

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par

AMOKRANE TAOUS

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie civil

Option : Géotechnique et Environnement

Thème

AMELIORATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES

DES SOLS PAR INCORPORATION DES STABILISANTS

Soutenu devant le Jury composé de :

Melle BELHASSANI, Maître Assistante à l'UMMTOPrésidente

Mme MOUBAREK, Maître Assistante à l'UMMTO Examinatrice

Mr BEN AZZOUG, Maître de conférences à l'UMMTOPromoteur

Promotion : 2014 / 2015

Résumé

Avec la réduction de ressources en matériaux de qualité pour un sol à une bonne résistance aux surcharges, les Géotechniciens cherchent à développer des techniques de stabilisation des sols instables par différents ajouts.

Une étude bibliographique a été faite sur les sols évolutifs ainsi que sur les différentes techniques de stabilisation avec la présentation de quelques résultats des chercheurs.

Après avoir présenté les caractéristiques principales des sables et des argiles, nous avons exposé les différents moyens de stabilisation appliqués aux sols.

Dans ce mémoire une méthodologie expérimentale a été développée permettant d'étudier le comportement physique et mécanique par l'évaluation de la résistance à la compression à 21 jours d'un sable pollué traité par deux mélanges, ciment-chaux vive et ciment-argile.

L'ajout au sable de ciment (5% à 10% et 15%), de chaux ou d'argile (0%, 2%, 4 et 16%) permet de trouver le pourcentage de la matrice ciment-chaux ou de ciment-argile à incorporer pour avoir une amélioration des paramètres physicomécaniques du sable.

Nous avons étudié l'influence de la teneur en eau sur la résistance mécanique de trois types d'argile soumis à des températures élevées. Au cours de la cuisson, le changement de couleur de chaque argile en fonction de la température est observé.

A la température de 1000°C toutes ces argiles finissent en couleur rouge brique.

Les particules d'argile ne sont nullement responsables de la couleur du sol alors elle est due à la présence des solutions ioniques métalliques

Le changement de couleur de chaque argile nous conduit à étudier l'influence de la teneur en sulfates de fer et de cuivre sur la résistance mécanique des argiles sous une forte température.

Le chauffage des trois argiles traitées par les sulfates de fer et les sulfates de cuivre a montré son efficacité sur la résistance mécanique et sur son comportement physique.

Mots clés : Stabilisation, Sables, Argiles, Ciment, Chaux vive, sulfate de cuivre, sulfate de fer, chaleur.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE I : Généralités Sur Les Sables et Les Argiles.....	18
I.1 – Introduction	18
I.2 – Structure des sols à granulométrie uniforme : [Holtz,1971]	18
I.2.1 – Structure des sols pulvérulents (sols grenus) $D > 2 \mu\text{m}$	18
I.2.2 – Structure des sols fins $D < 2 \mu\text{m}$	19
I.2.3 – Les sols fins	20
I.3 – Les sables.....	20
I.3.1 – Propriétés physiques des sables.....	22
I.3.2 – Le sable pollué	22
I.4 – Les argiles.....	22
I.4.1 –Structure élémentaire des minéraux argileux.....	23
I.4.2 –Structure moléculaire des argiles.....	24
I.4.3 – Les principaux types de minéraux argileux	24
a. La kaolinite $[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$	24
b. La montmorillonite $[\text{Si}_4\text{Al}_{(2-x)}\text{Mg}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_2, n\text{HO}]$	25
c. Les illites $[\text{Si}_{(4-x)}\text{Al}_x\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{HO})_2x\text{K}]$	26
I.4.4–Caractéristiques minéralogiques des argiles	28
a. La surface spécifique (Ss).....	28
b. La capacité d’échange cationique (CEC).....	28
c. La densité de charge spécifique	29
I.4.5–Caractéristiques physiques des argiles	29
I.5- Conclusion	30
CHAPITRE II : Techniques de stabilisation des sols	31
II.1 – Introduction.....	31
II.2 – Principaux objectifs de la stabilisation	31
II.3 – Les techniques de stabilisation des sols.....	32
II.3.1 –La stabilisation physique.....	32
II.3.2 –La stabilisation mécanique.....	33
II.3.3 –Stabilisation chimique (ou stabilisation physico-chimique).....	35
II.4 –Stabilisation des sols par la Chaux et le Ciment	35
II.4.1 –La chaux	35
II.4.2 –Ciment.....	37
II.5 –Travaux de recherches réalisés pour stabilisation des sols	39

II.6 – CONCLUSION	42
CHAPITRE III : Essais d’identification des matériaux utilisés	43
III.1 – Introduction	43
III.2 – Analyse granulométrique et l’essai de sédimentation	44
III.2.1 – Analyse granulométrique.....	44
III.2.2 – Conduite de l’essai.....	44
III.2.3 – Essai de sédimentation	46
III.2.4 – Résultats d’analyse granulométrique et de l’essai de sédimentation.....	48
III.2.4.1– Argile	48
III.2.4.2– Le sable.....	50
III.3 – Limites d’Atterberg.....	52
III.3.1 Classification des sols en fonction des limites d’Atterberg.....	54
III.3.2 – Résultats de l’essai Limites d’Atterberg	56
III.3.2.1 – La limite de liquidité	56
III.3.2.2 – La limite de plasticité W_p	57
III.3.2.3 – Indice de plasticité.....	58
III.3.2.4 – Interprétations des résultats des limites d’Atterberg.....	58
III.4 – L’essai Proctor	59
III.4.1 – Principe de l’essai.....	59
III.4.2 – Matériel et mode opératoire	60
III.4.3 – Les résultats de l’essai Proctor.....	61
III.4.3.1 – Argile	61
III.4.3.2 – Sable	62
III.4.4 – Interprétation des résultats des essais Proctor	63
III.5 – Analyse minéralogique et Chimique.....	64
III.5.1 – Analyse minéralogique.....	64
III.5.2 – L’analyse chimique	65
III.6- Conclusion	66
CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile.....	67
IV.1 – INTRODUCTION.....	67
IV.2 – STABILISATION DU SABLE PAR LE CIMENT ET CHAUX.....	67
IV.2.1- Confection des éprouvettes.....	67
IV.2.2- Conservation des éprouvettes.....	67
IV.2.3- Essai d’écrasement.....	68
IV.2.4- Résistance du matériau à l’action de l’eau.....	71
IV.3- Analyse et discussion des résultats expérimentaux obtenus.....	72

IV.3 .1– Traitement par le ciment seul (éprouvette témoin)	72
a- Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état sec (Rsec)	72
b- Essai de contrôle sur sable stabilisé au ciment seul	74
IV.3.2– traitement du sable par le ciment – chaux pour les 3 modes de conservation	76
IV.3.2.1–variation de la résistance à l'état sec Rsec du sable stabilisé par ciment +chaux..	76
a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes	77
b- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes.....	79
IV.3.2.2– Essai de contrôle sur sable stabilisé au ciment et à la chaux	82
a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes	83
b- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes.....	85
IV.3.3– traitement du sable par le ciment et l'argile pour les 3 modes de conservation	88
IV.3.3.1–Evolution de la résistance à l'état sec Rsec en fonction de la teneur en argile.....	88
a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes	89
b- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes.....	91
IV.3.3. 2– Essai de contrôle sur sable stabilisé au ciment et à l'argile	93
a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes	94
a- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes.....	96
IV.3.4- Conclusion.....	98
IV.4- Coefficient de ramollissement (A. Komar)	99
IV.4.1 - Evaluation du coefficient de ramollissement du sable traité par le ciment.....	99
IV.4.1.2 - Sable traité par le ciment seul	99
IV.4.1.2 - Sable traité par le ciment et la chaux	101
IV.4.1.3 - Sable traité par le ciment et l'argile	104
IV.4.2- Analyse des résultats	106
c- Analyse des résultats.....	110
IV.6 – Conclusion.....	110
CHAPITRE V : Traitement des argiles par la chaleur	111
V.1 – INTRODUCTION.....	111
V.2 – Traitement des argiles à chaud	111
V.2. 1. Principe de l'essai.....	112
V.2.2. Description et observations	113
V.2.2.1.Argile rouge	113
V.2.2.2. L'argile jaune	114
V.2.2.3. L'argile grise.....	117
V.2.3 - Résistance à l'écrasement.....	119
V.2.3.1- Résistance à l'écrasement à l'état sec (Rsec).....	119

V.2.3.2- Résistance à l'écrasement après immersion de 24 heures (R _{sat}).....	120
V.2.3.3. Le coefficient de ramollissement (K _r).....	121
V.3 - Ajouts des sulfates de fer et de cuivre aux argiles.....	122
V.3.1 – mode opératoire.....	123
V.3.2 Présentation des résultats et discussions	123
V.3.2.1- Description et observations	123
V.3.2.2- Résistance à l'écrasement à l'état sec.....	126
V.3.2.3- Résistance à l'écrasement à l'état sec.....	128
V.3.2.4- Le coefficient de ramollissement (K _r).....	130
V.4- Conclusion	132
Conclusion générale et perspectives	133
Bibliographie	135
Annexe I:: Courbes de comparaison des résultats de traitement de sable par	141
le ciment-chaux et le ciment-argile.....	141
Annexe II: les éprouvettes des trois argiles traitées par la chaleur.....	150

Liste des Figures

Figure I.1 : structure des sols.

Figure I.2 Diagramme de Casagrande.

Figure I.3 : sables roulés de diamètre 1mm.

Figure I.4 : Echantillon de Sable pollué.

Figure I.5 : Structure Elémentaire Tétraédrique.

Figure I.6 : Structure Elémentaire Octaédrique.

Figure I.7: Structure de la kaolinite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).

Figure I.8 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite. D'après Grim, 1959.

Figure I.9 : Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).

Figure I.10 : Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite.

Figure I.11 : Structure de l'illite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).

Figure I.12: Vue au Microscope Electronique à Balayage des trois minéraux d'argile.

Figure II.1 : Courbe de compactage.

Figure II.2: Influence de la granulométrie sur l'optimum Proctor.

Figure II.3: Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor.

Figure II.4: Transformation du calcaire en chaux vive.

Figure II.5: La chaux éteinte en poudre.

Figure III.1: Essai d'Analyse Granulométrique.

Figure III.2: Diagramme semi logarithmique obtenu de l'analyse granulométrique d'un sol.

Figure III.3: Appareil Agitateur et Solution.

Figure III.4: Essai de Sédimentation.

Figure III.5: courbes granulométriques des trois types d'argile.

Figure III.6: courbe granulométriques du sable.

Figure III.7: États d'un sol en fonction de sa teneur en eau.

Figure III.8: Détermination de la limite de liquidité par l'appareil de Casagrande.

Figure III.9: Détermination de la limite de plasticité.

Figure III.10: Abaques de plasticité de Casagrande, pour différents types de sols (d'après casagrande, 1948 et Haward, 1977).

Figure III.11: Limite de liquidité des trois sols (N= 25 coups).

Figure III.12: Equipement de l'essai Proctor normal.

Figure III.13: Compactage des couches.

Figure III.14: Courbe de l'Optimum Proctor des différents sols.

Figure III.15: Courbe de l'Optimum Proctor du Sable.

Figure IV.1: Eprouvettes de sable + (ciment-chaux) à l'état sec.

Figure IV.2: Eprouvettes de sables + (ciment-chaux) immergées dans l'eau.

Figure IV.3: Essai de l'écrasement d'Eprouvette de sable.

Figure IV.4: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état sec (Rsec).

Figure IV.5: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état de saturation (Rsat).

Figure IV.6: Résistance à sec Rsec -% chaux (stabilisation : 5 % ciment+chaux)

Figure IV.7: Résistance à sec Rsec -% chaux (stabilisation : 10 % ciment+chaux)

Figure IV.8: Résistance à sec Rsec -% chaux (stabilisation : 15 % ciment+chaux)

Figure IV.9: stabilisation du sable par ciment-chaux conservé à l'air libre.

Figure IV.10: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans un sac légèrement humidifié.

Figure IV.11: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans l'eau 7 jours.

Figure IV.12: résistance R_{sat} -%chaux (stabilisation :(5% ciment + chaux)

Figure IV.13: résistance R_{sat} -%chaux (stabilisation :(10% ciment + chaux)

Figure IV.14: résistance R_{sat} -%chaux (stabilisation :(15% ciment + chaux)

Figure IV.15: stabilisation du sable par ciment-chaux conservé à l'air libre.

Figure IV.16: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans un sac légèrement humidifié.

Figure IV.17: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans l'eau 7 jours.

Figure IV.18: résistance à sec (R_{sec}) - %argile (stabilisation : 5%ciment+argile).

Figure IV.19: résistance à sec (R_{sec}) - %argile (stabilisation : 10%ciment+argile).

Figure IV.20: résistance à sec (R_{sec}) - %argile (stabilisation : 15%ciment+argile).

Figure IV.21: stabilisation du sable par ciment-argile conservé à l'air libre.

Figure IV.22: stabilisation du sable par ciment-argile conservé à l'air libre.

Figure IV.23: stabilisation du sable par le ciment-argile conservé dans l'eau 7 jours.

Figure IV.24: Résistance R_{sat} - %argile (stabilisation : 5%ciment +argile)

Figure IV.25: Résistance R_{sat} - %argile (stabilisation : 10%ciment +argile)

Figure IV.26: Résistance R_{sat} - %argile (stabilisation : 15%ciment +argile)

Figure IV.27: résistance mécanique d'éprouvette de sable (Conservation à l'air libre).

Figure IV.28: résistance mécanique d'éprouvette de sable (Dans un sac légèrement humidifié)

Figure IV.29: résistance mécanique d'éprouvette de sable (conservation dans l'eau 7 jours).

Figure IV.30 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment

*Figure IV.31 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et chaux
(à l'air libre)*

Figure IV.32 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et chaux

*Figure IV.33 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et chaux
(conservation dans l'eau 7 jours)*

*Figure IV.34 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et argile
(à l'état libre)*

*Figure IV.35 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et argile
(dans un sac légèrement humidifié)*

*Figure IV.36 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et argile
(conservation dans l'eau 7 jours).*

*Figure IV.37 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment+ à l'air libre).*

*Figure IV.38: Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment + dans un sac humidifié).*

*Figure IV.39 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment + immergé dans l'eau 7 j).*

*Figure IV.40 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment + à l'air libre).*

*Figure IV.41: Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment + dans un sac humidifié).*

*Figure IV.42 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment + immergé dans l'eau 7 j).*

Figure V.1: éprouvettes témoin (Jaune, Grise et Rouge).

Figure V.2: Four à haute température.

Figure V.3: Argile rouge cuite à différentes températures.

Figure V.4: Argile rouge cuite immergée.

Figure V.5: Argile jaune cuite à différentes températures.

Figure V.6: Argile jaune cuite immergée

Figure V.7: Argile grise cuite à différentes températures.

Figure V.8: Argile grise cuite, immergée.

Figure V.9: Essai d'écrasement.

Figure V.10: Résistance à l'écrasement R_{esc} - Température des 3 argiles.

Figure V.11 Résistance à l'écrasement après immersion R_{sat} – Température.

Figure V.12: Coefficient de ramollissement des argiles traité par la chaleur.

Figure V.13: Les éprouvettes d'argiles traitées par le sulfate de fer.

Figure V.14: Les éprouvettes d'argiles traitées par le sulfate de cuivre.

Figure V.15 : résistance mécanique des argiles+ $FeSO_4$ traitées à la chaleur (état sec).

Figure V.16 : résistance mécanique des argiles+ $CuSO_4$ traitées à la chaleur (état sec).

Figure V.17: Résistance mécanique des argiles+ $FeSO_4$ traitées à la chaleur (état saturé).

Figure V.18: Résistance mécanique des argiles+ $CuSO_4$ traitées à la chaleur (état saturé).

Figure V.19: Coefficient de ramollissement des argiles traité par le sulfate de Fer.

Figure V.20: Coefficient de ramollissement des argiles traité par le sulfate de Cu.

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : quelques données sur les minéraux argileux

(Mitchell, J.K, fundamental of soil behavior).

Tableau I.2 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001).

Tableau III.1 : Analyse granulométrique du sol de M'douha (jaune)

Tableau III.2 : Analyse granulométrique du sol d'Oued-Aissi (rouge)

Tableau III.3 : Analyse granulométrique du sol de Takhoukht (gris)

Tableaux III.4 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Tableau III.5: Classification des sols en fonction des limites d'Atterberg.

Tableau III.6: Indice de plasticité.

Tableau III.7: limite de liquidité des sols d'Oued Aissi, Mdouha et Thakhoukht.

Tableau III.9: limite de plasticité des sols d'Oued Aissi, Mdouha et Thakhoukht.

Tableau III.10 : Indice de plasticité des sols d'Oued Aissi, Mdouha et Thakhoukht.

Tableaux III.11: Essai Proctor ; compactage du matériau dans le moule

Tableau [IV.12] : détermination de l'optimum proctor pour l'argile rouge

Tableau [IV.13] : détermination de l'optimum proctor pour l'argile jaune

Tableau [IV.14] : détermination de l'optimum proctor pour l'argile grise

Tableau III.15: résultats de l'essai Proctor du sable.

Tableau III.16: Résultats de l'analyse minéralogique.

Tableau III.17: Résultats de l'analyse chimique des trois argiles.

*Tableau IV.1: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment
à l'état sec (Rsec).*

*Tableau IV.2: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment
à l'état de saturation (Rsat).*

Tableau IV.3 : variation de la Résistance R_{sec} - % chaux (stabilisation : ciment+ chaux)

Tableau IV.4 variation de la résistance R_{sat} - % chaux (stabilisation : ciment+ chaux)

Tableau IV.5 variation de la résistance R_{sec} - % argile (stabilisation ciment + argile)

Tableau IV.6 variation de la résistance R_{sat} -% chaux (stabilisation ciment+argile)

Tableau IV.7 : Evaluation du coefficient de ramollissement du sable traité par le ciment

Tableau IV.8 : Evolution du coefficient de ramollissement en fonction du pourcentage de chaux pour différentes teneurs en ciment et modes de conservation.

Tableau IV.9 : Evolution du coefficient de ramollissement en fonction du pourcentage de l'argile pour différentes teneurs en ciment et modes de conservation.

Tableau V.1 : Variation de la résistance R_{sec} en fonction de la température

Tableau V.2 : Variation de la résistance après immersion R_{sat} - Température

Tableau V.3: Coefficient de ramollissement des trois argiles.

Tableau V.4: résistance à l'écrasement R_{sec} des argiles+ $FeSO_4$ traitées à la chaleur (état sec).

Tableau V.5: résistance à l'écrasement des argiles + $CuSO_4$ traitées par la chaleur (état sec).

Tableau V.6: résistance mécanique des argiles + $FeSO_4$ traitées par la chaleur (état saturé).

Tableau V.7: résistance mécanique des argiles + $CuSO_4$ traitées par la chaleur (état saturé).

Tableau V.8 : Coefficient de ramollissement des argiles traité par le sulfate de cuivre.

Tableau V.9 : Coefficient de ramollissement des argiles traitées par le sulfate de cuivre.

Notation et Nomenclature

γ_s : poids spécifique des particules

ρ_d : masse volumique sèche

γ_w : Poids volumique de l'eau est égal à 1 Mg/m^3

w_L : La limite de liquidité

w_P : La limite de plasticité

w_S : La limite de retrait

w_{re} : limite de retrait effective

I_P : Indice de plasticité

I_L : Indice de liquidité

C_u : Coefficient d'uniformité

C_c : Coefficient de courbure

K_{ram} : coefficient du ramollissement

CPA : ciment portland artificiel

C : Ciment

L : Chaux

S : Sable

W : poids de l'eau

W_{opt} : teneur en eau optimale

W_{sat} : teneur en eau de saturation

R_c : contrainte de compression

F_{max} : force de compression maximale

R_{sat} : Résistance à la compression simple après immersion

R_{sec} : Résistance à la compression simple à l'état sec de sol stabilisé

D : la dimension des plus gros grains du sol.

INTRODUCTION GENERALE

La stabilisation des sols a pour objectif de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir, sans préparation, à supporter une route, un parking, une aire industrielle ou encore confectionner des blocs de terre comprimée en vue de leur utilisation comme matériau de construction.

L'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence d'une solution ou d'un produit sur le sol.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions de l'environnement.

Plusieurs produits sont employés aujourd'hui avec les sols pour obtenir un matériau de construction avec des propriétés meilleures que celles du sol original. Ceux employés le plus couramment sont le ciment et la chaux. D'autres, tels que le mélange ciment et chaux, l'Argile additionnée au ciment, semblent être des stabilisateurs satisfaisants mais ils n'ont pas été très employés parce que leurs caractéristiques et leurs réactions, quand on les mélange avec des sols ne sont pas bien connues.

Le traitement au ciment ou à la chaux, des sols en place permet d'éviter le décapage et le remplacement par matériaux d'apport. C'est Donc une solution plus économique et bien adaptée à de nombreux chantiers, qui est apparue aux Etats Unis au début du siècle.

Le traitement des sols instables procure notamment deux avantages :

- ✓ l'assèchement des sols permettant de les rendre praticables aux engins de chantier ;
- ✓ l'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable (résistances mécaniques, insensibilité à l'eau et au gel).

Problématique

L'amélioration du comportement des sols instables par l'ajout de la chaux ou de ciment n'est pas nouvelle ; mais le choix ainsi que la quantité du stabilisant qui conviennent le mieux pour un sol sableux ou argileux ne sont pas connus.

Le traitement des argiles par la chaleur est une technique de stabilisation très efficace ; mais de nombreux problèmes se posent :

- Est-ce que le comportement mécanique et physique d'une argile rouge se diffère à celui d'une argile jaune ou grise ?
 - Quelle est la relation entre résistance mécanique de chaque type d'argile traité par la chaleur ainsi que sa teneur en eau optimale et de saturation.

Objectif de ce travail

Les objectifs visés par ce travail sont:

- **Reconnaissance des sols** : il est nécessaire de faire des essais d'identification au laboratoire sur différents types de sols : le sable pollué et l'argile.
- **Influence des stabilisateurs ciment-chaux ou ciment-argile** sur la résistance mécanique d'un sable pollué dans les différents modes de conservation en calculant le coefficient de ramollissement pour chaque mode.
- **Déterminer la résistance mécanique** à l'état sec et à l'état humide des trois argiles différentes traitées par la chaleur puis calculer leur coefficient de ramollissement.
- **Le comportement physique et mécanique de trois argiles** traitées par la chaleur et les sulfates de cuivre et de fer.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est scindé en deux parties complémentaires :

La première partie constitue la synthèse bibliographique, qui se compose de deux chapitres :

- **Le premier chapitre** « généralités sur les sables et les argiles » est consacré à la présentation des sables et des argiles, leurs méthodes d'identification et leurs caractéristiques.
- **Le deuxième chapitre** « Techniques de stabilisation des sols » présente une synthèse bibliographique sur la stabilisation et les divers stabilisants à incorporer au sol pour répondre aux exigences de qualité que doit avoir un matériau moderne.

La deuxième partie présente le travail expérimental réalisé dans le cadre de cette thèse, il est composé de quatre chapitres :

- **Le troisième chapitre** « Essais d'identification des matériaux utilisés » est consacré à la présentation des matériaux utilisés et les différents essais d'identification des sols à savoir ; l'analyse granulométrique, l'essai Proctor, limites d'Atterberg et l'analyse chimique et minéralogique.

- **Le quatrième chapitre** «Stabilisation d'un sable pollué par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile » décrit le mode opératoire et les travaux de stabilisation réalisés ainsi que les résultats obtenus. Une étude comparative sera faite à base de graphes pour voir la meilleure matrice de stabilisation. Trois milieux de conservation ont été expérimentés. Dans le premier mode les éprouvettes ont été conservées à l'air libre en été ; dans le deuxième les éprouvettes sont immergées dans l'eau pendant sept (07) jours ensuite elles sont retirées et continuent leur durcissement à l'air libre jusqu'au 21^{ème} jour. Dans le troisième mode de conservation les éprouvettes sont introduites dans des sachets en plastique légèrement humidifié et elles sont conservées pendant sept jours ensuite elles sont retirées et continuent leur durcissement à l'air libre.
- **Le cinquième chapitre** « Traitement des argiles par la chaleur ». Ce chapitre est composé de deux parties :
 - dans la première partie nous traitons la stabilisation des argiles par la chaleur : trois argiles vont être traitées à différentes températures puis les soumettre à l'essai de compression simple afin d'évaluer leur résistance mécanique à l'état sec et à l'état humide. Le calcul du coefficient de ramollissement est indispensable pour déterminer la température idéale qui donne la meilleure résistance à l'argile traitée.
 - La deuxième partie est consacrée pour «Stabilisation des Argiles par les sulfates de fer et de cuivre à chaud », dans lequel on a étudié l'influence des Sels minéraux sur la couleur des argiles. Dans ce chapitre nous allons étudier l'influence de l'ajout du sulfate de Cuivre et de sulfate de Fer sur trois types d'argile (l'argile rouge, l'argile jaune, et l'argile grise) sous une très haute température.

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Sables et Les Argiles

I.1 – Introduction

En fonction de l'environnement et de leur formation naturelle, les sols se présentent à l'état homogène, mais souvent à l'état hétérogène (en mélanges) notamment de sables et d'argiles, ou encore stratifiés en couches par sédimentation de plusieurs matériaux différents.

Bien que ces types de sols (mélanges et multicouches) sont exploités à l'état naturel comme support de fondations d'ouvrages de génie civil, néanmoins, ils peuvent être également reconstitués au laboratoire ensuite sur chantier, pour assurer certaines fonctions d'étanchéité, de résistance et de flexibilité dans le cas des ouvrages en terre (routes, barrages, barrières étanches,...).

Par ailleurs, l'hétérogénéité et l'anisotropie de ces sols, nécessitent des études plus approfondies et plus complexes pour comprendre et maîtriser leur comportement mécanique sous les différentes sollicitations auxquelles ils seront confrontés lors de leur mise en service.

Dans ce chapitre nous présenterons les sols étudiés dans cette recherche en particulier, à savoir : les sables et les argiles.

I.2 – Structure des sols à granulométrie uniforme : [Holtz,1971]

I.2.1 – Structure des sols pulvérulents (sols grenus) $D > 2 \mu\text{m}$

Les grains se détachent les uns des autres sous l'effet de leur poids (exemple : les sables). Les principales forces intervenant dans l'équilibre de la structure sont les forces de pesanteur; c'est par des réactions de contact grain à grain qu'un ensemble stable peut exister. Cette stabilité sera d'autant meilleure que le nombre de contact sera élevé (sol bien gradué) [M. ELGONNOUNI, 2010].

Dans le cas de sols humides non saturés (fig. I.1-a) : l'eau est retenue, sous forme de ménisques au voisinage des points de contacts entre les grains, par des forces de capillarité; elle crée entre ces derniers des forces d'attraction. Le matériau présente une cohésion capillaire (châteaux de sable). Les forces capillaires sont négligeables devant les forces de pesanteur.

I.2.2 – Structure des sols fins $D < 2 \mu\text{m}$

Les particules de sol restent liées les une aux autres et présente une cohésion: il a l'apparence d'un solide et ne se désagrège pas sous l'effet de la pesanteur ou d'autres forces appliquées. Les particules sont formées par un empilement de feuillets. Elles ont une forme de plaquettes. La surface des plaquettes étant chargée négativement, les particules sont soumises à des forces d'attraction intergranulaires diverses : forces électriques, forces de Van der Waals. Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance augmente. Pour qu'elles puissent avoir une influence sur le comportement du sol il est nécessaire que les grains de ce sol aient des dimensions très petites [M. ELGONNOUNI, 2010].

Il se crée autour des particules de sol une pellicule d'eau adsorbée ou eau liée d'épaisseur de ($\approx 0,01 \text{ mm}$) (figure. I.1-b). Elle est maintenue à la surface des grains par des forces d'attraction moléculaires. Les dipôles d'eau sont orientés perpendiculairement à la surface des grains. Cette eau présente des propriétés très différentes de celles de l'eau libre:

- elle a une très forte densité : 1,5
- elle est liée à la particule (elle ne se déplace pas sous l'effet de la gravité),
- sa viscosité très élevée, qui lui confère des propriétés intermédiaires entre celles d'un liquide et celles d'un solide, est à l'origine de certains comportements des sols argileux: fluage, compression secondaire, ...
- elle ne s'évacue qu'à température élevée (vers $300 \text{ }^\circ\text{C}$).

La couche d'eau adsorbée joue un rôle de lubrifiant entre les grains. Son influence est considérable sur les propriétés mécaniques du sol.

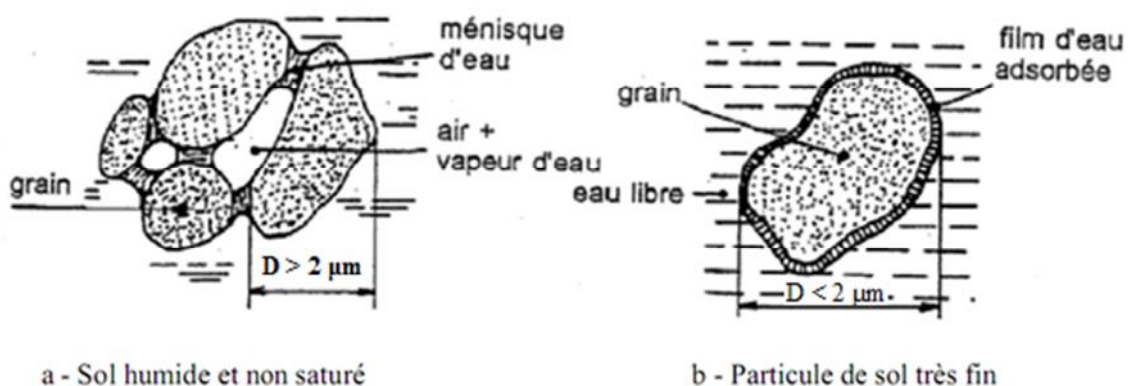


Figure I.1 : structure des sols.

