

III.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, l'étude sera consacrée à l'effet de la stabilisation consistant à faire un apport de matériau pour corriger ses défauts du point de vue granulométrique que stabilité et portance par l'ajout de pouzzolane+ chaux , Les pourcentages de chaux ajoutés sont respectivement 8% Pouzzolane+2%Chaux, 12% Pouzzolane 3%Chaux, 16% Pouzzolane+4%Chaux, 20% Pouzzolane+5% chaux.

Les essais menés sur les différentes formulations sable+P% (avec P% représente les pourcentages de pouzzolane+chaux ajoutée) sont :

- Ø Essais de l'analyse granulométriques.
- Ø Essais de Proctor modifié.
- Ø Essais **CBR** Immédiat et Immersion
- Ø Essais de Cisaillement direct.
- Ø Essais de la résistance à la compression.
- Ø Essais de la résistance à la traction simple

III.2 INFLUENCE DE L'AJOUT DE POUZZOLANE CHAUX SUR PROPRIETES DE SABLE :

III.2.1 Effet de l'ajout de pouzzolane et chaux sur la granulométrie :

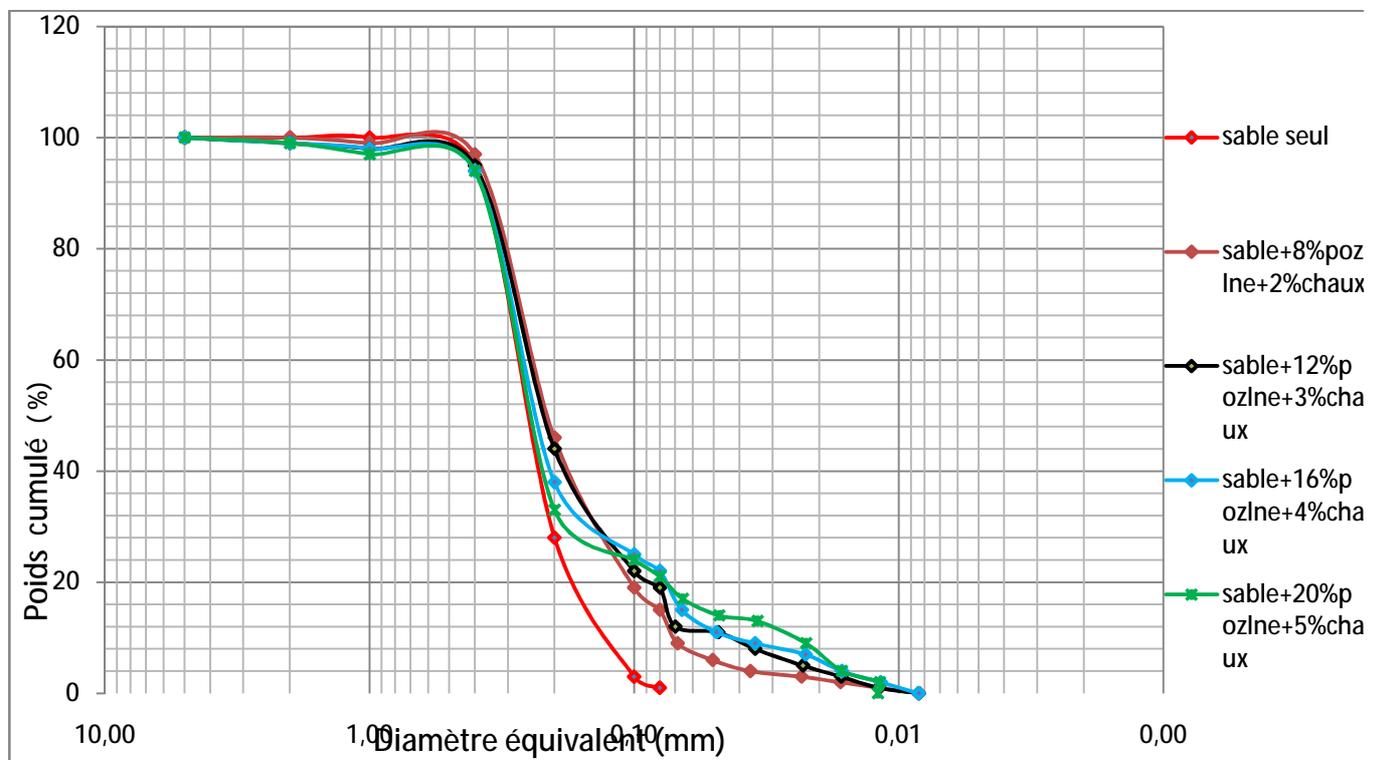


Figure III.1 : Courbe granulométrique des différents mélanges (Sable +pouzzolane%+chaux(%)).

▼ Commentaire :

D'après la figure III.1 qui représente les distributions granulométriques des mélanges traités, on remarque un léger déplacement de la courbe vers la gauche ; proportionnellement à l'augmentation du pourcentage d'ajout de (chaux+pouzzolane). Ce déplacement indique une diminution du pourcentage d'éléments fins au profit d'une augmentation des plus gros éléments surtout sur la fraction 0.08mm-0.01mm.

III.2.2 Effet de l'ajout de pouzzolane et chaux sur les paramètres de Proctor :

L'essai Proctor modifié est réalisé sur les sols obtenus pour différents mélanges (Sable – pouzzolane - chaux). Les résultats sont donnés par les courbes de compactage dans la figure III2

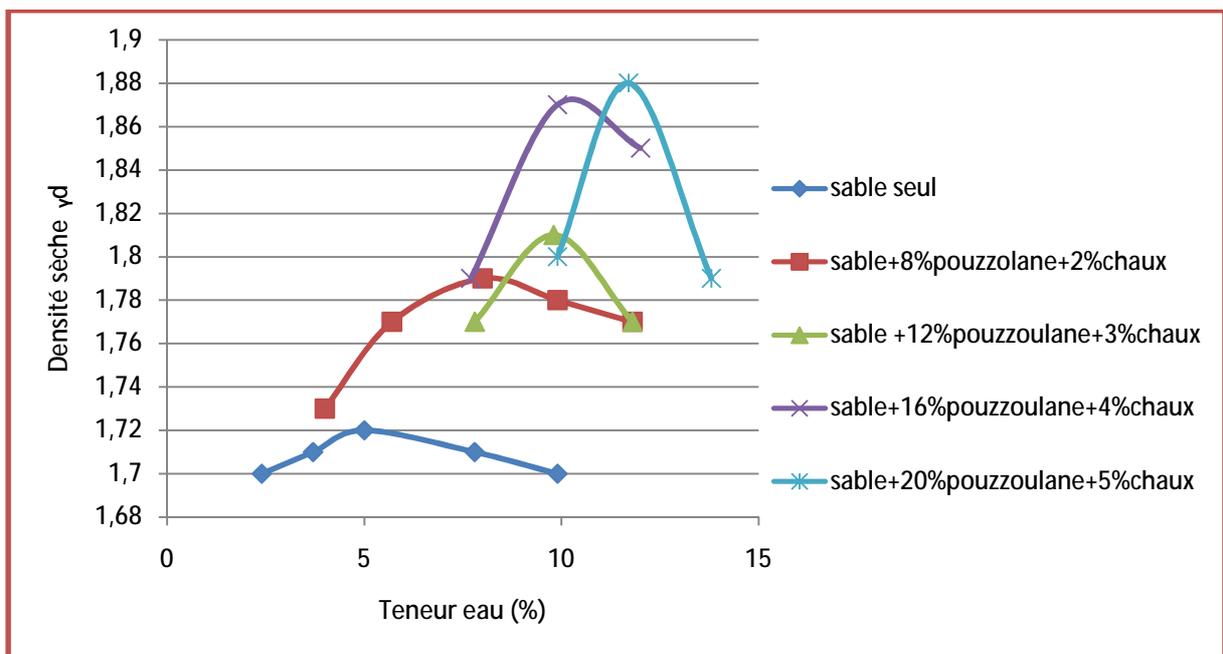


Figure III.2 : Essai de Proctor modifié pour les mélanges sable + pouzzolane (p%) + chaux (P%)

Le tableau III.1 résume les résultats de l'essai de Proctor modifié pour les différents mélanges sable –pouzzolane et chaux.

Tableau III.1 : Résultats de l'ajout de chaux et pouzzolane sur les paramètres de Proctor modifié.

	Sable seul	Sable + 8% pouzzolane + 2% chaux	Sable+ 12% pouzzolane + 3% chaux	Sable+ 16% pouzzolane + 4% chaux	Sable + 20% pouzzolane + 5% chaux
W% <i>opt</i>	5	8,8	9,8	10,5	11,8
γ_d (t /m ³)	1.72	1.79	1.81	1.87	1.88

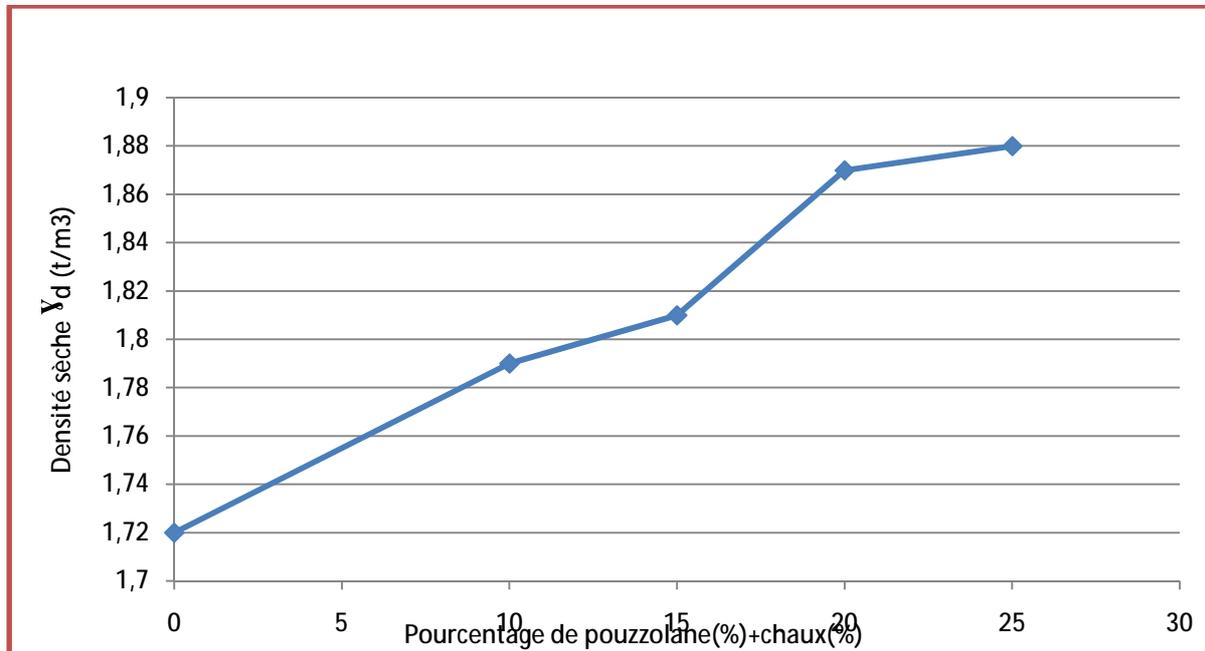


Figure III.03 : Variation de la densité sèche γ_d en fonction du pourcentage de chaux et pouzzolane ajouté.

III.2.3 Effet de l'ajout de pouzzolane et chaux sur le pourcentage des vides (Porosité) :

Sachant, que pour la couche de base, la porosité (pourcentage des vides) est donné par

$$n = \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}\right) \times 100 ; \text{ Avec } \gamma_s = 2.72 \text{ t/m}^3 . \text{ Figure III.10 montre l'évolution de}$$

pourcentage des vides en fonction de pourcentages de chaux ajouté.

Le tableau III.2 résume les résultats de pourcentage du vide pour les différents mélanges sable- chaux (%).

Tableau III.2 : Résultats de l'ajout de pouzzolane et chaux et pouzzolane sur le pourcentage des vides

	sable+ 0% chaux	sable+8% pouzzolan e +2% chaux	sable+12% pou zzolane+ 3% chaux	sable +16% pouzzola ne +4% chaux	sable +20% pouzzola ne+ 5% chaux
Teneur en eau optimum Wopt%	5	8.8	9.8	10.5	11.8
Densité sèche γ_d (t/m ³)	1.72	1.79	1.81	1.87	1.88
Pourcentage du vide n (%)	36.76	34.19	33.45	31.25	30.88

A partir des résultats du tableau précédent, la figure III.4 représente graphiquement la variation de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de chaux et pouzzolane ajouté.

