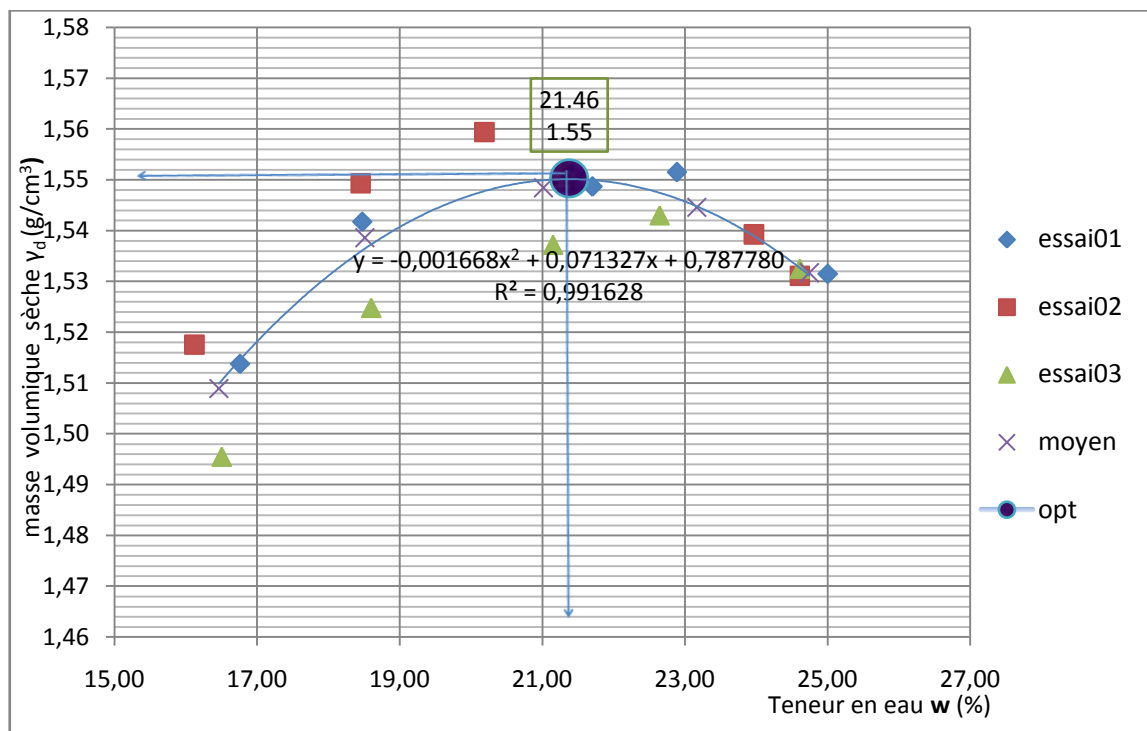


Figure III.5 : Résultats des essais Proctor normal.

Le tableau III.9 présente une récapitulation des trois essais de Proctor normal.

	Essai 1	Essai2	Essai3	Moyenne
Masse volumique sèche Maximale $\gamma_{d \text{ Max}}$ (g/cm^3)	1.55	1.56	1.54	1.55
Teneur en eau optimale w_{optn} (%)	21.44	20.76	22.18	21.46
Degré de saturation (%)	78.41	76.68	79.67	78.26

Tableau III. 9 : Récapitulation de l'essai Proctor normal.

La valeur de la teneur en eau optimale est de $w_{\text{optn}} = 21.46\%$ et la masse volumique sèche correspondant à l'optimum Proctor normal est de $\gamma_{d \text{ max}} = 1,55 \text{ g/cm}^3$ et le degré de saturation $S_r = 78,26\%$.

III.2.3.1-2: Essais Proctor modifié :

Le tableau III.10 présente les masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau à différentes teneur en eau.

Les tableaux A.12, A.13 et A.14, qui sont joints en annexe présentent les détails des résultats obtenus.

	Essai 1				
Masse volumique sèche γ_d	1.73	1.75	1.79	1.78	1.77
Teneur en eau $w(\%)$	7.97	10.67	13.19	16.45	19.30
	Essai 2				
Masse volumique sèche γ_d	1.75	1.78	1.79	1.79	1.77
Teneur en eau $w(\%)$	6.35	9.12	12.07	16.05	19.20
	Essai 3				
Masse volumique sèche γ_d	1.72	1.75	1.79	1.78	1.77
Teneur en eau $w(\%)$	6.60	9.48	13.34	16.08	18.08

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

La figure III.6 présente les masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau.

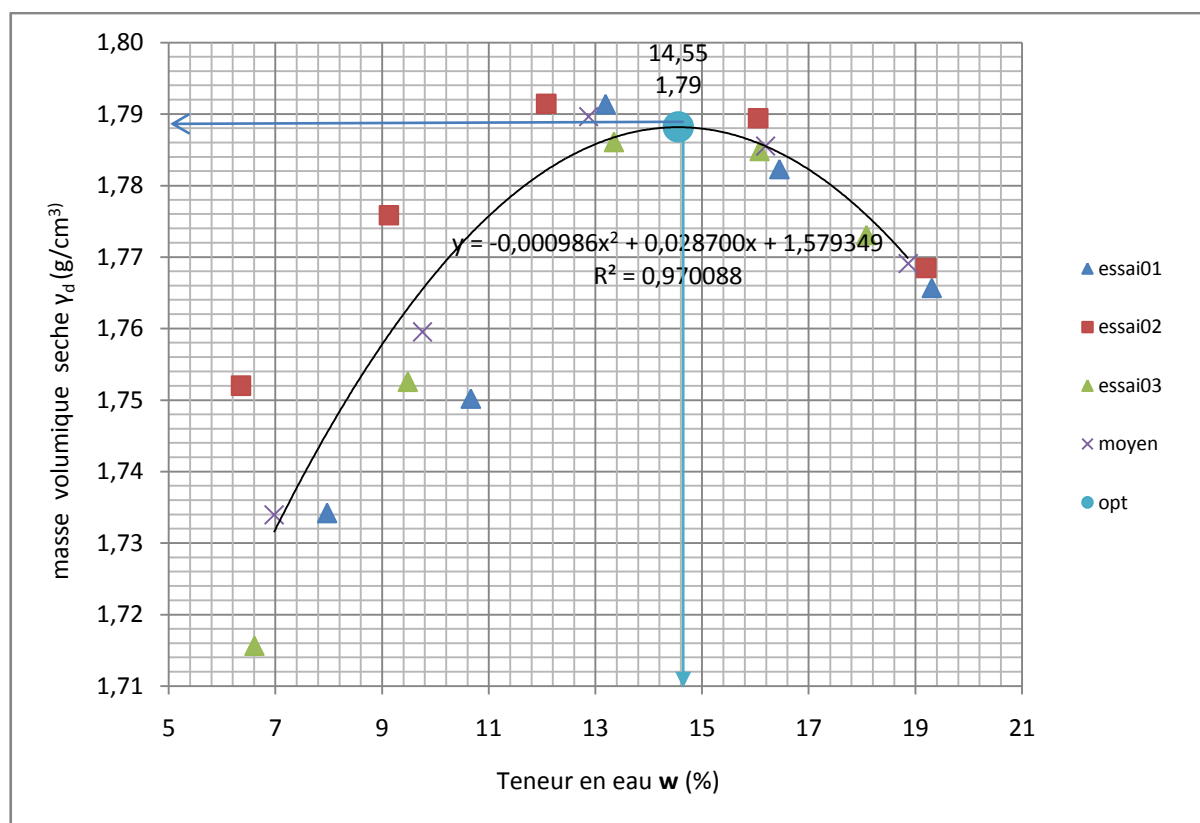


Figure III.6 : Résultats des essais Proctor modifié.

Le tableau III.11 présente une récapitulation aux trois essais de Proctor modifié

	Essai 1	Essai2	Essai3	Moyenne
Masse volumique sèche Maximale $\gamma_{d \text{ Max}}$ (g/cm ³)	1.78	1.81	1.79	1.79
Teneur en eau optimale w_{optm} (%)	15.15	13.51	14.76	14.55
Degré de saturation (%)	79.79	73.87	77.89	77.18

Tableau III.11 : Récapitulation de l'essai Proctor modifié.

La valeur de la teneur en eau optimale est de $w_{\text{optm}} = 14.55\%$, et la masse volumique sèche correspondant à l'optimum Proctor modifié est de $\gamma_{d \text{ max}} = 1,79 \text{ g/cm}^3$ et le degré de saturation $S_r = 77.18\%$.

III.2.3.2: Essai de portance C.B.R:

III.2.3.2.1: C.B.R immédiat :

Les tableaux III.12 et III.13 Présentent les valeurs des forces de pénétration en fonction des enfoncements et de l'indice C.B.R. immédiat d'une éprouvette témoin confectionnée aux caractéristiques optimums du Proctor modifié. La courbe des forces de pénétration en fonction des enfoncements de l'éprouvette témoin sont jointes en a Annexe A.15 et Annexe A.16.

Temps	Enfoncements (mm)	Forces de pénétration (KN)	
		Essai 1	Essai 2
51"	0,625	4,71	3,76
1'31"	1,25	6,71	5,53
2'12"	2,00	8,06	7,25
2'37"	2,50	8,71	8,39
4'42"	5,00	10,69	11,20
6'41"	7,50	11,40	12,99
8'37"	10,00	12,06	14,19

Tableau III.12 : Forces de pénétration en fonction des enfoncements.

	Indice C.B.R. immédiat à 2.5, mm(%)	Indice C.B.R. immédiat à, 5mm(%)	Indice C.B.R. max(%)
Essai 1	65.22	53.62	65.22
Essai 2	62.81	56. 22	62.81
Moyenne	64.02	54.92	64.02

Tableau III.13: Valeurs de l'indice C.B.R. immédiat.**III.2.3.2.2: Essai C.B.R après imbibition :**

Le tableau III.14 présente la valeur du gonflement linéaire $g(\%)$ et la teneur en eau après imbibition.