I.2.3 – Les sols fins

La classification des sols fins utilise des critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. On définit quatre grandes catégories principales :

- Les limons très plastiques ;
- Les limons peu plastiques ;
- Les argiles très plastiques ;
- Les argiles peu plastiques.
- Selon la position d'un point représentatif ayant un point d'abscisse la limite de liquidité W_L et pour ordonnée l'indice de plasticité I_p dans un diagramme appelé diagramme de plasticité.

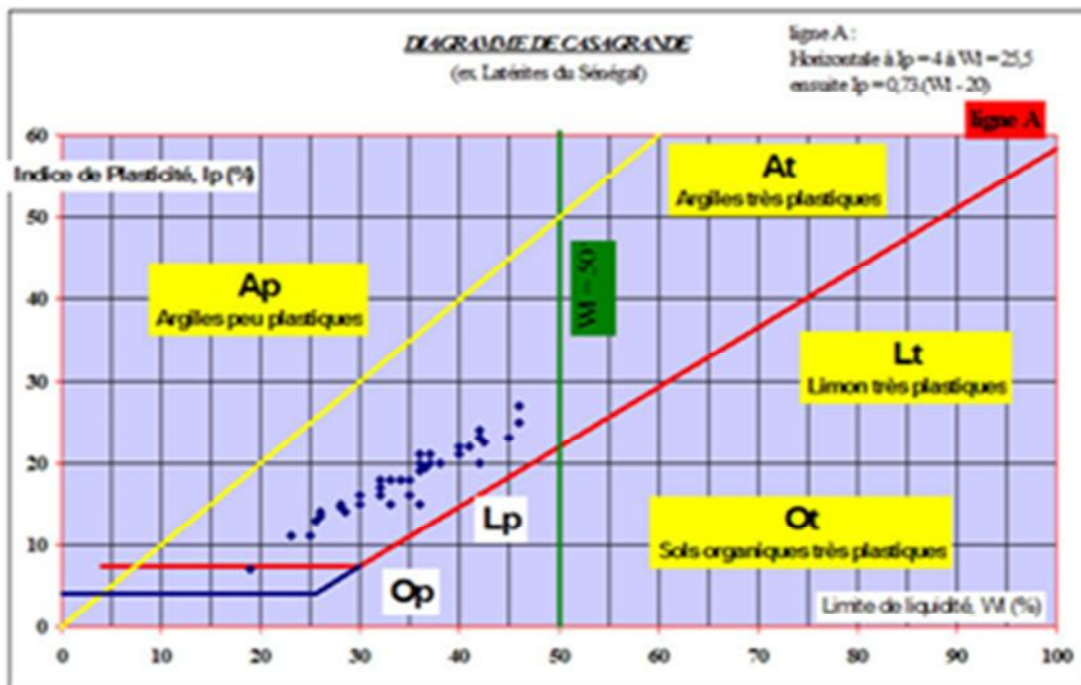


Figure I.2 Diagramme de Casagrande.

Les mots argile et limon ne représentent plus ici des classes granulométriques, mais sont liés à la nature minéralogique des particules de sol.

I.3 – Les sables

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meubles n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,08 mm et 2 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect

granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable.



Figure I.3 : sables roulés de diamètre 1mm.

Le sable est souvent le produit de la décomposition du [granite](#) du fait de l'[érosion](#). Ainsi, le plus fréquent de ses composants est le [quartz](#), constituant le moins altérable du granite, ainsi que des micas et des feldspaths. Un sable issu d'une [roche volcanique](#) est plutôt noir tandis qu'un sable marin s'enrichit de débris de coquillages. Il peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature, en général il prend la couleur noire ou blanche.

Le sable de carrière, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux rugosités marquées.

On distingue trois familles de sables:

- ✓ Les sables roulés siliceux, dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.
- ✓ Les sables de concassage calcaires sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières. Leur coût de revient élevé, les rend économiquement moins intéressant.
- ✓ Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir qui peut remplacer par excellence les deux types de sables suscités.

I.3.1 – Propriétés physiques des sables

Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 45°, au-delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver cette pente stable. Cette propriété peut être exploitée pour étudier des formes parfaites générées par l'écoulement du sable sur des plaques de formes différentes [S. Belmedrek, 2006]. Par exemple, en faisant couler du sable sur un socle de forme carrée, le sable va former une pyramide parfaite avec des pentes de 30°.

I.3.2 – Le sable pollué

La pollution des sables artificiels est en fonction de deux facteurs: d'une part de la nature et de l'état d'altération de la roche d'origine, d'autre part des méthodes d'élaboration. Ainsi, la présence de minéraux (feldspaths, mica noirs, amphiboles.), plus ou moins altérables donnent des produits plus tendres et se débitant plus facilement. Les concassages successifs pulvérisent des éléments les plus tendres de la roche qui tout naturellement se concentrent dans les classes granulaires inférieures. Par conséquent, la propriété des sables croît avec le nombre d'étapes de concassage et avec le nombre d'éliminations des fractions fines.



Figure I.4 : Echantillon de Sable pollué.

I.4 – Les argiles

Le terme « argile » fait référence soit à l'argile granulométrique, soit à l'argile minéralogique. L'argile granulométrique définit les constituants mécaniques issus de l'altération de minéraux silicatés de la roche-mère, regroupant l'ensemble des particules de diamètre inférieur à 2 μm : les argiles proprement dites, des particules de quartz, de micas et de calcaire [Z. Belabbaci, S. Aissa, Mamoune et Bekkouche, 2011].

Les argiles sont des sols très sensibles à l'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

- ✓ **Argiles raides** : dures et présentent un comportement plus fragile. Ceci à cause de la présence des carbonates et du quart microscopique [Caillere et Simonne ,1982].
- ✓ **Argiles plastiques** : moins dures et très déformables.

Les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2 μm chargées négativement comme la **Montmorillonite**, l'**Illite** et la **Kaolinite**.

La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau.

I.4.1 –Structure élémentaire des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, en réseau cristallin, d'eau (H_2O), de silice, sous forme de silicates (SiO_3) et d'aluminium, sous forme d'alumine (Al_2O_3). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets avec un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types (Freeah F., 2006).

- Le tétraèdre de silice $\text{SiO}_4(\text{Te})$: 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrent un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (figure.I.5.).

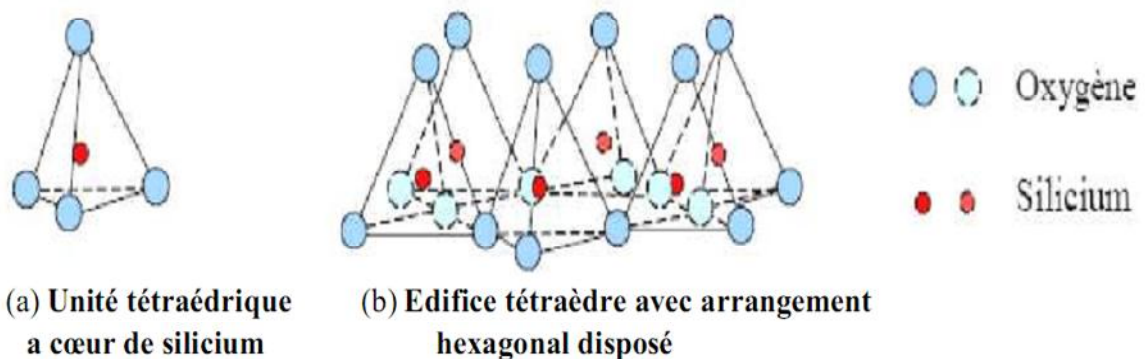


Figure I.5 : Structure Élémentaire Tétraédrique.

- L'octaèdre d'alumine $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ et éventuellement de magnésium $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ (Oc): 6 ions hydroxydes enserrent un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (figure. I.6.).

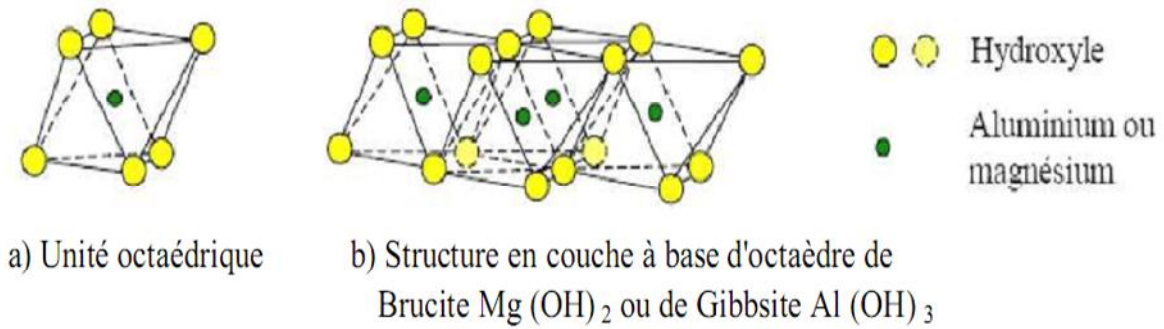


Figure I.6 : Structure Élémentaire Octaédrique.

I.4.2 – Structure moléculaire des argiles

Les minéraux argileux sont tous constitués à partir d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupés par un espace appelé espace interfoliaire. La structure formée en liant une couche tétraédrique à une couche octaédrique est appelée feuillet 1 :1 dont l'épaisseur est d'environ 0,7 nm.

Les liens de covalence et les liaisons ioniques assurent la structure rigide du feuillet élémentaire; des liaisons moins fortes mais essentielles assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former la particule d'argile (Freeah F., 2006)

I.4.3 – Les principaux types de minéraux argileux

a. La kaolinite $[Si_2 Al_2 O_5(OH)_4]$

C'est une argile blanchâtre, son feuillet est de type 1:1, elle est formée de couches élémentaires comprenant chacune un feuillet tétraédrique (silice) et un feuillet octaédrique (aluminium). Les particules de kaolinite contiennent habituellement entre 70 et plus de 100 couches élémentaires, ce qui se traduit par une épaisseur variant entre 50 et 100 nm et qui peut même, dans certains cas, atteindre 2000 nm.

Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène et les forces de Van der Waals (Youdjari D., 2010). Ces liens d'hydrogène étant très forts, l'eau qui est toujours présente dans les dépôts d'argile s'infiltre difficilement entre les couches, qui peuvent alors s'empiler pour former des minéraux argileux très stables et relativement épais.

C'est pourquoi la kaolinite a une surface spécifique inférieure à celle de la plus part des minéraux argileux.

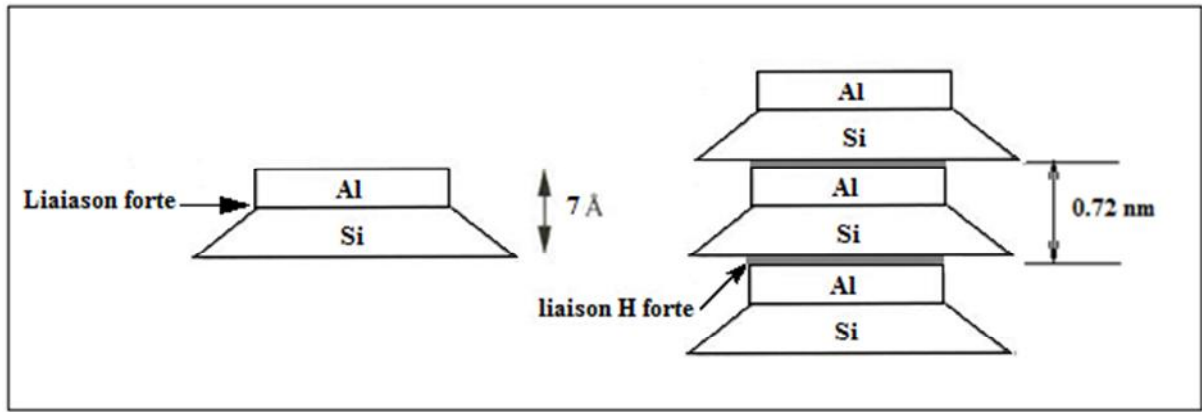


Figure I.7: Structure de la kaolinite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991).

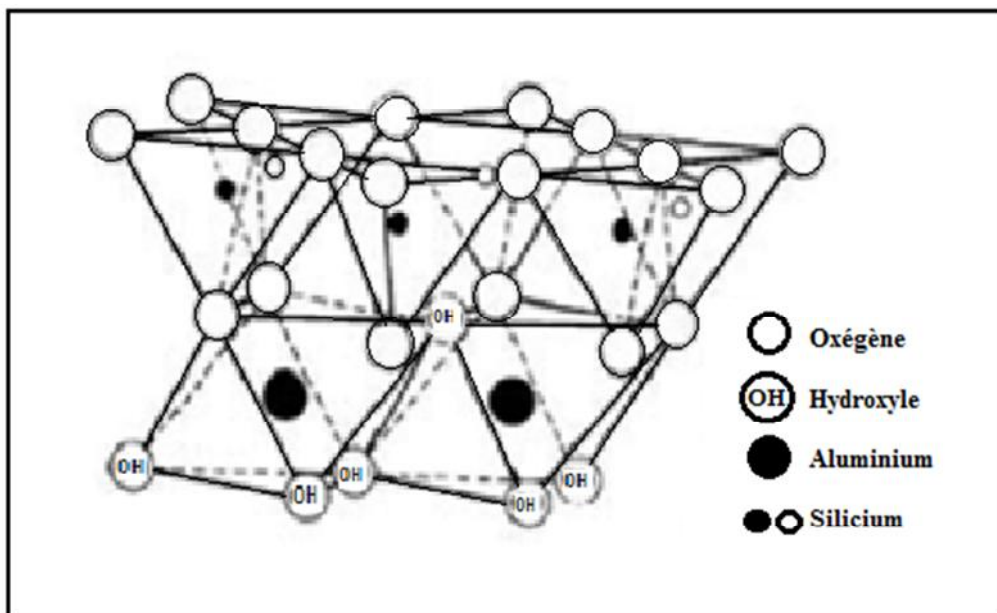


Figure I.8 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite. D'après Grim, 1959.

b. La montmorillonite $[\text{Si}_4\text{Al}_{(2-x)}\text{Mg}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_2, n\text{HO}]$

C'est un minéral abondant. Il est formé de couches élémentaires constituées de deux feuillets tétraédriques placés de part et d'autre d'un feuillet octaédrique contenant des atomes d'aluminium (gibbsite), c'est un feuillet 2 :1. Elle porte parfois le nom de **Smectite**. Des molécules d'eau fortement attirées vers les surfaces chargées des feuillets tétraédriques assurant les liens entre les couches. Ces liens demeurent cependant plutôt faibles, car lorsque la quantité d'eau augmente dans le sol, les molécules d'eau peuvent s'infiltrer très facilement entre les couches et les séparer. Les particules de montmorillonite comptent généralement entre une et quelques couches élémentaires et ont une épaisseur variant de 1 à 10 nm ; elles se rangent parmi les plus fines chez les minéraux argileux.

La bentonite, un minéral argileux dont les propriétés sont similaires à celles de la montmorillonite, La vermiculite aussi est un minéral argileux qui appartient au même groupe que la montmorillonite (Youdjari D., 2010).

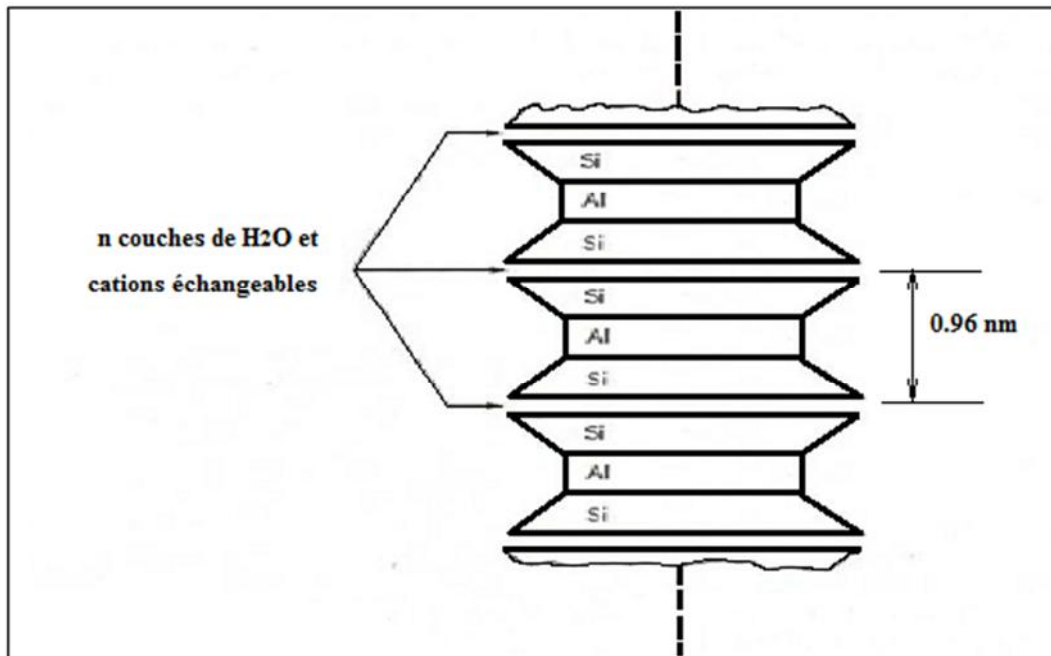


Figure I.9 : Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).

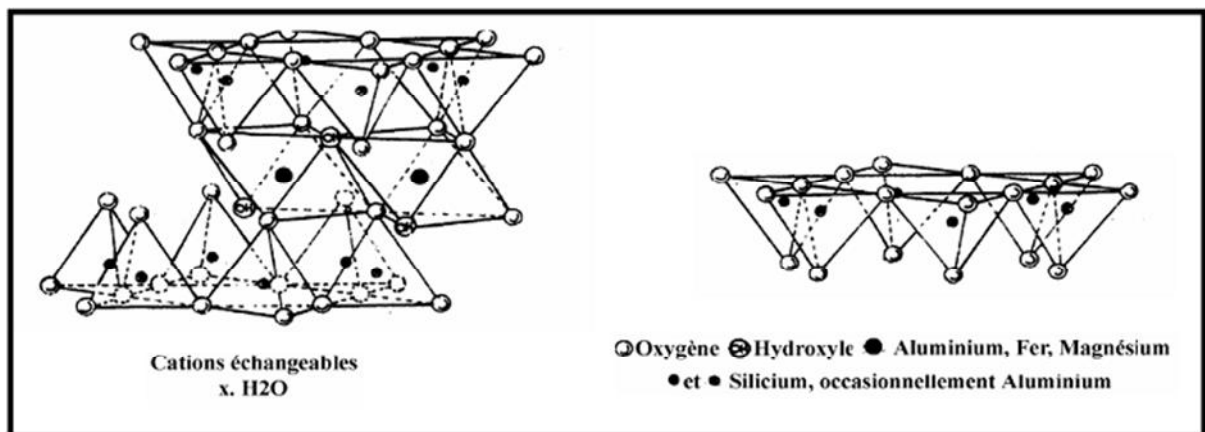


Figure I.10 : Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite.

c. Les illites $[Si_{(4-x)}Al_xAl_2O_{10}(HO) 2xK]$

L'illite est considérée comme un des minéraux argileux le plus abondant sur la terre. Elle est formée d'un feuillet octaédrique emprisonné entre deux feuillets tétraédriques, feuillet 2 :1. Les liens qui unissent les couches élémentaires, ils sont assurés par des atomes de

potassium(K). Bien qu'étant plutôt forts comparativement à ceux de la montmorillonite, ils demeurent inférieurs aux liens d'hydrogène de la kaolinite (Youdjari D.2010). L'épaisseur typique de l'illite se situe donc entre celles de la montmorillonite et de la kaolinite, c'est-à-dire à environ 30 nm, bien qu'elle puisse varier de 10 à 200 nm. Le chlorite est un minéral argileux assez abondant dont le comportement s'apparente à celui de l'illite.

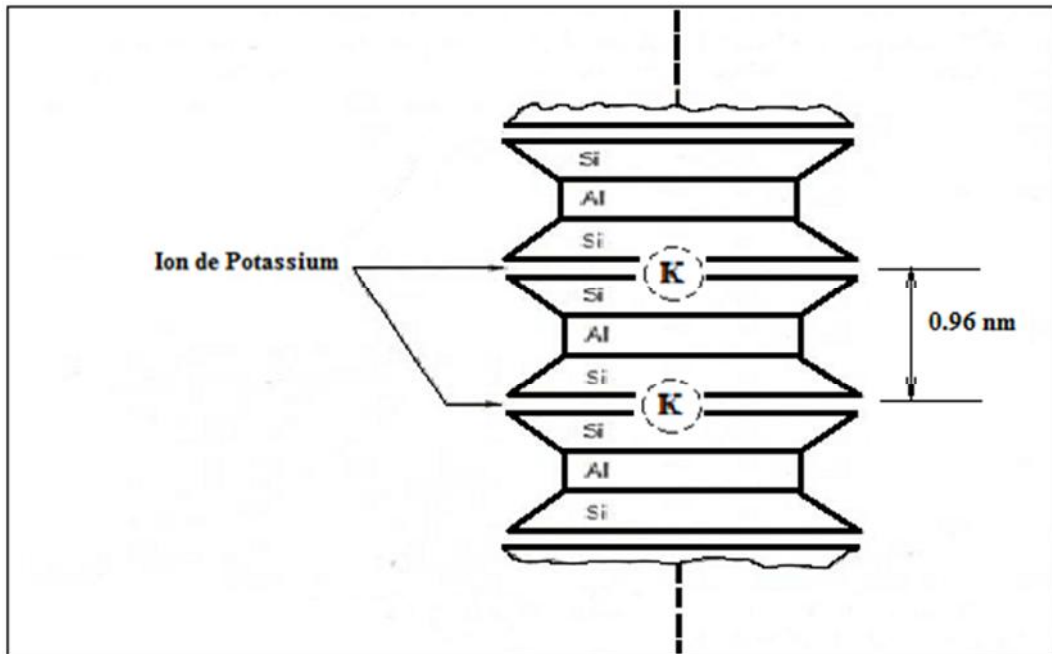


Figure I.11 : Structure de l'illite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).

La figure (I.11) présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage.

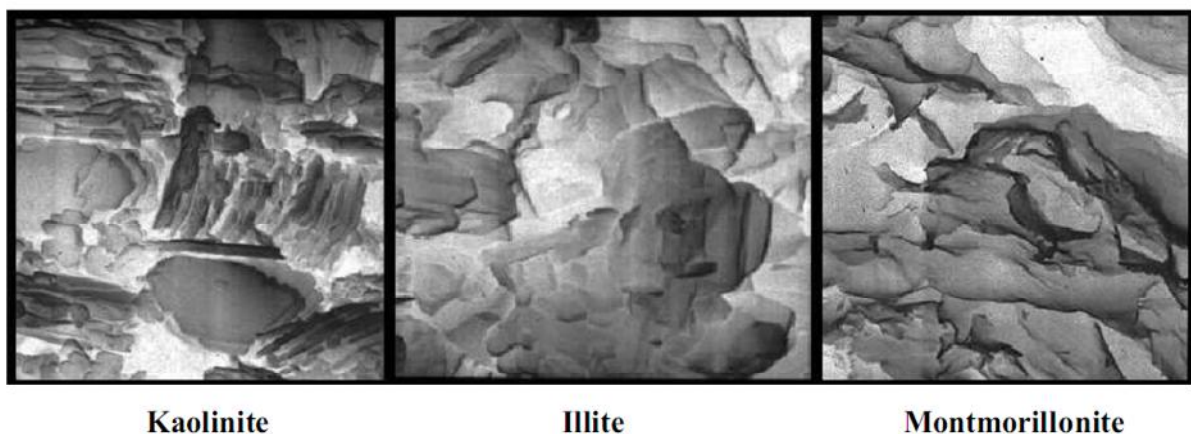


Figure I.12: Vue au Microscope Electronique à Balayage des trois minéraux d'argile.

I.4.4–Caractéristiques minéralogiques des argiles

a. La surface spécifique (S_s)

La dimension d’une particule est exprimée par de nombreux auteurs par le concept de surface spécifique (Bolt, 1956 ; Komornik & David, 1969, Giroud et Bottéro, 1972..). Ce concept est défini comme étant le rapport entre la surface (S) de l’ensemble des grains solides constituant l’échantillon et son poids (P° (Szymkiewicz F., 2011).

$$S_s = \frac{S}{P} ;$$

Etant donné que les argiles sont composées de particules fines (diamètre < 2µm), leur surface spécifique est donc très élevée.

<i>Type de minéraux</i>	Surface spécifique (m ² /g)	Diamètre (µm)	Epaisseur du feuillet (µm)
kaolinite	10 - 20	0,3 - 3	0,7
Montmorillonite (Smectite)	800	0,1 – 2	1
Illite	80 – 100	0,1 – 2	1

Tableau I.1 : quelques données sur les minéraux argileux (Mitchell, J.K, fundamental of soil behavior)

b. La capacité d’échange cationique (CEC)

Les minéraux argileux ont la propriété d’interagir avec les cations ou les anions. L’échange des ions se fait autour de la surface extérieure de l’unité structurale. Les cations échangeables les plus connus sont le calcium (Ca⁺⁺), le magnésium (Mg⁺⁺), l’hydrogène (H⁺), le potassium (K⁺), le nitrate (NH)et le sodium (Na⁺).

La Mesure de la capacité d’une argile à échanger des cations est exprimée en Milli équivalent par 100 grammes d’argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales.

<i>Type de minéraux</i>	<i>Surface interne (m²/g)</i>	<i>Surface externe (m²/g)</i>	<i>Surface totale (m²/g)</i>	<i>C.E.C. (milliéquivalent/100g)</i>
kaolinite	0	10 - 30	10 – 30	5 – 15
Illite	20 – 55	80 – 120	100 – 175	10- 40
Montmorillonite (Smectite)	600 – 700	80	700 – 800	80 – 150

Tableau I.2 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001).

c. La densité de charge spécifique

La densité de charge spécifique est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse.

$$\frac{CEC}{S};$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al³⁺ pour Si⁴⁺ dans la couche tétraédrique ; Mg²⁺ ou Fe²⁺ pour Al³⁺ dans la couche octaédrique), une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux. La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur (AZZOUZ F., 2006). Aussi, plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée donc induit une diminution de gonflement.

I.4.5–Caractéristiques physiques des argiles

L'argile possède les caractéristiques d'un colloïde électronégatif (possédant des charges négatives à sa surface). Elle est très hydrophile, c'est-à-dire qu'elle a la capacité de se lier facilement avec l'eau. Elle présente ainsi les caractéristiques suivantes :

- La plasticité : elle peut être modelée ;

- L'adhésivité : elle se colle aux pièces métalliques des outils ;
- Le gonflement et le retrait, c'est-à-dire que l'argile change de volume selon le degré d'humidité du sol ;
- L'alternance humectation ;
- Responsable de gonflement ;
- Retrait des colloïdes argileux.

Lorsque le sol argileux se dessèche, les colloïdes se rétractent, des fissures se créent dans la masse de terre qui se crevasse.

I.5- Conclusion

Du point de vue géotechnique, les sols sont classés selon leur composition, leurs propriétés importantes et leur mode de déposition.

Les particules de sable sont classées en trois subdivisions de sable gros, moyen et fin. La plus part des systèmes de classification des sols place la limite du sable fin à 0,2 mm

L'analyse générale de la structure des argiles illustre la complexité de leur comportement. De nombreux comportements des argiles ont été éclaircis ces dernières années. Toutefois, bien des phénomènes sont toujours en cours d'étude, tels que les variations de volume, qui sont d'une complexité élevées et dont les conséquences sont des pathologies d'ouvrages et des dommages dans les structures.

CHAPITRE II : Techniques de stabilisation des sols

II.1 – Introduction

La stabilisation est pratiquée de longue date. On a pu envisager l'application de la stabilisation à la réalisation de pistes, de routes, pistes d'envol pour avion etc....

Le problème que pose l'utilisation traditionnelle de la terre, est donc un problème de durabilité. C'est ce qui explique en grande partie l'abandon de ce matériau primitif malgré son excellent avantage de d'isolation thermique. Alors le recours à la stabilisation pour améliorer les caractéristiques de la terre est le moyen qui attire l'attention des spécialistes.

Stabiliser la terre c'est modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière

Ou encore on appelle stabilisation des sols, l'ensemble des procédés permettant d'améliorer leurs caractéristiques

II.2 – Principaux objectifs de la stabilisation

La stabilisation répond à un certain nombre d'objectifs qui sont:

- ✓ réduire le volume des vides entre les particules solides (porosité).
- ✓ colmater les vides qui ne peuvent être supprimé (perméabilité).
- ✓ créer des liens ou améliorer ou les liaisons existantes entre les particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer les caractéristiques du matériau et de :

- ✓ Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques: augmenter la résistance à la compression simple à l'état sec, à l'état humide et la résistance à la traction et au cisaillement;
- ✓ Obtenir une meilleure cohésion ;
- ✓ Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau ;
- ✓ Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser ;
- ✓ Réduire sa sensibilité à l'eau : gonflement et retrait. Il est entendu que les améliorations obtenues doivent avoir un caractère irréversible.

II.3 – Les techniques de stabilisation des sols

La plupart des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'augmenter leur stabilité mécanique et d'améliorer leur performance (GLEN LÉGÈRE, 2001). Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- stabilisation physique ;
- stabilisation mécanique;
- stabilisation chimique;
- stabilisation par ajout des matériaux;
- stabilisation thermique.