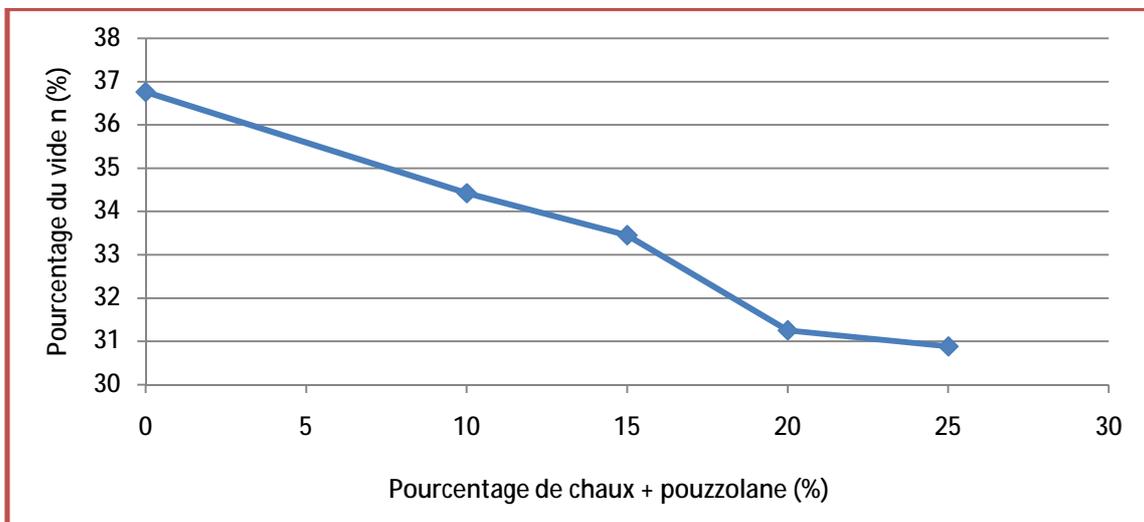


Figure III.4: Variation de porosité n(%) en fonction du pourcentage de pouzzolane et chaux ajouté

▼ **Commentaire :**

- L'ajout de chaux+pouzzolane présente une influence sur la teneur en eau optimale qui est traduite par une l'augmentation pour tous les mélanges sable-(chaux+pouzzolane) par rapport au sable seul allant de 5% jusqu'au 11.8%

- Le mélange sable+ (20% pouzzolane +5% chaux donne une densité sèche maximale avec une augmentation de $1.72t/m^3$ de sable seul jusqu'au $1.88 t/m^3$.
- On remarque une croissance de la densité sèche (augmentation) jusqu'au dernier mélange sable+ (20% pouzzolane+ 5% chaux) qui de $1.88 t/m^3$.
- Le pourcentage (20% pouzzolane+5% chaux) présente un pourcentage optimum de fine pour avoir un meilleur résultat de densité sèche et un minimal pourcentage de vide (porosité).

III.3. Essai CBR immédiat et immersion :

Le but de l'essai C.B.R est précisément d'apprécier l'aptitude du sol à supporter des charges routières pour permettre de dimensionner la couche de fondation.

III.3.1 Principe :

Par définition, l'indice pour C.B.R est le rapport exprimé en pourcentage de pression obtenue sur un matériau standard pour le même enfoncement. On distingue deux types d'essais C.B.R :

- Essai C.B.R immédiat pour laquelle l'échantillon est compacté avec une teneur en eau donnée, puis immédiatement après compactage on procède au poinçonnement. C'est cet essai qu'on utilise dans notre étude.
- Essai C.B.R immersion, c'est le même que le précédent, la seule différence est que le poinçonnement se fait après quatre jours d'immersion.
- Le compactage devra être fait dans les conditions de l'essai Proctor modifié.
- Compactage : on compacte le sol avec la teneur en eau W_{opt} suivant l'essai Proctor modifié (5 couches 10 coups ; 25 coups et 55 coups pour chaque couche).
- La presse utilisée à une vitesse constante d'enfoncement égale à 1.27 mm/min muni d'une tige de poinçonnement de $\varnothing = 5 \text{ cm}$ ($D = 4.96 \text{ cm}$, $S = 19.3 \text{ cm}^3$) et pourvue d'un contrôleur de cadence, ainsi que d'un comparateur permettant de suivre les enfoncements (Coefficient de l'anneau =20.4).

0.63 mm	1.25 mm	2 mm	2.5 mm	5 mm	7.5 mm	10 mm	12.5 mm
30 secondes	1 minute	1.4 minutes	2 minutes	4 minutes	6 minutes	8 minutes	10 minutes

III.3.2 Résultats CBR immédiat :

Les tableaux CBR immédiat (III.3) ; (III.4) ; (III.5) ; (III.6) ;(III.7) et (III.8) résument la pression obtenu en fonction d'enfoncement pour les différents mélanges sable+ chaux à 10 coups ; 25 coups et 55 coups par couche.

Tableau III.3 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le sable seul

	Temps	30S	1mn	1mm 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable seul 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	2.33	3.52	4.22	4.84	7.77	9.89	10.70	11.31
sable seul 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	2.77	3.73	5.65	6.17	9.35	11.49	12.72	14.13
sable seul 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	3.43	5.12	7.45	8.57	12.01	14.37	15.89	17.32

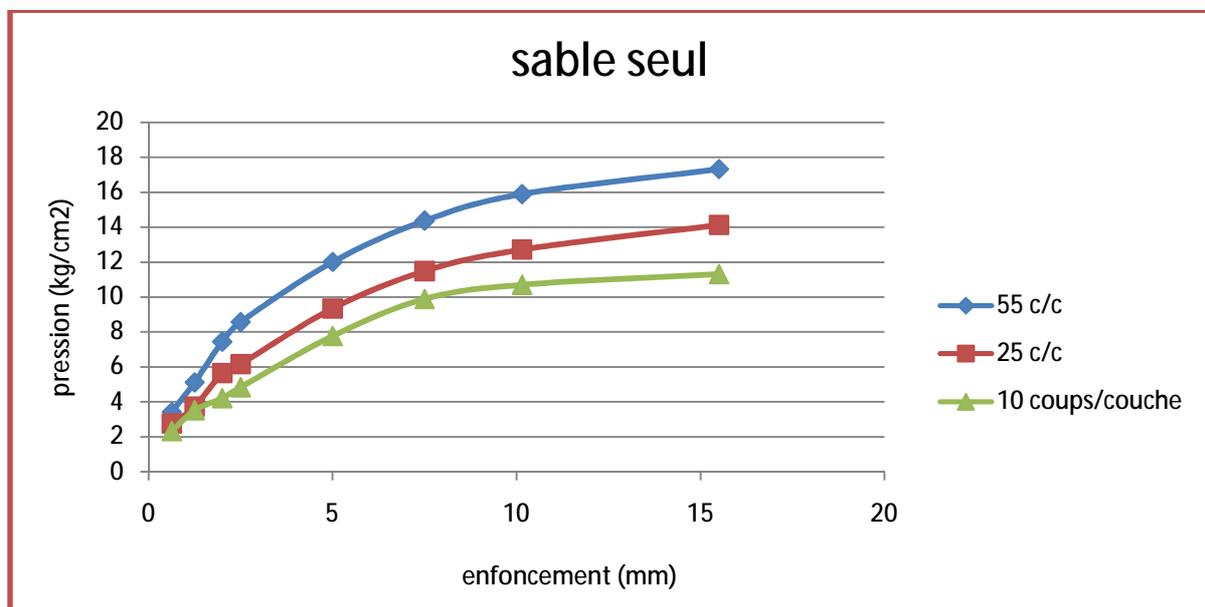


Figure III.5: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable seul.

Tableau III.4 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le
Sable +8%pouzzolane 2%chaux

	Temps	30S	1mn	1mn 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable + 8%P+ 2% Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	2.11	3.17	6.28	8.45	15.85	21.13	26.42	28.53
sable + 8%P+ 2% Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	6.34	11.62	16.91	19.02	28.58	34.88	35.93	36.99
sable + 8%P+2% Ch 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	6.34	13.74	23.25	27.48	40.16	46.5	47.56	48.62

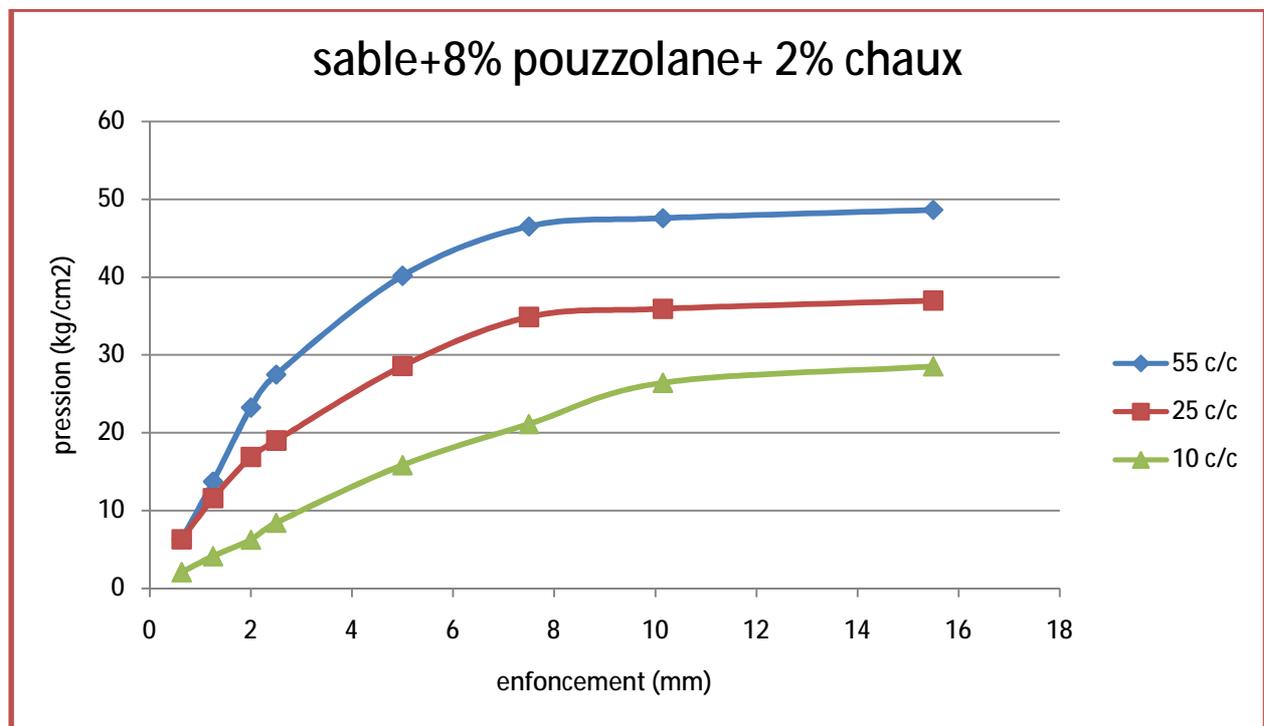


Figure III.6: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour
Sable+8%pouzzolane+ 2% chaux

Tableau III.5 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour
le sable +12%pouzzolane + 3%chaux

	Temps	30S	1mn	1mm 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable + 12%P+ 3% Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	2.11	5.22	8.39	11.74	22.2	32.76	38.05	40.16
sable + 12%P+3% Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	4.22	7.28	12.56	15.85	31.76	38.99	46.5	48.62
sable + 12%P+ 3% Ch 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	8.45	16.91	27.48	31.76	41.22	48.62	52.84	53.9

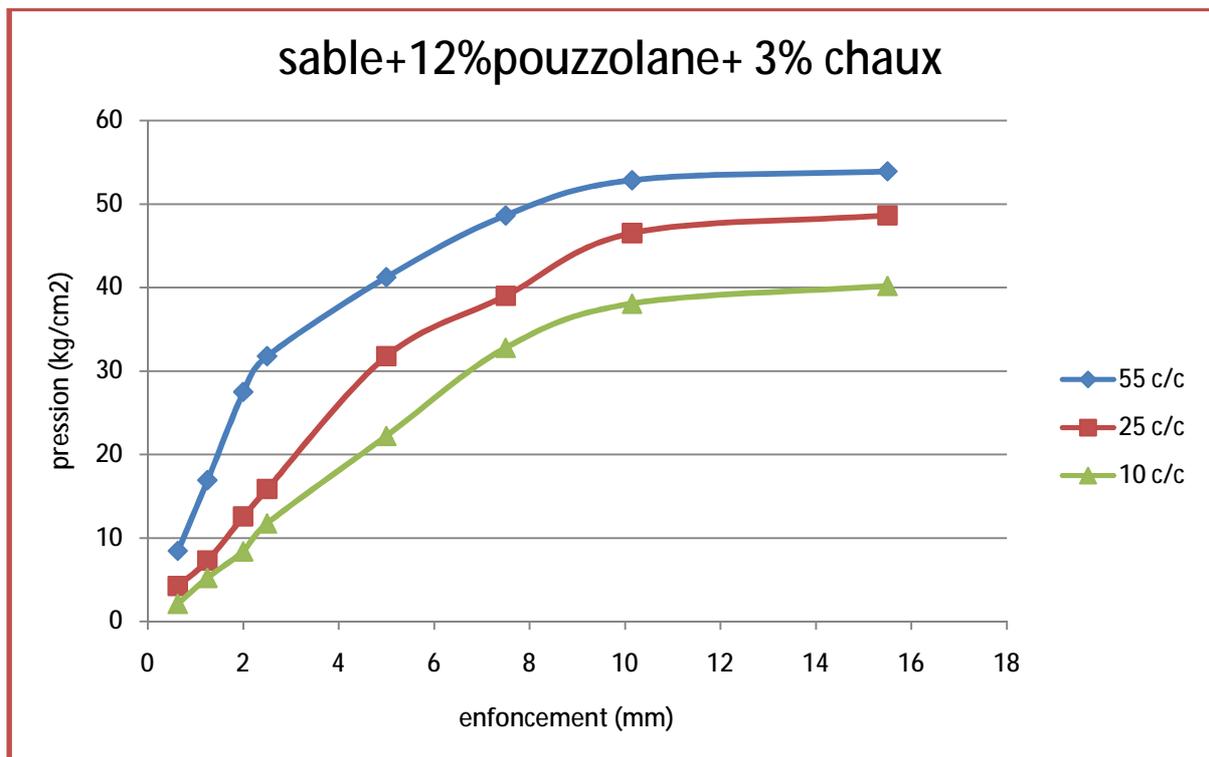


Figure III.7: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour
Sable+12%pouzzolane +3% chaux