	Essai 1	Essai 2	Moyenne
Lecture initiale	000	000	
Lecture finale	15.360	16.545	
$\Delta h = \text{lecture finale} - \text{lecture initiale}$	15.360	16.545	
Gonflement linéaire : $g(\%) = \Delta h / h$	13.25	14.28	13.77
Masse de la tare (g)	51.79	51.25	
Masse totale humide (g)	117.69	118.38	
Masse totale sec (g)	104.24	104.84	
Masse d'eau (g)	13.45	13.54	
Masse du sol sec (g)	52.45	53.59	
Teneur en eau après imbibition. %	25.64	25.27	25.46

Tableau III.14: Valeur du gonflement linéaire $g(\%)$ et la teneur en eau après imbibition.

Le tableau III.15 présent les valeurs des forces de pénétration en fonction des enfoncements et le tableau III.6 présente les valeurs des l'indices C.B.R. après imbibitions (04 jours) d'un éprouvette témoin confectionné aux caractéristiques optimales Proctor modifié. La courbe des forces de pénétration en fonction des enfoncements de l'éprouvette témoin sont jointes en a Annexe A.17 et Annexe A.18.

Temps	Enfoncements (mm)	Force de pénétration (KN)	
		Essai 1	Essai 2
38"	0,625	0,17	0,15
1'07"	1,25	0,22	0,22
1'44"	2,00	0,28	0,26
2'08"	2,50	0,32	0,32
4'09"	5,00	0,49	0,47
6'10"	7,50	0,73	0,71
8'09"	10,00	0,99	0,97

Tableau III.15 : Forces de pénétration en fonction des enfoncements.

	Indice C.B.R. imbibé à 2,5mm(%)	Indice C.B.R. imbibé à 5mm(%)	Indice C.B.R. max(%)
Essai 1	2.42	2.48	2.48
Essai 2	2.42	2.37	2.42
Moyenne	2.42	2.43	2.43

Tableau III.16 : Valeurs de l'indice C.B.R. après immersion.

III.2.3.3: Mesures aux ultrasons :

a-Eprouvette confectionnée aux caractéristiques optimales Proctor normal :

Le tableau III.17 présente les résultats de deux(02) essais qui ont été réalisés pour la détermination du temps et la vitesse de propagation.

	Eprouvette1	Eprouvette2	Moyenne
Poids (g)	1755.30	1731.10	1743.20
Longueur(L): cm	12.00	12.00	12.00
Temps (t) : (μs)	160.00	175.30	167.65
Vitesse (v) =t/L (m/s)	750.00	684.54	715.78

Tableau III.17 : Résultats du temps et la vitesse de propagation dans l'échantillon témoin.

b-Eprouvette confectionnée aux caractéristiques optimales Proctor modifié :

Le tableau III.18 présente les résultats de deux(02) essais qui ont été réalisés pour la détermination du temps et de vitesse de propagation.

	Eprouvette1	Eprouvette2	Moyenne
Poids (g)	4301.10	4369.40	4335.25
Longueur (L): cm	11.59	11.59	11.59
Temps (t) : (μs)	122.30	123.10	122.70
Vitesse (v) =t/L(m/s)	947.67	941.51	944.59

Tableau III.18: Résultats du temps et la vitesse de propagation dans l'échantillon témoin

III.3: Sol traité :

Dans cette partie on a regroupé l'ensemble des résultats qui concernent les essais d'identification (les limites d'Atterberg, essai au bleu de méthylène), et les essais mécaniques (CBR immédiat et après imbibition et essais ultrasoniques) des échantillons obtenus à partir des éprouvettes traitées à différents dosages en ciment et confectionnées à la teneur en eau aux conditions de l'optimum du Proctor normal et ceux du Proctor modifié.

III.3.1: Essais d'identifications :

III.3.1.1: Limites d'Atterberg:

Les tableaux A.19 à A.30 qui présentent les valeurs des limites de liquidité, des limites de plasticité et des indices de plasticité correspondant aux différents dosages de ciment sont jointes en annexe.

Le tableau III.19 résume l'ensemble des valeurs moyennes des limites de liquidité, des limites de plasticité et des indices de plasticité en fonction des teneurs en ciment.

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Limite de liquidité %	76.32	68.82	57.42	53.98	51.33	50.97	49.01
Limite de plasticité %	30.28	31.44	33.18	35.82	36.44	36.85	35.97
Indice de plasticité	46.05	37.39	24.24	18.07	14.88	14.12	13.05

Tableau III.19 : Valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.

La figure III .07 présente la courbe de variation de la limite de liquidité en fonction du dosage en ciment.

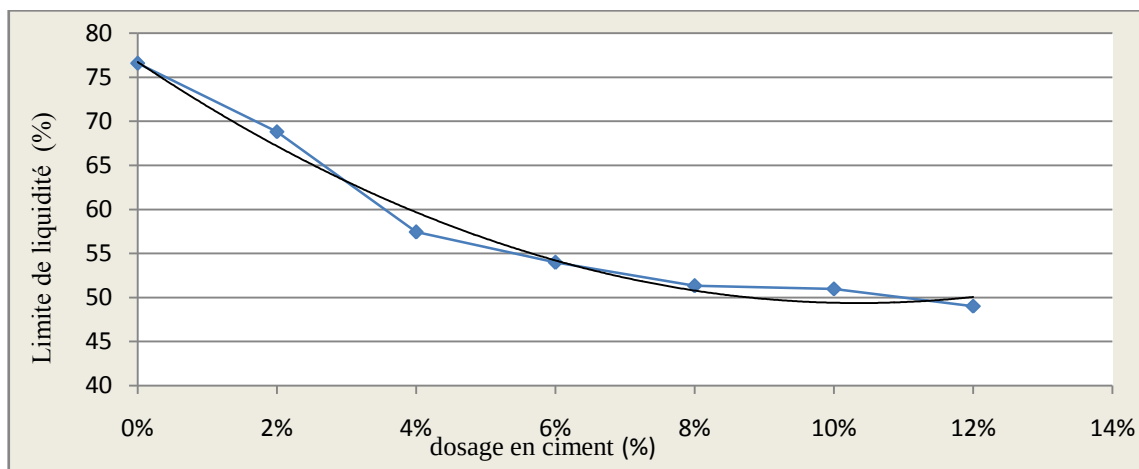


Figure III .07: Limite de liquidité en fonction du dosage en ciment.

La figure III .08 présente la courbe de variation de la limite de plasticité en fonction du dosage en ciment.

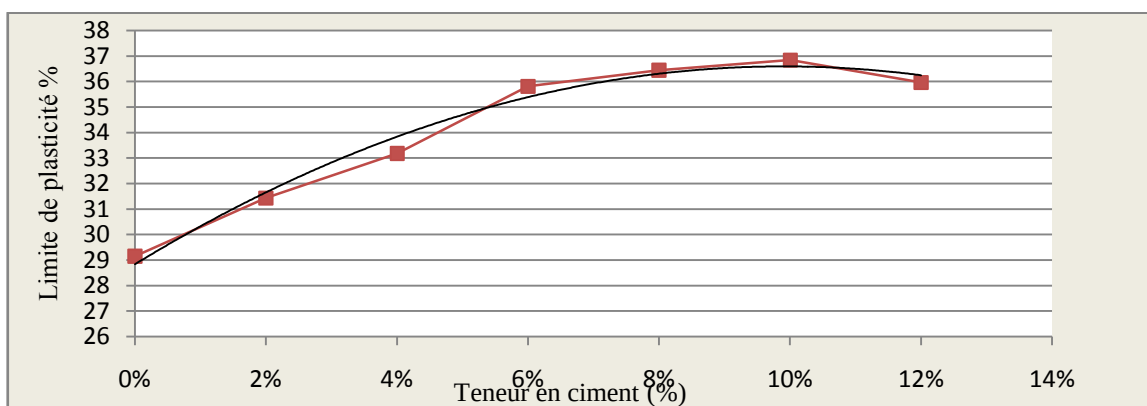


Figure III .08 : Limite de plasticité en fonction du dosage en ciment.

La figure III .09 présente la courbe de variation de l'indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.

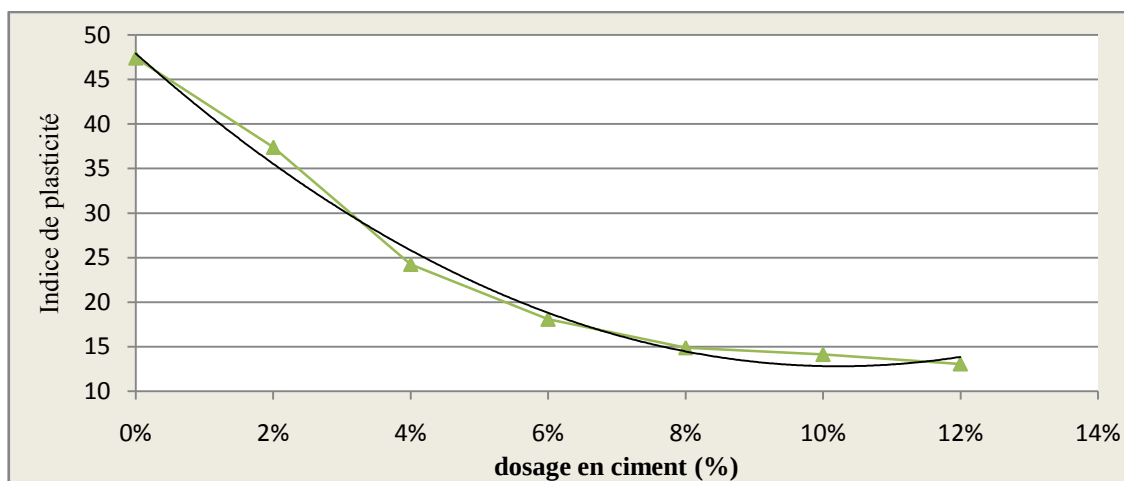


Figure III .09: Indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.