II.3.1 –La stabilisation physique

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées en intervenant sur la texture du mélange constitué de fraction de grains différents. Il s'agit d'une stabilisation avec apport de stabilisants chimiquement inertes. Ces stabilisants agissent essentiellement sur la composition granulométrique du matériau, donc sur les propriétés mécaniques. Généralement, ils sont plus ou moins stables, leur friction interne est forte à l'état sec ils n'ont aucune cohésion ni plasticité.

Ces stabilisants ajoutés à des sols réduisent les effets néfastes du retrait. On peut évoquer :

❖ Les minéraux

Les sables et graviers dont le rôle favorable est bien connu et est particulièrement bien exploité dans les pisés

❖ Les fibres

Cette méthode de stabilisation est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou à l'état plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait.

Les fibres peuvent être utilisées en combinaison avec d'autres stabilisants, avec le ciment, avec la chaux ou le bitume.

On utilise trois variétés de fibres lors de la stabilisation :

- ✓ Les fibres végétales : Pailles de toutes espèces : orge, seigle, blé, froments, escourgeons, la Lavande et balle de céréales telles que riz et orge, etc
- ✓ Les fibres animales : poils et crins du bétail.
- ✓ Les fibres synthétiques : cellophane, aciers, fibres de verre.

Les fibres végétales ou animales sont très efficaces peu chères et que l'on utilise dans la confection des briques.

II.3.2 –La stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique comprend deux méthodes :

❖ Stabilisation par dessiccation

C'est une technique très ancienne, qui consiste à mouler la terre avec une teneur en eau élevée, sans compactage et à laisser les briques séchées au soleil. Elle a pour effet l'augmentation de la cohésion du matériau. Il est souhaitable de limiter les dimensions des éléments pour réduire les risques nuisibles de fissuration et de retrait.

❖ Stabilisation par compactage (densification)

Le compactage est la méthode de stabilisation la plus ancienne et la plus importante. Il consiste en une réduction de volume pratiquement instantanée du sol dû à la réduction des vides remplis d'air.

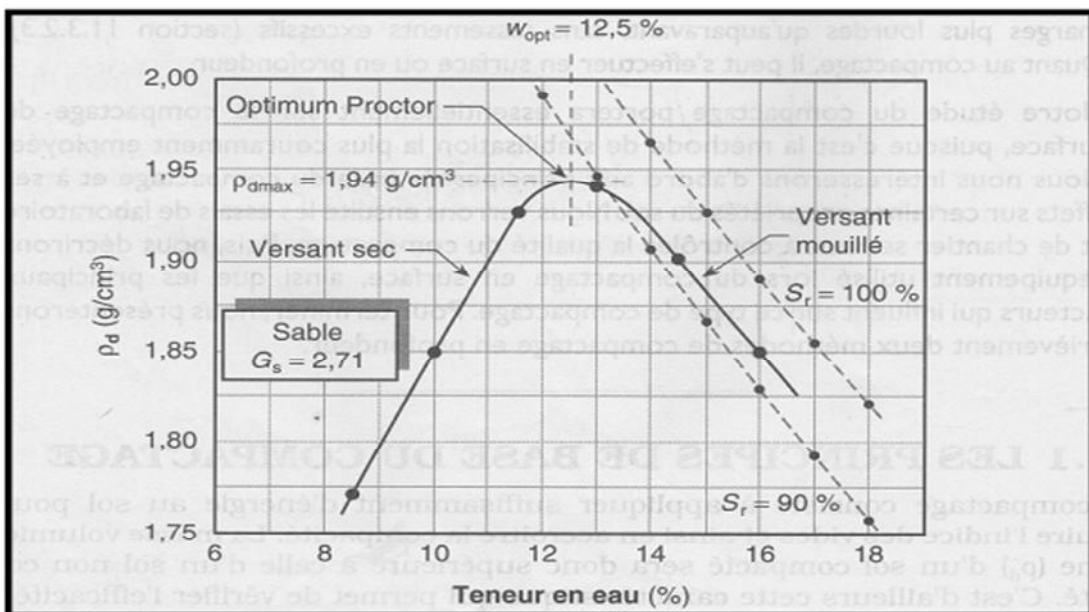


Figure II.1 : Courbe de compactage.

Il peut entraîner aussi bien une modification de la teneur en eau qu'une modification de la granulométrie. Le compactage à lui seul peut souvent résoudre un problème particulier de sol, en outre il entre pour une part essentielle dans nombre d'autres méthodes de stabilisation.

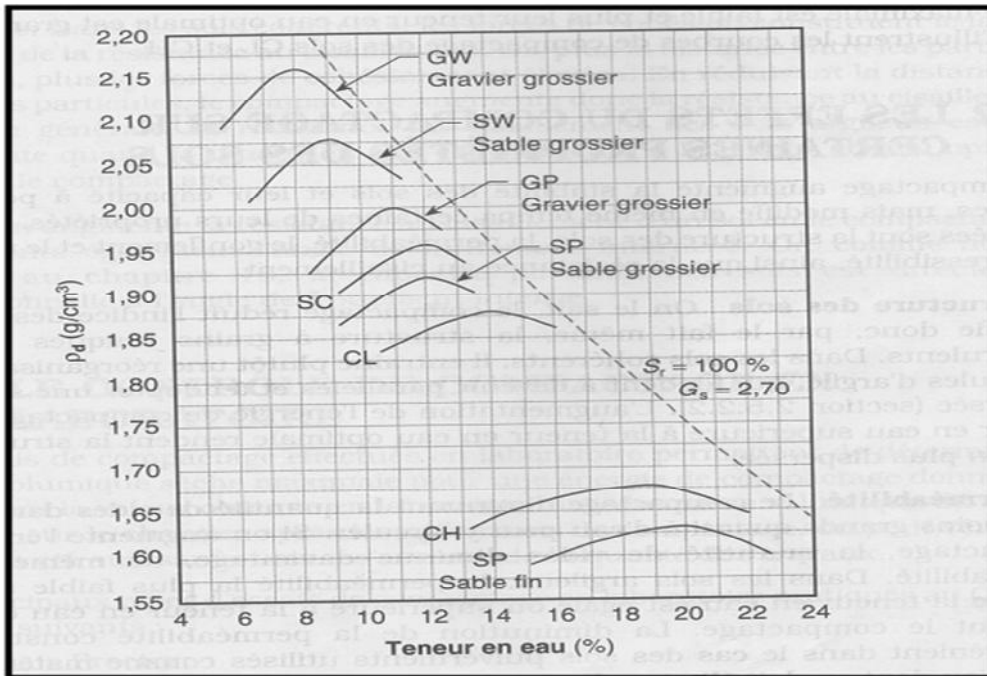


Figure II.2: Influence de la granulométrie sur l'optimum Proctor.

Le compactage est influencé par certains paramètres, Proctor (1933) démontre que le compactage est fonction de la masse volumique du sol, de la teneur en eau, de l'énergie de compactage, de la méthode de compactage utilisée et enfin du type de sol (granularité, présence des minéraux argileux).

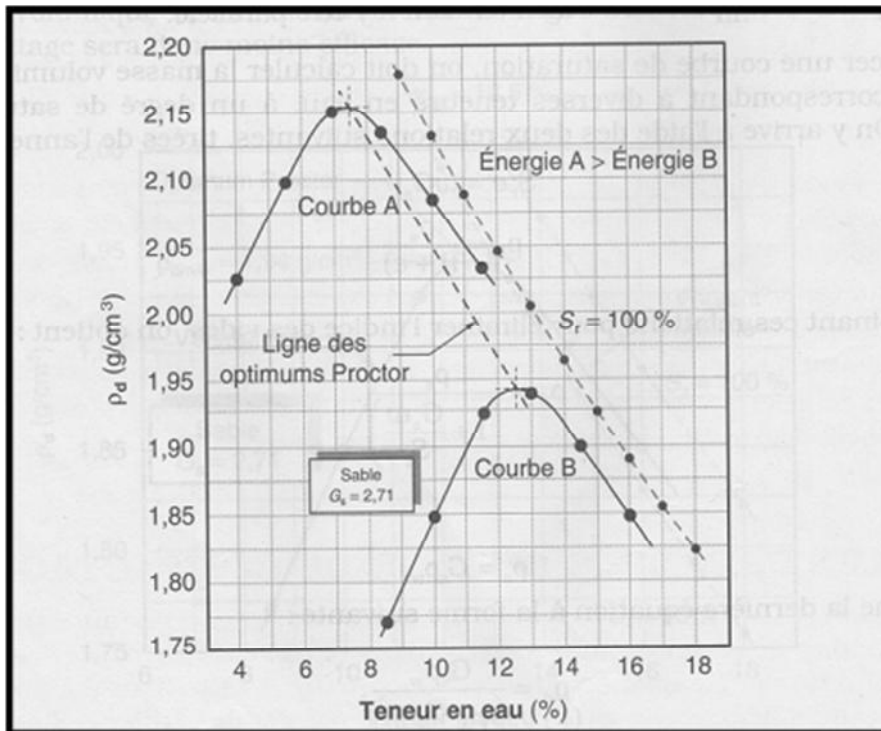


Figure II.3: Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor.

II.3.3 –Stabilisation chimique (ou stabilisation physico-chimique)

La stabilisation chimique est une méthode efficace pour améliorer les propriétés mécaniques des sols. En effet, ces pratiques de stabilisation sont utilisées depuis plusieurs millénaires. A cette époque, les pyramides de Shersi au Tibet étaient construites à partir d'un mélange de chaux et d'argile compactée (Rogers et al, 1996). Ce n'est que vers la fin des années 1940 aux Etats-Unis que les premières études de mélanges chaux-argiles ont été effectuées en laboratoire (Rogers et al, 1996b) (**GLEN LÉGÈRE, 2001**). Aujourd'hui, les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du génie civil à l'échelle mondiale. La chaux, le ciment et les cendres volantes sont les produits stabilisants les plus couramment utilisés.

II.4 –Stabilisation des sols par la Chaux et le Ciment

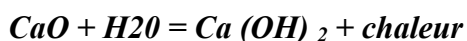
Plusieurs produits sont employés aujourd'hui avec les sols pour obtenir un matériau de construction avec des propriétés meilleures que celles du sol original. Ceux employés le plus couramment sont le ciment et la chaux (**Département Ingénierie Novembre, 2004**).

II.4.1 –La chaux

La chaux peut être utilisée sous deux formes : la chaux vive et la chaux hydratée.

La chaux vive provient de la calcination de calcaire dans des fours à haute température ($T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$). La calcination permet de libérer le gaz carbonique (CO_2) afin d'obtenir l'oxyde de calcium (CaO) qui est la chaux vive.

Le principe de l'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau du sol provoque une consommation d'eau et une évaporation importante. Cette propriété est mise à profit pour l'assèchement des sols fins argileux et humides.



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur

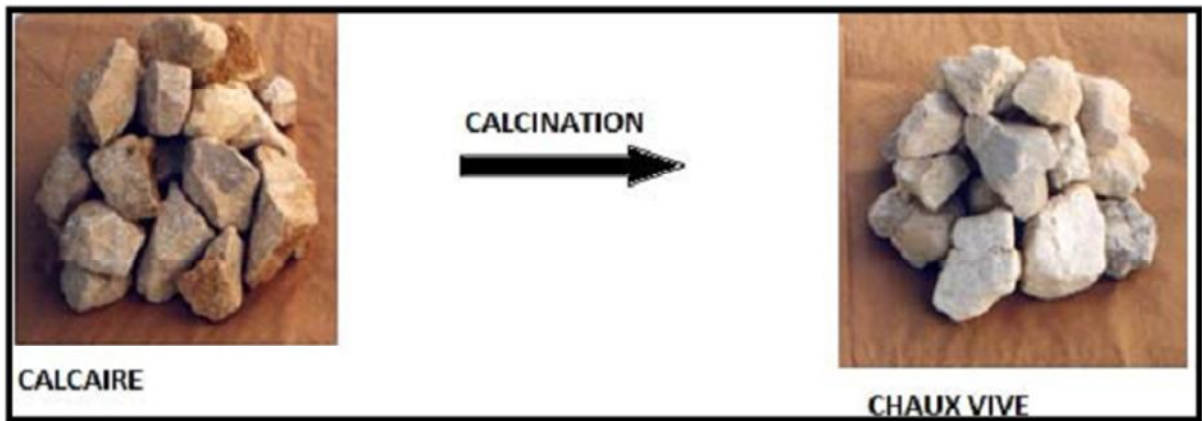


Figure II.4: Transformation du calcaire en chaux vive.

L'hydroxyde de calcium aussi appelé chaux hydratée ou chaux éteinte, est obtenu par l'ajout de 25 % d'eau en masse à la chaux vive (Chauvin et al, 1980) (GLEN LÉGÈRE, 2001).



Figure II.5: La chaux éteinte en poudre.

❖ Traitement des sols par la chaux

Le traitement des sols par la chaux provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na^{++} , K^{++}) par des cations Ca^{++} apportés par la chaux; ceci développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables (GLEN LÉGÈRE, 2001).

Un sol argileux et humide passe d'un état plastique à un état solide, friable, facilement utilisable. On utilise la chaux aérienne sous forme de chaux éteinte ou de chaux vive, qui produit un abaissement plus important de la teneur en eau mais qui est plus délicate à manipuler (3% de chaux vive ont les mêmes effets que 4% de chaux éteinte).

L'addition de chaux a des effets à long terme (plus d'un an) par combinaison avec les constituants des argiles et l'action de la chaux sur les sols dépend:

- ✓ de la finesse qui augmente la surface de contact ;
- ✓ de la teneur en chaux libre (élément actif) ;
- ✓ de la durée du traitement ;
- ✓ du compactage qui doit suivre rapidement le malaxage (dans la journée) ;
- ✓ de la teneur en eau.

II.4.2 –Ciment

Les **Ciments Portland** sont des liants hydrauliques composés essentiellement de silicates de calcium hydrauliques qui font prise et durcissent en vertu d'une réaction chimique à l'eau nommée hydratation (**Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, MacLeod et McGrath, 2004**). Quand on ajoute la pâte (ciment, air et eau) aux granulats (sable et gravier, pierre concassée ou autre matériau granulaire), elle agit comme une colle et lie ensemble les granulats pour former une masse comparable à la pierre, le béton, le matériau le plus polyvalent et le plus commun qui existe (**GLEN LÉGÈRE, 2001**) .

Le ciment Portland est le produit qu'on obtient en réduisant en poudre un clinker constitué principalement de silicates de calcium hydrauliques auxquels on ajoute diverses formes de sulfate de calcium, du calcaire et de l'eau, mais aussi divers produits d'addition au choix du fabricant.

Les matières qui entrent dans la fabrication du ciment portland doivent contenir des proportions appropriées de chaux, de silice, d'alumine et de fer.

❖ **Traitement des sols par le ciment**

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, aux quels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel.

Le ciment est un liant fort, rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise (**Verdeyen .J et Leyder .J.P**).

La prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui évolue encore au bout d'un an), mais elle est stoppée par le gel.

Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel (**Verdeyen .J et Leyder .J.P**).

❖ **Traitement mixte**

Dans le cas où le sol est humide (on préconise la chaux) et peu argileux (on préconise le ciment), on utilise d'abord la chaux à faible dose (0,5 à 2 %) et ensuite le ciment, ces liants ayant une action complémentaire.

Le traitement préalable à la chaux par son action immédiate amène le sol à un état optimal pour le traitement au ciment (**Norme Française, 1994**).

❖ **Limites d'utilisations**

D'une part, il convient que le sol :

- ne soit pas trop plastique (les sols à indice de plasticité supérieur à 30 peuvent poser des problèmes) car le malaxage est difficile.
- ne contienne pas de "cailloux " trop gros (maximum 40 à 50 mm) qui gênent le malaxage.

D'autre part, il convient que :

- la teneur en eau ne soit ni excessivement élevée, ni trop basse pour que le traitement soit efficace, d'où l'importance des conditions climatiques durant le chantier.
- le sol ait une bonne réactivité : certains ne réagissent ni à la chaux ni au ciment; les sols organiques ne sont pas traitables au ciment sauf s'il y a destruction préalable à la chaux vive de la matière organique; les sulfures de fer inhibent le traitement à la chaux (cas des marnes pyriteuses).
- la chaux est en général utilisée pour les sols " argileux " ou pour les sols limoneux peu plastiques.
- Le ciment est utilisé pour des sols non plastiques ou pour des sols préalablement traités à la chaux à faible dosage (traitement mixte).
- la résistance au gel est nettement meilleure avec le ciment qu'avec la chaux, aussi, pour les sols argileux, un traitement mixte chaux-ciment est préférable dans des régions soumises aux phénomènes de gel-dégel ".

II.5 –Travaux de recherches réalisés pour stabilisation des sols

L'opportunité d'un traitement et le choix d'un type de traitement dépendent essentiellement de la nature du sol (sol cohérent ou non, argileux ou sableux...) et de l'utilisation prévue.

La stabilisation des sols a été étudiée par un grand nombre de chercheurs.

Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit pour avoir une bonne résistance mécanique.

Le potentiel de gonflement du sol, de l'ordre de 10%, fut diminué pour des valeurs satisfaisantes. Cette même technique a été utilisée dans la réalisation d'autoroutes aux USA des études élaborées par **Chen(1988)** , **Nelson et al (1992)**, **Sivapullaiah et al,(2000)** et **Puppala et al,(2004)** montrent que, parfois, l'ajout de chaux au sol expansif contenant des proportions notables (>3%) en gypse ou en sulfate peut occasionner un soulèvement au lieu d'une stabilisation **Suppakit et al,(2001)** rapportent que la chaux est l'unique matériau de stabilisation à base de calcium qui peut occasionner des réactions expansives en contact du sulfate.

Unikowski 1982 quant à lui a montré en réalisant des mélanges sable de Leucate avec l'argile, que même une petite pollution des granulats d'un mortier (5 %) par des particules d'argiles peut être très pénalisante ou au contraire bénéfique en ce qui concerne la résistance à 28 jours

DERRICHE.Z et LOUAFI.B (2005) dans leur étude à partir d'un programme expérimental les auteurs ont analysé les mécanismes physiques de la stabilisation du gonflement d'une argile pure par l'ajout de sable sous différentes formes, par malaxage et par interaction de nappe de sable. Cette étude se penche sur l'influence de la taille des grains sur le comportement au gonflement du sol étudié. Il est ressorti dans cette étude que la réduction du gonflement par l'ajout de sable est le résultat de la diminution de la densité propre de l'argile dans le mélange.

G. Rajasekaran (2005) a étudié le comportement des Sulfates qui contiennent les argiles marines stabilisées par le ciment ou la chaux. Dans leur étude des propriétés physico-chimiques et de technologie de l'argile traitée par la chaux contenant l'ettringite ont été examinées. Les études récentes ont indiqué que les techniques de stabilisation des argiles par

la chaux et le ciment devraient être réalisées avec précaution pour éviter la réaction des sulfates d'argiles.

Terashi et Niina ont montré, en stabilisant des mélanges sable-argile, que la résistance d'un matériau sol-ciment dépendait de la fraction sableuse, et que le maximum est atteint pour 60 % de sable environ. (Le Roux et al. 1969) ont obtenu des résultats assez similaires (optimum de résistance obtenus pour 40% de sable) et les expliquent de la manière suivante : au fur et à mesure que la quantité de sable augmente dans le mélange, l'argile est de plus en plus diluée, et le dosage en chaux ou ciment par rapport à l'argile augmente. L'attaque de l'argile par la chaux est donc plus grande. Cependant, à partir d'un optimum de 40 % environ, le potentiel de réaction du sol avec la chaux diminue. Il est intéressant de noter que ce pourcentage de particules grossières correspond aussi à celui pour lequel la compacité maximale d'un mélange dans le cas de deux familles de particules de taille bien différentes, comme nous venons de le dire.

Toutefois il faut noter que ces résultats sont obtenus à 7 jours : le sable est attaqué beaucoup plus lentement que l'argile par la chaux et le ciment, ce qui au cours du temps, aura pour conséquence de déplacer l'optimum vers un plus grand pourcentage de sable, sans toutefois arriver à 100 %.

Mellal Fatima (2009) a fait une étude expérimentale du comportement physique et mécanique des mélanges traités par l'évaluation de l'influence d'une variété du pourcentage en chaux (C= 1, 2, 3 et 4%) sur les limites d'Atterberg, la compactibilité, la portance, la compressibilité, le potentiel et la pression de gonflement, la résistance à la compression à 28 et à 90 jours, et la résistance au cisaillement à 7, 14 et 28 jours de cure du sol. Une augmentation continue en chaux de 1 à 4% implique une amélioration des paramètres physicomécaniques, ce qui signifie le bon comportement des mélanges traités.

La stabilisation de la matrice marne-chaux est due à des réactions chimiques entre les minéraux argileux dans le sol et la chaux hydratée (floculation et agglomération, réaction pozzolanique).

L'application du traitement à 2% de chaux de la marne a été exécutée au niveau du chantier, et les résultats obtenus sur chantier ont été confrontés avec les résultats trouvés au laboratoire.

DJAANI Mabrouka et BENMANSOUR Samah Farah (2011) Ont fait une étude expérimentale sur les sols d'In-Amenas, portant sur l'effet de la chaux et du ciment à différentes concentrations sur le taux et la pression du gonflement afin de déduire une méthode pratique simple, économique et efficace pour abaisser le phénomène de gonflement.

(Fabien Szymkiewicz, 2011) a fait une étude de laboratoire, en réalisant des mélanges dits "de référence" d'un sol-ciment composé majoritairement de sol. Le ciment ne représentera au maximum que 30% du mélange. Trois sables et cinq sols fins ont été traités en faisant varier à chaque fois les quantités de ciment et d'eau, afin d'observer l'influence de la granulométrie, de l'argilosité et de la quantité d'eau présente dans le mélange sur la résistance, la rigidité et la déformation à la rupture du matériau. Par ailleurs, des sols reconstitués à base de sable et de sol fin ont été traités afin d'étudier l'impact des fines et de leur nature sur la résistance du matériau.

En parallèle, le suivi de différents chantiers a permis d'étudier la mise en œuvre de la méthode, l'homogénéité du matériau réalisé in situ, et de comparer les résultats obtenus avec ceux de l'étude paramétrique.

Les résultats de ce travail sont représentés par des abaques reliant la résistance au dosage en ciment et au rapport C/E, ainsi qu'un tableau de synthèse de données expérimentales des différentes propriétés mécaniques du matériau sol-ciment (en fonction de la nature du sol rencontré), et des formules permettant pour les sols grenus de prédire la résistance à 7 et 28 jours en fonction du pourcentage de fines dans le sol et du dosage en ciment.

Le travail de recherche mené par **Zouhair ATTIMA, Abdelilah DEKAYIR, Mohamed Amine Doss BENNANI et Kamal ELHAMMOUTI (2014)** avait pour objectif la stabilisation des marnes et des sols marneux souvent sujets à des problèmes (gonflements, glissement). En effet, l'ajout de la chaux vive naturelle à ces marnes peut apporter une solution idéale pour les stabiliser et ceci par des modifications intéressantes de leurs propriétés géotechniques. Il a été notamment prouvé que l'addition de la chaux aux marnes dans le domaine humide de la courbe de compactage apporte une contribution très sensible dans la portance et permet d'avoir des qualités meilleures qui sont:

- Une addition de 5% de chaux vive permet d'atteindre la maturation à 48 heures et du coup la stabilisation de sa plasticité,

- Une réduction de sa surface spécifique.
- Une chute de la valeur de sa masse volumique sèche (1.8 %) et de sa teneur en eau optimale,
- Un ajout de 5% de chaux aboutit à une augmentation significative de plus de 100% de son indice CBR (California Bearing Ratio) de 3,6 à 28,9).

II.6 – CONCLUSION

Dans la conception des matériaux de construction à partir de la stabilisation des sols remaniés, le choix du stabilisant et le procédé de stabilisation sont déterminants.

La stabilisation mécanique convient comme traitement à n'importe quels sols; pour peu que le moyen de densification soit adapté à la nature du sol (compactage statique pour les sols cohérents et par vibration pour les sols pulvérulents).

La stabilisation physico-chimique apportera essentiellement une insensibilisation à l'eau pour les matériaux argileux.

CHAPITRE III : Essais d'identification des matériaux utilisés

III.1 – Introduction

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification » (MAGNAN J.P.)

Les essais d'identification conduisent à une description précise et chiffrée, et non seulement descriptive, du sol. Une définition chiffrée est nécessaire car des sols d'aspects très voisins peuvent présenter des comportements (mécaniques, en particulier) très différents.

Les essais d'identification servent de base aux divers systèmes de classification des sols. Leurs résultats permettent aussi d'estimer au moyen de corrélations des ordres de grandeur des propriétés mécaniques des sols et d'établir un prédimensionnement grossier des ouvrages au stade des premières études.

On distingue classiquement deux grandes catégories d'essais d'identification (MAGNAN J.P.) :

- les essais qui dépendent de l'arrangement et de la répartition des phases (squelette solide, eau, air). Ces essais caractérisent l'état du sol et ne peuvent être réalisés que sur des échantillons intacts ;
- les essais qui traduisent les propriétés des particules du sol et l'intensité de leurs liaisons avec l'eau. Ces essais caractérisent la nature du sol et sont réalisés sur des échantillons intacts ou remaniés (dont l'état a été perturbé lors du prélèvement ou du transport).

Ce projet a nécessité l'établissement d'un programme d'essais en laboratoire pour connaître les caractéristiques géotechniques des sols à étudier (sable et argile).

Pour chacun de nos sols on effectuera les essais suivants :

- L'analyse granulométrique ;
- Les limites de consistances ;
- L'analyse chimique et l'analyse minéralogique ;
- L'essai Proctor ;
- Equivalent de sable.

III.2 – Analyse granulométrique et l'essai de sédimentation

III.2.1 – Analyse granulométrique

L'Analyse granulométrique d'un sol est sa décomposition en diverses fractions selon la dimension ou le diamètre des grains qui le composent.

Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 0,08 mm (Norme AFNOR, NF P 94-056). Les échantillons nécessaires pour cet essai devront être représentatifs de la granulométrie complète du sol. Il faudra donc veiller à ce que le lavage ne conduise pas à éliminer les éléments fins. Cette analyse granulométrique est complétée par et par l'analyse de sédimentation pour les éléments inférieurs ou égal à 0,08 mm. (Norme AFNOR NF P94-057).

III.2.2 – Conduite de l'essai

Les opérations préalables à effectuer sont les suivantes :

1. Préparation de l'échantillon :

Pour la préparation de l'échantillon il faut prendre une quantité de sol assez grande pour qu'il soit représentatif, assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et cette quantité doit être représentée par un nombre rond pour faciliter les calculs.

La masse de sol prélevée pour l'analyse au laboratoire est de (800 g)

2. Le tamisage sous l'eau :

Il s'effectue sous un flux d'eau, Il faut alors laisser décanter puis sécher chaque refus avant de les peser

3. séchage :

Il est nécessaire de sécher l'échantillon. Mais le séchage devra être assez progressif, et doit se faire à température assez basse pour ne pas faire éclater les grains contenant de l'eau et pour ne pas modifier la nature chimique de l'échantillon. Nous avons fixé la température de séchage à 105°C.

4. pesage :

Les eaux transportant les fines sont récupérées dans une bassine.

Après décantation l'eau claire est siphonnée. Les fines recueillies au fond de la bassine et les différents refus ainsi isolés sont mis à sécher à l'étuve à 105°C et puis pesés.



Cas a



Cas b

Figure III.1: Essai d'Analyse Granulométrique.

La composition granulométrique d'un sol est exprimée par une courbe granulométrique qui est tracée en reportant en ordonnée, à l'échelle arithmétique les tamisât, grains exprimés sous forme pourcentage du poids total du matériau. Les diamètres des tamis sont portés en abscisse à l'échelle logarithmique.

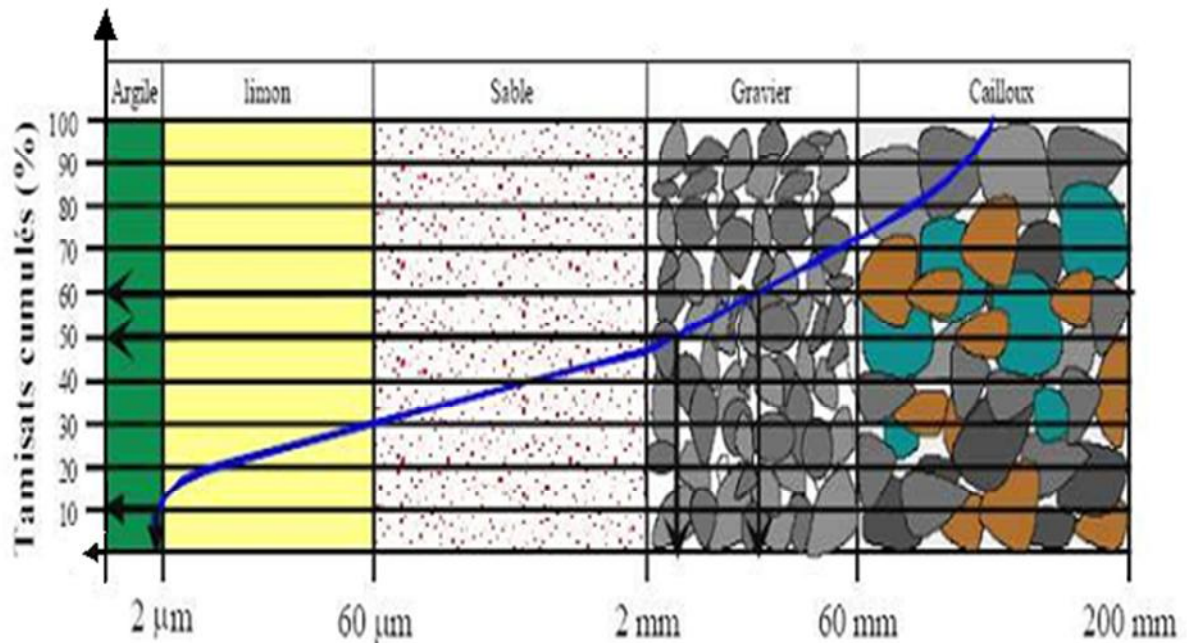


Figure III.2: Diagramme semi logarithmique de l'analyse granulométrique d'un sol.