Tableau III.6 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le sable+16%pouzzolane + 4%chaux

	Temps	30S	1mn	1mm 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable + 16%P 4% Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	4.22	7.39	13.74	15.85	34.88	43.33	48.62	50.73
sable + 16P+ 4% Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	5.28	11.62	19.02	22.19	40.16	49.56	54.96	56.02
sable + 16P+ 4% Ch 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	7.39	16.79	29.25	38.1	56.02	70.81	77.16	79.27

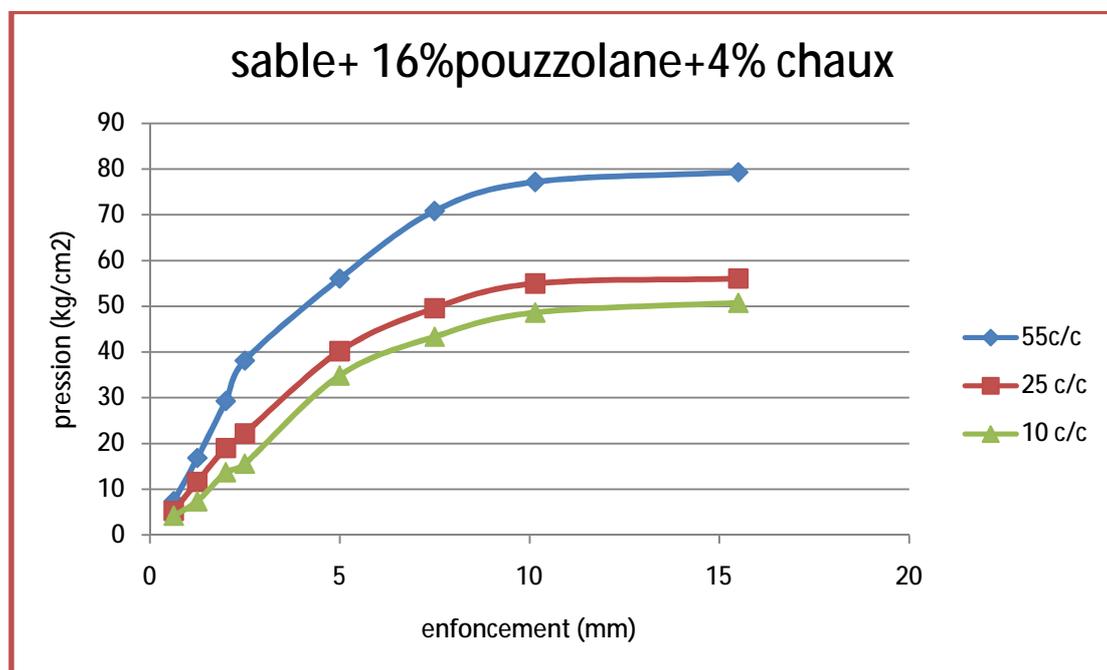


Figure III.8: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour
Sable +16%pouzzolane +4% chaux

Tableau III.7 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le
Sable +20%pouzzolane + 5%chaux

Temps	30S	1mn	1mm 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn	
Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50	
sable + 20%P+5%Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	4.22	8.45	13.55	17.79	36.99	46.33	54.96	60.24
sable + 20%P+5%Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	5.28	10.56	17.74	23.91	47.56	62.13	76.1	78.21
sable + 20%P+5%Ch 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	7.39	15.85	22.13	28.42	56.02	73.93	89.84	90.9

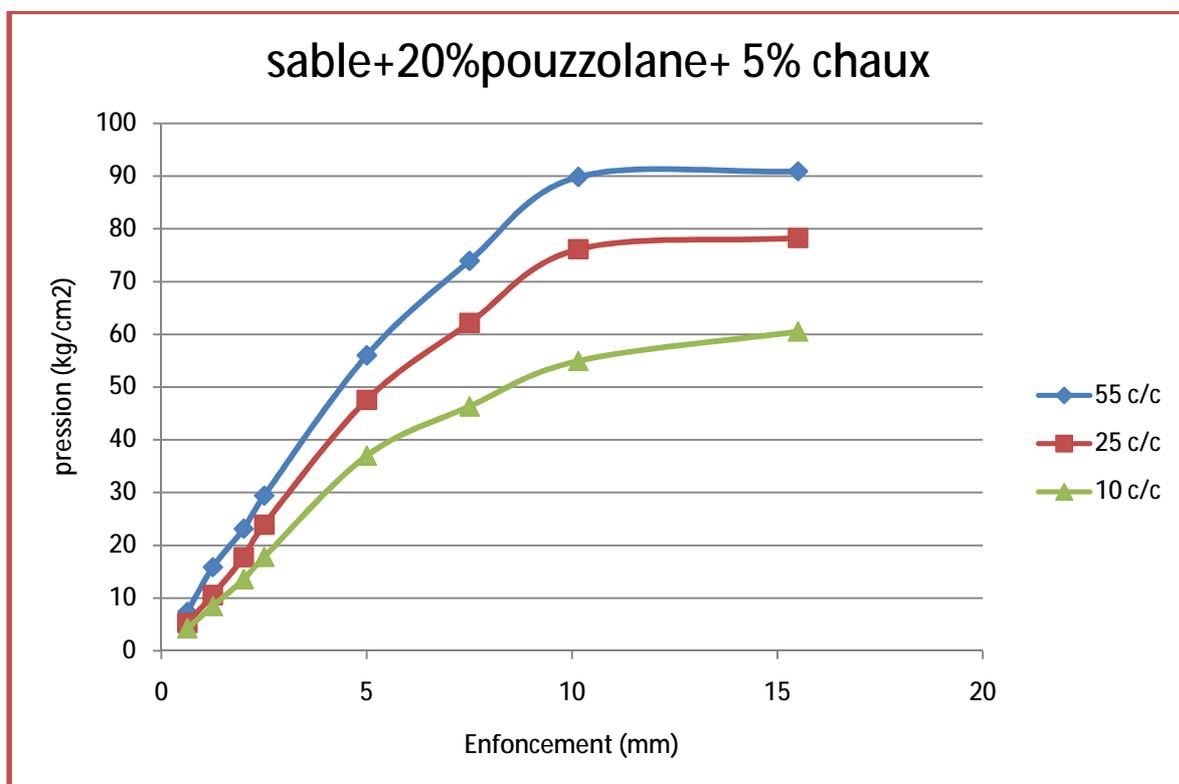


Figure III.9: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour
Sable+20%pouzzolane +5% chaux.

III.3.3 Exploitation des résultats :

- **L'indice portant Californien :**

On compare la pression qui a provoqué un certain enfoncement dans l'échantillon avec celle qui a provoqué le même enfoncement d'un sol type, on note les pressions correspondantes aux enfoncements 2.5 mm et 5 mm : l'indice est égal au maximum des deux rapports suivants :

$$I_{2.5} = \frac{P_{2.5}}{0.7} \text{ et } I_5 = \frac{P_5}{1.05}$$

$P_{2.5}$: Pression correspond à un enfoncement de 2.5 mm.

P_5 : Pression correspond à un enfoncement de 5 mm.

0.7 Et 1.05 correspond à un enfoncement aux pressions d'enfoncement de matériau standard.

Le tableau III.9 résume les résultats obtenu d'essai CBR indice CBR max pour les différents nombre de coups pour chaque mélange ainsi le **CBR à 95 % de L'OPM.**

Tableau III.8 : Résultats obtenu pour le CBR immédiat à 95% de l'OPM

Sable seul			
	10 coups/ couche	25 coups/ couche	55 coups/ couche
W (%)	5	5	5
γ_d (t/m ³)	1.58	1.65	1.72
Indice CBR max(%)	6.8	8.92	11.68
CBR à 95% de l'OPM (%)	8.28		
Sable +8%pouzzolane +2%chaux			
W (%)	8.8	8.8	8.8
γ_d (t/m ³)	1.63	1.73	1.80
Indice CBR max (%)	15.09	27.17	39.25
CBR à 95% de l'OPM (%)	23.5		
Sable +12%pouzzolane +3%chaux			
W (%)	9.8	9.8	9.8
γ_d (t/m ³)	1.65	1.77	1.82
Indice CBR max (%)	21.14	30.24	45.37
CBR à 95% de l'OPM (%)	26.5		
Sable +16%pouzzolane +4%chaux			
W (%)	10.7	10.7	10.7
γ_d (t/m ³)	1.68	1.79	1.83
Indice CBR max(%)	33.21	38.24	54.42
CBR à 95% de l'OPM (%)	37		
Sable+20%pouzzolane +5%chaux			
W (%)	11.8	11.8	11.8
γ_d (t/m ³)	1.71	1.80	1.84
Indice CBR max (%)	35.22	45.29	53.35
CBR à 95% de l'OPM (%)	43		

Les figures III.17 ; III.18 ; III.19 ; III.20; III.21 et III.22 montrent la déduction des valeurs CBR à 95% à partir d'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche.

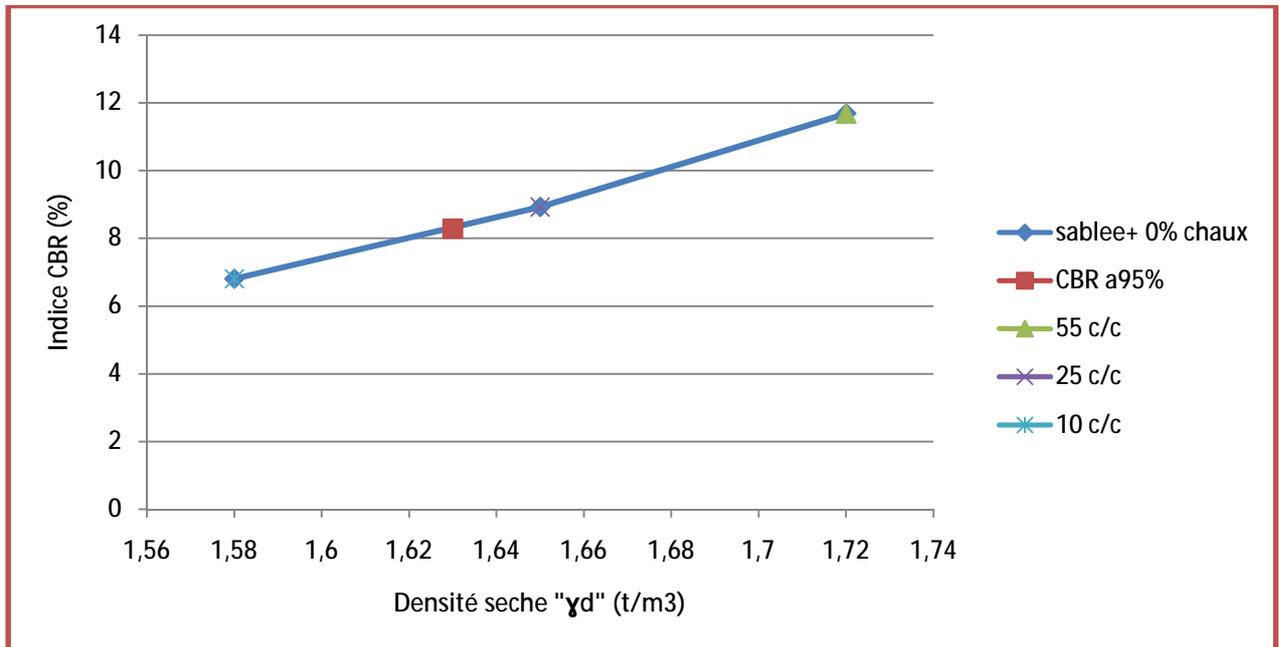


Figure III.10 : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de sable seul

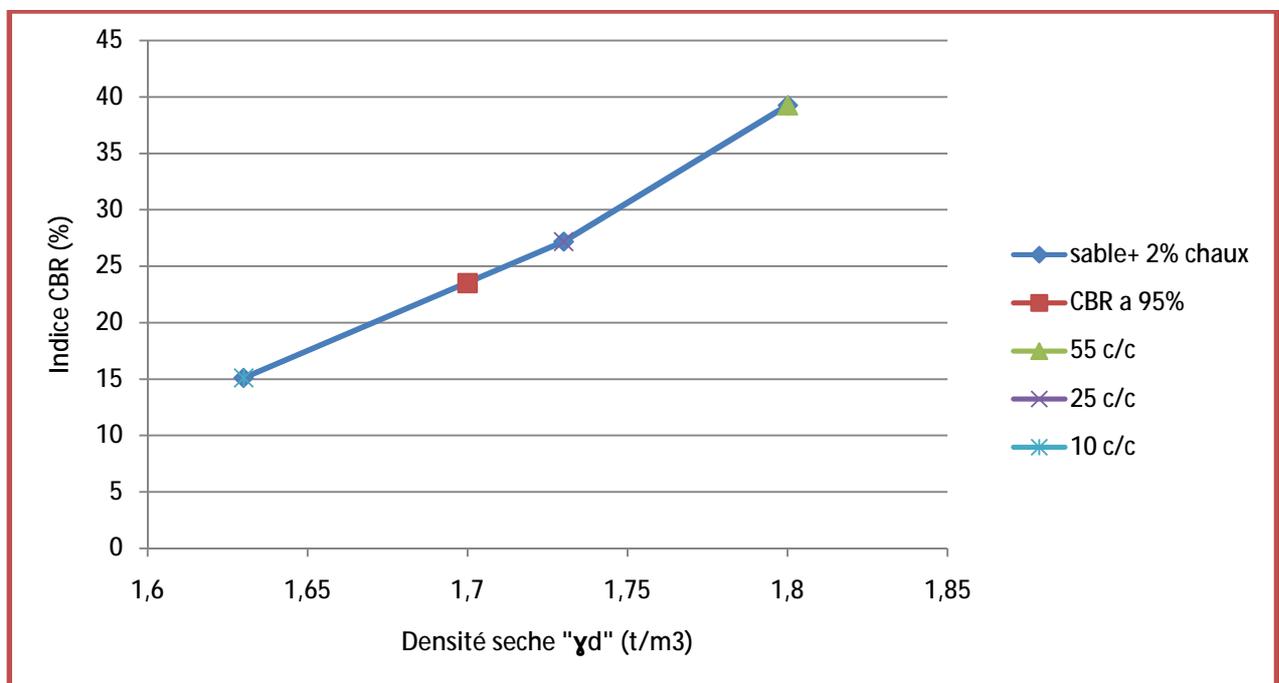


Figure III.11: l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+8% pouzzolane +2% chaux.