La figure suivante présente les classifications du sol traité à différents dosages en ciment

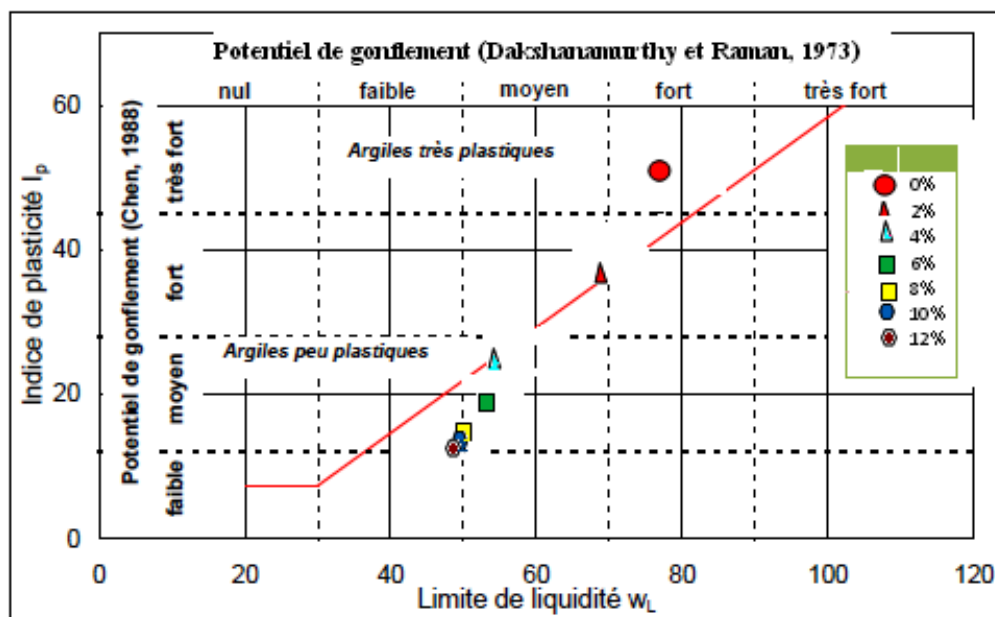


Figure III.10 : Classification du sol traité à différents dosages en ciment d'après (Dakshanamurthy et Raman. (1973) et Chen (1988)).

III.3.1.3: Essai au bleu de méthylène :

Le tableau III.20 présente la variation de la valeur au bleu de méthylène et la surface spécifique à différents dosage en ciment.

Dosage en ciment (%)	Volume de la solution (cm3)	VBS (cm3/g)	La surface spécifique
0	240.60	8.02	168.42
2	164.00	5.47	114.80
4	157.00	5.23	109.90
6	14500	4.83	101.50
8	135.00	4.50	94.50
10	115.00	3.83	80.50
12	110.00	3.67	77.00

Tableau III.20: Variation de la valeur de VBS et la surface spécifique en fonction du dosage en ciment.

La figure III.11 présente la courbe de variation de la valeur du bleu de méthylène en fonction du dosage en ciment.

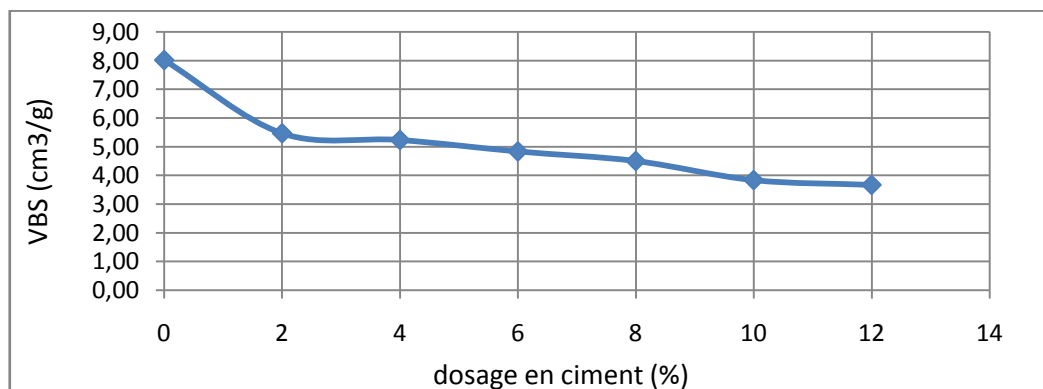


Figure III.11 : Variation de la valeur de VBS en fonction du dosage en ciment.

La figure III.12 présente la courbe de variation de la surface spécifique en fonction du dosage en ciment.

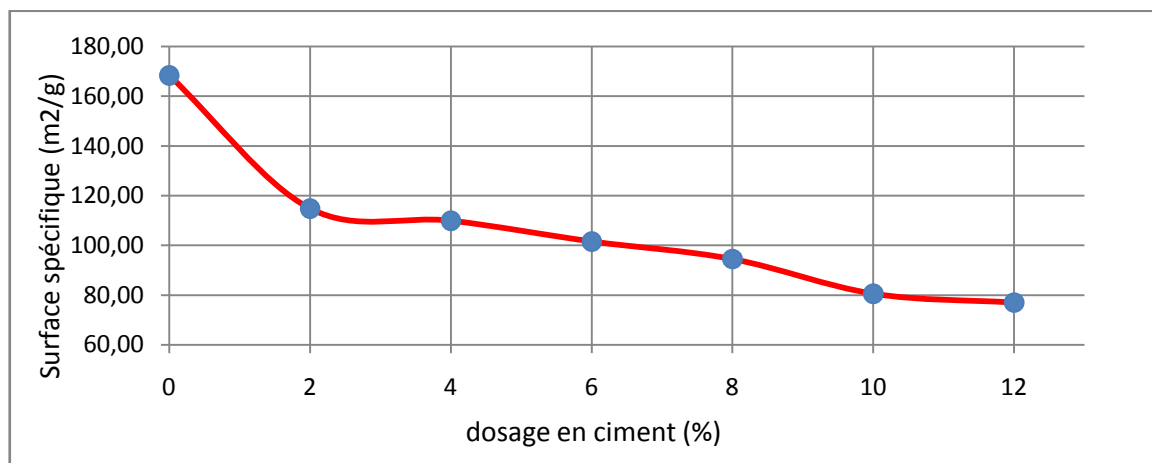


Figure III.12 : Variation de la valeur de surface spécifique en fonction du dosage en ciment.

III.3.1.4: Interprétation des résultats des essais d'identification obtenus :

D'après la courbe de la figure III.7, les valeurs de la limite de liquidité diminuent avec l'augmentation du pourcentage de ciment, la diminution de la limite de liquidité est due à la diminution de la surface spécifique totale car la fraction argileuse est devenue faible avec l'augmentation du dosage en ciment.

Un autre facteur influe sur la limite de liquidité, il s'agit de la nature de l'interaction entre les deux matériaux : argile et ciment, car avec l'ajout de ciment, le nombre des liaisons argile – argile diminue, alors qu'il y a accroissement de liaisons de type ciment – argile, cela fait diminuer la quantité d'eau nécessaire pour éloigner les particules d'argiles entre elles, et par conséquent la limite de liquidité diminue elle aussi.

En regardant la courbe de la figure III .08 on constate une augmentation de la limite de plasticité quand le pourcentage de ciment augmente.

Nous remarquons aussi à travers la courbe de la figure III.09 une diminution de l'indice de plasticité quand le pourcentage de ciment augmente, ceci suit la même évolution que la limite de liquidité.

La figure III. 10 montre que l'effet du traitement de l'argile gonflante qui était classée comme une argile très plastique avec un potentiel de gonflement fort à très fort (d'après Dakshanamurthy et Raman. (1973) et Chen (1988) devient un limon peu plastique avec une réduction marquée du potentiel de gonflement.

Cela montre que les mélanges tendent à avoir le même comportement lorsque le pourcentage de ciment est élevé, car la consistance devient de plus en plus faible. La valeur de bleu et la surface spécifique totale diminuent avec l'augmentation du pourcentage de ciment d'après la figure III.11 et III.12, cette diminution réduit la capacité d'absorption du mélange, et par conséquent, le potentiel de gonflement sera plus faible.

III.3.2: Les essais de caractérisation:

III.3.2.1: Etude de la portance :

a) Essai C.B.R immédiat :

Le tableau III.21 présente l'ensemble des résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements, et le tableau III.22 présente les indices C.B.R immédiats des éprouvettes traitées à différents dosages en ciment.

Dosage en ciment		0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Temps	Enfoncements (mm)	Forces de pénétration						
30"	0,625	4,24	6,79	6,62	6,88	6,47	7,05	6,67
1'	1,25	6,12	9,03	8,94	9,57	8,92	10,58	9,01
1'40"	2	7,65	10,32	10,45	11,24	10,69	12,38	10,64
2'	2,5	8,55	11,07	11,09	12,00	11,50	13,12	11,37
4'	5	10,94	13,27	13,46	14,75	14,25	16,02	13,80
6'	7,5	12,19	14,41	14,88	16,71	15,76	17,76	15,31
8'	10	13,13	14,84	15,42	18,08	15,37	17,82	15,24

Tableau III.21: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment.

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	64.02	82.94	83.10	89.87	86.16	98.24	85.19
Indice C.B.R. immédiat à 5mm	59.41	66.56	67.53	74.00	71.52	80.37	69.26
Indice C.B.R. max	64.02	82.94	83.10	89.87	86.16	98.24	85.19

Tableau III.22 : Résultats des indices C.B.R. immédiats pour différents dosages en ciment.

Les figures III.13 illustre les forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment.

La figure III.14 présente les courbes de variation des forces de pénétration en fonction du dosages en ciment correspondant à chaque enfoncements.