L'analyse granulométrique du sol pour les particules inférieures ou égales à 0.08 mm se fait par la sédimentation (Norme AFNOR, NF P94-057). La sédimentation est un essai complémentaire à l'analyse granulométrique par tamisage du sol ce qui peut être nécessaire à la description et la classification (Norme AFNOR, NF P 94-056. La méthode utilise le fait que dans le milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des particules fines est fonction de leur dimension.

III.2.3 – Essai de sédimentation

- **But d'essai:** c'est la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 0.08mm.
- **Principe de l'essai de sédimentation**

-Tamiser l'échantillon de sol (passant au tamis 0.08mm), et récupérer le tamisât, sécher l'échantillon dans une étuve jusqu' au poids constant, prendre à 90g de tamisât sec. Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2litres contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée et une solution à 5% d'hexa méta phosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10 \text{HO}$).



Figure III.3: Appareil Agitateur et Solution.

- laisser imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante; -agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel, retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai), plonger le densitomètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre; procéder à la prise des lectures du densimètre et de la température ambiante aux temps suivant(en minutes): 0.5 -1 -2 -5 - 10 -20 - 80 - 240- 1440) calculer le pourcentage des tamisât et compléter la courbe granulométrique.



Figure III.4: Essai de Sédimentation.

III.2.4 – Résultats d'analyse granulométrique et de l'essai de sédimentation

III.2.4.1– Argile

Les tableaux [III.1], [III.2] et [III.3] présentent les résultats des analyses granulométriques des trois échantillons d'argile.

Tamis (mm)	tamisât cumulé (%)
20	100,00
10	89,73
5	86,62
2	82,49
1	79,28
0,4	76,54
0,2	74,18
0,1	72,09
0,08	69,96
0,0673	66,3
0,0489	62,4
0,035	56,55
0,0225	52,65
0,0161	47,97
0,0114	42,90
0,0082	37,05
0,0059	30,40
0,0034	23,40
0,002	15,60

Tableau III.1 : Analyse granulométrique du sol de M'douha (jaune)

Tamis (mm)	tamisât cumulé (%)
20	100,00
10	97,92
5	94,33
2	90,70
1	88,54
0,4	86,17
0,2	83,41
0,1	78,61
0,08	77,95
0,0674	76,74
0,0490	72,91
0,0350	69,07
0,0225	63,31
0,0161	57,56
0,0114	52,95
0,0082	47,97
0,0059	40,29
0,0034	32,62
0,002	21,1

Tableau III.2 : Analyse granulométrique du sol d'Oued-Aissi (rouge)

Tamis (mm)	tamisât cumulé (%)
20,00	100,00
10,00	97,20
5,00	95,17
2,00	88,83
1,00	80,29
0,40	74,11
0,20	63,79
0,10	53,00
0,08	52,00
0,0728	42,75
0,0517	40,81
0,0363	38,87
0,0232	34,98
0,0159	33,04
0,0112	31,9
0,0080	27,21
0,0057	21,38
0,0033	13,6
0,002	11,66

Tableau III.3 : Analyse granulométrique du sol de Takhoukht (gris)

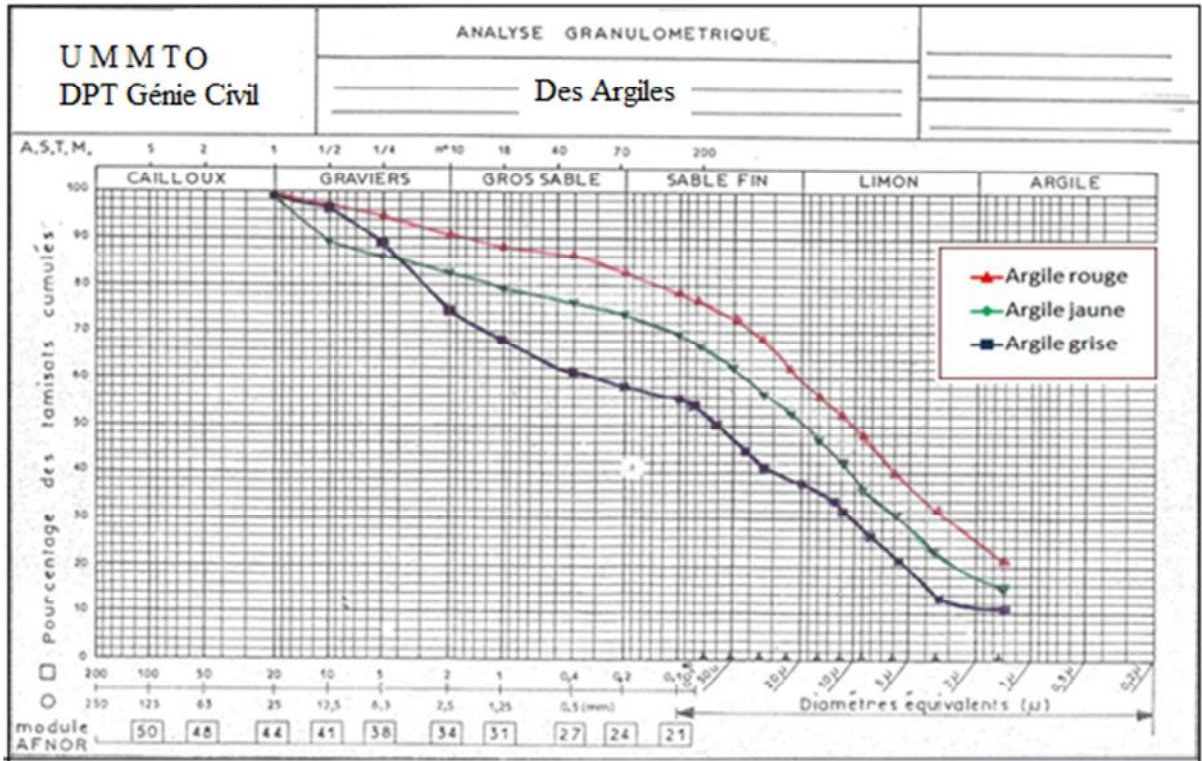


Figure III.5: courbes granulométriques des trois types d'argile.

D'après le laboratoire central des ponts et chaussées une particule est invisible à l'œil nu si son diamètre est inférieur à 0,080 mm. Une grosse particule est celle dont le diamètre est supérieur ou égal à 0,08mm. La classification de ces sols est faite selon la méthode du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC)

Sol d'Oued-Aissi (argile rouge)

Sur le tableau III.2 Nous relevons un tamisât de 77,95% au diamètre de 0,08mm. Ce sol contient 77,95% de fines et 22,05% de grosses particules donc c'est un sol fin. Il peut être soit un limon soit une argile. Pour reconnaître ce sol fin nous allons réaliser les essais de limites d'Atterberg.

Sol de M'Douha (jaune)

Le tamisât, au diamètre de 0,08 mm est de 69,96 %, ne contient que 30,04% de grosses particules donc c'est aussi un sol fin qui peut être soit un limon soit une argile. Pour classer un tel sol il faut déterminer la limite de plasticité W_L et l'indice de plasticité I_p

Sol de takhoukht (gris)

Au diamètre 0,08mm le tamisât est de 52%, ce sol contient plus de 50% de particules fines donc c'est encore un sol fin.

Pour approfondir cette classification nous allons déterminer les limites d'Atterberg dans le paragraphe III.3

III.2.4.2– Le sable

Tamis (mm)	refus (g)	refus (%)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât cumulé
5	0,00	0,00	0	-	100,00
2	380,60	38,06	380,60	38,06	61,94
1	265,49	26,55	646,09	64,61	35,39
0,4	187,01	18,70	833,10	83,31	16,69
0,2	77,69	7,77	910,79	91,08	8,92
0,1	32,95	3,30	943,74	94,37	5,63
0,08	8,98	0,90	952,72	95,27	4,73
fond	42,79	4,28	995,51	99,55	0,45

Tableaux III.4 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

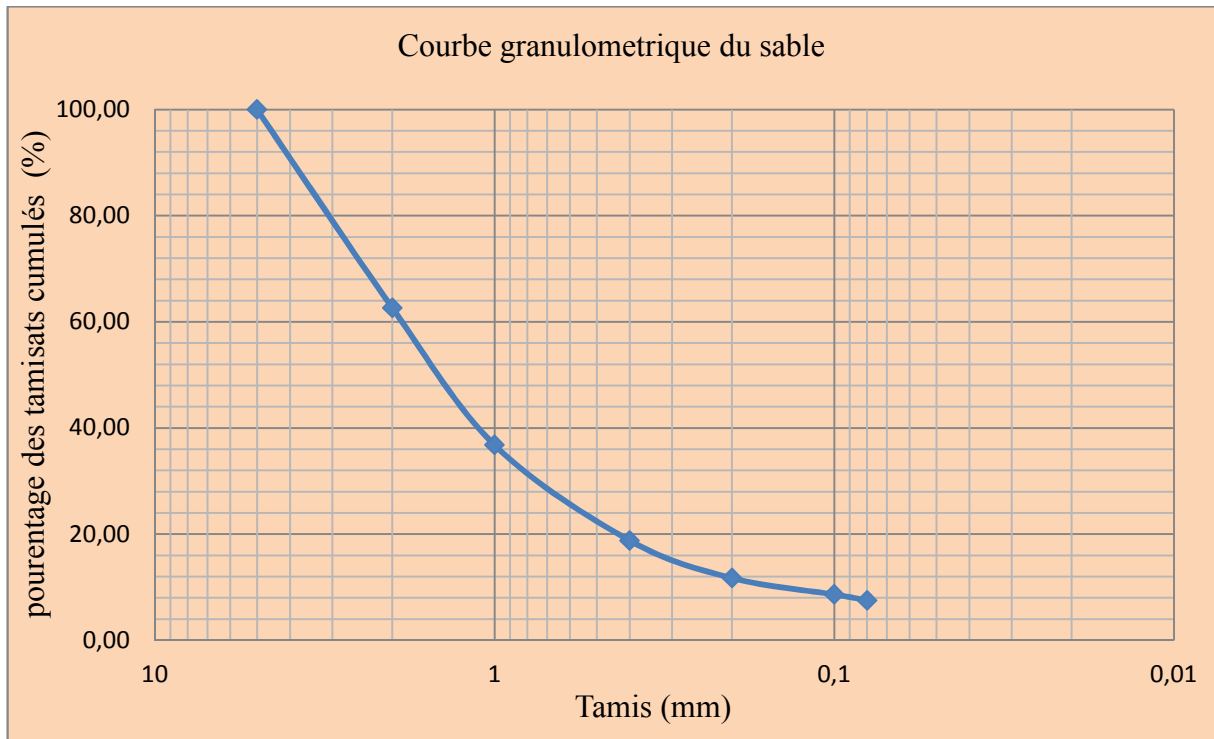


Figure III.6: courbe granulométriques du sable.

Nous classerons ce sable suivant la méthode de classification LCPC.

Le tamisât au diamètre 0,08 mm est de 5%. Le pourcentage de fines particules que contient ce sable est négligeable donc c'est un sol grossier il peut être soit du sable soit du gravier

Le tamisât au diamètre de 2 mm est de 62,64%, il contient 37,36% de gravier donc c'est un sable propre il peut être bien gradué ou mal gradué.

Soient :

- D_{10} le diamètre du tamis qui laisse passer 10% de tamisât (appelé diamètre efficace d'Allen Hazen

- D_{30} le diamètre du tamis qui laisse passer 30% de tamisât

- D_{60} le diamètre du tamis qui laisse passer 60% de tamisât

Le degré d'uniformité $U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ caractérise la pente de la courbe granulométrique. Il prend les valeurs suivantes

La courbure C de la courbe granulométrique est donnée par $C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$

Nous relevons sur la *figure III.6* :

$D_{10} = 0,18 \text{ mm}$

$D_{30} = 0,7 \text{ mm}$

$D_{60} = 1,8 \text{ mm}$

Nous avons $U = 10$ et $C = 1,512$

Un sable est bien gradué si le coefficient d'uniformité est supérieur à 6 et si la courbure est comprise entre 1 et 3. Puisque ces deux conditions sont satisfaites alors le sable est bien gradué, la granulométrie est étalée, donc c'est un sable propre bien gradué (Sb)

III.3 – Limites d'Atterberg

Les essais d'Atterberg ont un caractère arbitraire et fournissent des moyens d'identification et de classification des sols très utiles à l'ingénieur.

En fonction de la teneur en eau, un sol remanié se présente suivant des consistances variables pour lesquelles on peut distinguer quatre états : liquide, plastique, solide avec retrait et solide sans retrait. En réalité le sol passe graduellement d'un état à l'autre et les frontières respectives ne sont définies que conventionnellement par les limites d'atterberg. Elles sont donc des teneurs en eau qui sont obtenues par des essais effectués sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,42 mm.

Les teneurs en eau séparant les divers états de consistance du sol dépendent de la nature du sol. On les appelle:

- limite de liquidité w_L (limite entre l'état liquide et l'état plastique) ;
- limite de plasticité w_P (limite entre l'état plastique et l'état solide avec retrait) ;

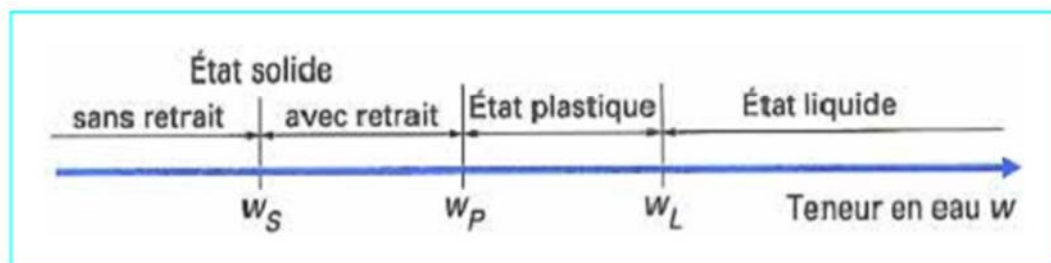


Figure III.7: États d'un sol en fonction de sa teneur en eau.

Les limites de liquidité, de plasticité et de retrait sont déterminées au moyen d'essais conventionnels (Norme AFNOR, NF P 94-051)

❖ **La limite de liquidité** se détermine au moyen d'un appareil normalisé, appelé

« Coupelle de Casagrande », qui est constitué d'une coupelle d'une dizaine de centimètres de diamètre, d'un socle de rigidité fixe et d'un système cranté permettant de soulever et de laisser retomber la coupelle d'une hauteur constante (10 mm) à raison d'un coup par seconde. Le sol argileux, préparé à une teneur en eau fixe, est étalé dans la coupelle puis entaillé avec une spatule normalisée. On compte le nombre N des coups nécessaires pour que les lèvres de l'entaille se rapprochent sur 10 mm de longueur. L'opération est renouvelée pour différentes teneurs en eau. La limite de liquidité correspond par convention à $N = 25$ coups (Norme AFNOR, NF P 94-051).



Figure III.8: Détermination de la limite de liquidité par l'appareil de Casagrande.

❖ La limite de plasticité

La limite de plasticité est par convention la teneur en eau au-dessous de laquelle il devient impossible de confectionner des bâtonnets de 3 mm de diamètre et de 100 mm de longueur sans qu'ils se rompent ou s'émiettent. L'essai s'effectue à la main, comme montré sur la figure (III.13).



Figure III.9: Détermination de la limite de plasticité.

❖ **Indice de plasticité I_p**

Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité : $I_p = w_L - w_p$.

L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique (R.Dupain R.Lanchon J.C.Saint.Arroman).

III.3.1 Classification des sols en fonction des limites d'Atterberg

On classe les sables, les limons et les argiles en fonction des limites d'Atterberg selon les tableaux suivants :

	Limite de liquidité w_L	Indice de plasticité I_p
Sable	$w_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < w_L < 60$	$5 < I_p < 25$
Argile	$w_L > 30$	$I_p > 15$

Tableau III.5: Classification approximative des sables, limons et argiles.

Degré de plasticité	Indice de plasticité
Non Plastique	0 – 5
Peu plastique	5 – 15
Plastique	15 – 40
Très Plastique	>40

Tableau III.6: Degré de plasticité selon l'indice de plasticité I_p .

Casagrande a établi que les valeurs de W_L et I_p dépendent de l'origine des argiles et il a traduit les résultats de cette recherche dans le diagramme ci-dessous appelé diagramme de plasticité de Casagrande figure III.14.

En 1932 le chercheur s'est servi de ce diagramme pour classer les sols fins en portant l'indice de plasticité en ordonnée et la limite de liquidité en abscisse (MAGNAN J.-P.).

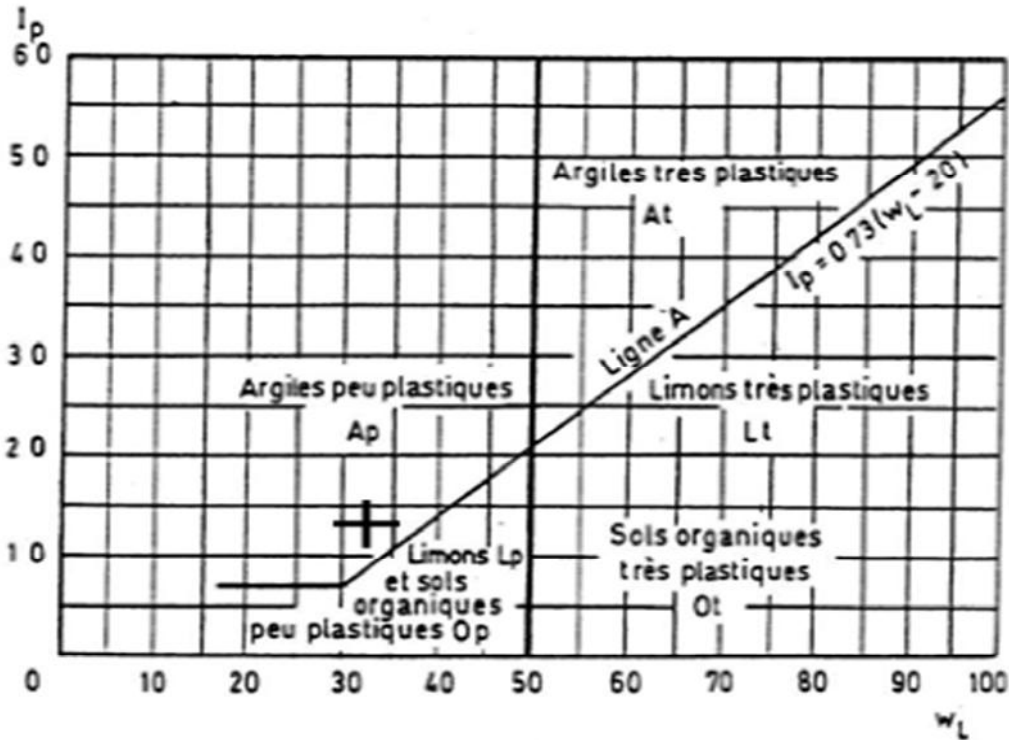


Figure III.10: Abaqués de plasticité de Casagrande, pour différents types de sols (d'après casagrande, 1948 et Haward, 1977).

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Selon la position d'un point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité W_L et pour ordonnée l'indice de plasticité I_p on classe les sols à grains fins. Ces fines particules sont classées parmi les limons si le point représentatif $M(W_L, I_p)$ se situe au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité de Casagrande et elles sont classées parmi les argiles si le point représentatif se situe au-dessus de la ligne A.

Un sol est très plastique si sa limite de liquidité est supérieure à 50 % et peu plastique si elle est inférieure à 50%.

Suivant selon la méthode du LCPC le diagramme de plasticité de Casagrande définit 4 grandes catégories principales les limons très plastiques LT.

- les limons peu plastiques LP
- les argiles très plastiques AT
- les argiles peu plastiques AP

III.3.2 – Résultats de l'essai Limites d'Atterberg

Les valeurs trouvées des limites de consistance des trois échantillons sont inscrites aux tableaux [III.7], [III.8] et [III.9].

III.3.2.1 – La limite de liquidité

Le sol d'Oued Aissi (argile rouge)			Le sol de l'Mdouha (argile jaune)			Le sol de Takhoukht (argile grise)		
N° de l'essai	Nombre de coups	Teneur en Eau (%)	N° de l'essai	Nombre de coups	Teneur en eau(%)	N° de l'essai	Nombre de coups	Teneur en eau(%)
1	20	38,9	1	23	42,755	1	17	22,98
2	23	37,1	2	24	42,012	2	19	22,63
3	26	36,35	3	26	40,979	3	26	21,51
4	33	33,55	4	28	39,206	4	30	20,61
wL=36,7% (à 25 coups)			wL=41,4% (à 25 coups)			wL= 21,6% (à 25 coups)		

Tableau III.7: limite de liquidité des sols d'Oued Aissi, Mdouha et Thakhoukht.

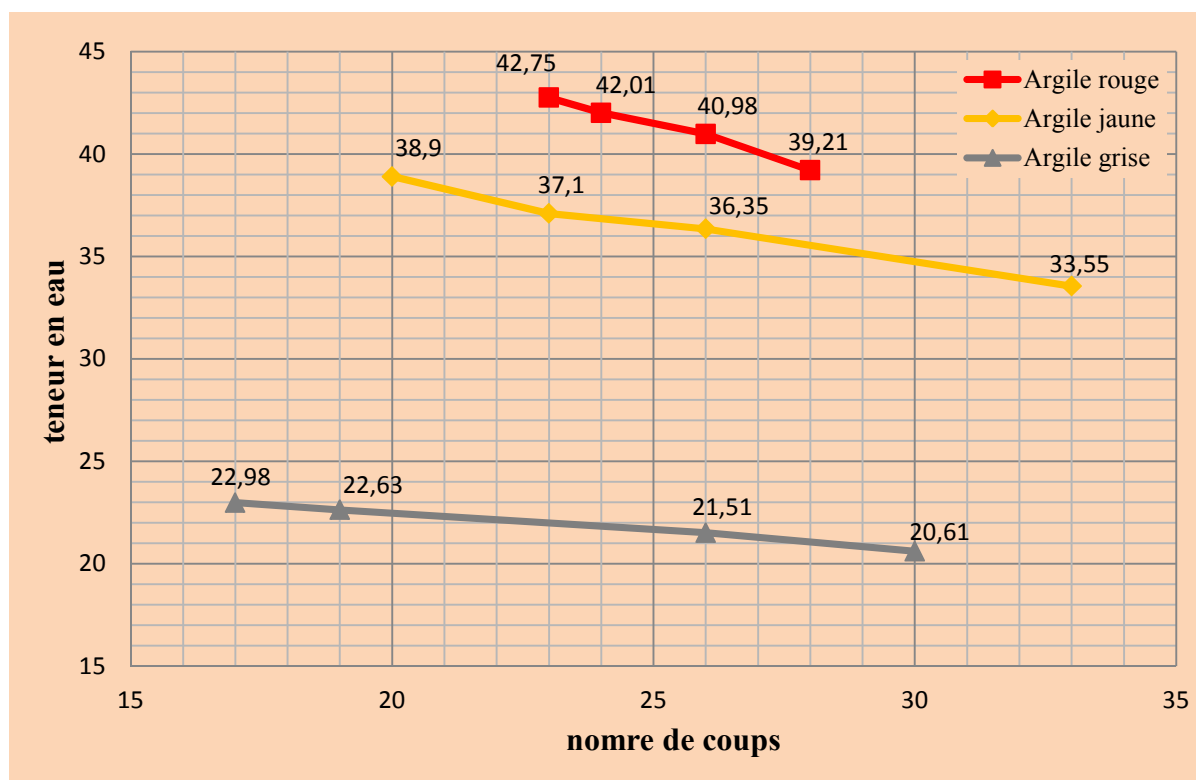


Figure III.11: Limite de liquidité des trois sols (N= 25 coups).

III.3.2.2 – La limite de plasticité W_p .

La limite de plasticité étant inférieure à la limite de liquidité il faut donc laisser l'échantillon sécher un peu plus.

Faire une boulette de mortier (12 mm environ). De cette boulette, faire un cylindre en la roulant, avec la paume de la main sur une plaque plane, lisse et sèche, d'un mouvement alternatif.

Le sol d'Oued Aissi (argile rouge)		Le sol de Mdouha (argile jaune)		Le sol de Takhoukht (argile grise)	
N°de l'essai	Teneur en eau	N°de l'essai	Teneur en eau	N°de l'essai	Teneur en eau
1	19,74	1	23,75	1	16,57
2	20,22	2	22,68	2	16,67
3	21,98	3	22,16	3	16,97
$W_p = 20,65$		$W_p = 22,86$		$W_p = 16,74$	

Tableau III.9: limite de plasticité des sols d'Oued Aissi, Mdouha et Thakhoukht.

III.3.2.3 – Indice de plasticité

Type de sol	Indice de plasticité
Argile rouge d'oued aissi	16.05
Argile jaune de Mdouha	18.54
Argile grise de takhoukht	4.86

Tableau III.10 : Indice de plasticité des sols d'Oued Aissi, Mdouha et Thakhoukht.

III.3.2.4 – Interprétations des résultats des limites d'Atterberg

Le sol d'Oued Aissi :

Le sol rouge d'Oued Aissi est un sol fin donc il peut être soit une argile soit un limon

Sa limite de liquidité =36,7% est inférieure à 50% c'est un sol peu plastique

Le point représentatif M (WL= 36,7 ;Ip =16,05) se situe au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité Casagrand c'est une argile donc le sol de Oued Aissi est une argile peu plastique (AP)

Le sol de Mdouha:

Avec la limite de liquidité $W_L=22,86\%$ et l'indice de plasticité $IP =18,54\%$ le point représentatif se situe au-dessus de la ligne A C'est une argile. La limite de liquidité $W_L=22,86\%$ est inférieure à 50% donc c'est une argile peu plastique (AP)

Le sol de takhoukht:

Avec les coordonnées $W_L=21,6\%$ et $IP =4,86\%$ le point représentatif se situe au-dessous de la ligne A de l'abaque de plasticité de Casagrande donc c'est un limon peu plastique LP

Conclusion :

Les 3 sols étudiés sont des argiles peu plastiques. Le domaine de plasticité du sol de Mdouha est plus large que les deux autres car son indice de plasticité est plus grand.

III.4 – L'essai Proctor

Cet essai est très important dans tout ce travail, car toutes les étapes qui vont suivre reposent sur lui. Les échantillons destinés à l'écrasement pour étudier la résistance à la compression seront confectionnés par compactage au moule Proctor normal.

III.4.1 – Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé à l'aide d'une dame normalisée, selon l'échantillon de sol à étudier et à déterminer la teneur en eau du sol et sa densité sèche optimale. Il existe deux types d'essai de compactage (Babasaki, R., M. Terashi, T. Suzuki, A. Maekawa, M. Kawamura and E. Fukazawa ,1996):]

- L'essai Proctor normal ;
- L'essai Proctor modifié.

	Essai Proctor normal (Moule Proctor)	Essai Proctor modifié (Moule C.B.R)
Masse de la dame	2.49 Kg	4.535 Kg
Hauteur de chute	305 mm	457 mm
Nombre de couches pour le remplissage du moule	3	5
Nombre de coups par couche	25	55
Diamètre du moule	101.6 mm	152 mm

Tableaux III.11: Essai Proctor ; compactage du matériau dans le moule.

Le choix du moule dépend de la grosseur D des plus gros grains du sol :

- Si $D \leq 5\text{mm}$ (et seulement dans ce cas), le moule Proctor normal est autorisé, mais le moule California.Bearing.Ratio (CBR) est conseillé ;
- Si $5\text{ mm} < D \leq 20\text{ mm}$, utiliser le moule C.B.R ;
- Si $D > 20\text{ mm}$, tamiser le matériau à 20mm, et peser le refus :

-si le refus $\leq 25\%$, l'essai se fait dans le moule C.B.R, mais sans y intégrer le refus (échantillon écrêté à 20mm),

-si refus $>25\%$, l'essai Proctor ne peut pas être fait. Le sol sur lequel nous travaillons est tamisé à 5mm, alors on le compacte en utilisant le moule Proctor normal.

III.4.2 – Matériel et mode opératoire

Le moule Proctor normal, utilisable pour les sols fins, est un cylindre métallique que l'on peut fixer sur une plaque de base. Les dimensions du moule Proctor sont :

$\Phi=101,6\text{mm}$, hauteur (h)=117mm.

La dame Proctor est un tube cylindrique, dans laquelle coulisse un mouton actionné par une poignée. Les dimensions de la dame Proctor normal sont :

$\Phi=51\text{mm}$, poids (P)=2,49kg, hauteur de chute = 305mm.



Figure III.12: Equipement de l'essai Proctor normal.

On met la première couche de sol dans le moule, en utilisant la dame on compacte le sol par 25 coups, distribué comme illustré dans la figure.



Figure III.13: Compactage des couches.