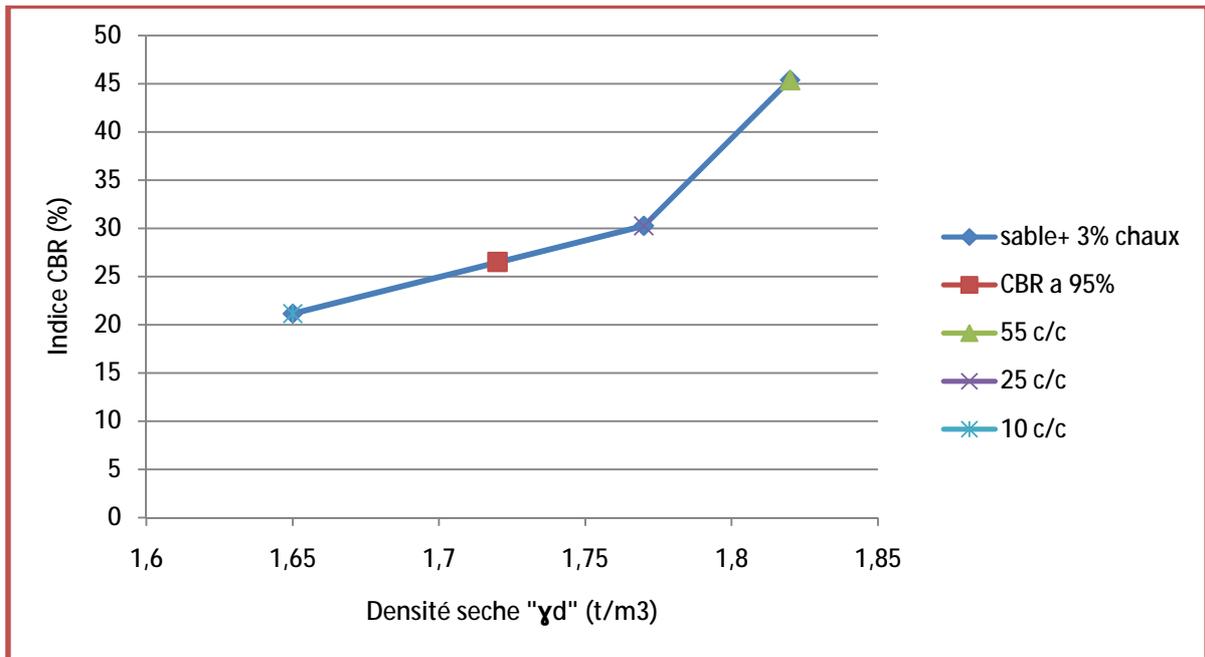


Figure III.12 : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+12% pouzzolane +3% chaux.

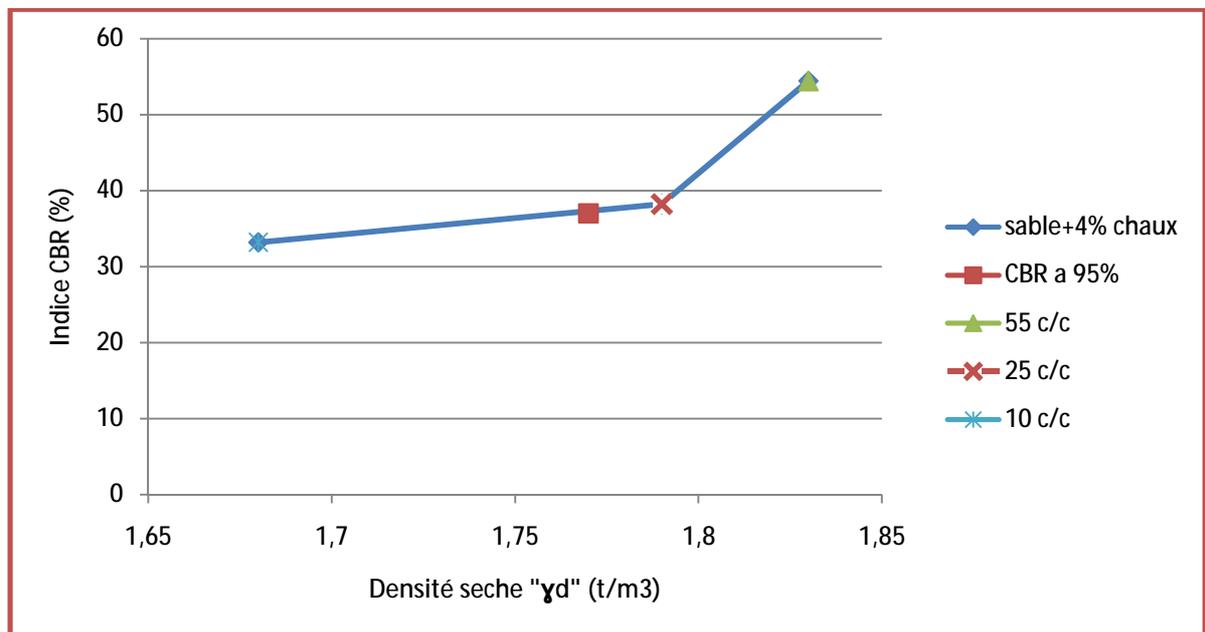


Figure III.13 : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+ 16% Pouzzolane+4% chaux.

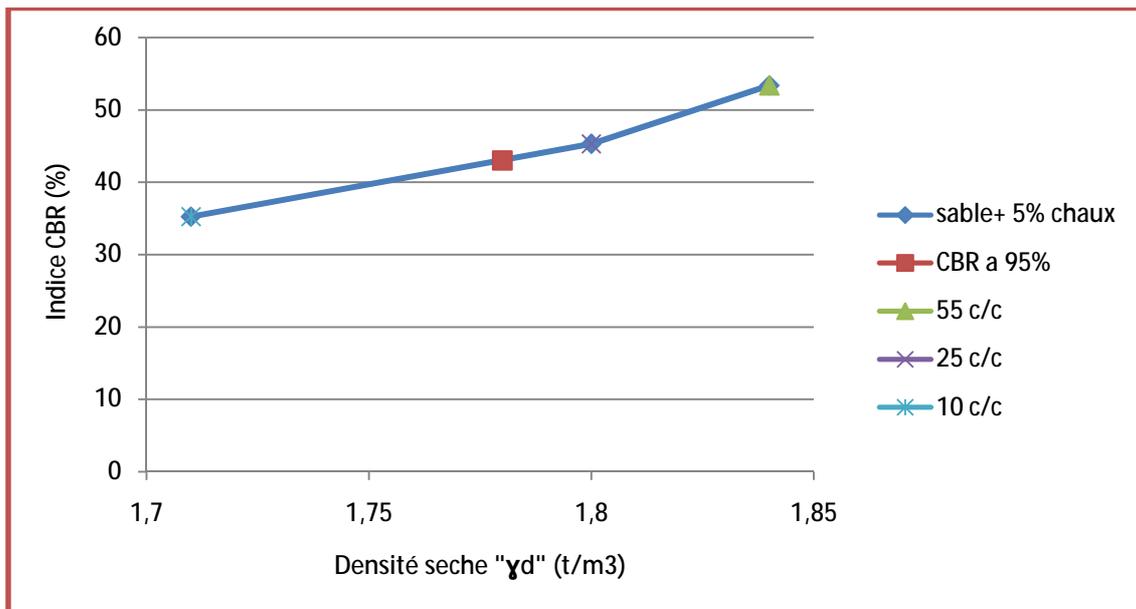


Figure III.14 : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+20% pouzzolane +5% chaux.

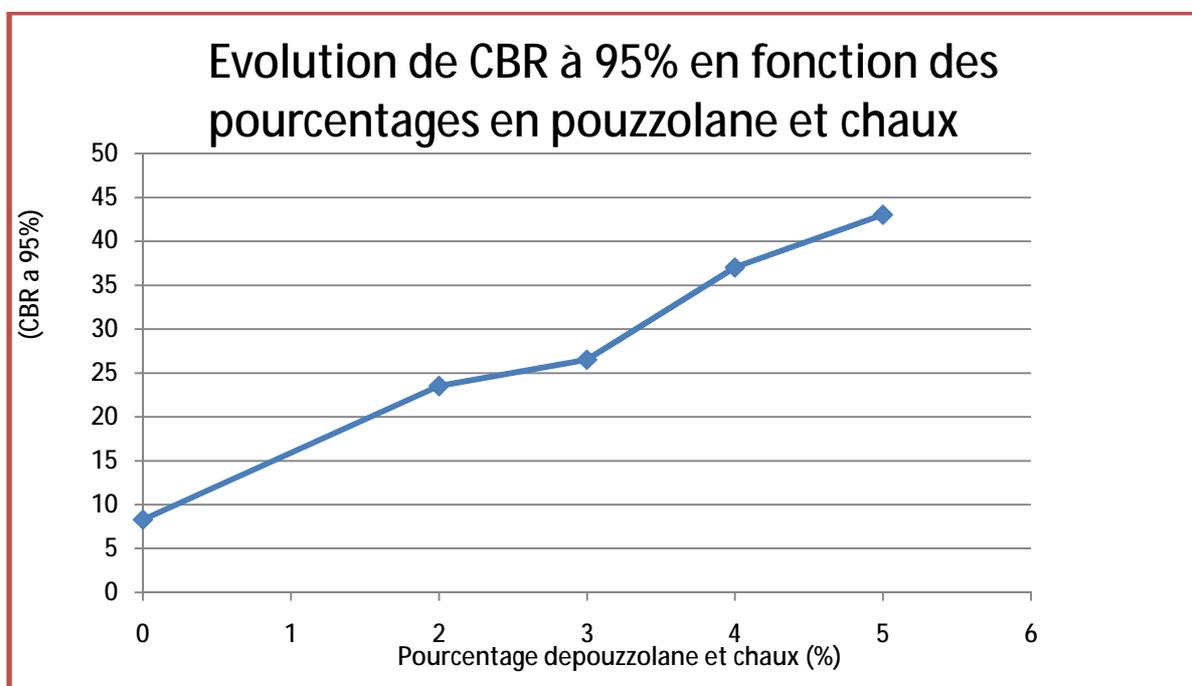


Figure III.15 Evolution de CBR à 95% en fonction des pourcentages en pouzzolane+ chaux

▼ Commentaire :

- Tous les mélanges montrent une croissance proportionnelle des indices CBR par rapport au pourcentage 20% Pouzzolane+5% chaux et par la suite une augmentation de CBR à 95% par rapport au sable seul.
- Le mélange sable+20% pouzzolane 5% chaux donne des valeurs maximales, allant de 8,28 % de sable seul jusqu'à 43 % ce qui est confondu avec la valeur maximale de densité sèche.
- Les résultats obtenus en essai CBR confirme que le pourcentage 20% pouzzolane 5 % chaux est un teneur optimum de fine pour cette étude.