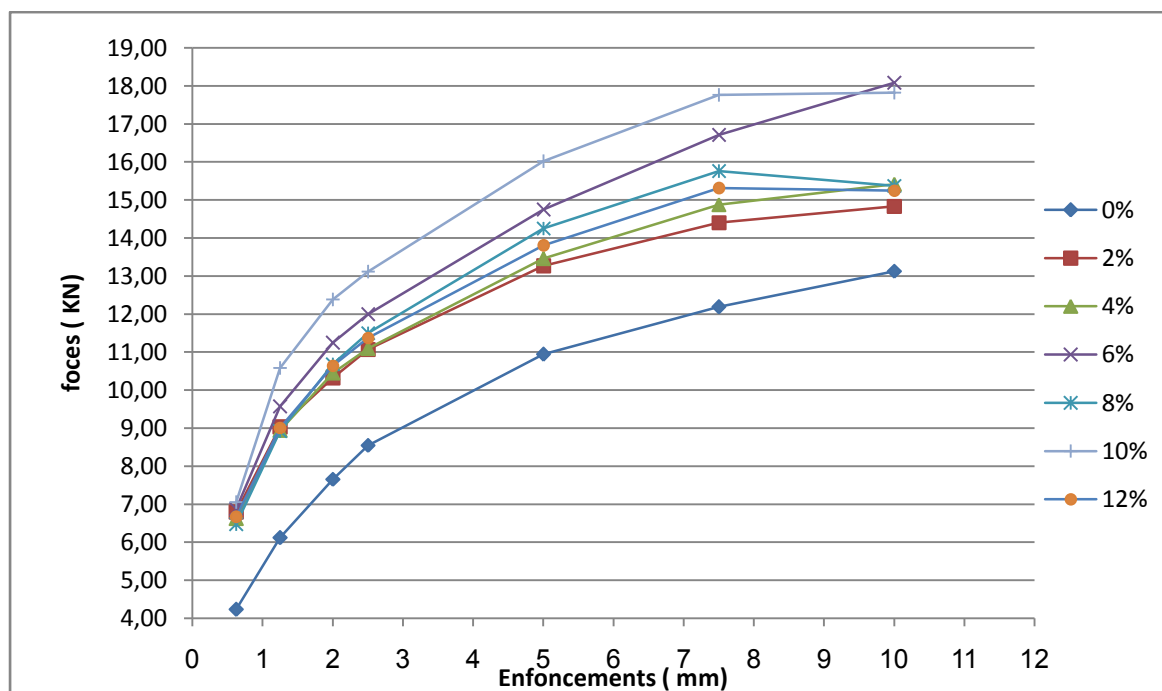


Figure III.13: Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment (C.B.R. immédiat).

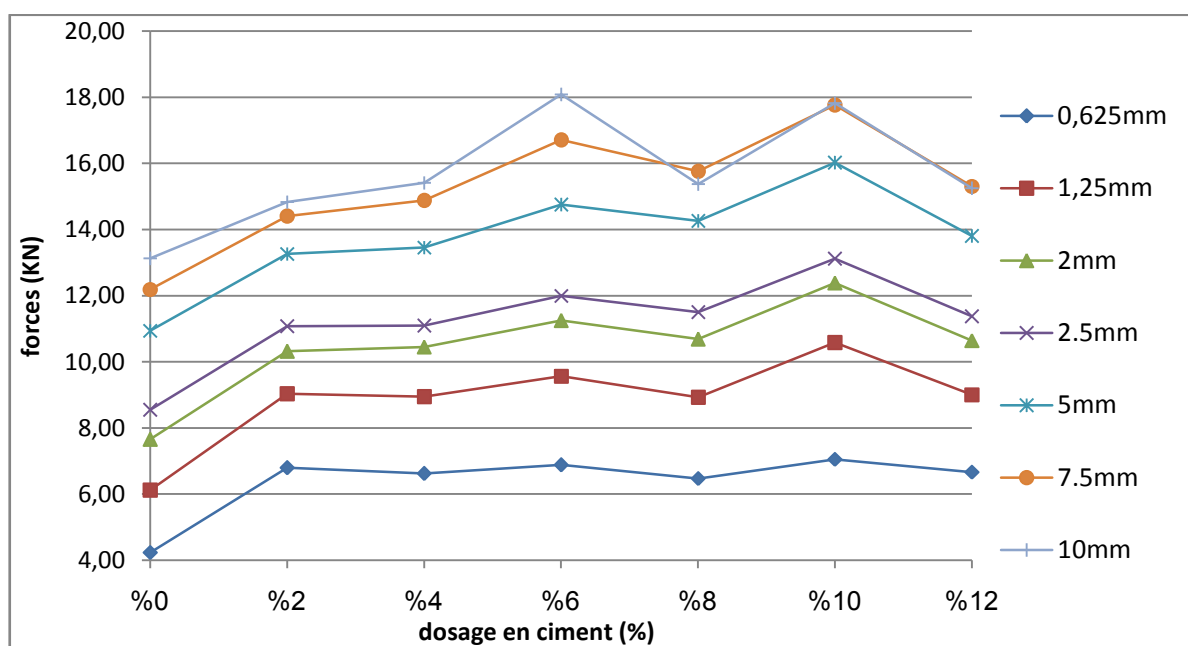


Figure III.14 : Courbes des forces en fonction du dosages en ciment de chaque enfoncement (C.B.R. immédiat)

La figure III.15 présente les indices C.B.R immédiat en fonction des teneurs en ciment correspondant aux résultats présentés dans le tableau III.22.

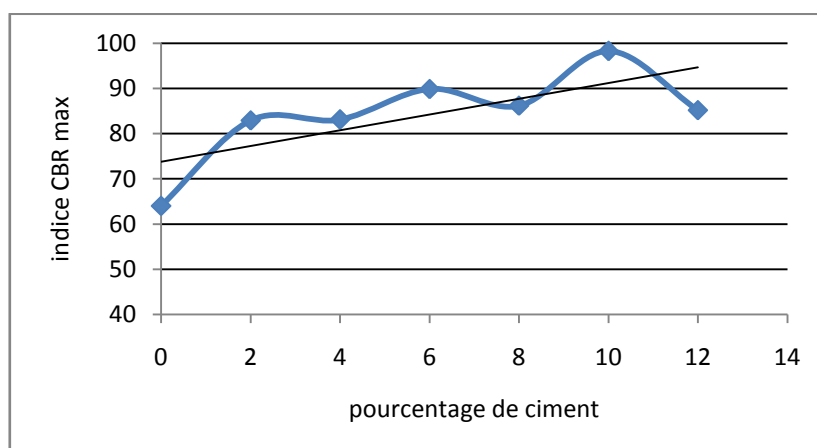


Figure III.15: Indices C.B.R. immédiats en fonction des dosages en ciment et leur droite moyenne.

Interprétation des résultats:

La figure III.13 présente les courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment. Ces courbes regroupées ont pour but de visualiser l'évolution des forces en fonction des enfoncements du sol traité à différents dosages en ciment par rapport au sol non traité. Elles montrent l'amélioration de la portance du sol avec le traitement. Mais à un stade donné du traitement l'évolution ne suit plus l'augmentation avec la teneur en ciment ajouté, c'est le cas de la courbe des forces en fonction des enfoncements du sol traité à un dosage en ciment de 10%.

La figure III.14 présente l'ensemble des courbes des forces de pénétration en fonction du dosages en ciment de chaque enfoncement. Il est remarquable que le traitement n'a pas d'effet notable sur les valeurs de forces d'enfoncements jusqu'à un enfoncement de 2,5 mm. Mais au-delà de cet enfoncement on observe une augmentation remarquable des valeurs des forces d'enfoncements avec le dosage en ciment.

La figure III.15 Présente les indices C.B.R. immédiats en fonction du dosages en ciment et leur droite moyenne.

Les indices de portance immédiat ne suivent pas l'augmentation avec le dosage en ciment, mais l'efficacité du traitement est bien visible. Car en partant d'un indice de portance immédiat de 64.02 du sol non traité, on arrive à un indice de portance immédiat de 98.24 pour un dosage de 10% en ciment. Leur droite moyenne donne une indication sur la teneur en ciment correspondante à un indice de portance immédiat.

b) Essai C.B.R après imbibition :

Les tableaux III.23 et III.24 présentent les idem des forces de pénétration en fonction des enfoncements et les indices C.B.R des éprouvettes traitées à différentes teneurs en ciment après leur imbibition.

Dosage en ciment		0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Temps	Enfoncements (mm)	Forces de pénétration(KN)						
30"	0,625	0,16	0,04	0,17	0,19	0,26	0,73	0,13
1'	1,25	0,22	0,09	0,41	0,43	0,58	1,12	0,60
1'40"	2	0,27	0,17	0,62	0,67	0,99	1,66	1,03
2'	2,5	0,32	0,22	0,69	0,80	1,25	1,89	1,42
4'	5	0,48	0,39	0,88	1,20	1,96	2,47	3,33
6'	7,5	0,72	0,47	0,90	1,25	1,89	2,24	3,01
8'	10	0,98	0,54	0,88	1,20	1,85	2,15	2,75

Tableau III.23 : Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosage en ciment.

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	2.42	1.61	5.15	5.96	9.34	14.17	10.63
Indice C.B.R. immédiat à 5mm	2.43	1.94	4.42	6.04	9.82	12.41	16.72
Indice C.B.R. max	2.43	1.94	5.15	5.96	9.82	14.17	16.72

Tableau III .24 : Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différents dosages en ciment.

Les figures III.16, III.17 et III.18 présentent respectivement les courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment, des forces de pénétration en fonction du dosages en ciment de chaque enfoncement et des indices C.B.R. après imbibition en fonction du dosages en ciment correspondant aux tableaux III.25 et III.26.