III.4.3 – Les résultats de l'essai Proctor

III.4.3.1 – Argile : Nous présentons dans les tableaux suivants les résultats de l'essai Proctor où: g = accélération de la pesanteur

d : densité du matériau $d = \frac{\rho}{\rho_w}$

ρ : masse volumique sèche du matériau

ρ_w : masse volumique de l'eau.

Les résultats obtenus de l'essai Proctor sont inscrits au tableau [IV.7], [IV.8] et [IV.9], ainsi que les courbes obtenues à partir de ces valeurs sont données par la figure IV.8.

Avec : $\gamma_d = \rho_d \cdot g$: poids volumique sec d'une éprouvette

ρ_d : masse volumique sèche d'une éprouvette

Teneur en eau de fabrication	Poids humide P_h (g)	Poids sec P_s (g)	Volume du moule (m^3)	Poids volumique sec (γ_d) (kN/m^3)
12	1887,38	1676,02	0,000949	17,66
13	1941,89	1710,46		18,02
15	1993,42	1732,23		18,25
17	1943,69	1656,55		17,46
18	1941,79	1638,66		17,27

Tableau [IV.12] : détermination de l'optimum proctor pour l'argile rouge

Teneur en eau de fabrication	Poids humide P_h (g)	Poids sec P_s (g)	Volume du moule (m^3)	Poids volumique sec (γ_d) (kN/m^3)
10	1885,65	1674,65	0,000949	17,65
11	1897,46	1686,51		17,77
12	1936,40	1704,87		17,97
13	1937,11	1683,51		17,74
15	1948,38	1665,54		17,55

Tableau [IV.13] : détermination de l'optimum proctor pour l'argile jaune

Teneur en eau de fabrication	Poids humide Ph (g)	Poids sec Ps (g)	Volume du moule (m ³)	Poids volumique sec (γ _d) (kN/m ³)
5	2220,15	2100,22	0,000949	22,13
6	2228,14	2113,12		22,27
7	2272,17	2128,59		22,43
8	2245,91	2081,97		21,94
10	2183,21	1989,72		20,97

Tableau [IV.14] : détermination de l'optimum proctor pour l'argile grise

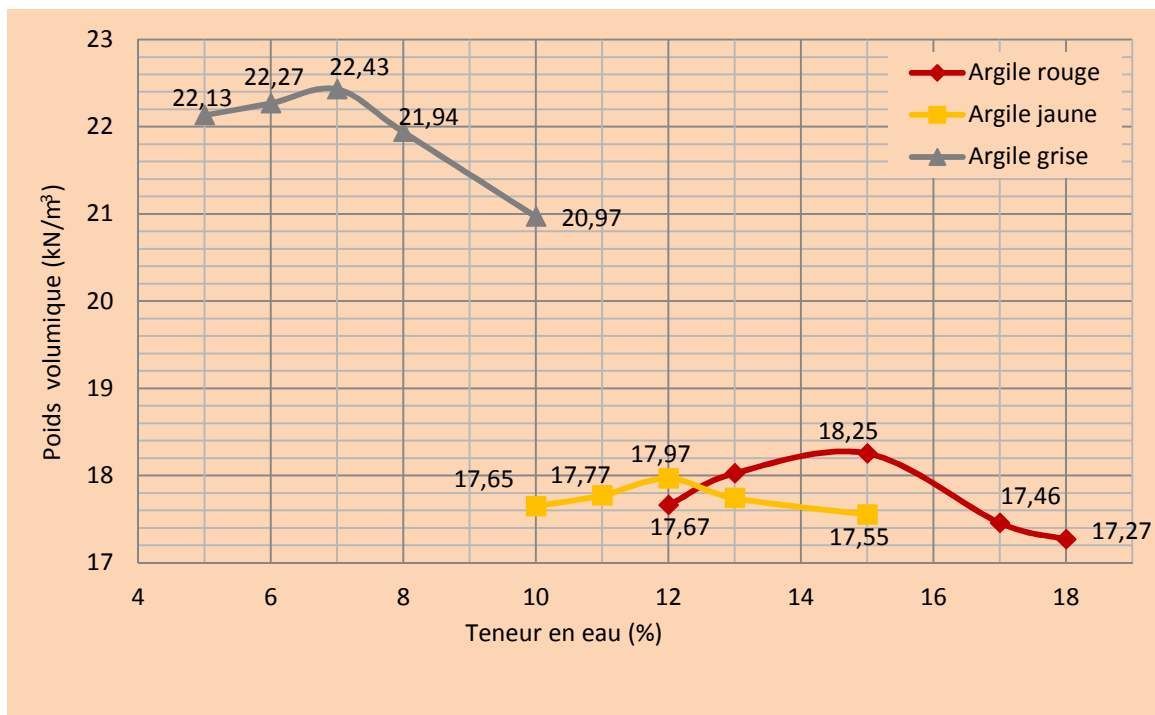


Figure III.14: Courbe de l'Optimum Proctor des différents sols.

III.4.3.2 – Sable

Nous présentons dans le tableau III.9 les résultats de l'essai Proctor :

ω: teneur en eau

P : poids de la tare

P_{sol sec} : poids du sol sec

ω (%)	$P_{\text{total}} + P_{\text{sol}}$ (Kn/m ³)	$P_{\text{total}} + P_{\text{sol sec}}$ (Kn/m ³)	P_{tare} (Kn/m ³)	P_{sol} (Kn/m ³)
8	1937.101	1808.806	132.514	16.65
10	1926.318	1772.065	131.889	18.36
13	1901.258	1764.76	172.724	17.38

Tableau III.15: résultats de l'essai Proctor du sable.

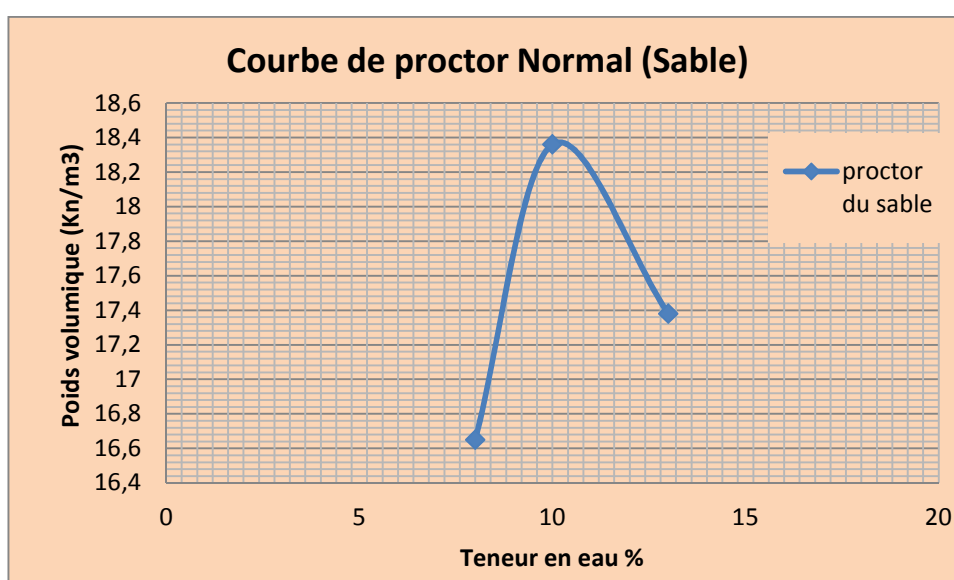


Figure III.15: Courbe de l'Optimum Proctor du Sable.

III.4.4 – Interprétation des résultats des essais Proctor

Le sol de Takhoukht contient plus de grosses particules, et son domaine de plasticité est inférieur aux deux autres sols ce qui fait que son poids volumique sec est plus grand et sa teneur en eau optimale est faible.

Le sol de Mdouha et celui d'Oued Aissi ont la même teneur en eau optimale et les mêmes poids volumiques secs.

III.5 – Analyse minéralogique et Chimique

III.5.1 – Analyse minéralogique

Si le sol contient une proportion appréciable de minéraux argileux, il peut être intéressant de procéder à leur identification ainsi qu'à celle des cations adsorbés. Si l'identification qualitative est relativement aisée, la détermination quantitative des différentes espèces argileuses est plus délicate et fait appel à des méthodes d'analyse chimique relativement élaborées, telles que la diffraction des rayons X, la thermogravimétrie et l'analyse thermique différentielle, la mesure des surfaces spécifiques, la spectrométrie infrarouge, etc., couplées judicieusement avec des méthodes chimiques classiques ou modernes (comme l'analyse par absorption atomique) et l'observation de lames minces au microscope électronique.

Les trois échantillons de sols ont été analysés par Spectromie de diffraction X afin de déterminer la nature des constituants minéraux.

Minéraux présents	Formules	Code échantillons Teneur en eau		
		Argile Rouge	Argile Grise	Argile Jaune
Quartz	SiO_2	20.2	49.0	34.0
Dolomie	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	01.0	01.0	11.0
Calcite	CaCO_3	-	-	21.0
Kaolinite	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	18.0	17.0	08.0
Chlorite	$\text{Al}_4(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	08.8	02.0	-
Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	29.0	13.0	17.0
Feldspaths (Na, Ca)	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	11.0	07.0	04.0
Rutile	T_iO_2	01.0	01.0	-
Feldspaths K	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	05.0	04.0	-
Autres : Minéraux ferrugineux	Fond RX	07.0	06.0	05.0

Tableau III.16: Résultats de l'analyse minéralogique.

III.5.2 – L'analyse chimique

C'est une méthode d'identification d'un sol qui nous permet de déterminer la quantité de :

- Résidu insoluble ;
- Sulfates ;
- Carbonates;
- L'eau de constitution;
- Des chlorures.

La composition minéralogique estimative (semi quantitative) a été évaluée sur la base des résultats chimiques et elle figure dans le tableau suivant :

Code de l'échantillon	Composition chimique										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaCO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
Argile Rouge	54.46	23.21	7.24	0.44	2.05	0.03	4.29	1.33	0.14	1.19	5.59
Argile jaune	61.59	18.75	6.83	0.242	1.43	0.02	3.27	1.065	0.125	1.10	5.37
Argile grise	68.72	14.29	6.43	0.044	0.80	0.01	2.24	0.80	0.11	1.02	5.14

Tableau III.17: Résultats de l'analyse chimique des trois argiles.

La teneur en CaCO nous conduit à faire la classification ci-dessous :

- 0 à 10% de CaCO₃ \implies Argile.
- 10 à 30% de CaCO₃ \implies Argile marneuse
- 30 à 70% de CaCO₃ \implies Marne
- 70 à 90% de CaCO₃ \implies Calcaire marneux
- 90 à 100% de CaCO₃ \implies Calcaire

D'après le pourcentage de CaCO_3 trouvé pour chaque sol et le pourcentage en minéraux argileux on a :

- Le sol d'Oued Aissi : c'est une argile composée de 20% de quartz (SiO_2) et de 71% de fraction argileuse (muscovite 29%, kaolinite 18%, feldspaths NaCa 11% et chlorite 8% feldspaths K 5 %).
- Le sol de M'Douha: C'est une marne composée essentiellement de carbonates (calcaire, dolomie), de 34% de quartz et de minéraux argileux (muscovite, kaolinite, feldspaths) à un taux de 29% ainsi qu'une faible teneur en chlorite.
- Le sol de Takhoukht C'est une argile composée d'une fraction importante de quartz (49%) de fraction argileuse (muscovite 13%, kaolinite 17 %, feldspaths K 4% et chlorite 2% feldspaths NaCa 7%).

III.6- Conclusion

Les essais d'identification ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de classer les sols selon leurs granulométries, plasticité, et compositions chimiques et minéralogiques

Les sols étudiés dans ce mémoire sont :

- ✓ Le sable moyen et propre avec granulométrie étalée et bien graduée.
- ✓ des sols fins extrait de :
 - Oued Aissi est une argile inorganique de moyenne plasticité.
 - L'Habitat est une marne.
 - Takhoukht est c'est une argile inorganique de faible plasticité. Les sols présentent des couleurs différentes, alors pour ce qui suit on désignera le sol extrait d'Oued Aissi par « l'argile rouge », et celui de Takhoukht par « l'argile grise » en référence à leurs couleurs, alors que celui de M'Douha t est une « marne jaune ».

Le choix du ciment, de la chaux et d'argile pour stabiliser le sable étudié est logique car ils contiennent des fractions argileuses importantes.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

IV.1 – INTRODUCTION

Il est reconnu que l'utilisation de chaux vive est moins coûteuse du point de vue du stockage et transport pour traiter une même surface (GLEN LÉGÈRE, 2001). De plus, un des buts du traitement des sols est d'abaisser le taux d'humidité. La chaux vive répond mieux à cette exigence que la chaux éteinte car elle ne contient pas d'eau au départ et la réaction exothermique contribue à évaporer une plus grande quantité d'eau.

La technique de stabilisation des sols au ciment est très utilisée, très importante car elle permet d'obtenir les performances escomptées, les caractéristiques mécaniques sont souvent élevées et dépendent du temps de prise.

Dans ce chapitre nous exposerons les résultats de la stabilisation d'un sable avec du ciment seul, mélanges : ciment-chaux et ciment-argile. Trois modes de conservation des éprouvettes ont été expérimentés pour chaque type de stabilisation.

IV.2 – STABILISATION DU SABLE PAR LE CIMENT ET CHAUX

IV.2.1- Confection des éprouvettes

Le sable est pris à son état naturel et est mis dans une étuve pour éliminer l'humidité qu'il contient. Le sable et une première teneur en ciment portland de 5% sont intimement mélangés dans le bac. On ajoute des pourcentages variables de chaux vive (2% ; 4% et 16%.) au mélange sable-ciment pour confectionner une série d'éprouvettes et ensuite on fabrique les autres séries en variant seulement le pourcentage de ciment. Les teneurs en ciment essayées sont : 5% ; 10% et 15%. Ces mélanges (sable-ciment-chaux) sont compactés manuellement suivant l'essai du Proctor normal. La teneur en eau de fabrication est fonction de la quantité de fines. Cette eau de gâchage est d'environ de 18% de la masse sèche.

IV.2.2- Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes réalisées ont subi une cure selon trois modes de conservation :

- ✓ **A l'air libre** : les éprouvettes sont conservées à l'air libre, à température ambiante, au laboratoire pendant 21 jours ensuite elles sont écrasées par compression simple.
- ✓ **Conservation dans l'eau**: les éprouvettes sont immergées dans l'eau, à température ambiante, où elles sont maintenues pendant 7 jours puis elles sont retirées pour continuer leur durcissement à l'air libre jusqu'au 21^{ème} jour où elles seront écrasées.
- ✓ **Conservation dans un sac en plastique légèrement humidifié** : les éprouvettes sont conservées dans un sac plastique fermé pour éviter le départ de l'eau donc l'humidité n'est pas contrôlée, il s'agit d'un essai où l'humidité est dans un état intermédiaire c'est adire entre un état saturé et un état sec.

IV.2.3- Essai d'écrasement

L'objectif principal est d'évaluer l'influence sur la résistance à la compression à l'état sec et saturé, après immersion de 24h dans l'eau, des éprouvettes de 21 jours d'âge du :

- ciment seul
- ciment combiné avec de la chaux
- mode de conservation

Ces écrasements sont effectués sur des éprouvettes :

- ✓ **à l'état sec** : pour déterminer l'influence de la combinaison du ciment et de la chaux sur la résistance à l'état sec (Rsec).



Figure IV.1: Eprouvettes de sable + (ciment-chaux) à l'état sec.

- ✓ **l'état saturé** : Après 21 jours de cure les éprouvettes seront immergées dans l'eau pendant 24 heures puis sont retirées et écrasées d'où la résistance après immersion (**R_{sat}**). Cet essai est appelé aussi essai de contrôle. Il est destiné à évaluer la résistance, du matériau traité, à l'action de l'eau.



Figure IV.2: Eprouvettes de sables + (ciment-chaux) immergées dans l'eau.

On applique un effort normal progressif jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On notera alors la charge maximale **F** de rupture exprimé en **KN** ; la résistance à la compression (**Rsec**) de l'éprouvette sera donnée par la relation $R_{sec} = F/S$; **S** étant la section transversale de l'éprouvette.

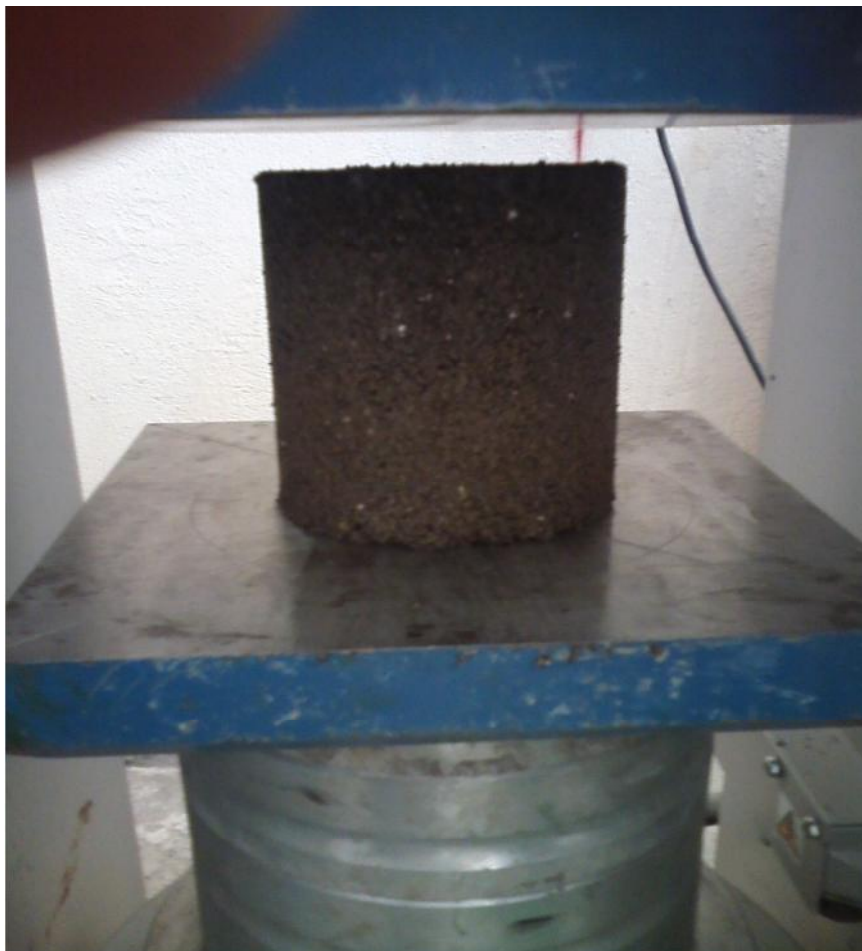


Figure IV.3: Essai de l'écrasement d'Eprouvette de sable.

IV.2.4- Resistance du matériau à l'action de l'eau

Les propriétés des matériaux saturés d'eau subissent de sensibles altérations : la masse volumique et la conductivité thermique augmentent, le volume de plusieurs matériaux (bois, argile) accroît (ils gonflent), la résistance baisse par suite de la violation des liens entre les particules du matériau par les molécules d'eau qui y pénètrent.

IV.3- Analyse et discussion des résultats expérimentaux obtenus

IV.3 .1– Traitement par le ciment seul (éprouvette témoin)

Les résultats de la stabilisation du sable à l'état sec, et à l'état saturé stabilisé par le ciment Portland, sont mentionnés dans les tableaux suivants :

a- Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état sec (Rsec)

Pourcentage du ciment (%)	Mode de Conservation					
	Air Libre		Sac légèrement Humidifié		Conservation dans l'eau	
	Rsec Mpa	Force (KN)	Rsec Mpa	Force (KN)	Rsec Mpa	Force (KN)
5	3.863	30.3	3.253	25	3.092	24.3
10	8.019	63	9.925	78	7.28	57.2
15	16.62	130.6	14.5	113.9	17.07	134.1

Tableau IV.1: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état sec (Rsec)

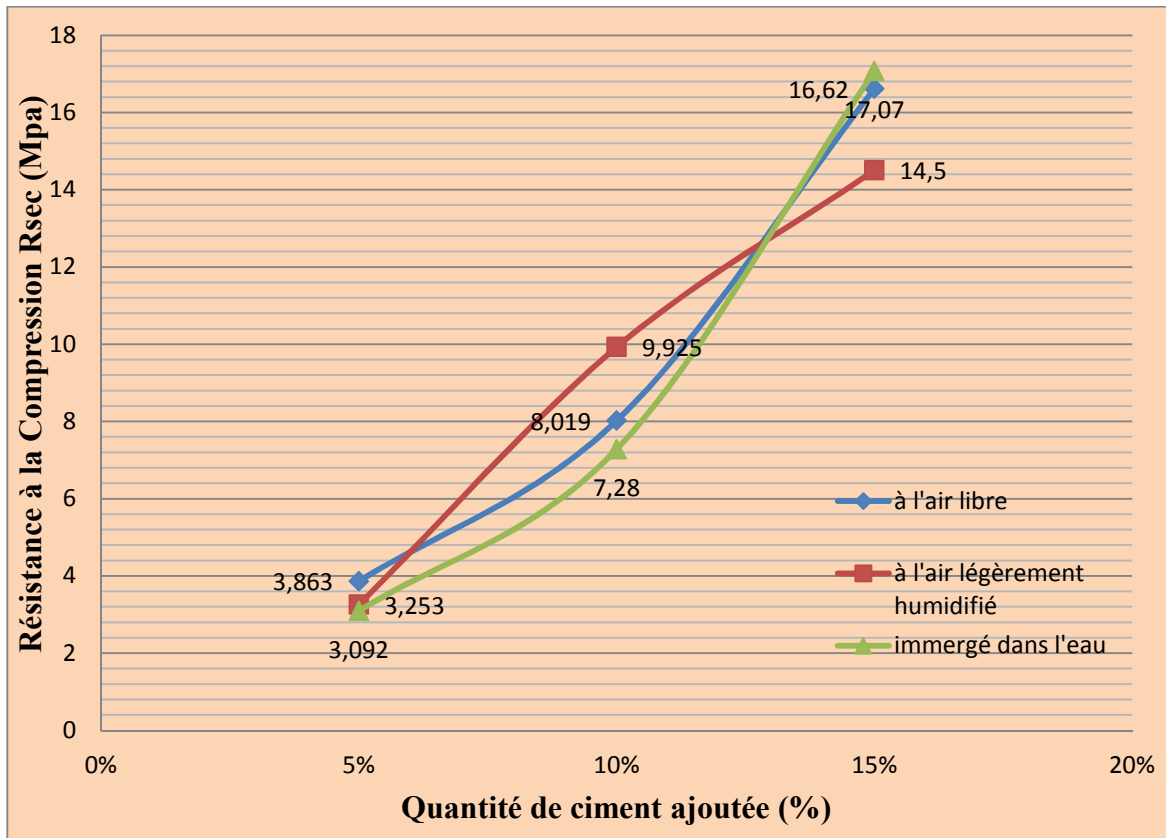


Figure IV4: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état sec (Rsec).

Dans tous les cas de conservation des éprouvettes, le sable est traité uniquement avec le ciment, la résistance mécanique de l'éprouvette (sable-ciment) augmente avec la teneur en ciment. Plus la teneur en liant est élevée, meilleure est la résistance du matériau. Comme le montre la **figure IV.4**, plus on ajoute du ciment au sable, plus le sable - ciment résultant est résistant.

Quelque soit le mode de conservation, la résistance augmente proportionnellement avec la teneur en ciment

Le processus de stabilisation initié par l'ajout du Ciment Portland au sable engendre trois étapes distinctes :

- L'échange cationique;
- L'hydratation par cimentation;
- Les réactions pouzzolaniques.

Le Ciment Portland possède des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux, soit celle de l'hydratation.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

Lorsque le Ciment Portland est hydraté, en plus du C-S-H, il forme également l'hydrate d'alumine-calciq (C-A-H) et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le CS-H et le C-A-H forment un réseau servant de « colle » donnant une structure et de la résistance au mélange.

b- Essai de contrôle sur sable stabilisé au ciment seul

Les éprouvettes de 21 jours d'âge sont immergées dans l'eau pendant 24h et sont écrasées

Pourcentage du ciment (%)	Mode de Conservation					
	Air libre		Sac légèrement Humidifié		Conservation dans l'eau	
	Rsat Mpa	Force (KN)	Rsat Mpa	Force (KN)	Rsat Mpa	Force (KN)
5	1.827	14.3	2.615	20.5	2.384	18.7
10	5.786	45.4	6.784	53.3	3.42	26.9
15	10.36	81.4	11.14	87.5	18.76	147.3

Tableau IV.2: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état de saturation (Rsat).

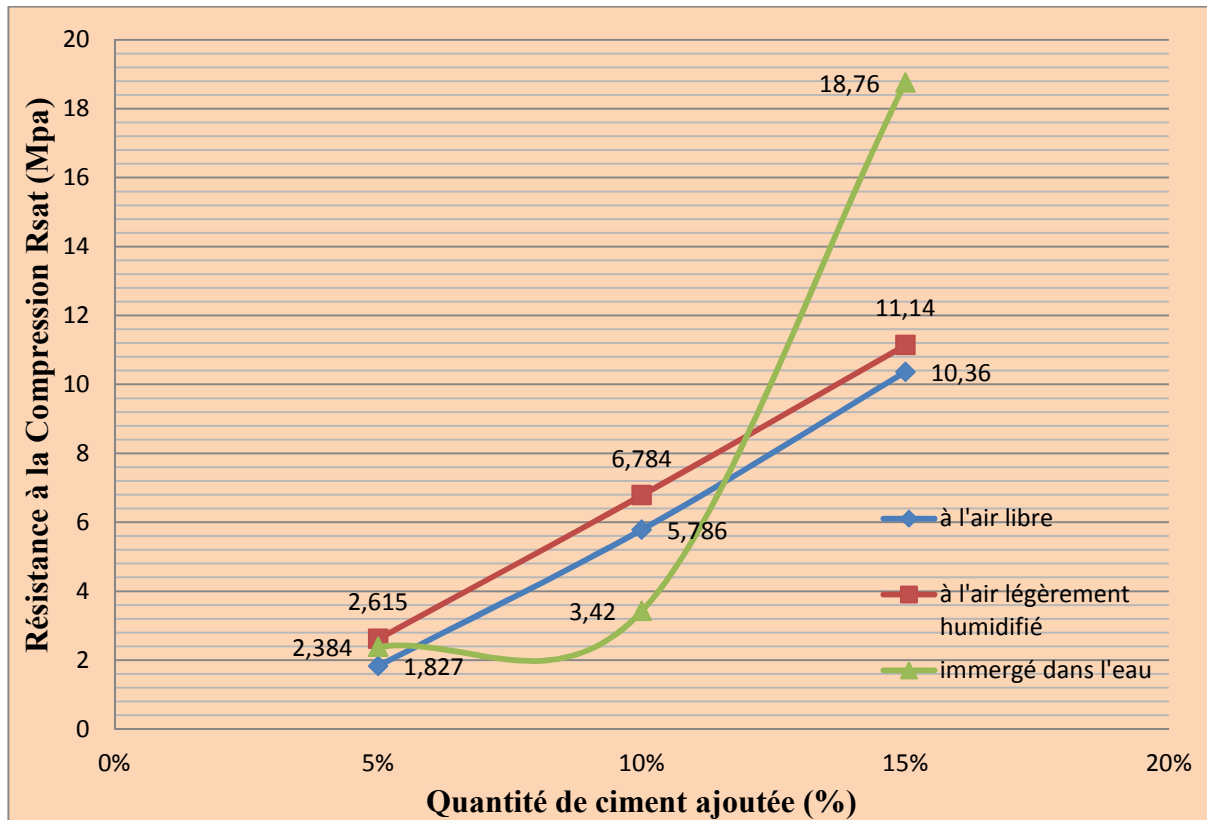


Figure IV.5: Résistance à la compression du sable stabilisé par le ciment à l'état de saturation (R_{sat}).

Les courbes de figure IV.5, la résistance à l'écrasement après immersion de 24h dans l'eau (**R_{sat}**) en fonction de la teneur en ciment, sont linéaires et présentent une grande similitude pour les deux modes : conservation à l'air libre ou dans un sac humide.

La conservation de l'éprouvette dans un sac humide fermé améliore légèrement la résistance par rapport à la conservation à l'air libre. L'eau présente dans le sac favorise l'amélioration de la résistance.

Pour le matériau conservé 7 jours dans l'eau, nous constatons un gain de résistance significatif pour des teneurs élevées en ciment. Ce mode de conservation a apporté un gain substantiel de résistance à l'écrasement après immersion de 24h dans l'eau. Nous pouvons conclure que : la conservation des éprouvettes dans un milieu humide ou saturé d'eau a un effet très bénéfique pour la résistance.

A l'état saturé la résistance (**R_{sat}**) augmente avec la teneur en ciment quelque soit le mode de conservation.

Pour de fortes teneurs en ciment, les échantillons conservés pendant 7 jours dans l'eau ont une résistance considérablement élevée et dépasse la résistance à sec (**Rsec**)

Pour de faibles dosages en ciment la résistance après immersion de 24h dans l'eau est faible par rapport à la résistance à sec quelque soit le mode de conservation.

IV.3.2– traitement du sable par le ciment – chaux pour les 3 modes de conservation

Tous les mélanges de sols naturels et de ciment portland sont généralement nommés « sol-ciment ». L'objectif visé par l'incorporation de la chaux dans un sable-ciment est d'étudier les proportions de chaux à incorporer dans un sable –ciment pour améliorer la Résistance mécanique à sec et la tenue à l'eau.

Les éprouvettes du sable stabilisées avec le ciment-chaux ont été réalisées en fixant le pourcentage du ciment et en variant le pourcentage de chaux. Le compactage des éprouvettes est fait selon le principe de l'essai Proctor normal.