III.3.4 Résultats CBR immersion

Les tableaux CBR immersion (III.10) ; (III.11) ; (III.12) ; (III.13) ;(III.14) et (III.15) résumant la pression obtenue en fonction d'enfoncement pour les différents mélanges sable + chaux à 10 coups ; 25 coups et 55 coups par couche

Tableau III.9: Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le sable seul

	Temps	30S	1mn	1mm 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable seul 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	2.36	4.12	6.95	8.12	12.32	14.13	15.07	16.22
sable seul 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	2.95	5.91	8.87	10.22	14.76	16.55	17.55	18.78
sable seul 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	3.54	8.27	11.99	13.25	16.79	19.22	20.67	22.44

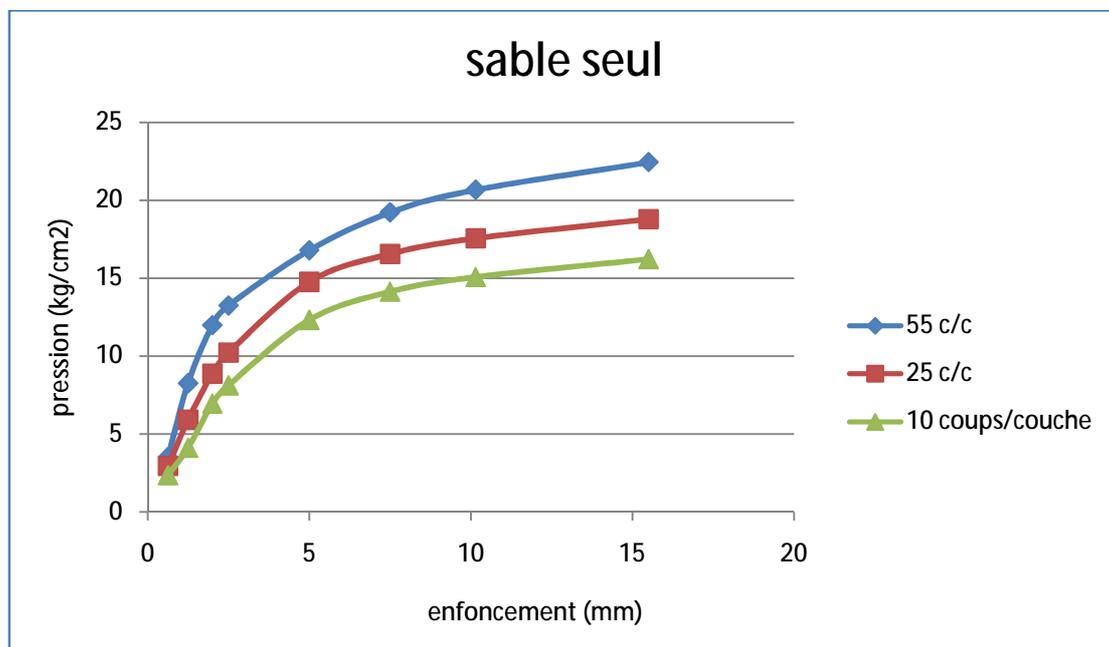


Figure III.16: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable

Tableau III.10 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le sable
+8% pouzzolane+ 2% chaux

	Temps	30S	1mn	1mm 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable + 8%P+ 2% Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	0.00	2.11	4.22	5.28	11.56	16.85	22.19	24.31
sable + 8% P+ 2% Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	3.17	7.39	11.56	14.79	21.13	26.42	31.70	32.76
sable + 8%P+ 2% C 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	4.22	9.51	15.74	19.02	29.42	38.05	40.16	41.22

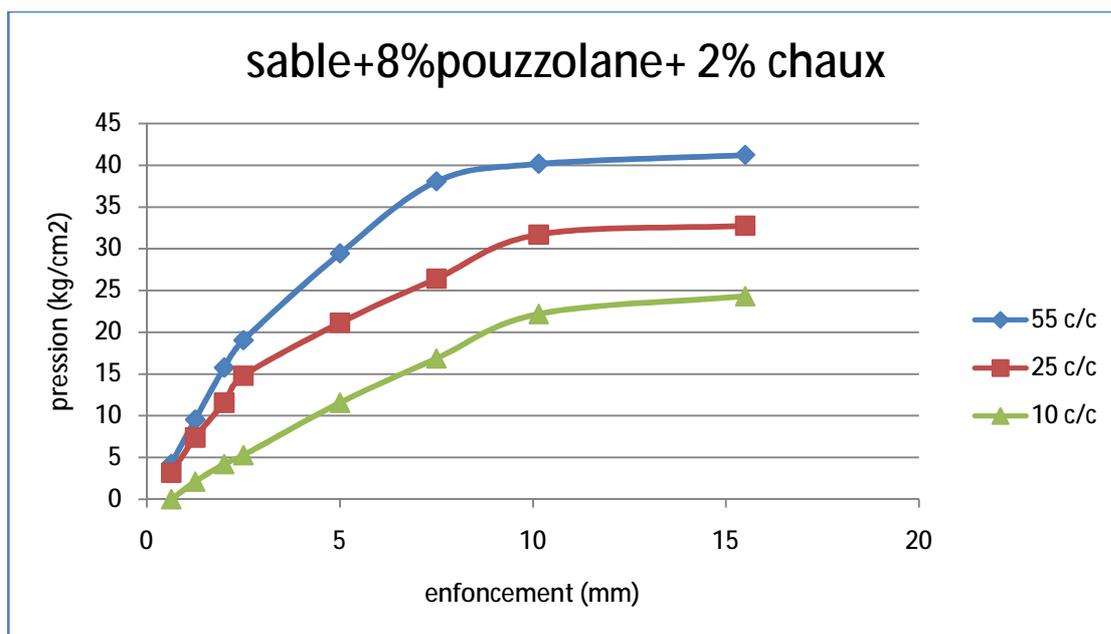


Figure III.17: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable
+8% pouzzolane+2% chaux

Tableau III.11: Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le sable+%pouzzolane + 3%chaux

	Temps	30S	1mn	1mn 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable + 12%P+3% Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	0	2.11	5.28	7.39	14.68	21.13	27.48	29.59
sable + 12%P+ 3% Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	1.05	4.11	7.34	9.51	20.08	28.48	35.93	38.05
sable + 12%P+3% Ch 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	3.17	10.45	16.91	22.19	30.59	38.05	43.33	45.45

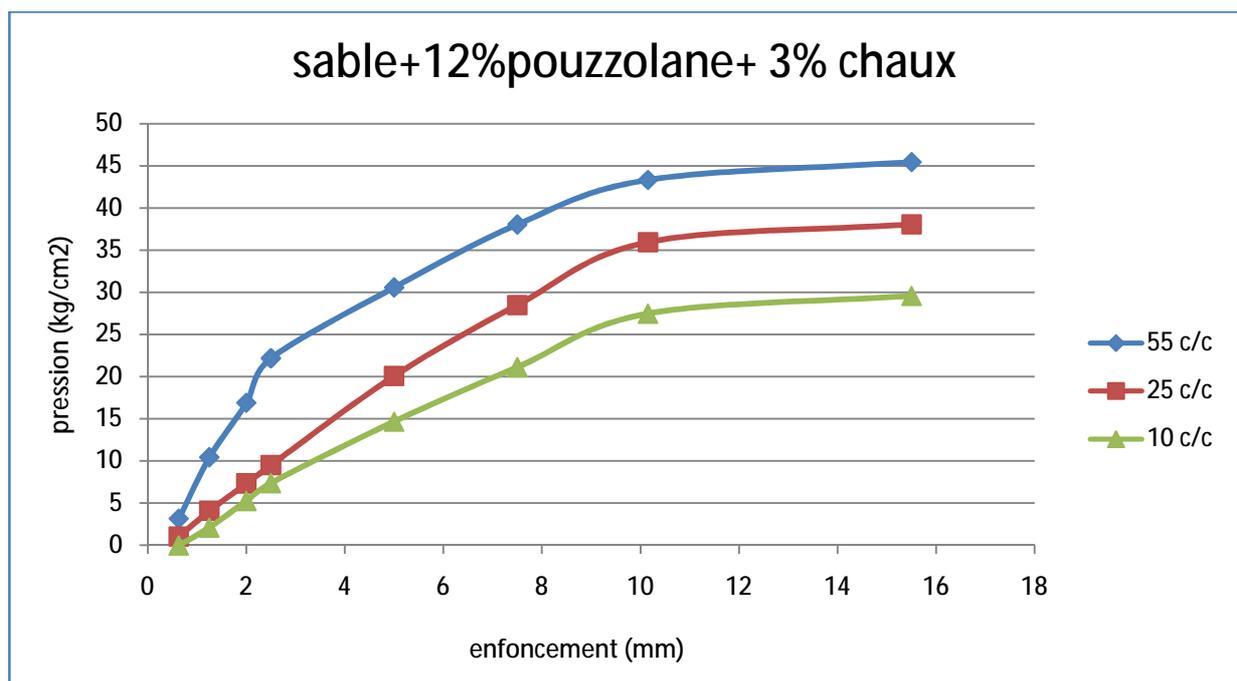


Figure III.18: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +12%pouzzolane 3% chaux.

Tableau III.12 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le
sable+16% pouzzolane + 4%chaux

	Temps	30S	1mn	1mn 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable + 16% P+ 4% Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	2.11	4.22	8.45	10.56	23.25	30.82	39.1	40.16
sable + 16% P+ 4% Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	3.17	7.34	12.68	16.91	31.70	40.16	47.56	48.62
sable + 16%P+ 4% C 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	4.22	11.45	20.79	26.53	45.27	58.13	65.53	66.59

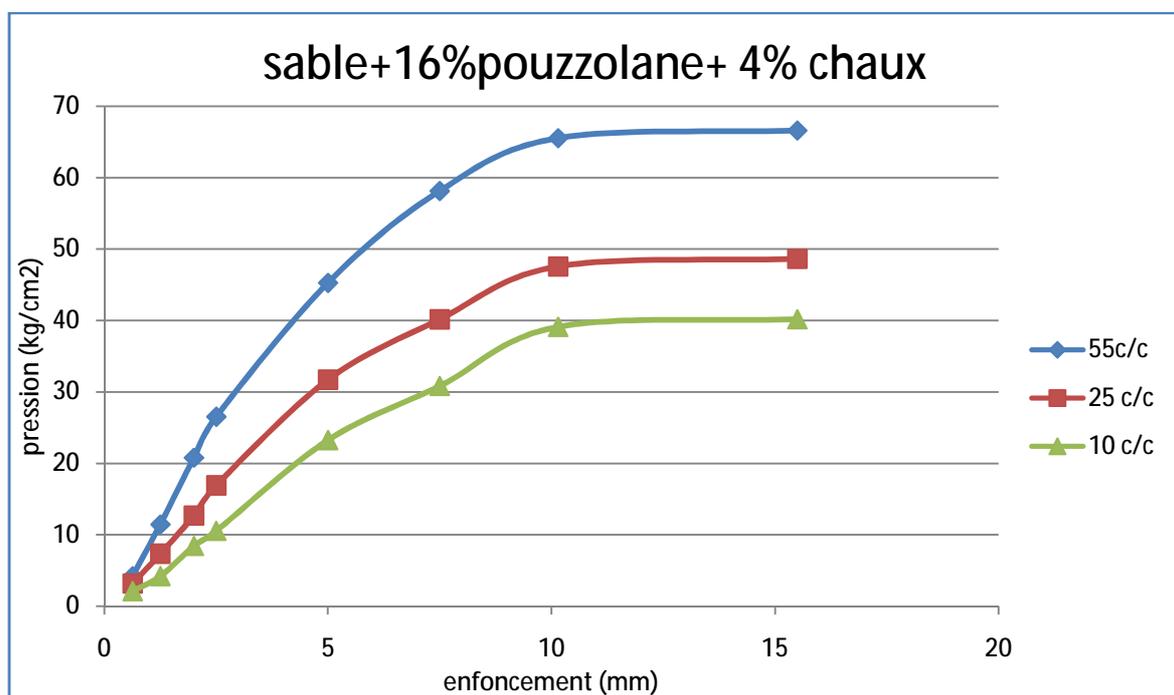


Figure III.19: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +16% pouzzolane
4% chaux

Tableau III.13 : Résultats de la pression en fonction d'enfoncement pour le
Sable +20%pouzzolane + 5%chaux

	Temps	30S	1mn	1mm 40s	2mn	4mn	6mn	8 mn	10mn
	Enf (mm)	0.63	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50
sable + 20%P+5% Ch 10 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	1.05	4.22	7.39	11.62	25.36	36.82	45.45	47.56
sable + 20%P+ 5%Ch 25 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	3.17	6.34	11.56	14.68	33.82	49.56	61.41	64.59
sable + 20%P+5% Ch 55 coups/couche	Pression (Kg/cm ²)	5.28	10.56	17.91	23.25	42.16	55.84	65.64	69.76

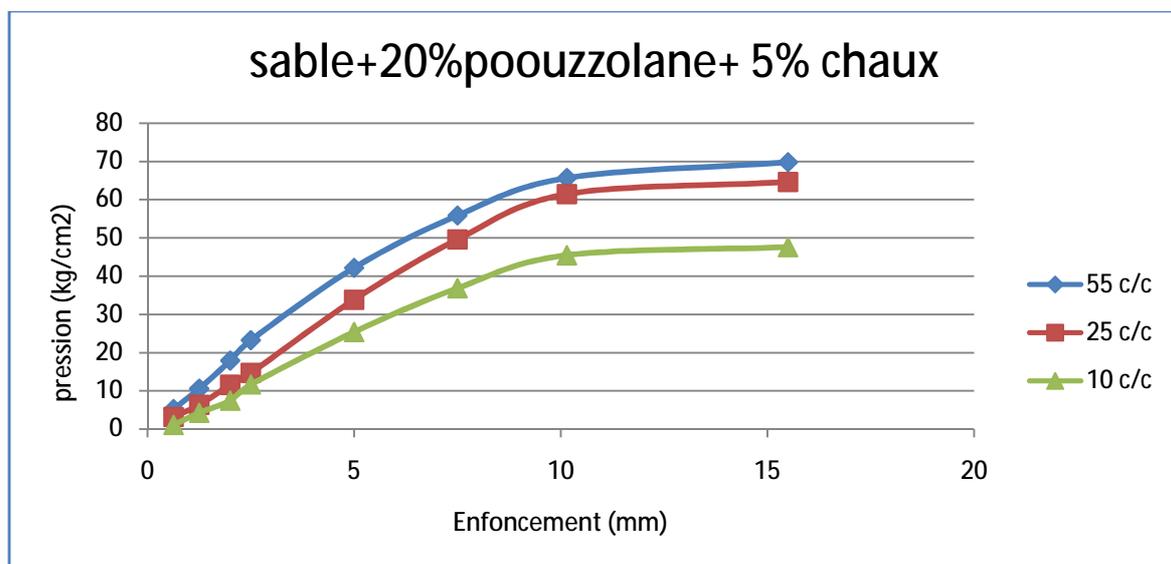


Figure III.20: Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable
+20 %pouzzolane +5% chaux