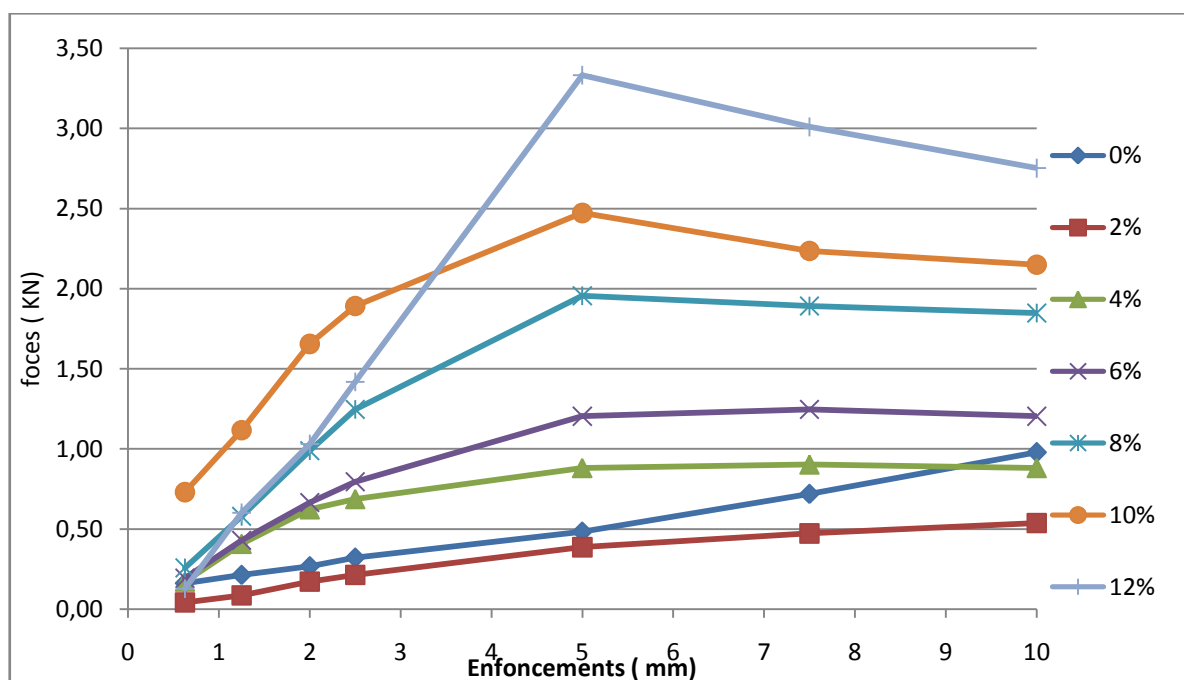


Figure III.16 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment (après imbibition).

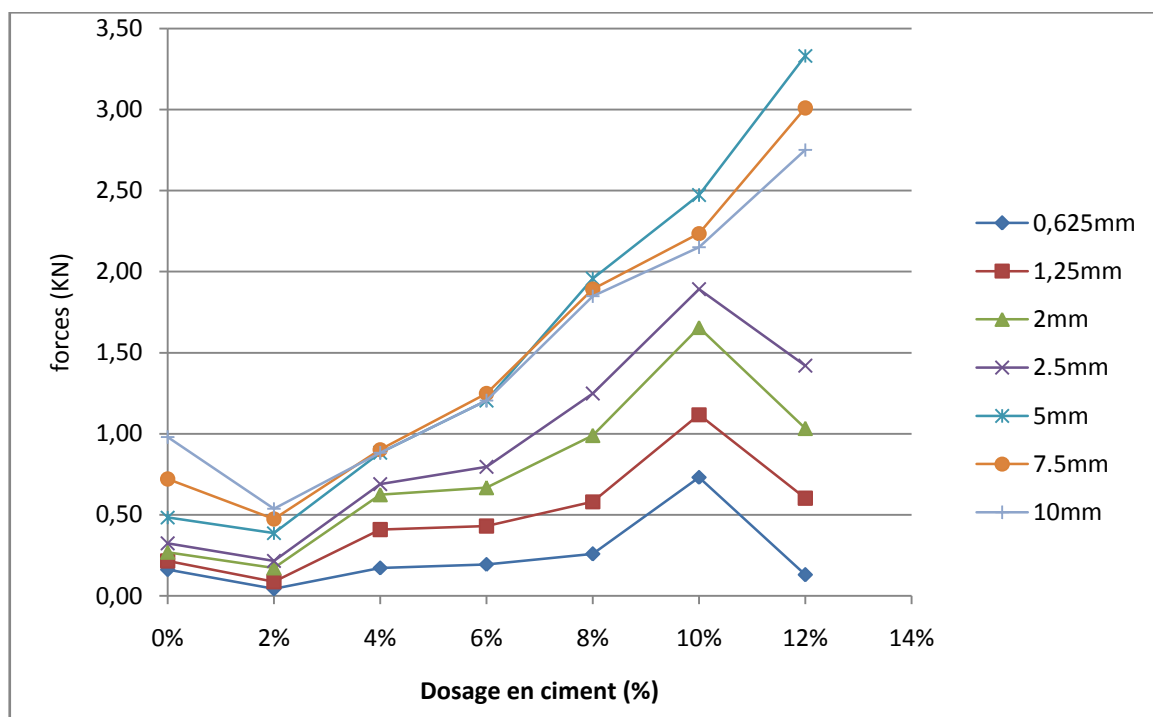


Figure III.17 : Courbes des forces en fonction des dosages en ciment de chaque enfoncement (après imbibition).

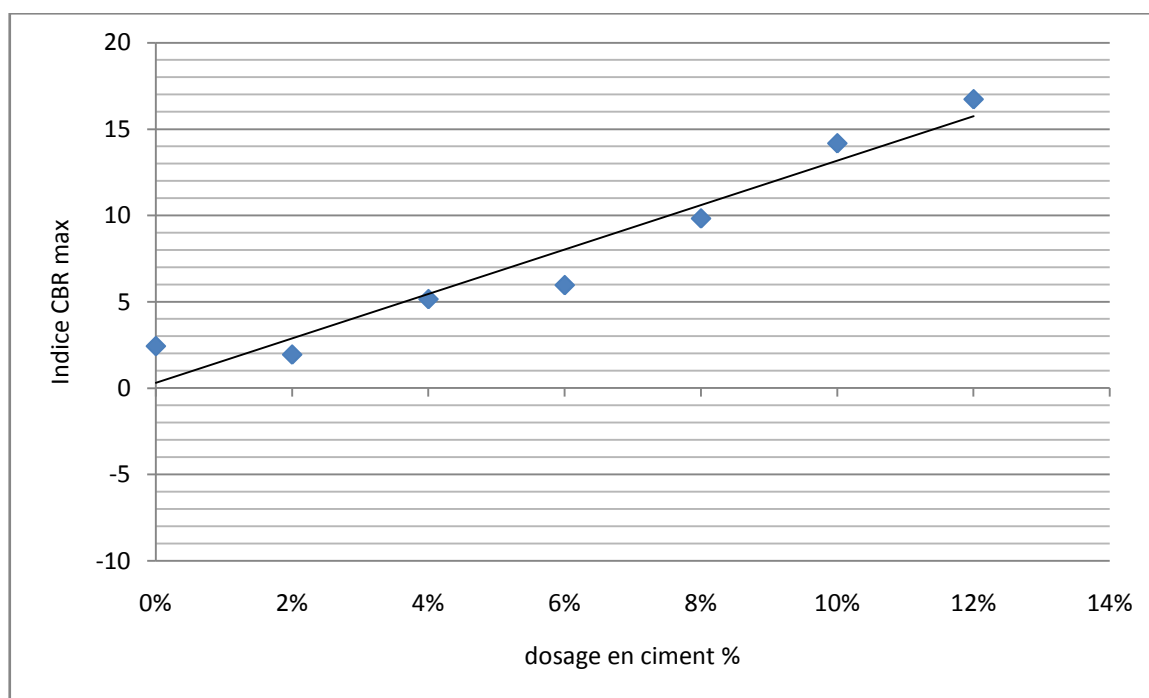


Figure III.18 : Indices C.B.R. après imbibition en fonction des dosages en ciment et leur droite moyenne.

Le tableau III.25 présente les gonflements linéaires après imbibition des éprouvettes traitées à différentes teneurs en ciment après leur imbibition.

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
le gonflement %	13.77	10.69	10.35	8.05	8.35	8.78	7.92

Tableau III.25 : Résultats des gonflements linéaires après imbibition pour différents dosages en ciment.

La figure III.19 présente le gonflement linéaire et la teneur en eau après imbibition en fonction du dosages en ciment d'après les résultats qui figurent sur le tableau III.25.

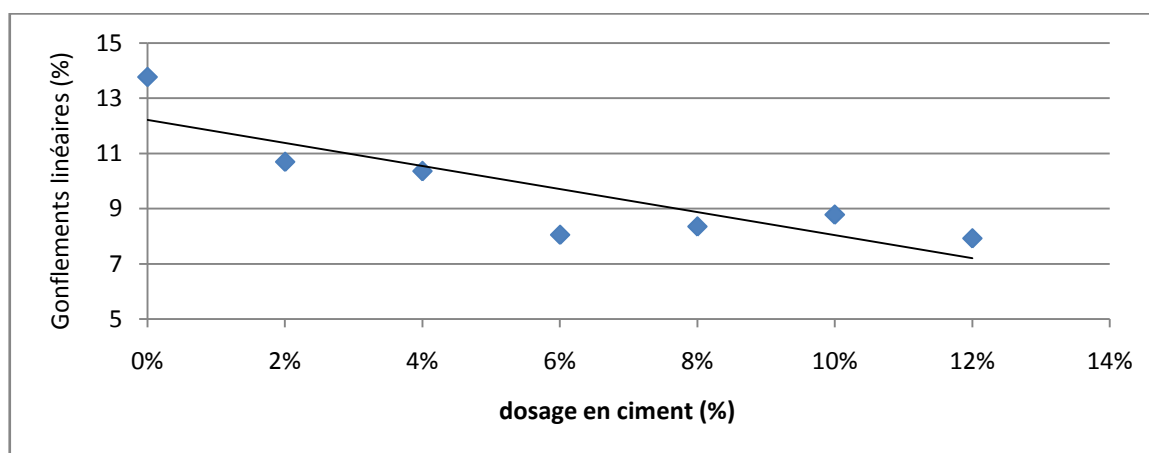


Figure III.19 : Gonflement linéaires en fonction des dosages en ciment et leur droite moyenne.