Les éprouvettes du mortier sable-ciment plus chaux confectionnées sont conservées selon trois modes de conservation différents :

- à l'air libre pendant 21 jours
- dans un sac en plastique légèrement humidifié (dont le taux d'humidité est inconnu) pendant 07 jours puis elles sont exposées à l'air libre jusqu'au 21^{eme} jour ;
- Immergées dans l'eau pendant 07 jours puis elles sont exposées à l'air libre jusqu'à 21^{eme} jour.

IV.3.2.1–variation de la résistance à l'état sec Rsec du sable stabilisé par ciment +chaux

Les résultats de la stabilisation du sable à l'état sec (**Rsec**) par le ciment Portland et la chaux vive sont mentionnés dans le tableau suivant:

(%) du ciment	(%) de chaux	Mode de conservation					
		Air libre		Sac légèrement humidifié		Conservation dans l'eau 7 jours	
		Rsec	Force (KN)	Rsec	Force (KN)	Rsec	Force (KN)
5	0	3.863	30.3	3.253	25	3.092	24.3
	2	3.6	28.3	4.053	31.8	4.283	33.3
	4	2.014	15.8	3.964	31.1	5.109	40.1
	16	2.005	15.7	1.932	15.2	2.764	21.7
10	0	8.019	63	9.925	78	7.28	57.2
	2	7.793	61.2	10.83	85.1	6.515	51.2
	4	7.123	55.9	7.716	60.6	8.202	64.4
	16	1.244	9.8	3.628	28.5	0.584	4.6
15	0	16.62	130.6	14.5	113.9	17.07	134.1
	2	15.3	120.2	11.39	89.5	15.06	118.3
	4	11.94	93.8	13.12	103	16.63	130.6
	16	2.492	19.6	2.533	19.9	2.426	19.1

Tableau IV.3 : variation de la Resistance Rsec - % chaux (stabilisation : ciment+ chaux)

a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes

Les graphes suivants montrent l'influence du mode de conservation sur la résistance mécanique des éprouvettes sable-ciment plus chaux à l'état sec, en fixant le pourcentage de ciment à 5%, 10% et 15%.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

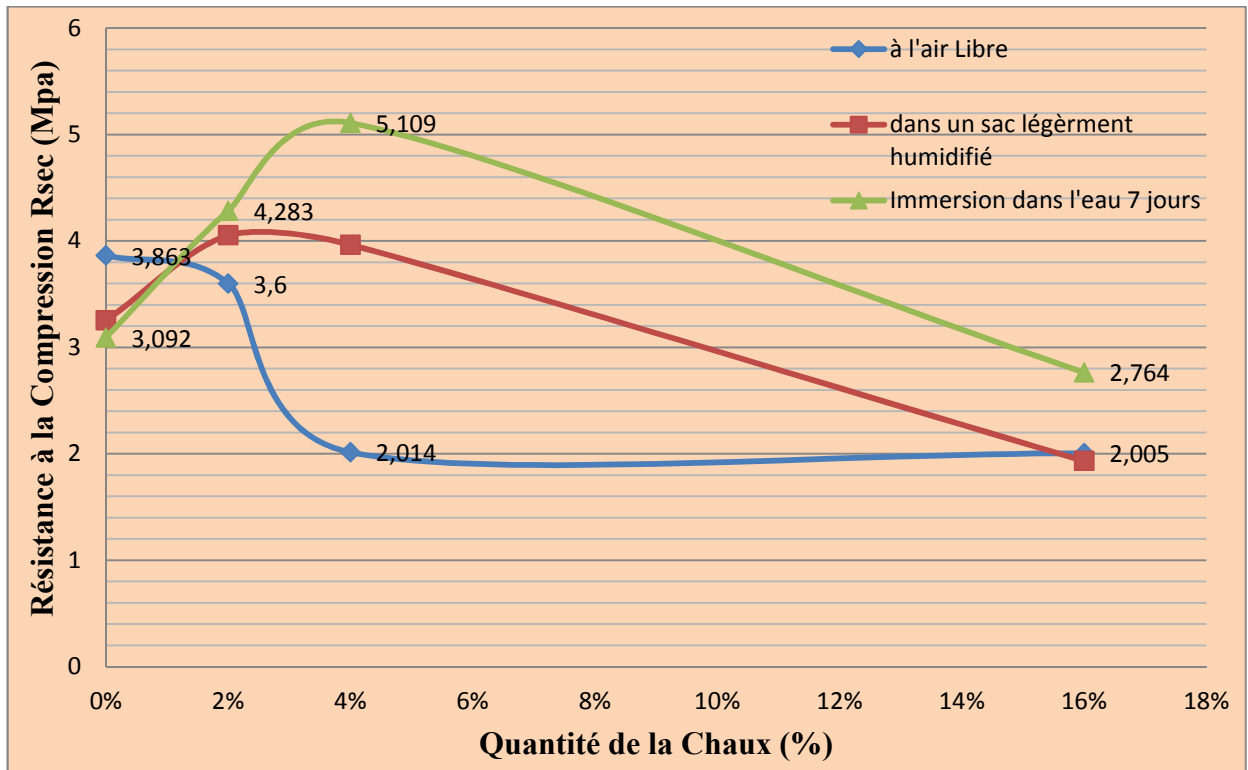


Figure IV.6: Résistance à sec R_{sec} -% chaux (stabilisation : 5 % ciment+chaux)

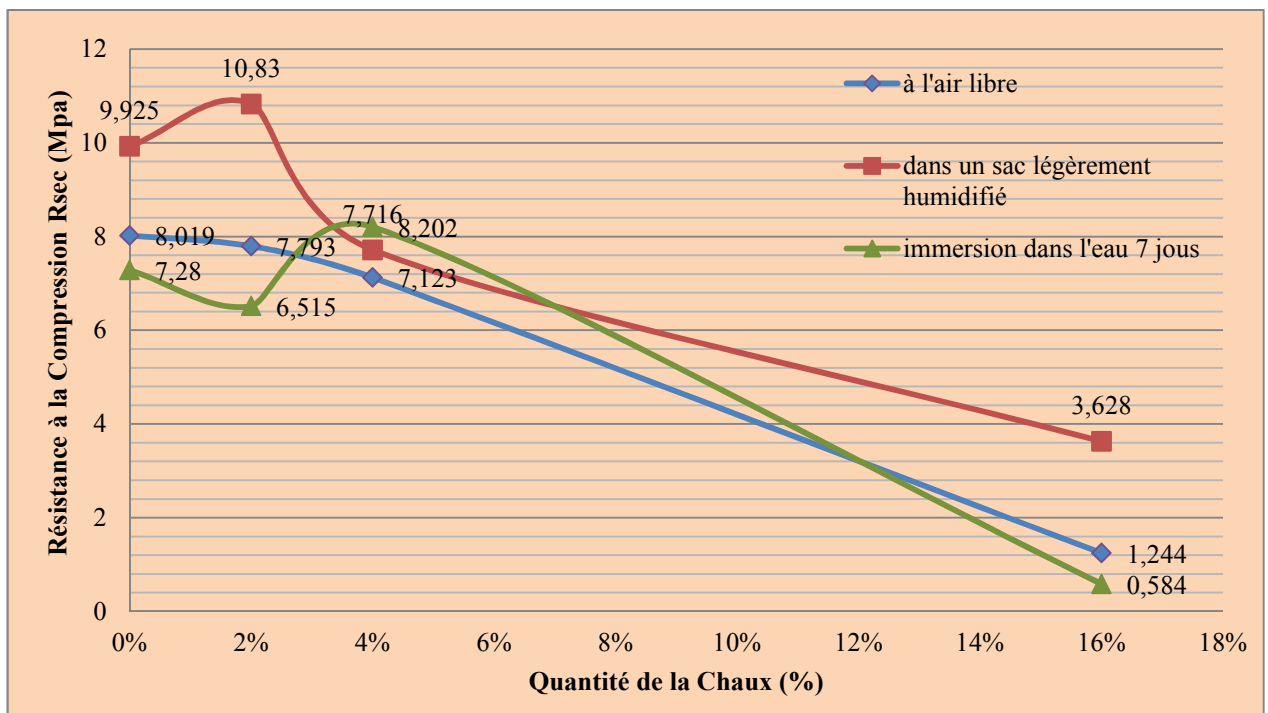


Figure IV.7: Résistance à sec R_{sec} -% chaux (stabilisation : 10 % ciment+chaux)

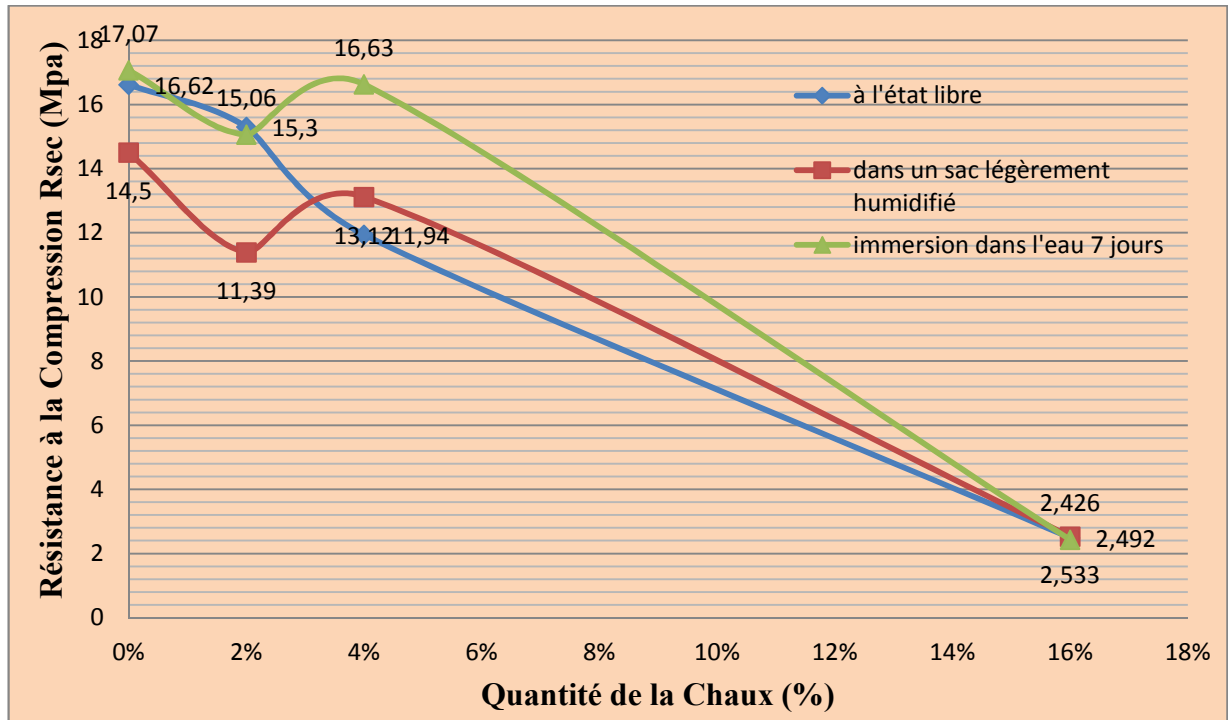


Figure IV.8: Résistance à sec R_{sec} -% chaux (stabilisation : 15 % ciment+chaux)

b- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes

Les graphes suivants montrent l'influence du pourcentage de ciment sur la résistance mécanique des éprouvettes de sable-ciment plus chaux à l'état sec dans chaque mode de conservation : à l'air libre, dans un sac légèrement humidifié et immergé dans l'eau pendant 7 jours.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

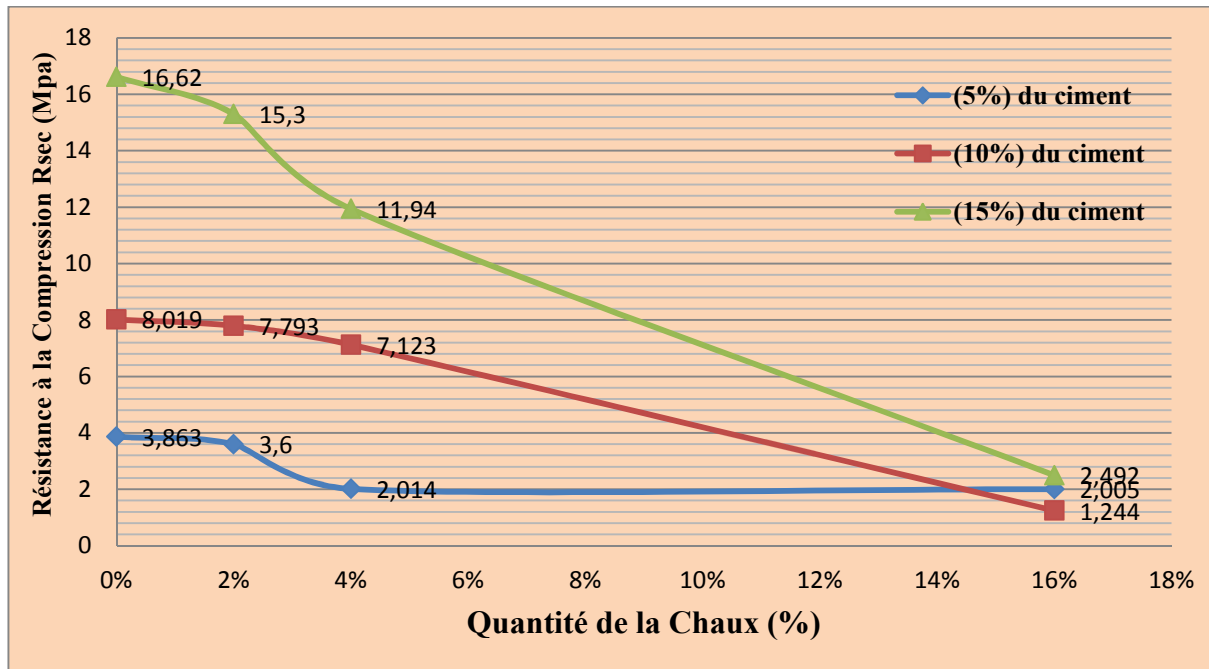


Figure IV.9: stabilisation du sable par ciment-chaux conservé à l'air libre.

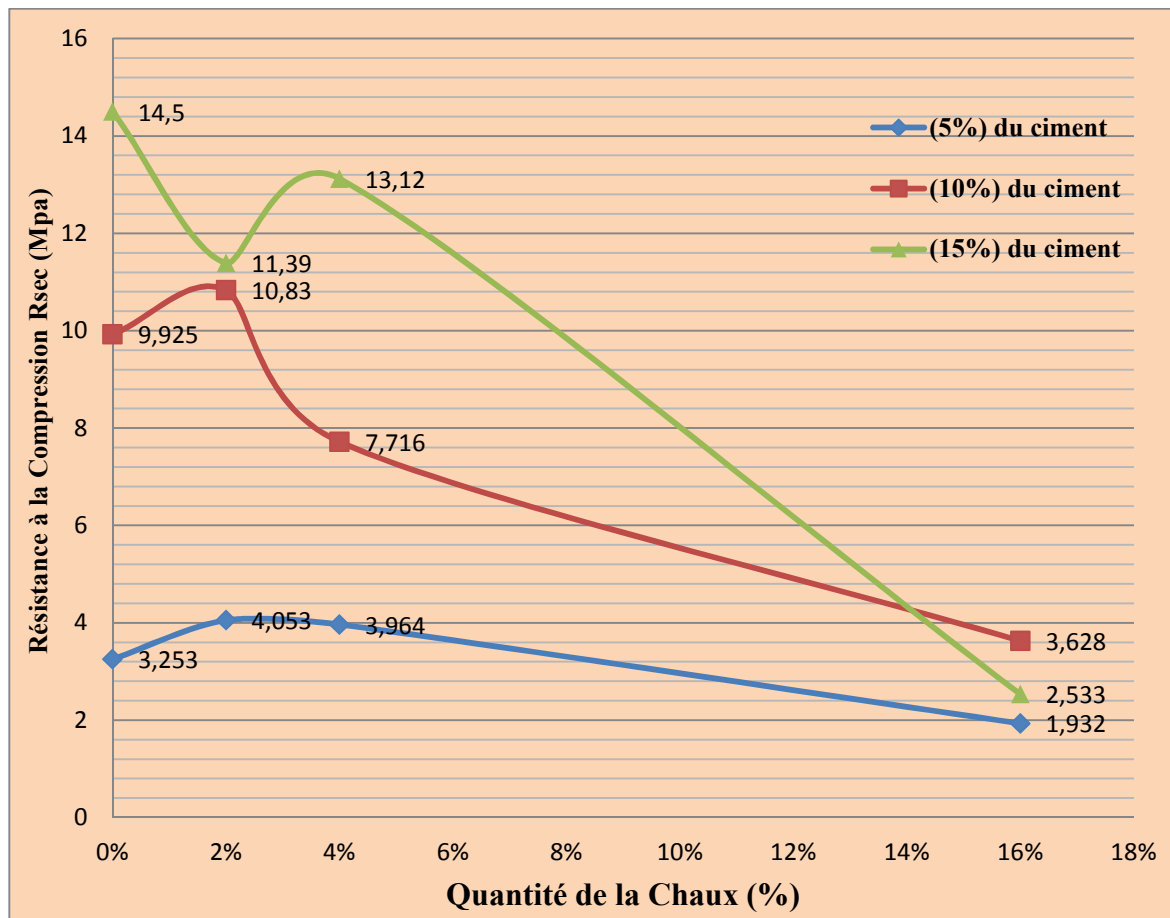


Figure IV.10: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans un sac légèrement humidifié.

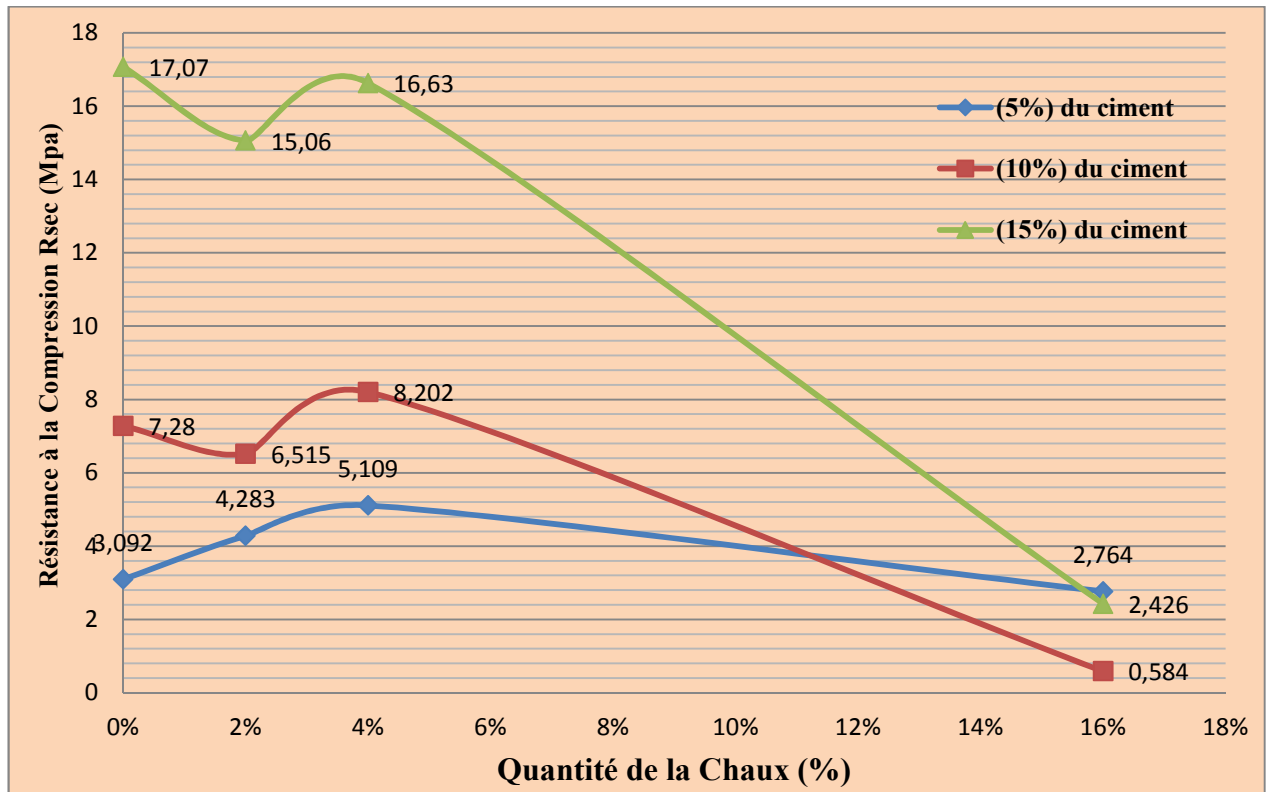


Figure IV.11: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans l'eau 7 jours.

➤ **A l'air libre :**

La résistance (**R_{sec}**) en fonction de la teneur en chaux est une fonction strictement décroissante quelque soit la teneur en ciment donc l'excès de chaux nuit à la résistance à se sec.

Sur les figures **IV.6** et **IV.8** on observe la position basse de la courbe représentant le mode du durcissement des échantillons à l'air libre .Cette position indique les mauvaises performances obtenues par ce type de conservation.

➤ **Conservation dans un sac légèrement humide :**

La résistance à sec diminue avec l'apport en chaux dans ce mode de conservation l'incorporation de la chaux est néfaste au produit sable ciment. Comme le montre ces mêmes figures ni l'ajout de chaux ni le mode de conservation ne peuvent apporter une quelconque amélioration.

➤ **Conservation dans l'eau pendant 7 jours**

A de faibles teneurs en ciment et en chaux, la stabilisation du sable par incorporation (ciment- chaux) donne des résultats très satisfaisants comme le montre la figure **IV.6**.

En effet le sol non stabilisé présente une résistance à sec (R_{sec}) = **3,092Mpa**. Avec l'incorporation de **4%** chaux, la résistance passe à (R_{sec})= **5,109Mpa**. L'ajout de 4% chaux augmente de 1,65 fois la résistance à sec brute (non stabilisée). La courbe (R_{sec}) en fonction de la teneur en chaux se présente en forme de cloche et **4%** semble un optimum de chaux donnant une très bonne résistance

La position haute de la courbe donnant la résistance (R_{sec}) en fonction de la teneur en chaux montre que le matériau stabilisé, conservé dans l'eau, bénéficie des meilleures conditions de cure.

On peut déduire qu'un sable traité au ciment, stabilisé avec un optimum de chaux de **4%** et conservé dans l'eau pendant sa cure donne des résultats très satisfaisants. Le mode de conservation dans l'eau améliore considérablement la résistance (R_{sec}).

Toutes les figures **IV.6**, **IV.7** et **IV.8** montrent la position haute de la courbe de variation de (R_{sec}), représentant le mode de conservation des échantillons dans l'eau pendant **7jours**. Ces courbes indiquent que les meilleurs résultats pour la résistance à sec sont obtenus par le mode de conservation des échantillons dans l'eau et ceci est vrai quelque soit la teneur en ciment et en chaux.

IV.3.2.2– Essai de contrôle sur sable stabilisé au ciment et à la chaux

La résistance à la compression sur des échantillons saturés après immersion dans l'eau pendant 24 h est portée sur le tableau IV.4

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

(%) du ciment	(%) de chaux	Mode de conservation					
		Air libre		Sac légèrement humidifié		Conservation dans l'eau 7j	
		Rsat	Force (KN)	Rsat	Force (KN)	Rsat	Force (KN)
5	0	1.827	14.3	2.615	20.5	2.384	18.7
	2	2.655	20.9	1.984	15.6	3.48	24.2
	4	1.974	15.5	2.198	17.3	2.832	22.2
	16	1.33	10.5	1.263	9.9	1.224	9.6
10	0	5.786	45.4	6.784	53.3	3.42	26.9
	2	5.141	40.4	5.71	44.8	7.195	56.5
	4	4.718	37.1	5.346	42	8.108	63.7
	16	1.0577	8.3	2.142	16.8	0.946	7.4
15	0	10.36	81.4	11.14	87.5	18.76	147.3
	2	7.906	62.1	12.09	95	13.29	104.4
	4	10.67	83.8	7.545	59.3	13.05	102.5
	16	1.435	11.3	1.991	11.7	1.893	14.5

Tableau IV.4 variation de la résistance Rsat - % chaux (stabilisation : ciment+ chaux)

a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes

On présente dans les courbes suivantes l'influence du mode de conservation sur la résistance mécanique des éprouvettes sable-ciment plus chaux à l'état de saturation, en fixant le pourcentage de ciment à 5%, 10% et 15%.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

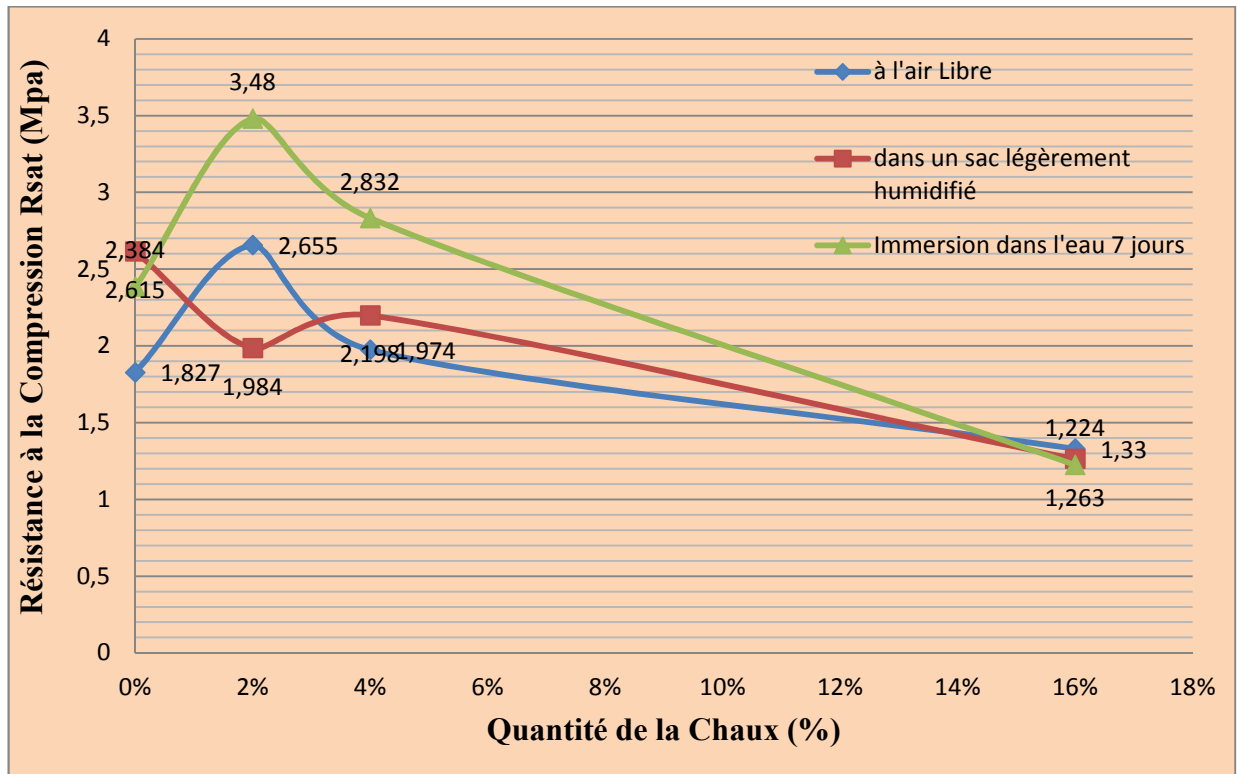


Figure IV.12: résistance Rsat -%chaux (stabilisation : (5% ciment + chaux))

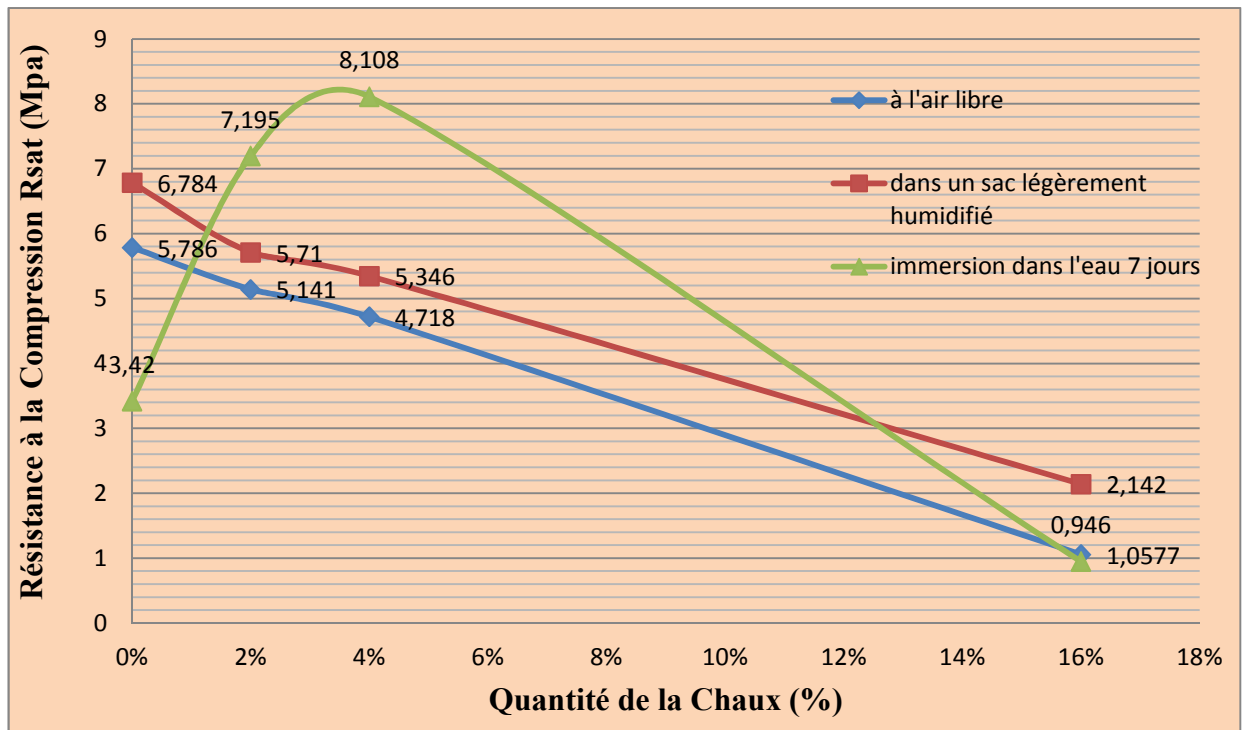


Figure IV.13: résistance Rsat -%chaux (stabilisation : (10% ciment + chaux))