Tableau III.14: Résultats obtenu pour le CBR immersion à 95% de l'OPM

Sable seul			
	10 coups/ couche	25 coups/ couche	55 coups/ couche
W (%)	5.00	5.00	5.00
γ_d (t/m^3)	1.60	1.66	1.70
Indice CBR max(%)	6.19	7.77	9.92
CBR à 95% de l'OPM (%)	6.45		
Sable+8%pouzzolane 2%chaux			
W (%)	8.8	8.8	8.8
γ_d (t/m^3)	1.65	1.76	1.81
Indice CBR max (%)	11	19.12	28.01
CBR à 95% de l'OPM (%)	7.57		
Sable +12%pouzzolane +3%chaux			
W (%)	9.8	9.8	9.8
γ_d (t/m^3)	1.67	1.78	1.84
Indice CBR max (%)	13.98	21.12	31.7
CBR à 95% de l'OPM (%)	10.35		
Sable +16%pouzzolane +4%chaux			
W (%)	10.5	10.5	10.5
γ_d (t/m^3)	1.71	1.81	1.85
Indice CBR max(%)	22.14	30.19	40.11
CBR à 95% de l'OPM (%)	11.10		
Sable +20%pouzzolane+ 5%chaux			
W (%)	11.8	11.8	11.8
γ_d (t/m^3)	1.72	1.83	1.87
Indice CBR max (%)	24.15	32.2	43.15
CBR à 95% de l'OPM (%)	12.55		

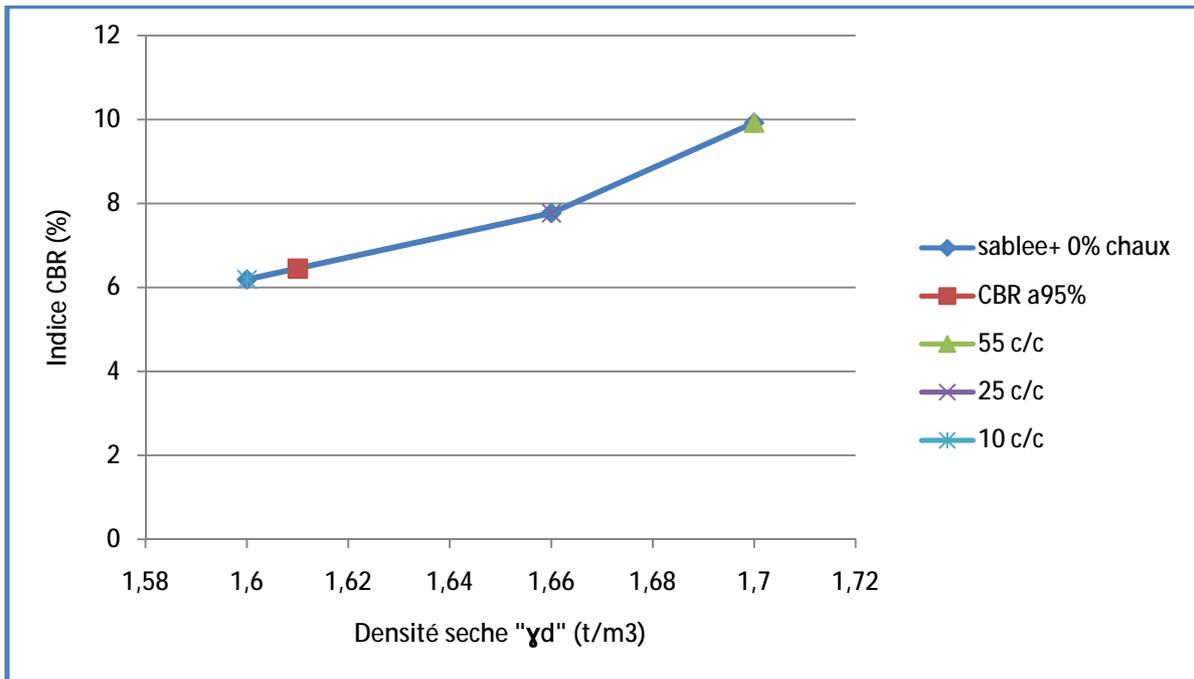


Figure III.21 : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de sable seul

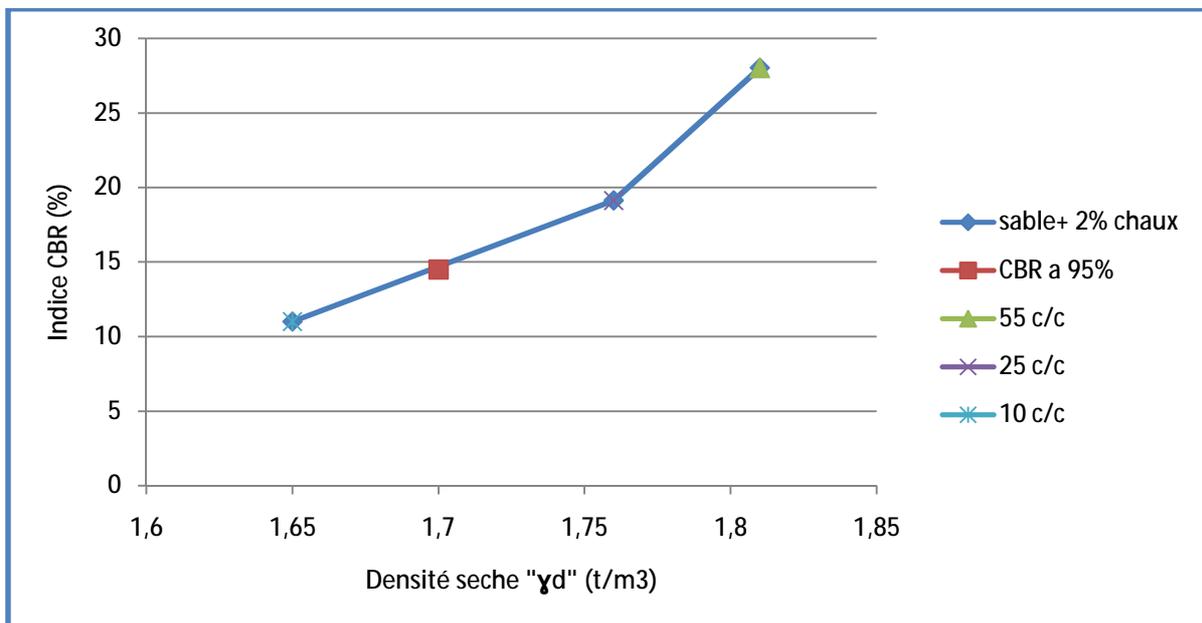


Figure III.22 : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+8%pouzzolane +2% chaux.

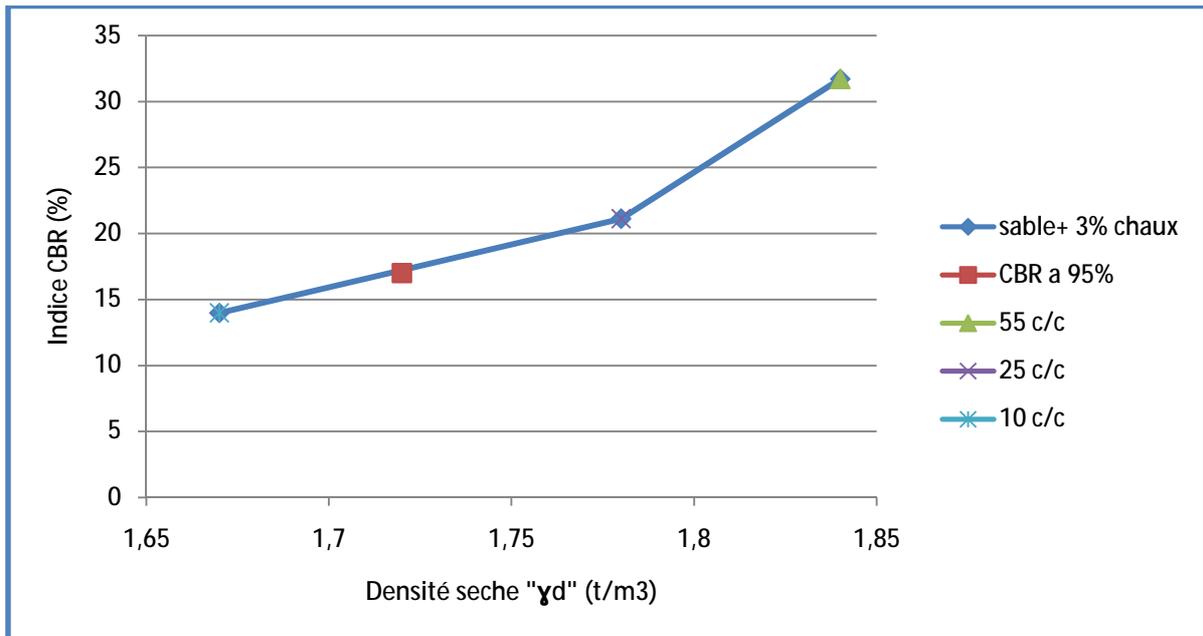


Figure III.23: l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+12 % pouzzolane +3% chaux.

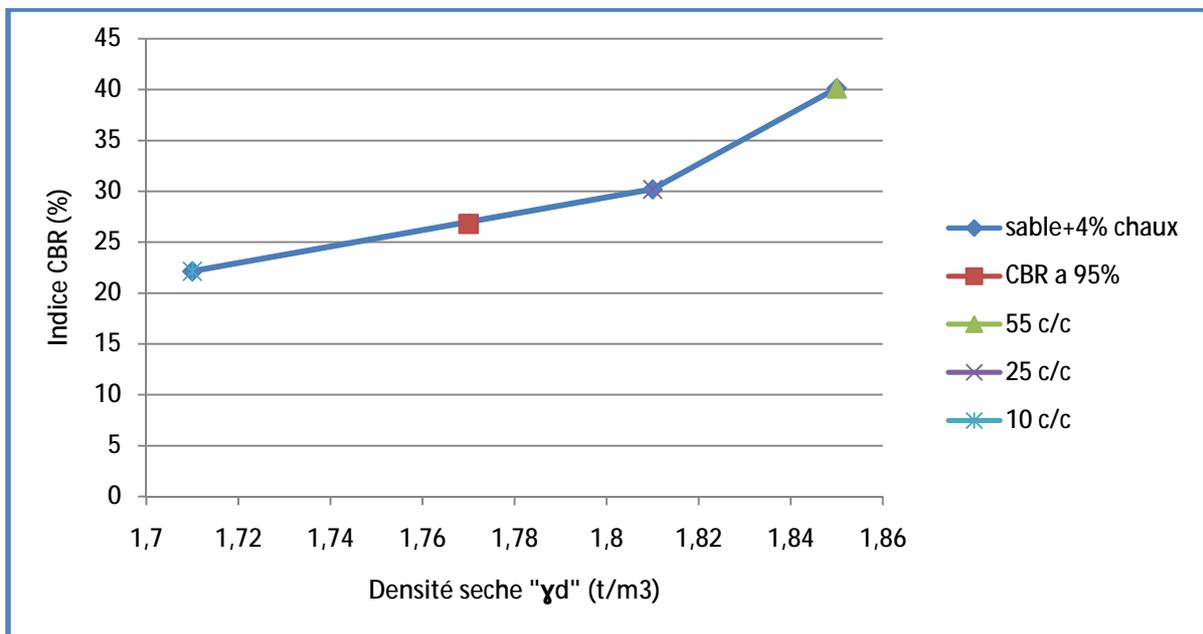


Figure III.24 : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+16% pouzzolane +4% chaux.

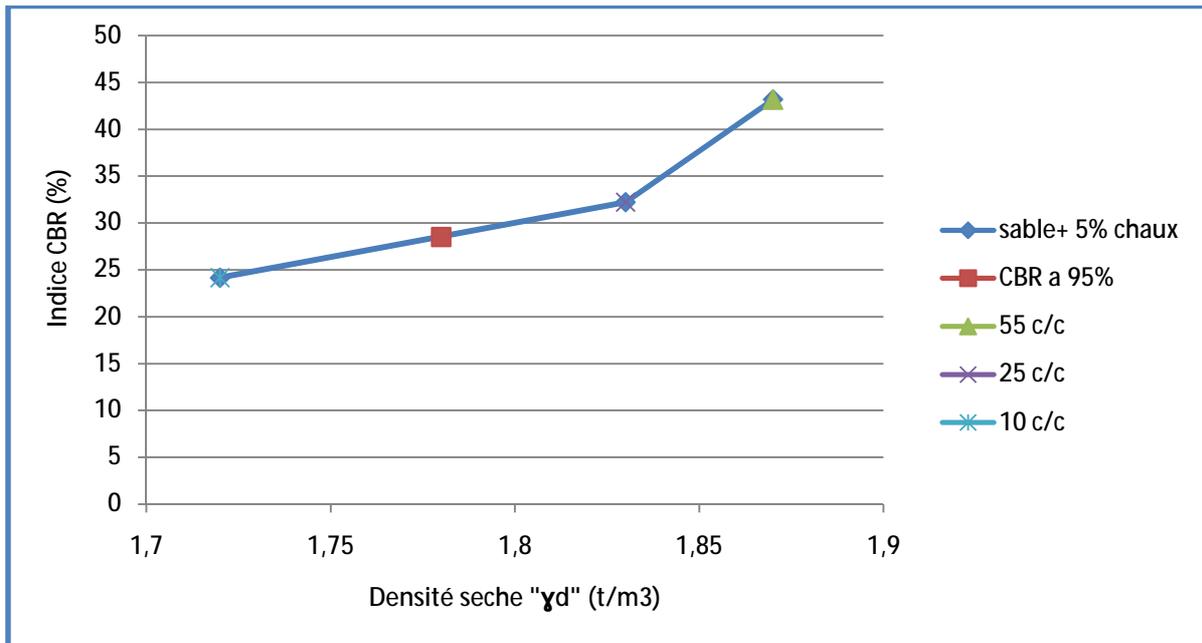


Figure III.25: l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+20%pouzzolane +5% chaux.