Interprétation des résultats:

La figure III.16 présente les courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements à différents dosages en ciment après imbibition. Ces courbes regroupées visualisent l'évolution des forces de pénétration en fonction des enfoncements à différents dosages en ciment des éprouvettes mises à imbibition pendant 04 jours par rapport à une éprouvette témoin (sans traitement).

L'imbibition a pour effet de voir l'influence de la présence d'eau sur la portance du sol avant et après traitement. On remarque que dans notre cas l'augmentation des forces de pénétration en fonction des enfoncements est notable et s'accroît avec le dosage en ciment ajoutée.

La figure III.17 Visualise les courbes des forces de pénétration en fonction du dosage en ciment de chaque enfoncement dans le sol avant et après traitement.

On observe que la force d'enfoncement augmente avec le dosage en ciment et s'accroît au-delà de l'enfoncement de 1.25 mm, sachant que l'enfoncement lui-même ne varie pas et ceci confirme donc l'efficacité du traitement.

La figure III.18 montre l'évolution des indices de portance après imbibition en fonction des dosages en ciment avant et après traitement ainsi que leur droite moyenne.

On observe une augmentation notable de l'indice de portance après imbibition due au traitement du sol qui varie de 2.43 pour le sol non traité à 16.72 pour le sol traité à 12% , cette augmentation peut être affectée à l'interaction eau-ciment sur le sol étudié.

La droite moyenne est tracée afin que les projeteurs puissent avoir une idée sur le dosage en ciment connaissant l'indice de portance après imbibition.

La figure III.19 présente les gonflements linéaires en fonction des dosages en ciment et leur droite moyenne. Le gonflement linéaire est obtenu à partir d'une éprouvette compactée, mise à l'imbibition pendant 04 jours.

On remarque que le gonflement diminue en effet avec l'augmentation du dosage en ciment qui commence de 13.77 % pour le sol non traité et arrive à 7.92% pour un dosage en ciment de 12%, ce qui justifie l'efficacité du traitement.

La droite moyenne a pour rôle de donner pour un dosage en ciment donné le gonflement correspondant.

III.3.2.3: Essais ultrasoniques :

A. Introduction :

Divers domaines de génie civil utilisent les essais ultrasoniques surtout dans les bétons et en mécanique des roches (étude de la formation des roches sédimentaires). Cependant, l'utilisation de ce procédé pour déterminer les vitesses d'impulsions des sols et dans la géotechnique est moins habituelle. La cause est que le signal transmis à travers le sol est faible et fortement affecté par le bruit. Dans l'objectif de déterminer les caractéristiques ultrasoniques des sols gonflants, nous adoptons dans le présent travail un système d'essai ultrasonique comprenant des capteurs d'ondes (émetteur et récepteur), un système d'acquisition de données, du couplant et des instruments de calibrage. La méthode consiste en la mesure de la vitesse de propagation d'une onde ultrasonique dans l'éprouvette de sol, on mesure le temps de propagation (t) entre émetteur et récepteur séparés par une distance (L) connue ($L=v \cdot t$). Concernant les matériaux homogènes, on note l'existence de vitesse de propagation des ondes longitudinales (de compression) et transversales (de cisaillement). Le sol en question est loin d'être un matériau homogène linéaire; c'est un matériau macroporeux, micro fissuré qui contient de l'eau, et dont les caractéristiques mécaniques sont orientées en fonction du sens de coulage.

La détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques a été effectuée sur des éprouvettes confectionnées à l'optimum Proctor normale et l'optimum Proctor modifié, traitées à différentes dosage en ciment.

B-1 : Eprouvettes confectionnées à l'optimum Proctor normal :

Le tableau de III. 26 présente l'ensemble des résultats du temps et de vitesse de propagation des ondes ultrasoniques effectuée sur des éprouvettes à différents dosages en ciment.

éprouvettes confectionnées à l'optimum Proctor normale				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	v_{moy} (m/s)
0	1	160,00	167,65	715,78
	2	175,30		
2	1	151,20	150,75	796,02
	2	150,30		
4	1	148,00	150,90	795,23
	2	153,80		
6	1	128,30	128,05	937,13
	2	127,80		
8	1	130,30	132,00	909,09
	2	133,70		
10	1	132,80	128,85	931,32
	2	124,90		
12	1	110,30	113,80	1054,48
	2	117,30		

Tableau III.26: Temps et vitesses de propagation des ondes ultrasonique.

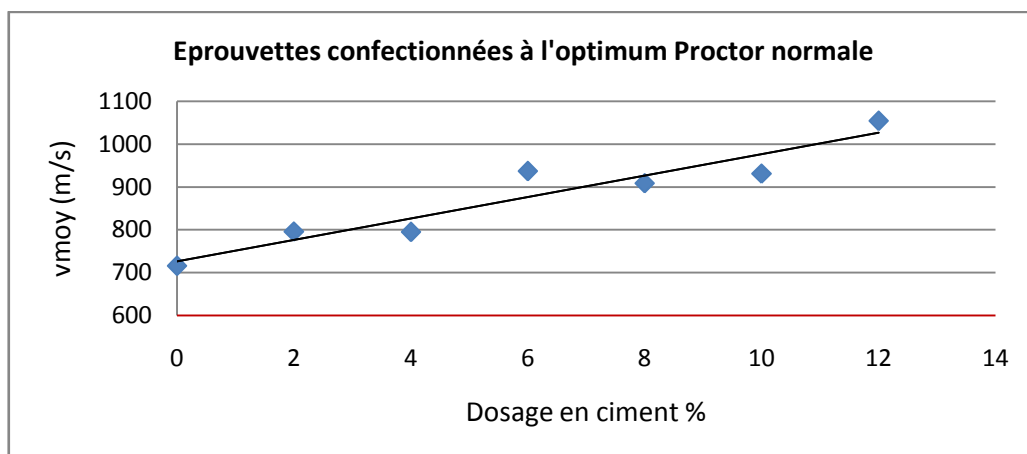


Figure III.20 : Vitesse de propagations en fonction des dosages en ciment

B-2 : Epreuves confectionnées à l'optimum Proctor modifié :

Le tableau de III.27 présente l'ensemble des résultats du temps et de vitesse de propagation des ondes ultrasoniques effectuée sur des éprouvettes à différents dosages en ciment.

épreuves confectionnées à l'optimum Proctor modifié				
Dosage en ciment (%)	Epreuves	Temps t_i (μs)	t_{moy} (μs)	v_{moy} (m/s)
0	1	122,30	122,70	944,58
	2	123,10		
2	1	97,70	93,35	1241,56
	2	89,00		
4	1	84,30	83,30	1391,36
	2	82,30		
6	1	82,40	80,90	1432,63
	2	79,40		
8	1	79,80	79,40	1459,70
	2	79,00		
10	1	77,00	77,75	1490,68
	2	78,50		
12	1	76,20	76,40	1517,02
	2	76,60		

Tableau III.27: Temps et vitesses de propagation des ondes ultrasonique.

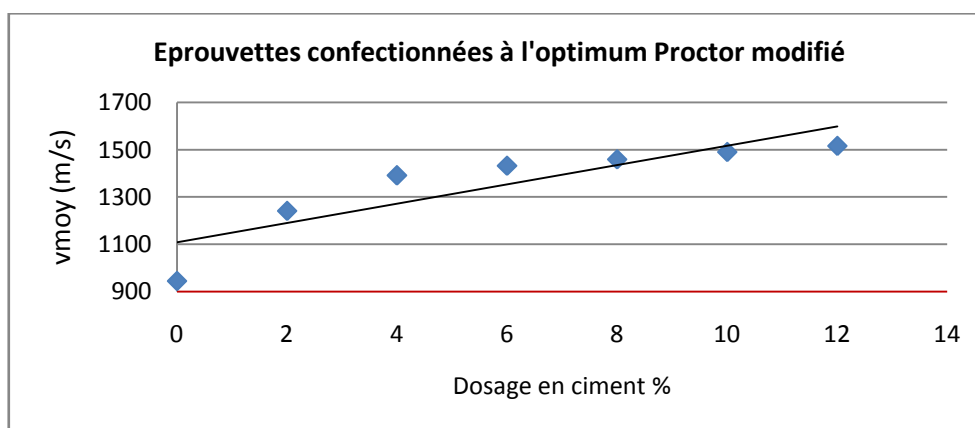


Figure III.21 : Vitesse de propagations en fonction des dosages en ciment.

B-3 : L'effet de l'âge des échantillons traités et non traités sur la vitesse de propagation dans différents dosages en ciment :

On a jugé utile de conserver les échantillons au laboratoire à une température ambiante pour effectuer d'autres essais ultrasoniques sur ces mêmes échantillons confectionnés à l'optimum Proctor normal et modifié, qu'ils soient traités ou non traités, et voir l'effet de l'âge de ces échantillons sur les caractéristiques élastiques.

Les tableaux de III.28 à III.32, présentent l'ensemble des résultats de temps et de vitesse de propagation des échantillons confectionnés à l'optimum Proctor normale et traités à différents dosages en ciment et à différents âges.

Age : 24 heures				
Dosage en ciment (%)	Echantillons	Temps t_i (μs)	t_{moy} (μs)	v_{moy} (m/s)
0	1	137,40	146,95	816,60
	2	156,50		
2	1	111,70	109,85	1092,40
	2	108,00		
4	1	106,60	108,50	1105,99
	2	110,40		
6	1	91,50	91,45	1312,19
	2	91,40		
8	1	97,50	97,65	1228,88
	2	97,80		
10	1	93,70	94,20	1273,89
	2	94,70		
12	1	83,10	83,85	1431,13
	2	84,60		

Tableau III.28 : Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment

Age : 04 jours				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	v_{moy} (m/s)
0	1	130,00	140,00	857,14
	2	150,00		
2	1	90,00	90,05	1332,59
	2	90,10		
4	1	110,10	106,75	1124,12
	2	103,40		
6	1	90,70	89,90	1334,82
	2	89,10		
8	1	85,40	85,65	1401,05
	2	85,90		
10	1	85,30	84,15	1426,02
	2	83,00		
12	1	84,40	83,65	1434,55
	2	82,90		

Tableau III.29 : Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment.