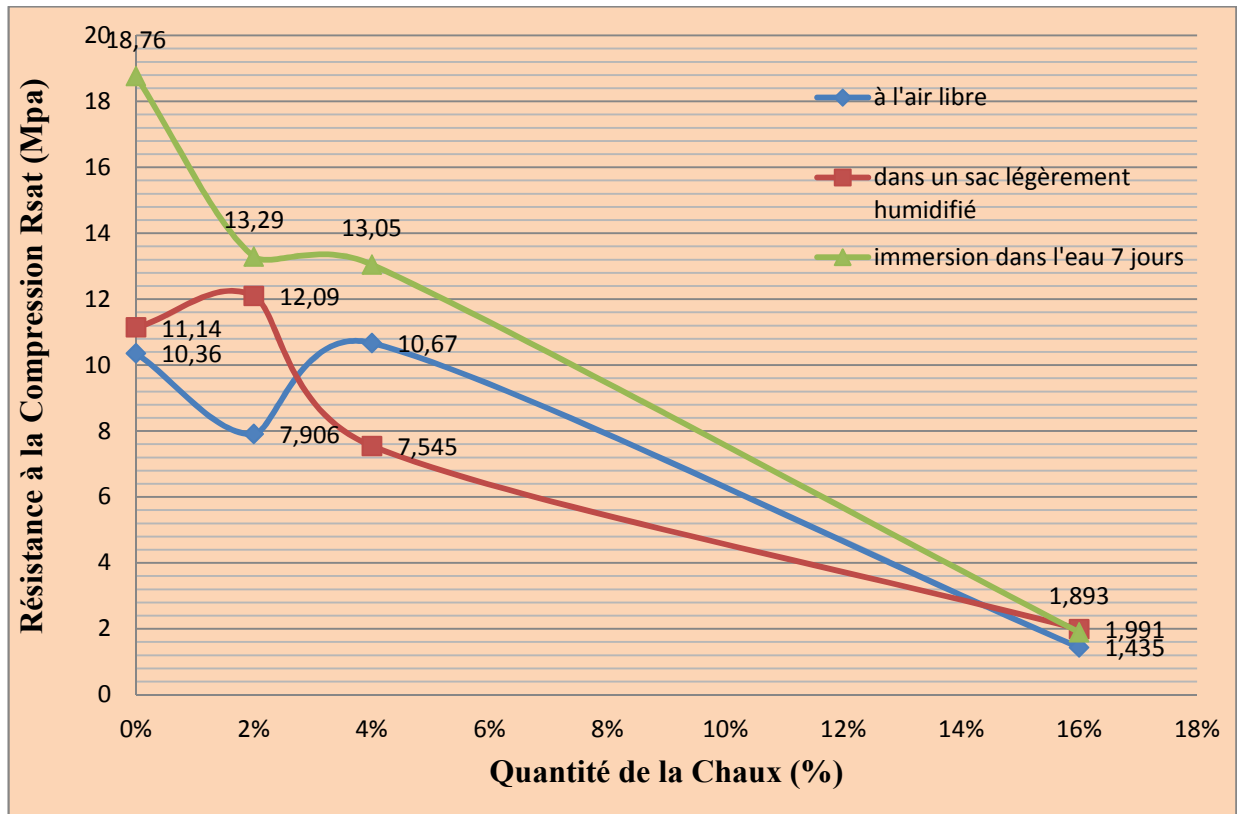


Figure IV.14: résistance R_{sat} -%chaux (stabilisation :(15% ciment + chaux)

b- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes

Les courbes suivantes montrent l'influence du pourcentage de ciment sur la résistance mécanique des éprouvettes de sable-ciment plus chaux à l'état de saturation dans chaque mode de conservation :

à l'air libre, dans un sac légèrement humidifié et immergé dans l'eau pendant 7 jours.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

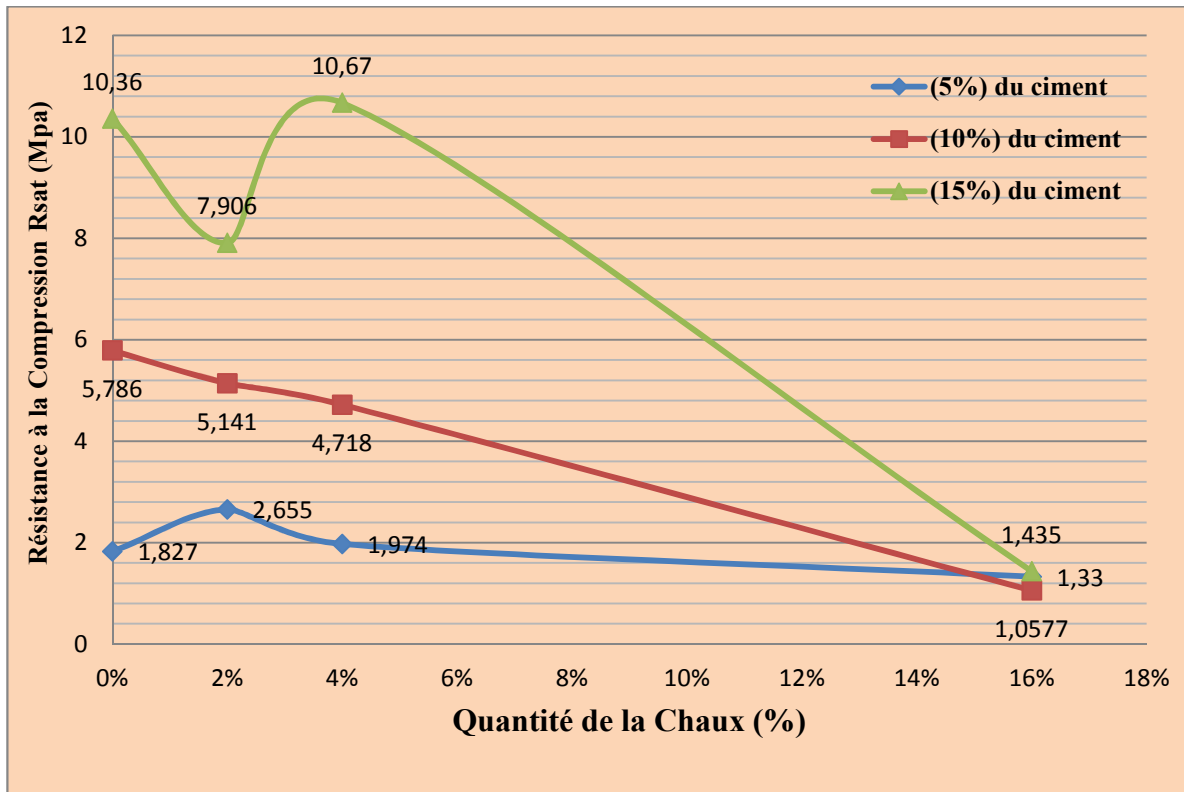


Figure IV.15: stabilisation du sable par ciment-chaux conservé à l'air libre.

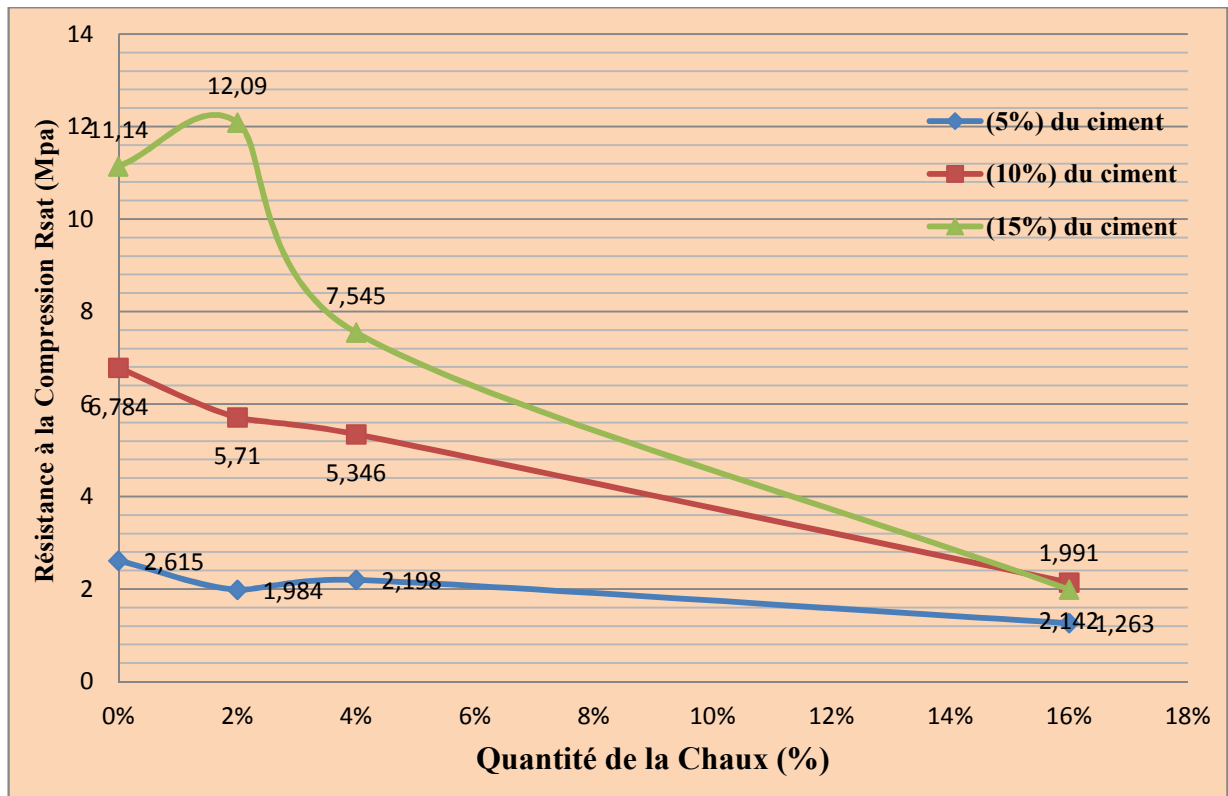


Figure IV.16: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans un sac légèrement humidifié.

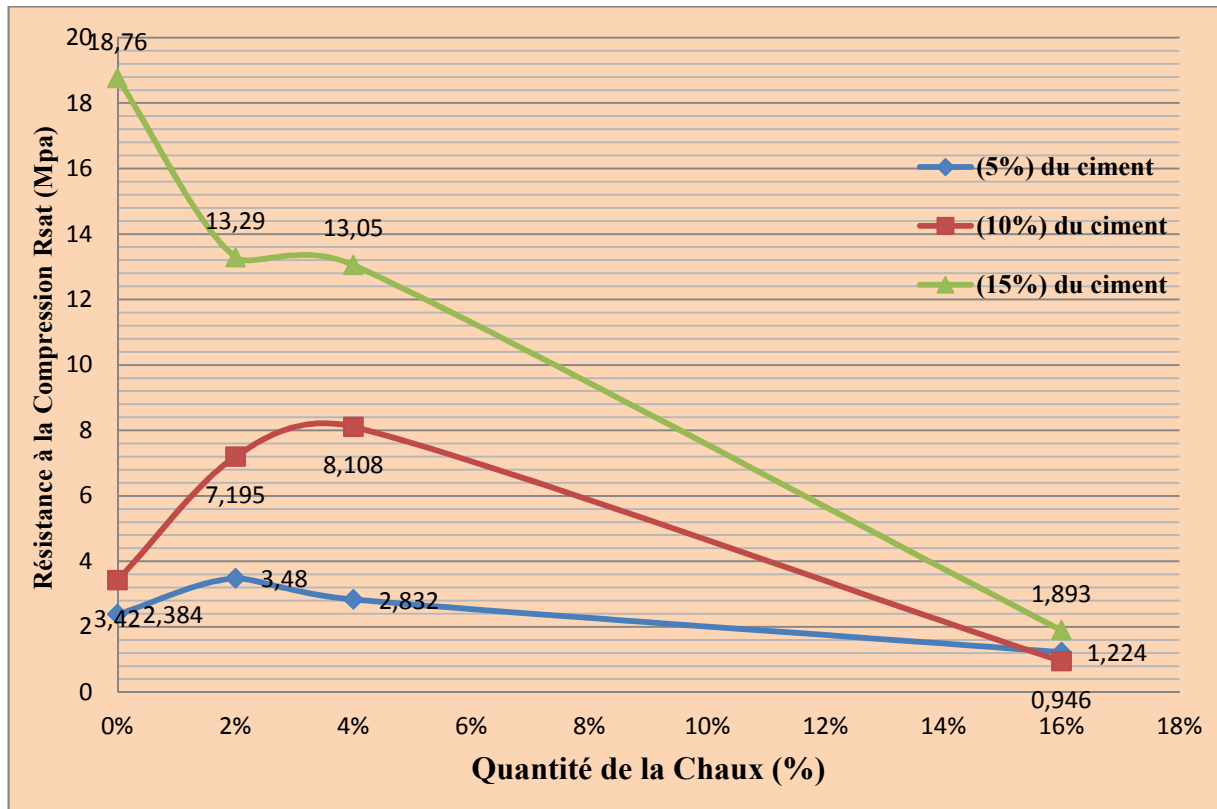


Figure IV.17: stabilisation du sable par le ciment-chaux conservé dans l'eau 7 jours.

La figure IV.12 montre que les courbes, correspondant au mode de conservation à l'air libre ou conservation dans l'eau pendant 7 jours, s'emboîtent l'une sur l'autre, se présentent en forme de cloche et admettent un optimum de chaux de 2%. Cet optimum de chaux élève considérablement la résistance après immersion surtout en mode de conservation des éprouvettes dans l'eau pendant 7 jours. En fortes doses, la chaux influence négativement sur la résistance du matériau traité.

Sur toutes les figures, La courbe du mode de conservation du matériau dans l'eau pendant 7 jours occupe toujours la partie haute de la résistance (R_{sec}) en fonction de la teneur en chaux. Ce mode de cure donne d'excellents résultats pour la résistance à sec et après immersion.

Les différents modes de conservation du matériau indiquent la façon dont est pratiquée la cure du sable- ciment. Les figures (IV.12) (IV.13) (IV.14) montrent que les conditions de cure ont une grande influence sur la résistance à l'immersion car la conservation dans l'eau

du matériau stabilisé permet de maintenir humide le matériau stabilisé pendant les premiers jours de cure.

IV.3.3– traitement du sable par le ciment et l’argile pour les 3 modes de conservation

Dans ces essais nous avons stabilisé le sable avec les mêmes teneurs en ciment et nous avons stabilisé le produit sable -ciment par de l’argile. Les teneurs essayées sont les suivantes : 2 - 4 et 16%

IV.3.3.1–Evolution de la résistance à l’état sec Rsec en fonction de la teneur en argile (stabilisation : ciment+argile)

(% du ciment	(% d’argile	Mode de conservation					
		Air libre		Sac légèrement humidifié		Conservation dans l’eau 7j	
		R sec Mpa	Force (KN)	R sec Mp	Force (KN)	R sec Mp	Force (KN)
5	0	3.863	30.3	3.253	25	3.092	24.3
	2	3.305	26	3.816	30	3.731	29.3
	4	2.764	21.7	4.25	33.4	3.628	28.5
	16	2.468	19.4	2.11	16.6	5.558	43.7
10	0	8.019	63	9.925	78	7.28	57.2
	2	7.307	57.4	5.536	43.5	9.334	73.3
	4	8.195	64.4	6.098	47.9	9.655	75.8
	16	5.636	44.3	5.969	46.9	7.46	58.6
15	0	16.62	130.6	14.5	113.9	17.07	134.1
	2	14.45	113.5	11.12	87.3	11.78	92.5
	4	9.569	75.2	6.593	51.8	17.89	140.05
	16	2.389	18.8	12.4	97.4	12.12	95.2

Tableau IV.5 variation de la résistance Rsec - % argile (stabilisation ciment + argile)

a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes

Les graphes suivants montrent l'influence du mode de conservation sur la résistance mécanique des éprouvettes sable-ciment plus argile à l'état sec, en fixant le pourcentage de ciment à 5%, 10% et 15%.

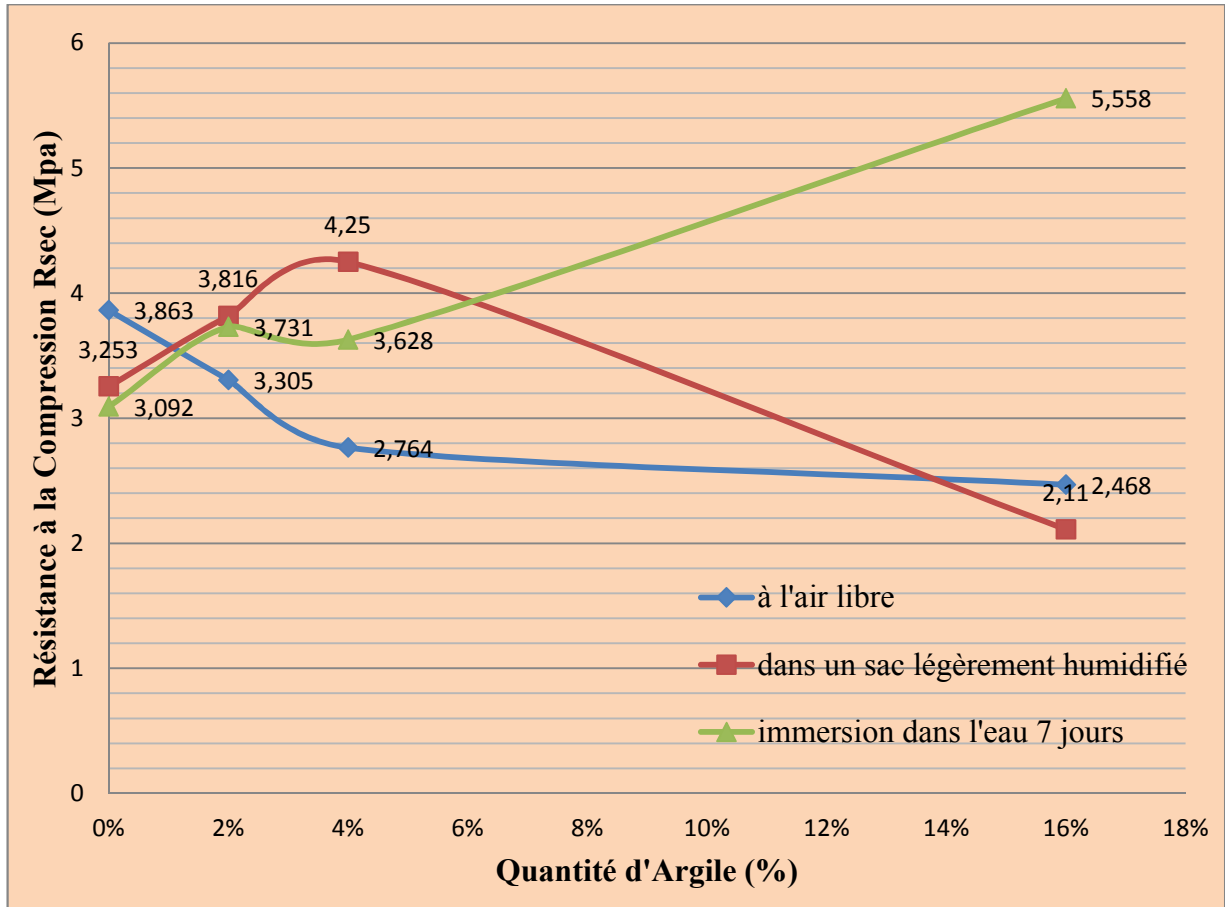


Figure IV.18: résistance à sec (Rsec) - %argile (stabilisation : 5%ciment+argile).

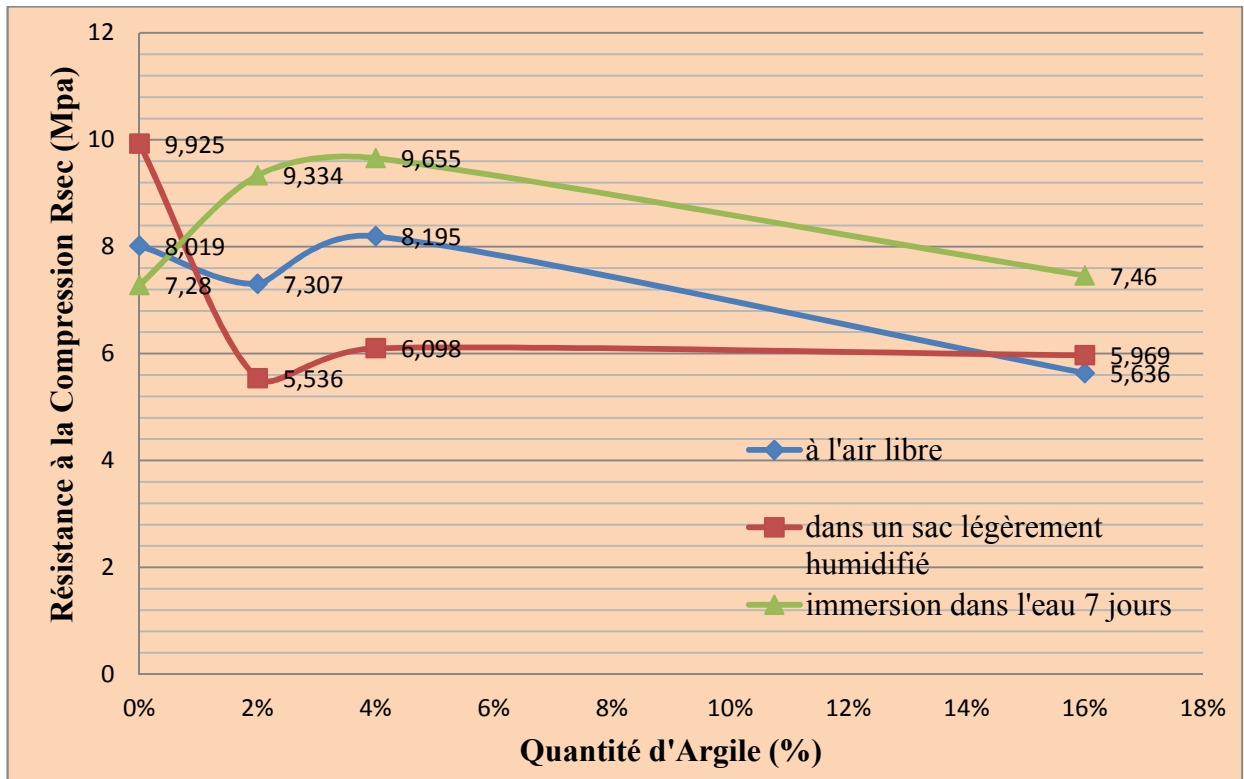


Figure IV.19: résistance à sec (Rsec) - %argile (stabilisation : 10%ciment+argile).

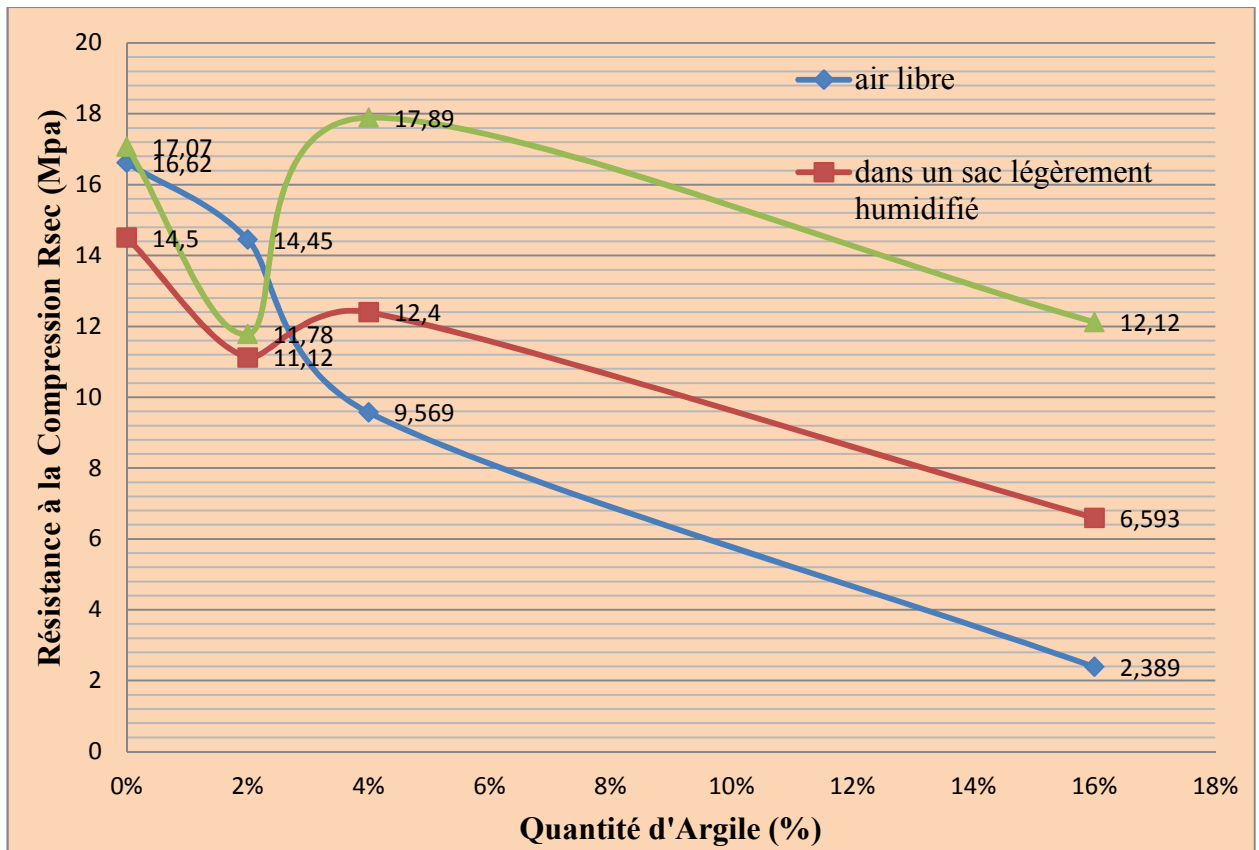


Figure IV.20: résistance à sec (Rsec) - %argile (stabilisation : 15%ciment+argile).

b- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes

Les graphes suivants montrent l'influence du pourcentage de ciment sur la résistance mécanique des éprouvettes de sable-ciment plus argile à l'état sec dans chaque mode de conservation : à l'air libre, dans un sac légèrement humidifié et immergé dans l'eau pendant 7 jours.