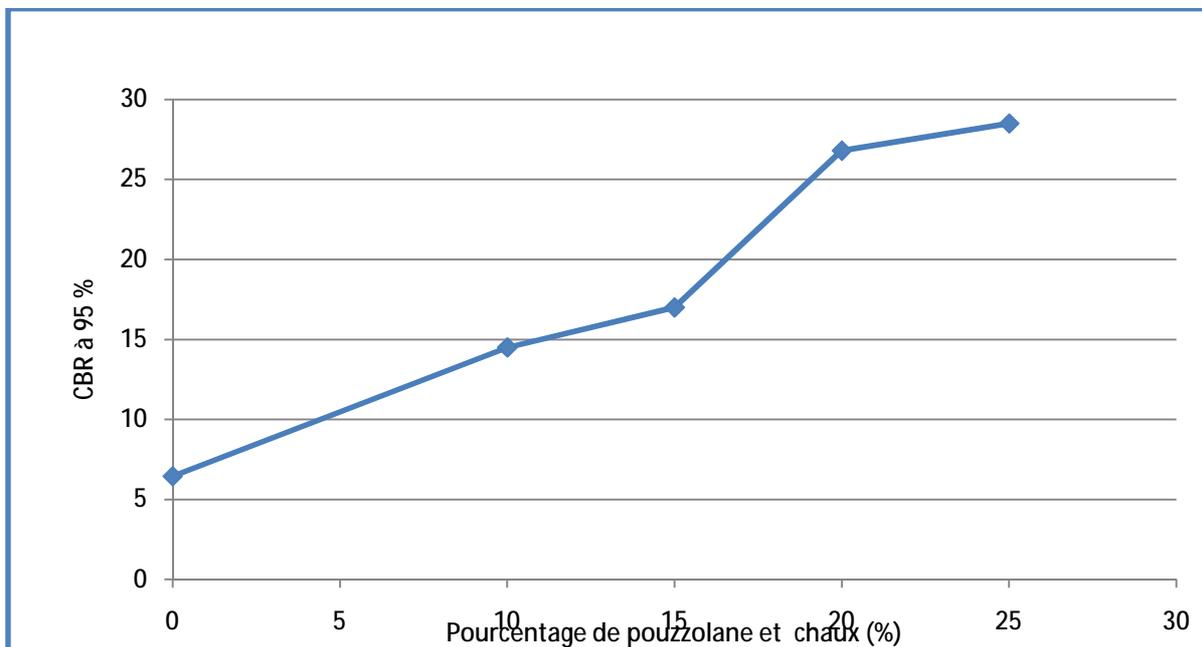


Figure III.26 Evolution de CBR à 95% en fonction des pourcentages en chaux et pouzzolane

▼ Commentaire :

- Tous les mélanges montrent une augmentation des indices CBR et par la suite une augmentation de CBR à 95% par rapport au sable.
- L'indice CBR immédiat et à l'immersion varie proportionnellement à l'augmentation de pourcentage (pouzzolane+chaux).
- Le mélange sable (20% Pouzzolane+5% chaux) donne des valeurs maximales de CBR à 95%, allant de 6,45 % de sable seul jusqu'à 12,55 % ce qui est confondu avec la valeur maximale de densité sèche.
- Les résultats obtenus en essai CBR confirme que le pourcentage (20% pouzzolane+ 5 % chaux) est un teneur optimum de fine pour cette étude.

III.4 RESISTANCE AU CISAILLEMENT :

Les essais les plus utilisés au laboratoire, sont l'essai de cisaillement direct (NF P94-071) et l'essai triaxial.

III.4.1 Essai de cisaillement direct :

L'essai est destiné à évaluer les caractéristiques mécaniques d'un sol, c'est-à-dire la cohésion C , l'angle de frottement Φ' et la résistance au cisaillement τ_{\max} au moment de rupture.

III.4.2 Principe de l'essai:

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre. De plus, un piston permet d'exercer une contrainte normale au plan de cisaillement.

Les demi-boîtes inférieures sont entraînées horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est à mesurer à l'aide d'un anneau fixé à la demi-boîte extérieure.

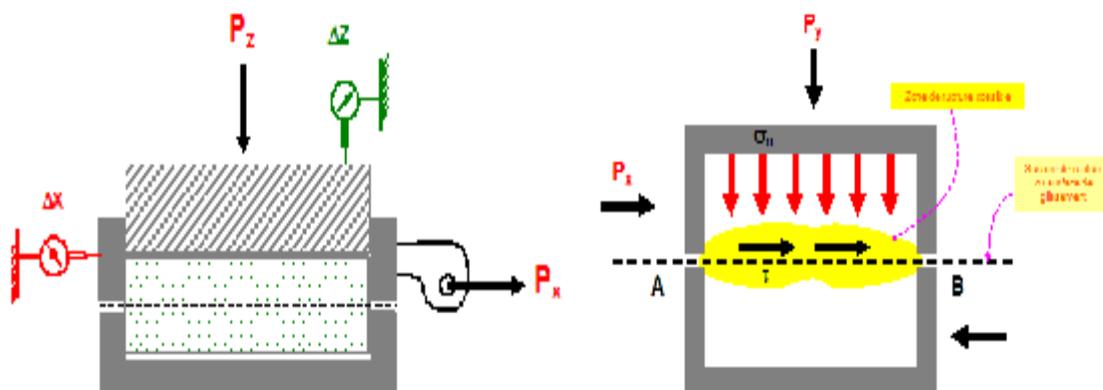


Figure III.27 : Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Sur la courbe Contrainte-Déformation (déplacement horizontal), la résistance au cisaillement est définie comme étant:

- § Le maximum de la contrainte de cisaillement τ_{\max} .
- § La contrainte de cisaillement τ_1 correspondant à une déformation fixée ϵ_1
- § La résistance au cisaillement est la contrainte de cisaillement à très grande déformation.

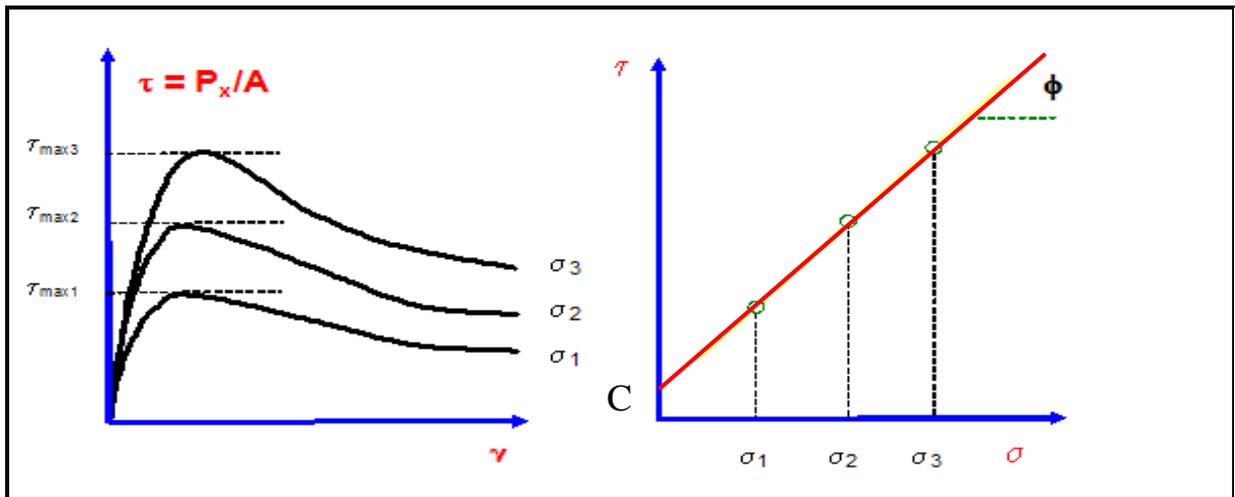


Figure III.28: Les caractéristiques mécaniques de résistance au cisaillement.

III.4.3 Les différents types d'essais :

Il existe trois types qui peuvent être effectués à l'appareil de cisaillement à la boîte:

a) Essai consolidé – drainé (C.D) :

L'échantillon est consolidé sous un effort N constant, cet essai permet de mesurer les paramètres ϕ_d et C_d . la vitesse de cisaillement est environ un micron par minute, et doit être choisie en fonction de la perméabilité du sol testé. La vitesse de cisaillement est de l'ordre de micron par minute

b) Essai consolidé – non drainé (C.U) :

L'essai C.U ne convient que pour les sols de faibles perméabilités. La phase de consolidation est identique à celle de l'essai CD.

c) Essai non consolidé – non drainé (UU) :

Cet essai convient les sols peu perméables Il est important de réaliser l'essai avec une vitesse de cisaillement élevée, de l'ordre de 1mm/mn.

Le tableau II.7 reporte les vitesses des trois types d'essais.

Tableau III.15 : Vitesses des essais de cisaillement.

Type d'essai	Vitesse
Essai U.U	0,25-0,5 (mm/mn)
Essai C.U	2-20 ($\mu\text{m}/\text{mn}$)
Essai C.D	0,5-2($\mu\text{m}/\text{mn}$)

III.4.4 Choix des paramètres de résistance au cisaillement :

La détermination des paramètres mécaniques s'effectue conformément aux indications données par le tableau III.18 Smaida. (2008).

Tableau III.16 : Choix des paramètres caractéristiques de cisaillement de sols cité par Smaida (2008)

Type de sol	Type de calcul	Type de Comportement	Caractéristiques	Type D'essai	paramètres	formule	appareillage
Cohérent saturé	Court Terme	Non Drainé	Non Drainées	U.U C.U	C_u λ_{cu}	$\tau = C_u$ $\Delta C_u = \lambda_{cu} \cdot \Delta \sigma'$	Triaxial (boite de cisaillement)
Cohérent Non saturé	Court terme	Non Drainé	Non Drainées	U.U	C_{uu}, φ_{uu}	$\tau = C_u + \sigma' \cdot \text{tg } \varphi_{uu}$	triaxial (boite de cisaillement)
Cohérent	Long Terme	Drainé	Drainées	C.D C.U avec mesure de u	C', φ'	$\tau = C' + \sigma' \tan \varphi'$	Triaxial où boite de cisaillement (C.D), triaxial pour C.U
pulvérulent	Long Terme Ou Court terme	Drainé	Drainées	C.D	C', φ'	$\tau = C' + \sigma' \tan \varphi'$	Triaxial ou boite de cisaillement