Age : 12 jours				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	V_{moy} (m/s)
0	1	97,00	104,80	1145,04
	2	112,60		
2	1	87,70	87,65	1369,08
	2	87,60		
4	1	128,00	114,85	1044,84
	2	101,70		
6	1	87,60	86,40	1388,89
	2	85,20		
8	1	81,30	82,30	1458,08
	2	83,30		
10	1	81,10	80,35	1493,47
	2	79,60		
12	1	79,50	79,30	1513,24
	2	79,10		

Tableau III.30 : Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment

Age : 15 jours				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	V_{moy} (m/s)
0	1	96,00	103,50	1159,42
	2	111,00		
2	1	86,10	86,10	1393,73
	2	86,10		
4	1	126,50	113,55	1056,80
	2	100,60		
6	1	85,60	84,85	1414,26
	2	84,10		
8	1	79,30	80,05	1499,06
	2	80,80		
10	1	79,40	79,60	1507,54
	2	79,80		
12	1	77,50	77,30	1552,39
	2	77,10		

Tableau III.31: Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment.

Age : 28 jours				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	V_{moy} (m/s)
0	1	112,00	113,55	1056,80
	2	115,10		
2	1	86,30	86,30	1390,50
	2	86,30		
4	1	119,40	110,10	1089,92
	2	100,80		
6	1	85,30	84,50	1420,12
	2	83,70		
8	1	78,10	79,30	1513,24
	2	80,50		
10	1	76,50	76,10	1576,87
	2	75,70		
12	1	74,40	73,95	1622,72
	2	73,50		

Tableau III.32 : Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment.

La figure III.22 présente les courbes de variation des vitesses de propagation en fonction des dosages en ciment correspondant à chaque âge.

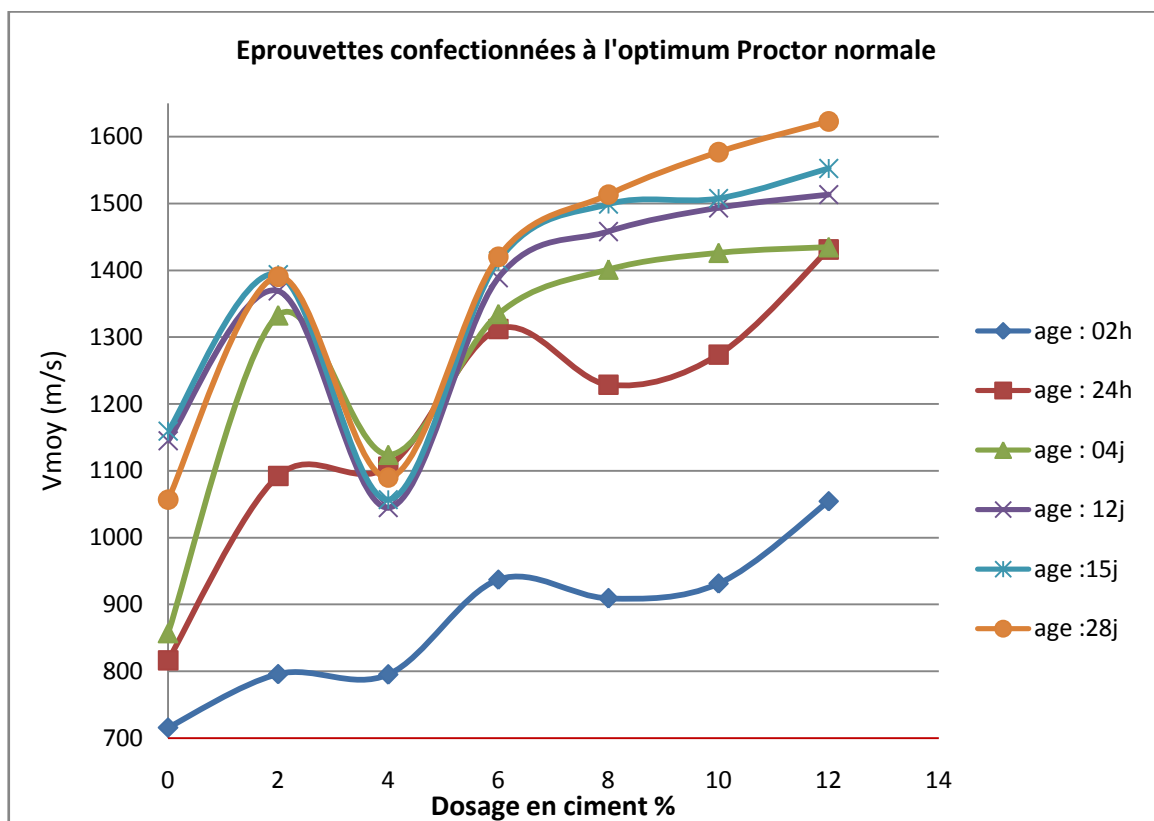


Figure III.22 : Vitesse de propagations en fonction des teneurs en ciment pour différents âges.

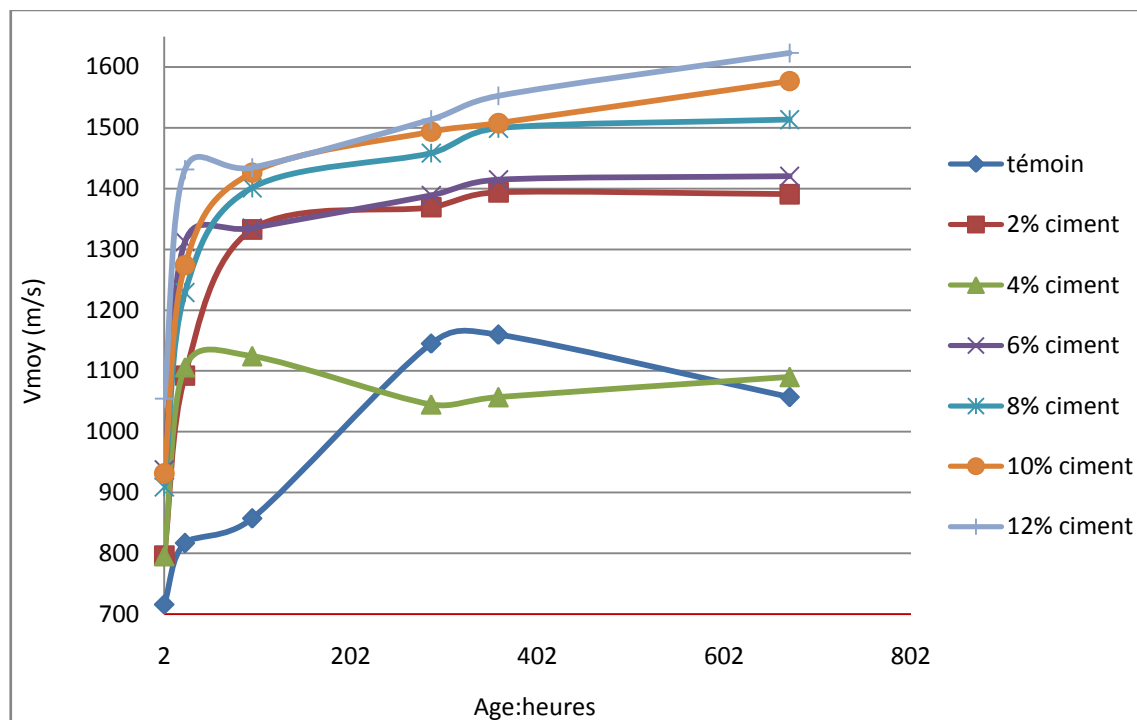


Figure III.23 : Vitesse de propagations en fonction des différents âges pour différentes dosages en ciment.

Les tableaux de III.33 à III.36, présentent l'ensemble des résultats du temps et de vitesse de propagation des éprouvettes confectionnées à l'optimum Proctor modifié et traitées à différents dosages en ciment et à différents âges.

Age : 07 heures				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	v_{moy} (m/s)
0	1	103,90	102,40	1131,84
	2	100,90		
2	1	85,80	80,90	1432,63
	2	76,00		
4	1	74,10	72,80	1592,03
	2	71,50		
6	1	71,20	71,20	1627,81
	2	71,20		
8	1	70,80	70,55	1642,81
	2	70,30		
10	1	67,30	68,35	1695,68
	2	69,40		
12	1	67,60	66,55	1741,55
	2	65,50		

Tableau III.33: Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment.

Age : 13 jours				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	v_{moy} (m/s)
0	1	103,00	101,50	1141,87
	2	100,00		
2	1	81,70	77,50	1495,48
	2	73,30		
4	1	71,00	69,75	1661,65
	2	68,50		
6	1	68,60	68,05	1703,16
	2	67,50		
8	1	67,70	66,95	1731,14
	2	66,20		
10	1	63,30	64,20	1805,30
	2	65,10		
12	1	63,80	62,80	1845,54
	2	61,80		

Tableau III.34: Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment.

Age : 16 jours				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	V_{moy} (m/s)
0	1	98,00	97,60	1187,50
	2	97,20		
2	1	81,00	83,00	1396,39
	2	85,00		
4	1	70,40	69,30	1672,44
	2	68,20		
6	1	68,00	67,60	1714,50
	2	67,20		
8	1	67,80	67,10	1727,27
	2	66,40		
10	1	63,00	63,95	1812,35
	2	64,90		
12	1	61,80	62,20	1863,34
	2	62,60		

Tableau III.35: Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment.

Age : 28 jours				
Dosage en ciment (%)	Eprouvettes	Temps t_i (μ s)	t_{moy} (μ s)	v_{moy} (m/s)
0	1	92,40	91,50	1266,67
	2	90,60		
2	1	79,80	78,75	1471,75
	2	77,70		
4	1	69,10	68,60	1689,50
	2	68,10		
6	1	65,20	64,20	1805,30
	2	63,20		
8	1	64,30	63,75	1818,04
	2	63,20		
10	1	60,40	61,15	1895,34
	2	61,90		
12	1	60,30	59,40	1951,18
	2	58,50		

Tableau III.36: Temps et vitesses de propagation à différents dosages en ciment.

La figure III.24 Présente les courbes de variation des vitesses de propagation en fonction des dosages en ciment correspondant à chaque âge.

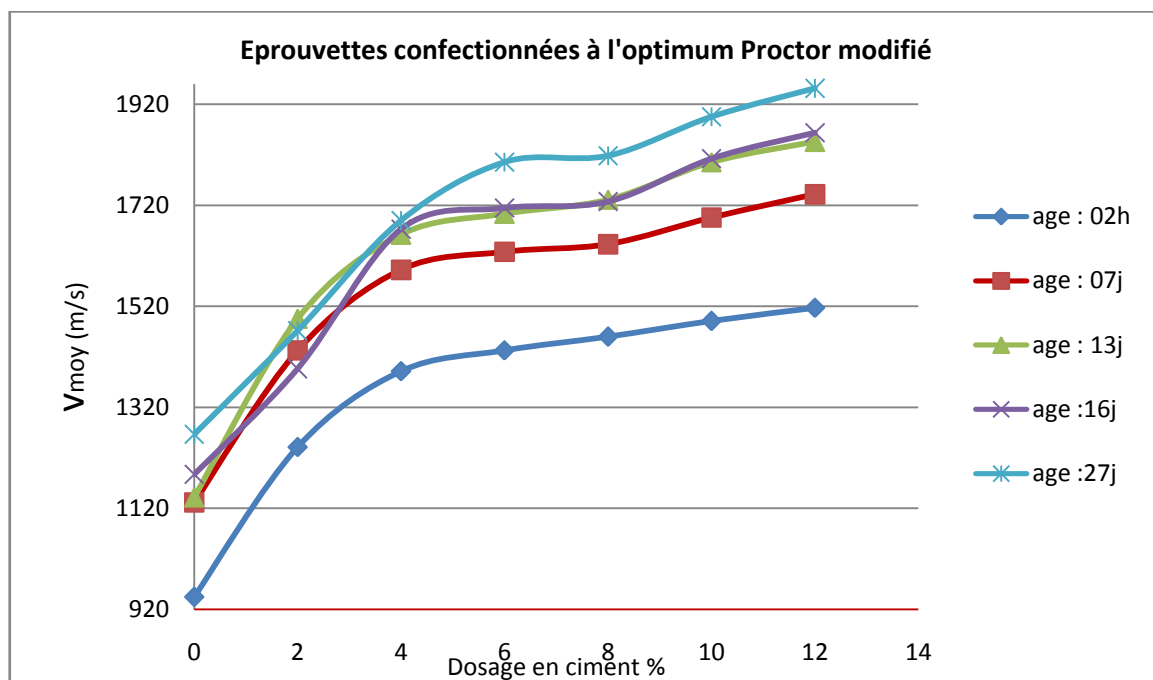


Figure III.24 : Vitesse de propagations en fonction des teneurs en ciment pour différents âges.

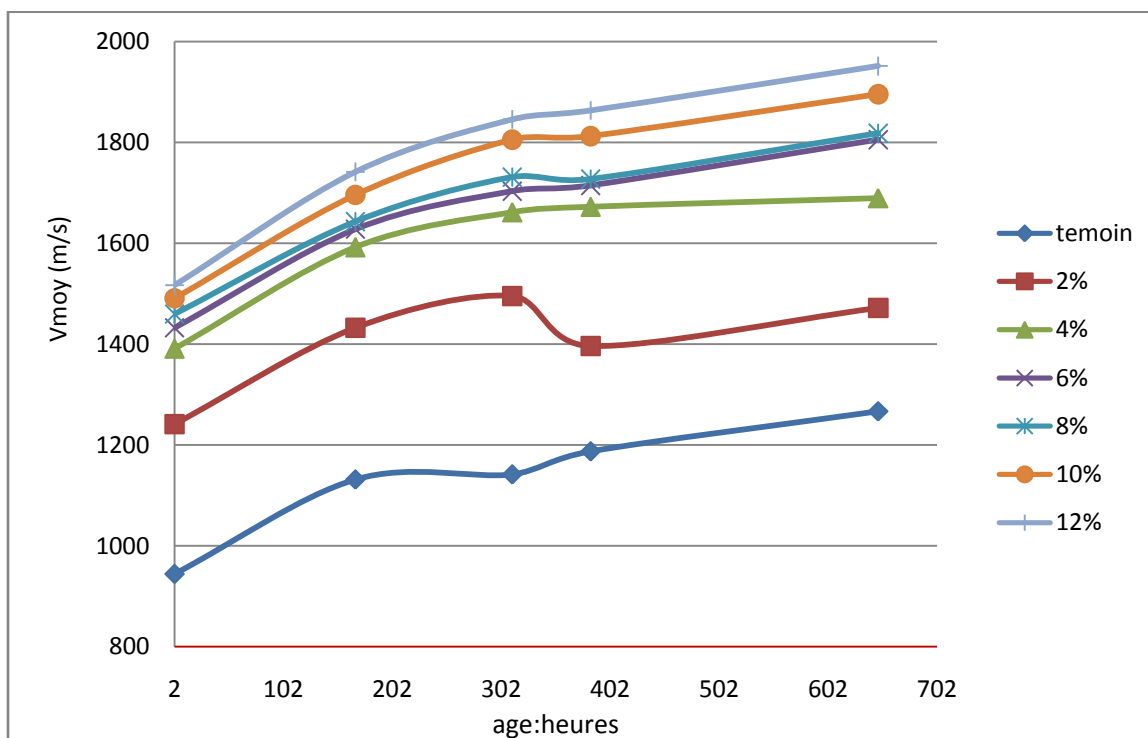


Figure III.25 : Vitesse de propagations en fonction des différents âges pour différentes dosages en ciment.

Interprétation :

L'effet de l'ajout de ciment sur les caractéristiques ultrasoniques est traduit par la représentation graphique (Figure III.22), dont l'axe des abscisses représente le dosage en ciment additionnée à l'argile, tandis que l'axe des ordonnées représente les caractéristiques ultrasonique (vitesse de propagation).

L'influence de l'ajout de ciment sur les caractéristiques ultrasoniques est importante, on peut tirer des constatations de la figure III.22 ci qui suit :

□ Pour les échantillons de sols confectionnés à optimum Proctor normal on remarque l'accroissement sensible de la vitesse de propagation en fonction du dosage en ciment et que cet accroissement ne devient efficace qu'à partir de 4% de ciment.

Dès le jeune âge de l'éprouvette c'est-à-dire environ deux heures la vitesse de propagation passe de 715.78 m/s pour l'échantillon témoin à 1054.48 m/s pour l'échantillon traité à 12% de ciment.

Cet accroissement continue dans le sens d'une amélioration très sensible des caractéristiques ultrasoniques avec le temps et qui passe de 715.78 m/s à $t=2h$ à 1056.80 m/s après 28 jours d'âge.

Par contre lorsque l'échantillon a subi un traitement au ciment, on remarque une grande différence dans les résultats obtenus, avec une augmentation des valeurs de la vitesse de propagation qui passent à titre d'exemple de 1054.48 m/s à 12% de ciment à 1622.72 m/s après 28 jours.

Les mêmes observations ont été faites pour les échantillons de sols confectionnés à l'optimum Proctor modifié: on remarque l'accroissement sensible de la vitesse de propagation en fonction du dosage en ciment et que cet accroissement ne devient efficace qu'à partir de 2% de ciment.

Dès le jeune âge de l'éprouvette c'est-à-dire environ deux heures la vitesse de propagation passe de 944.58 m/s pour l'échantillon témoin à 1517.02 m/s pour l'échantillon traité à 12% de ciment.

Cet accroissement continue dans le sens d'une amélioration très sensible des caractéristiques ultrasoniques avec le temps et qui passe de 944.58 m/s à $t=2h$ à 1266.67 m/s après 28 jours d'âge.

Par contre lorsque l'échantillon a subi un traitement au ciment, on remarque une grande différence dans les résultats obtenus, avec une augmentation des valeurs de la vitesse de propagation qui passent à titre d'exemple de 1517.02 m/s à 12% de ciment à 1951.18 m/s après 28 jours.

On comparant les valeurs des vitesses de propagation trouvées dans les deux cas, c'est-à-dire les échantillons de sol confectionnés à l'optimum Proctor normal et ceux préparés à l'optimum Proctor modifié on remarque que:

Le temps de transmission de l'onde ultrasonique ainsi que la vitesse correspondante varient selon la variation de l'énergie de compactage.

-pour la même énergie de compactage la vitesse ultrasonique croît avec l'accroissement du dosage en ciment.

Les résultats obtenus de la vitesse ultrasonique avec une énergie de compactage effectué à l'optimum Proctor modifié sont plus marquées que celles obtenues avec une énergie de compactage à l'optimum Proctor normal.

*Les valeurs de la vitesse de propagation de l'échantillon témoin confectionné à l'optimum Proctor normal (715.78 m/s) est faible par rapport à celle de l'échantillon confectionné à l'optimum Proctor modifié (944.58 m/s) au temps $t=2$ heures cette différence est dû à l'énergie de compactage.

* On a constaté que cette énergie de compactage influe directement sur les caractéristiques élastiques de notre échantillon de sol qui avec le traitement en ciment, la vitesse de propagation passe du simple au double de sa valeur, puisque à 12% de ciment, l'échantillon compacté à l'optimum Proctor normal à $t=2$ heures la vitesse de propagation vaut 1054.48 m/s passe à une valeur de 1517.02 m/s, lorsque l'échantillon est compacté à l'optimum Proctor modifié d'une part et d'autre part en laissant l'échantillon à température ambiante pendant 28 jours la vitesse de propagation passe de 1054.48 m/s à 1622.72 m/s dans le cas de l'échantillon confectionné à l'optimum Proctor normal et passe de 1517.02 m/s à 1951.18 m/s lorsque l'échantillon est préparé à l'optimum Proctor modifié.