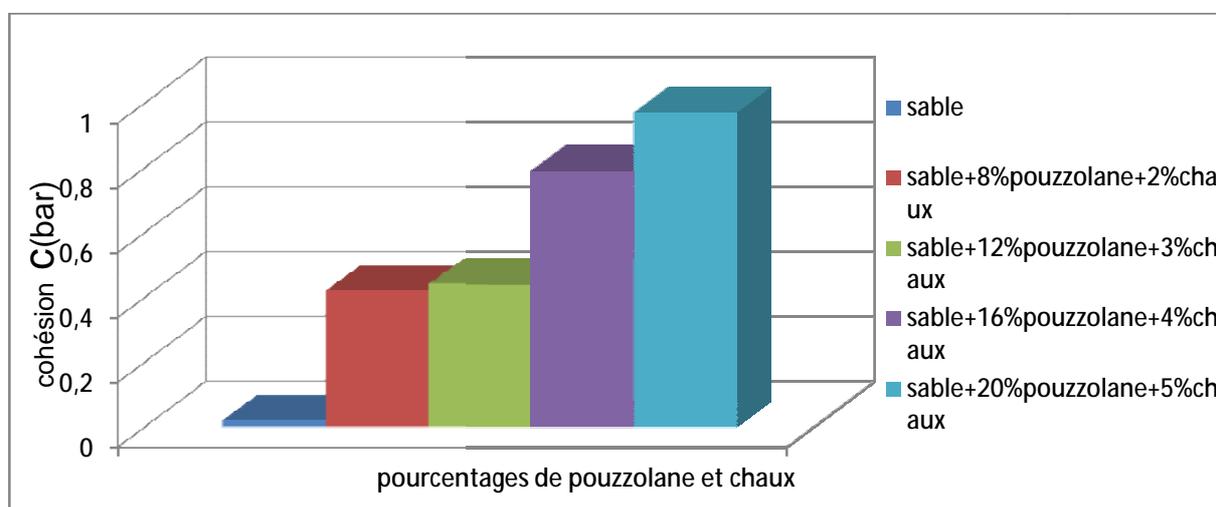
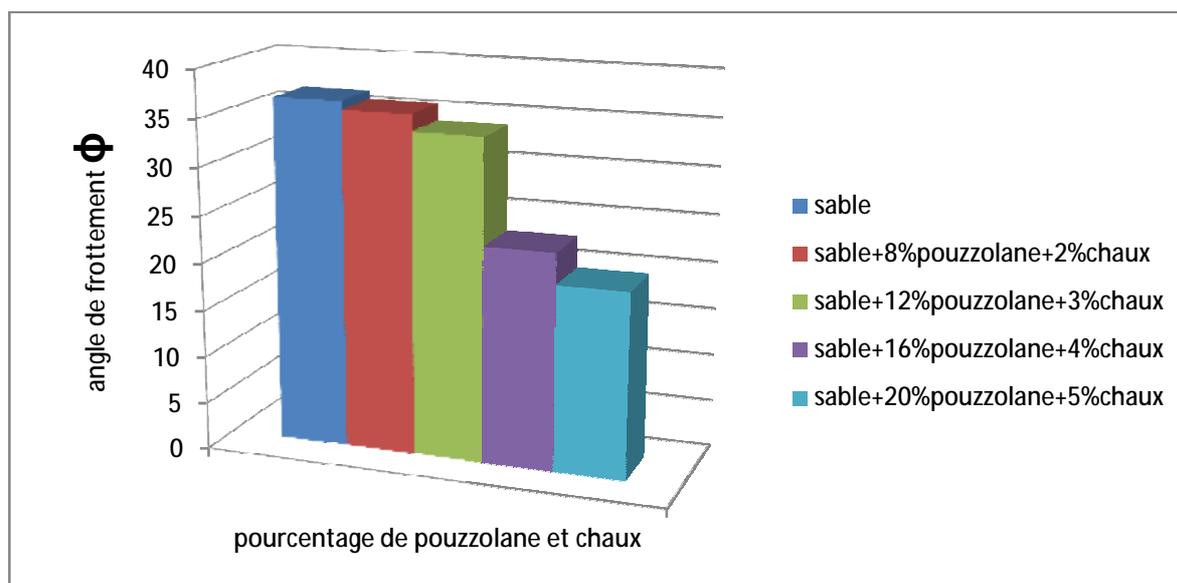
III.4.5. Effet de pouzzolane+chaux sur la résistance mécanique :

Les mélanges traités sable+pouzzolane+chaux(%) ont été tous préparé à la teneur en eau optimum comme dise les procédures d'essai de cisaillement à la boite.

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

Tableau III.17: Caractéristiques mécaniques des mélanges Sable de dune+pouzzolane(%)+chaux (%)

	φ°_{pic}	C_{pic} (bar)	τ_{1pic} (bar)	τ_{2pic} (bar)	τ_{3pic} (bar)
S (Sable seul)	36.65	0.02	0.70	1.62	2.19
S+8%P+2%Ch	35.77	0.42	1.14	1.87	2.59
S+12%P+3% Ch	33.94	0.44	1.11	1.78	2.02
S+16%P+4% Ch	22.88	0.79	1.21	1.63	2.06
S+20%P+5% Ch	19.60	0.97	1.33	1.68	2.04

**Figure III.29 :** Variation de cohésion en fonction des pourcentages de pouzzolane+chaux.**Figure III.30:** Variation de l'angle de frottement en fonction des pourcentages de chaux

▼ Commentaire

- § Tous les mélanges sable + pouzzolane(%) +chaux(%) montre une augmentation de résistance au cisaillement traduit par la croissance de cohésion (voir figure III.30) ; ce qui confirme les résultats précédents et qui donne l'importance d'ajout de pouzzolane+chaux pour l'amélioration des propriétés mécaniques
- § Inversement à la variation de cohésion ; on constate un diminution proportionnellement à l'augmentation de pourcentage (pouzzolane+chaux).

III.6 RESISTANCE A LA COMPRESSION

Après avoir fait les essais d'écrasement des éprouvettes des différents âges à 7 , 14 , 28 et 60 jours nous avons acquis des résultats sont résumé au tableau suivant :

Tableau III.18:Résultats aux essais d'écrasement des éprouvettes :

Pourcentage(%)	Age à 07jours			Age à 14jours		
	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)
Sable seul	1390	54	1.15	1370	93	02
Sable+8%pouzzolane+2%chaux	1375	282	6.1	1354	357	7.7
Sable+12%pouzzolane+3%chaux	1372	405	8.7	1357	504	10.8
Sable+16%pouzzolane+4%chaux	1398	485	10.5	1369	606	13.1
Sable+20%pouzzolane+5%chaux	1413	567	12.2	1388	709	15.3
Pourcentage(%)	Age à 28jours			Age à 60jours		
	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)
Sable seul	1340	120	2.6	1320	131	03
Sable+8%pouzzolane+2%chaux	1324	465	10	1304	500	11.5
Sable+12%pouzzolane+3%chaux	1327	655	14.1	1307	706	16.2
Sable+16%pouzzolane+4%chaux	1338	689	17.1	1318	849	19.7
Sable+20%pouzzolane+5%chaux	1359	922	19.9	1337	993	22.9

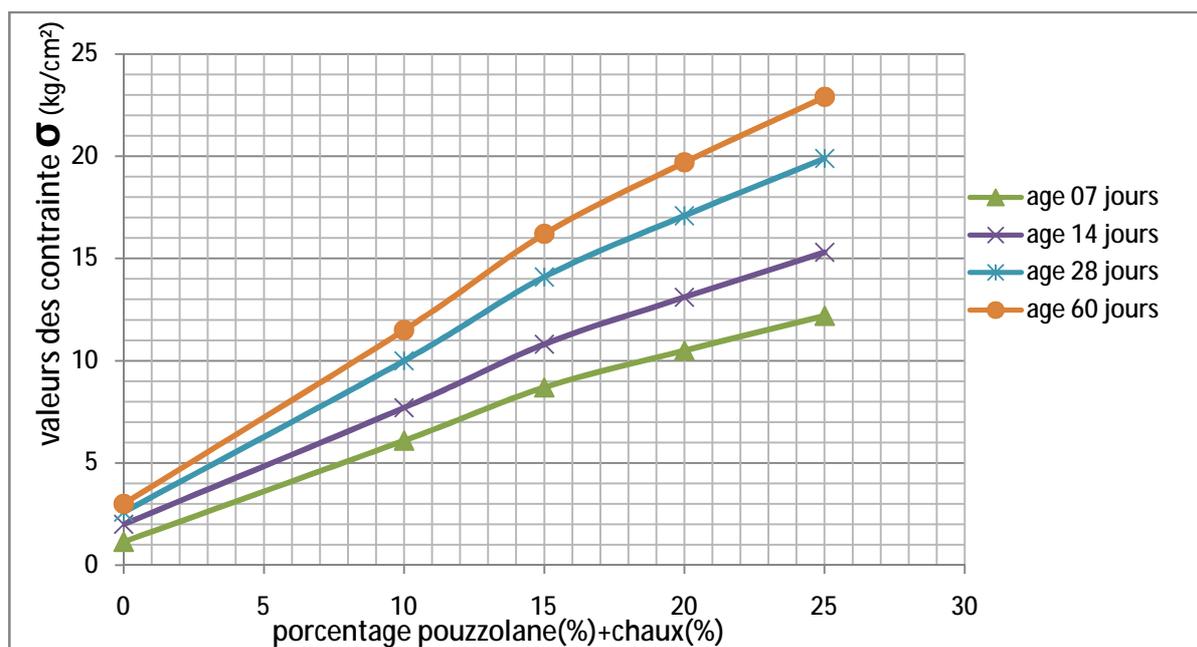


Figure III.31 : Variation de la résistance à la compression en fonction de l'ajout pouzzolane+chaux.

III.7 RESISTANCE DE TRACTION :

Après avoir fait les essais d'écrasement des éprouvettes des différents âges à 7 , 14 , 28 et 60 jours nous avons acquis des résultats sont résumé au tableau suivant :

Tableau III.19: Résultats aux essais d'écrasement des éprouvettes :

Pourcentage(%)	Age à 07jours			Age à 14jours		
	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)
Sable seul	1390	4.5	0.1	1369	07	0.2
Sable+8%pouzzolane+2%chaux	1377	15	0.31	1352	35.5	0.75
Sable+12%pouzzolane+3%chaux	1380	20.5	0.45	1365	50.5	1.1
Sable+16%pouzzolane+4%chaux	1400	24	0.5	1378	60	1.3
Sable+20%pouzzolane+5%chaux	1414	28.5	0.6	1392	70.5	1.5
Pourcentage(%)	Age à 28jours			Age à 60jours		
	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)	Poids (g)	F (KN)	σ (MPa)
Sable seul	1339	09	0.3	1319	11	0.4
Sable+8%pouzzolane+2%chaux	1322	46	0.9	1302	50	1.1
Sable+12%pouzzolane+3%chaux	1335	65	1.4	1315	70.5	1.65
Sable+16%pouzzolane+4%chaux	1347	77	1.7	1327	84	1.9
Sable+20%pouzzolane+5%chaux	1362	91	1.9	1343	98	2.3

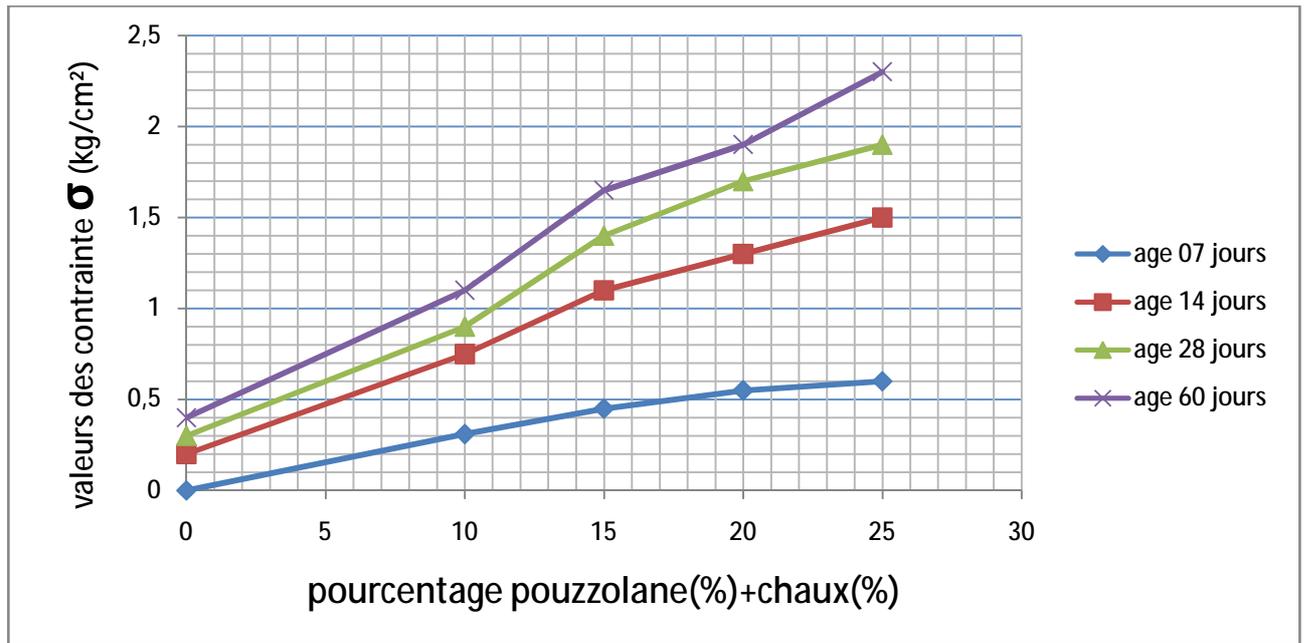


Figure III.32 : Variation de la résistance à la traction en fonction d'ajout pouzzolane+chaux.

▼ Commentaire

- On constate une augmentation de résistance à la compression et la résistance à la traction pour les deux durées de cure 7 ; 14 ; 28 et 60 jours. La figure ci-dessus figure III.32 montre l'augmentation de la résistance de compression pour les différents mélanges ainsi pour les différentes durées de cure
- De même une augmentation de la résistance à la traction (voir figure III.33) l'amélioration est clairement remarquable.

- **Conclusion :**

D'après les résultats obtenus on note que :

- ∅ Tous les mélanges ont donné des densités sèches plus grandes que celle obtenue pour le sable seul.
- ∅ On constate une augmentation de la teneur en eau optimum proportionnellement à l'augmentation de pourcentage pouzzolane+chaux.
- ∅ Tous les mélanges ont montré une augmentation pour les valeurs de CBR à 95% de l'OPM que ce soit pour immédiat ou immersion ; ce qui indique l'augmentation de la capacité portante des assises des chaussées.

- Ø L'ajout de pouzzolane+chaux à montré des meilleurs résultats en résistance au cisaillement. Ou on a constaté l'augmentation de la cohésion proportionnellement à l'ajout de pouzzolane+chaux, ce qui améliore les propriétés mécaniques de sable de dune.
- Ø Tous les mélange ont montré une amélioration de la résistance à la compression et la résistance à la traction aux différents âges de cure 07 ; 14 ; 28 et 60 jours.