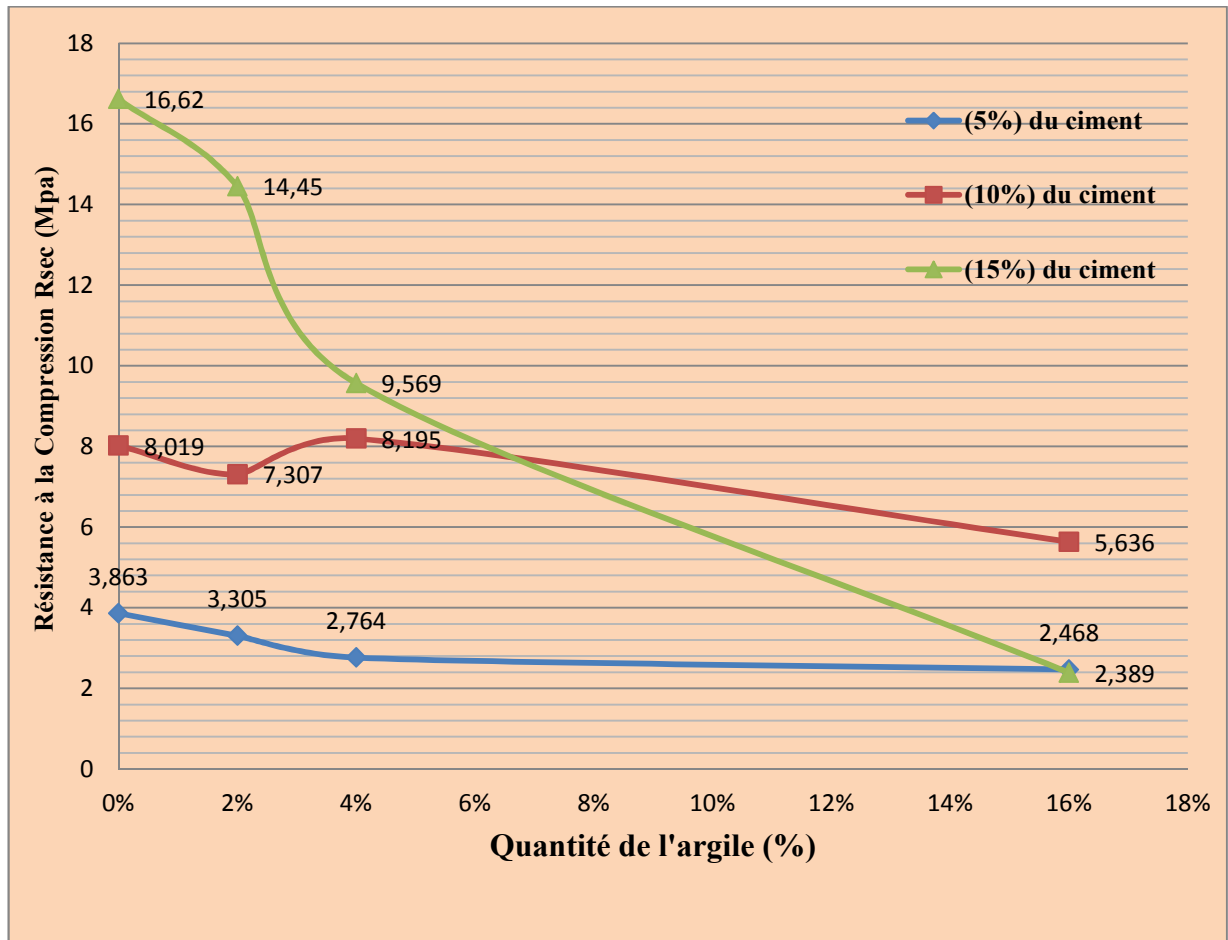


Figure IV.21: stabilisation du sable par ciment-argile conservé à l'air libre.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argle

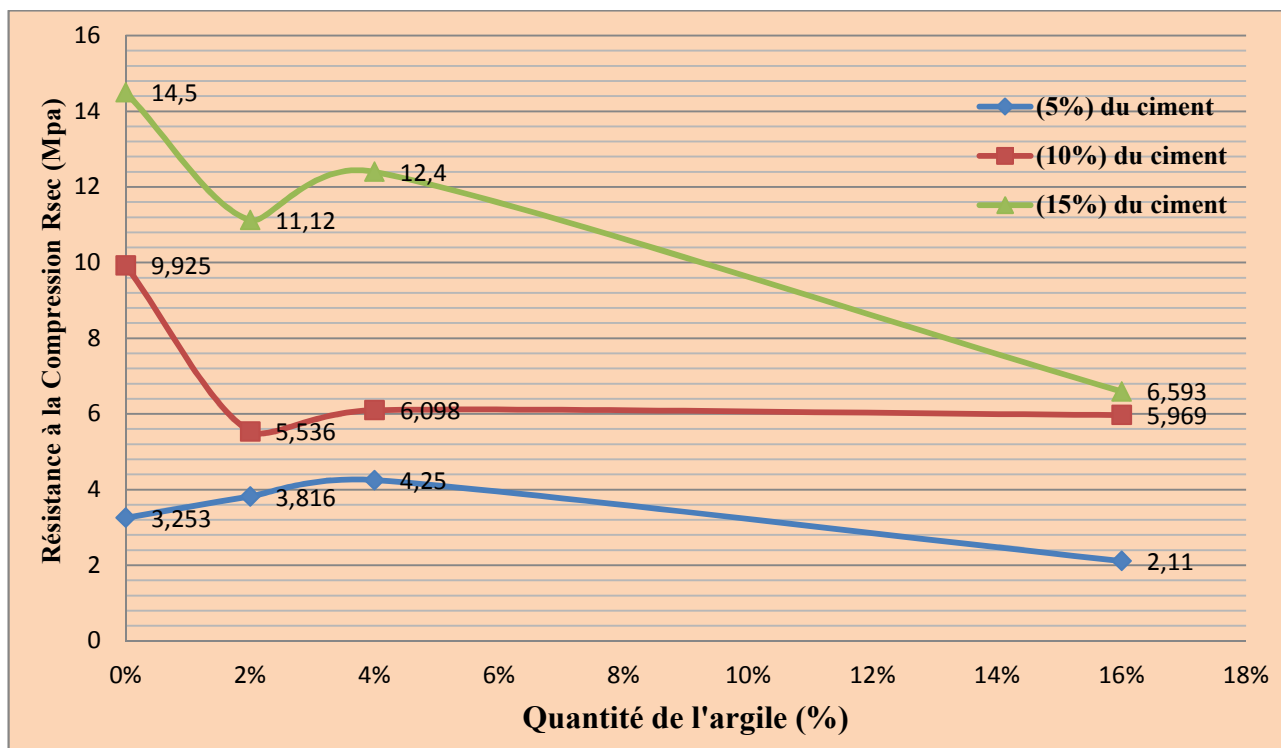


Figure IV.22: stabilisation du sable par ciment-argile conservé dans un sac légèrement humidifié.

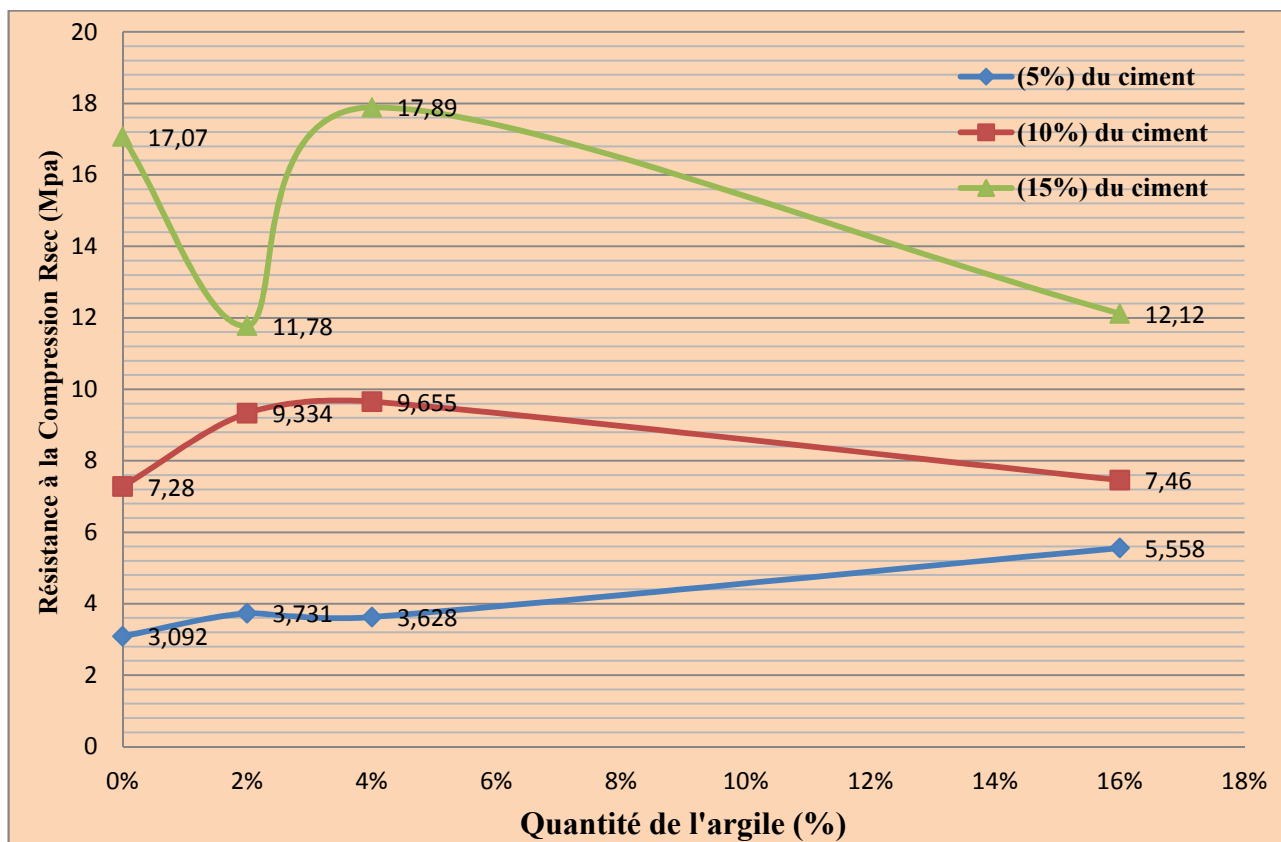


Figure IV.23: stabilisation du sable par le ciment-argile conservé dans l'eau 7 jours.

A l'air libre l'argile influence négativement sur la résistance mécanique à sec du sable traité par **5%** et **15%** de ciment : la résistance à l'écrasement à sec diminue en augmentant la teneur en argile. Comme le montre les figure (*IV.18*) et (*IV. 20*).

L'ajout de **4%** d'argile à l'éprouvette sable-ciment influence positivement sur la résistance mécanique à sec Dans les deux autres cas de conservation (dans un sac humide et immergé dans l'eau 7 jours), et aussi dans le cas de conservation à l'air libre avec **10%** du ciment. Comme le montre les figures (*IV.19*) (*IV.22*) (*IV.23*) (*IV.22*)

IV.3.3. 2– Essai de contrôle sur sable stabilisé au ciment et à l'argile

Les résultats de la stabilisation du sable à l'état saturé par immersion pendant 24 h par le ciment Portland et l'argile sont mentionnés dans les tableaux suivants:

(% du ciment	(% d'argile	Mode de conservation					
		Air libre		Sac légèrement humidifié		Conservation dans l'eau 7j	
		Rsat	Force (KN)	Rsat	Force (KN)	Rsat	Force (KN)
5	0	1.827	14.3	2.615	20.5	2.384	18.7
	2	2.191	20.9	2.056	15.6	3.506	24.2
	4	2.856	15.5	2.344	17.3	2.834	22.2
	16	1.585	10.5	1.741	9.9	3.06	9.6
10	0	5.786	45.4	6.784	53.3	3.42	26.9
	2	5.812	40.4	6.052	44.8	6.512	56.5
	4	7.033	37.1	3.834	42	5.697	63.7
	16	2.561	8.3	2.976	16.8	4.789	7.4
15	0	10.36	81.4	11.14	87.5	18.76	147.3
	2	9.164	62.1	7.791	95	9.629	104.4
	4	5.895	83.8	11.45	59.3	13.14	102.5
	16	3.226	11.3	5.62	11.7	4.896	14.5

Tableau IV.6 variation de la résistance Rsat -% argile (stabilisation ciment+argile)

a- Influence du mode de conservation sur la résistance des éprouvettes

On présente dans les courbes suivantes l'influence du mode de conservation sur la résistance mécanique des éprouvettes sable-ciment plus argile à l'état de saturation, en fixant le pourcentage de ciment à 5%, 10% et 15%.

CHAPITRE IV : Stabilisation du Sable par le Ciment-Chaux et le Ciment-Argile

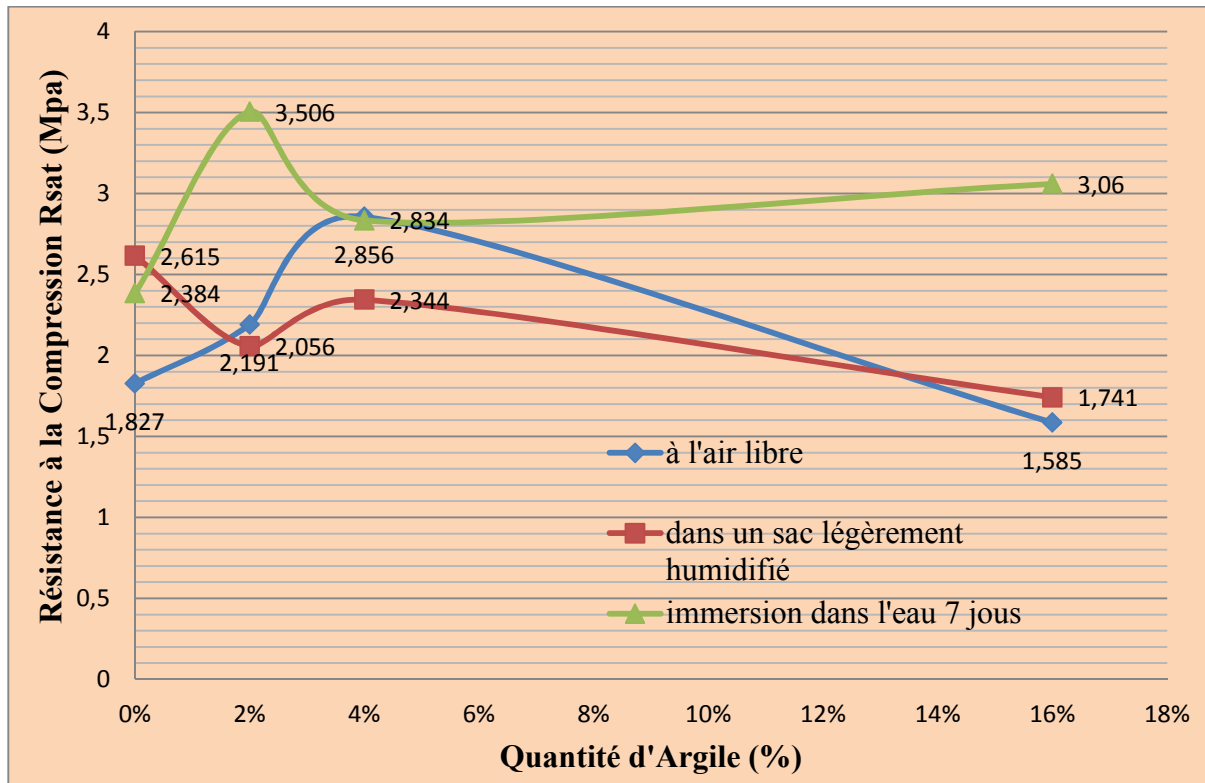


Figure IV.24: Résistance Rsat - %argile (stabilisation : 5%ciment + argile)

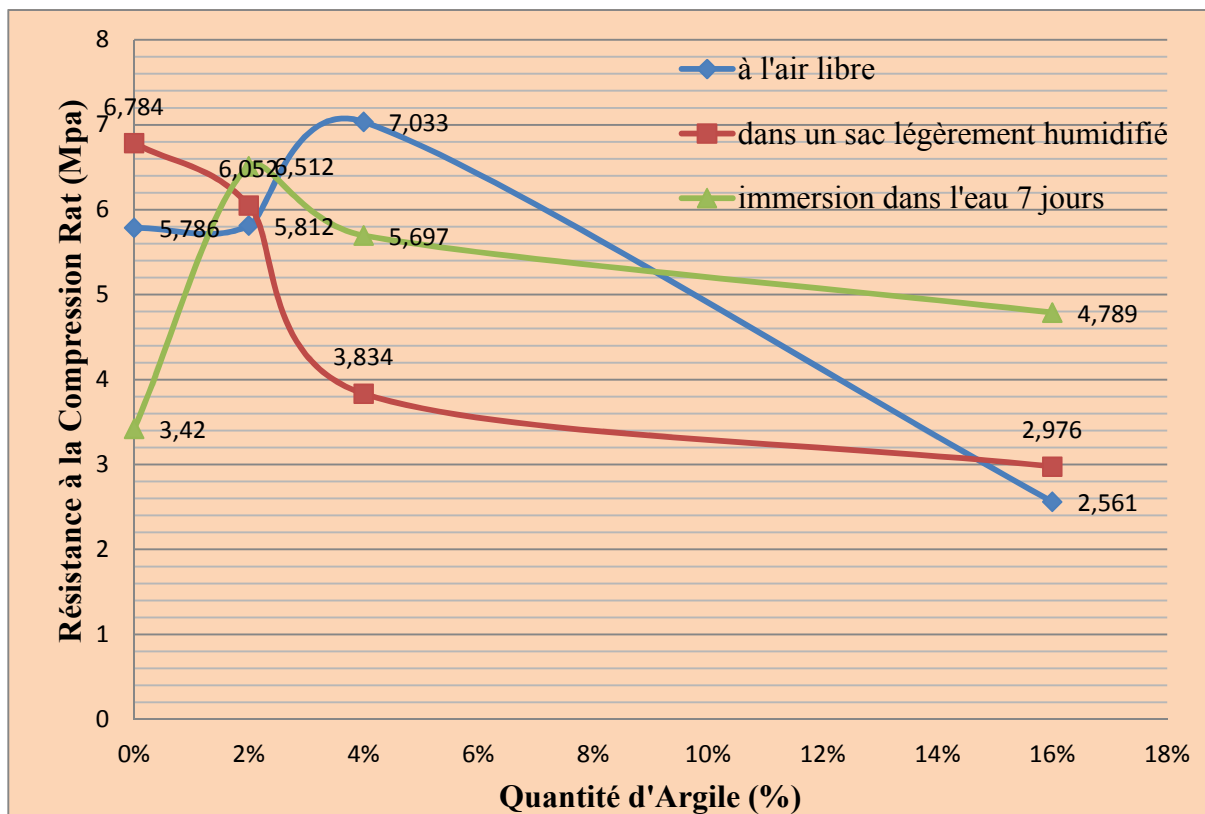


Figure IV.25: Résistance Rsat - %argile (stabilisation : 10%ciment + argile)

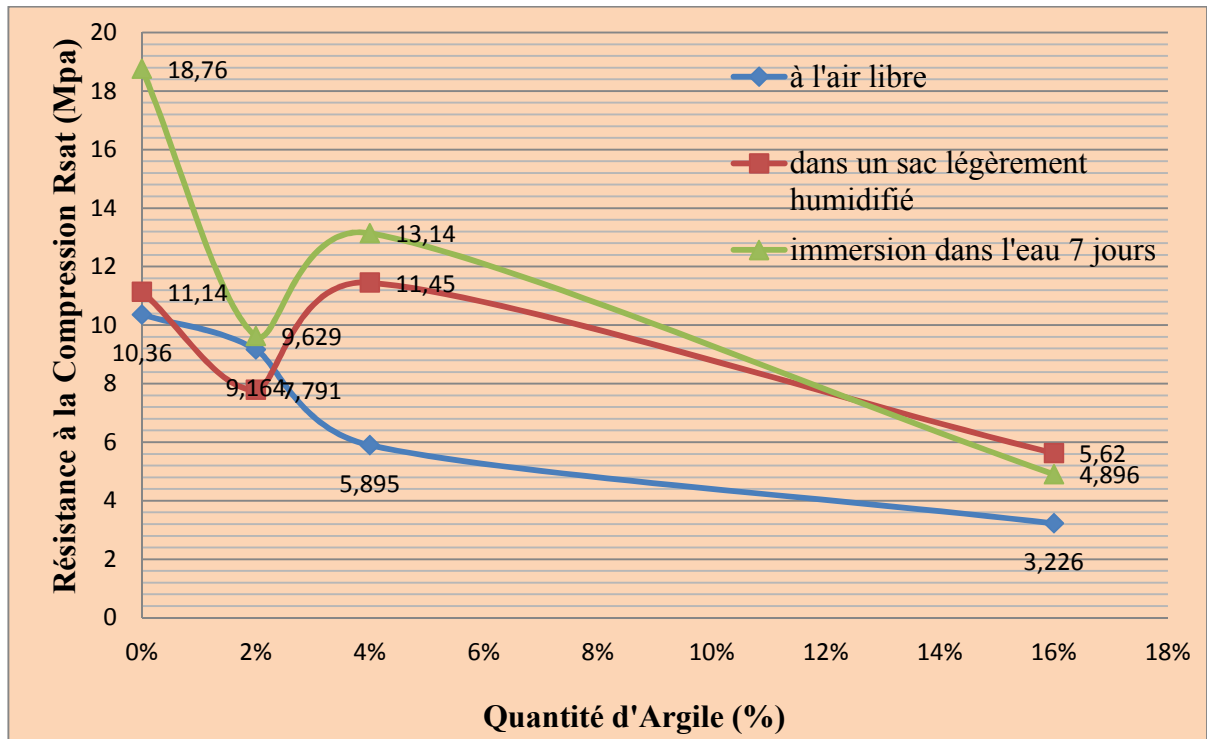


Figure IV.26: Résistance R_{sat} - %argile (stabilisation : 15%ciment +argile)

a- Influence du pourcentage de ciment sur la résistance des éprouvettes

Les courbes suivantes montrent l'influence du pourcentage de ciment sur la résistance mécanique des éprouvettes de sable-ciment plus argile à l'état de saturation dans chaque mode de conservation :

à l'air libre, dans un sac légèrement humidifié et immergé dans l'eau pendant 7 jours.

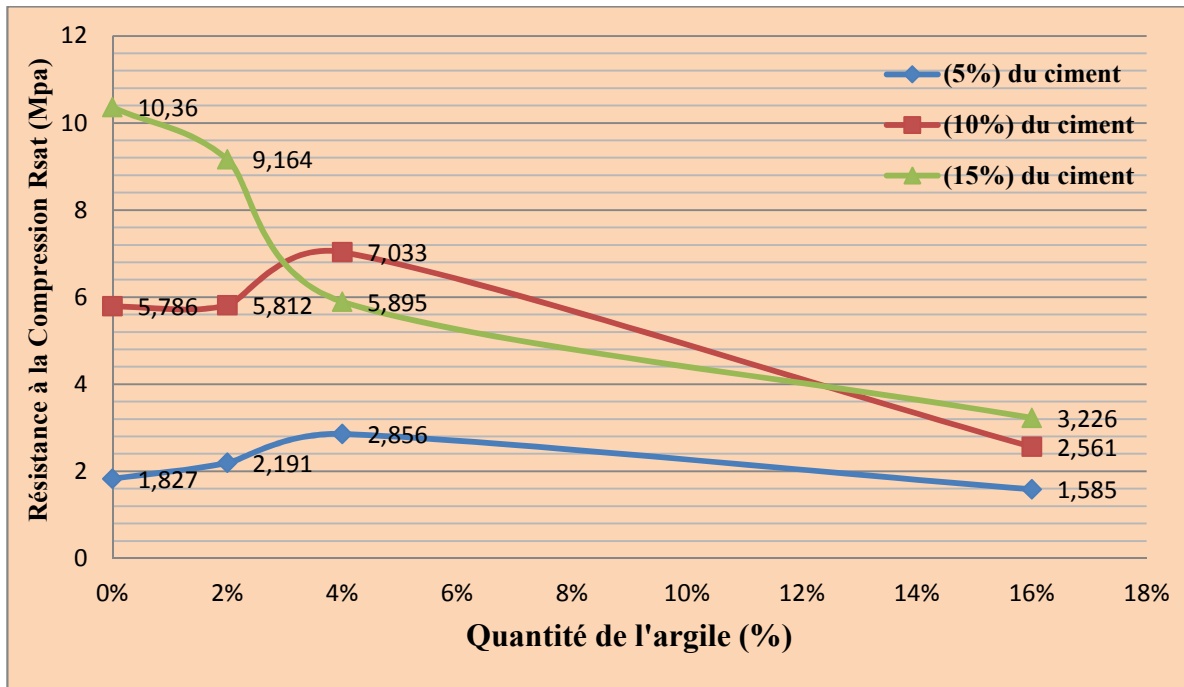


Figure IV.27: résistance mécanique d'éprouvette de sable (Conservation à l'air libre).

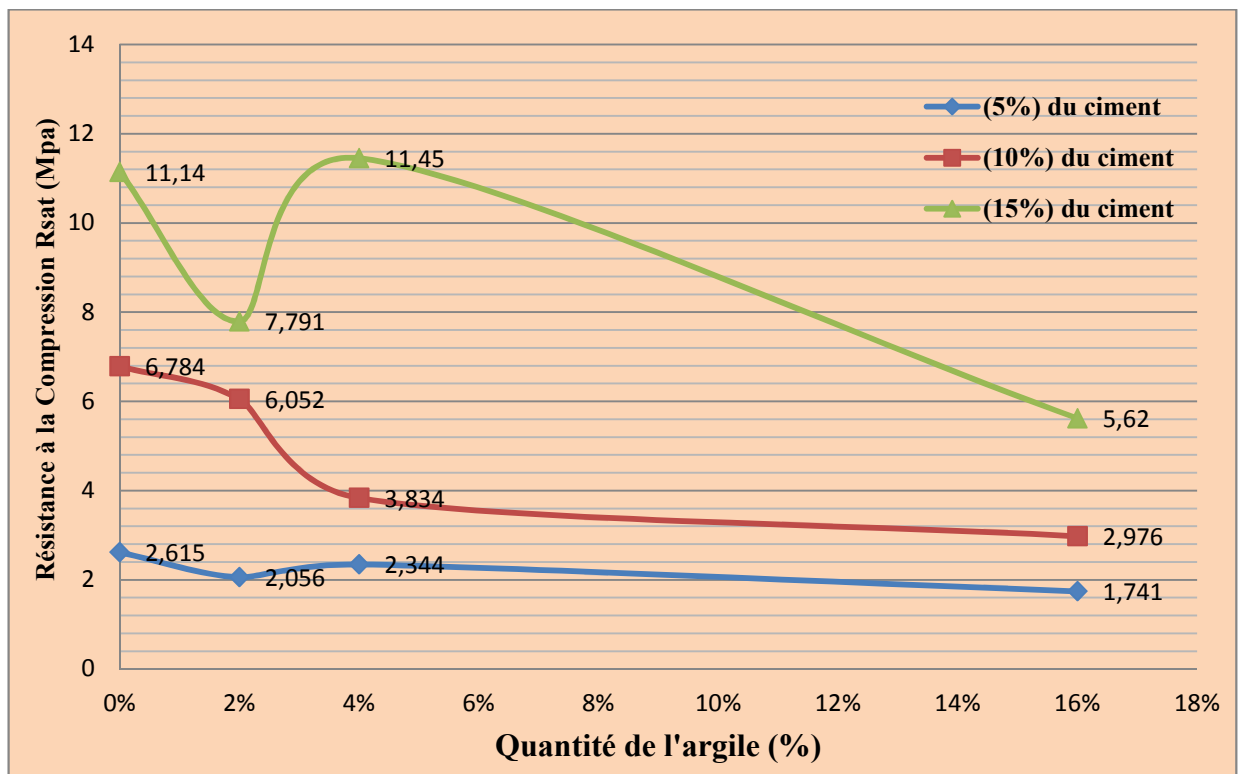


Figure IV.28: résistance mécanique d'éprouvette de sable

(Dans un sac légèrement humidifié)

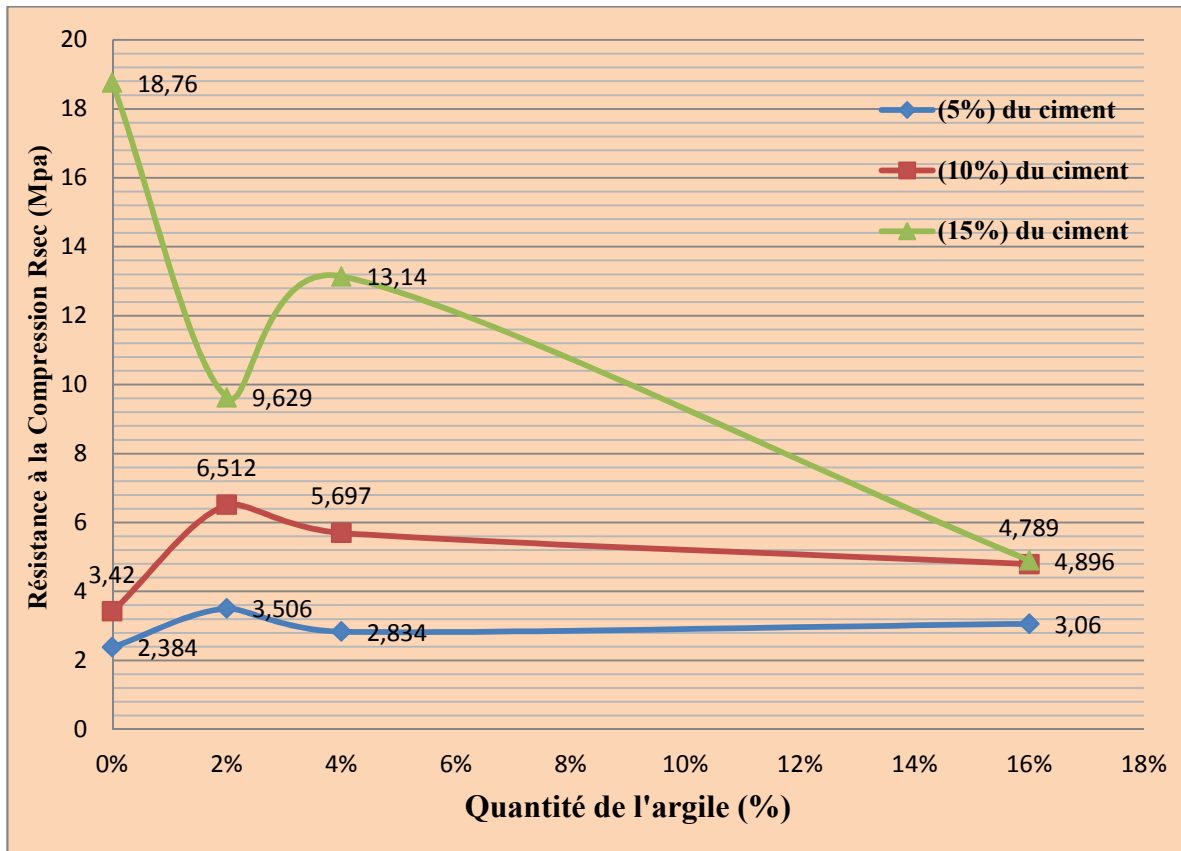


Figure IV.29: résistance mécanique d'éprouvette de sable (conservation dans l'eau 7 jours).

Dans les deux autres modes de conservation (légèrement humidifié et immergé dans l'eau 7 jours), la résistance à la compression de l'éprouvette augmente en fonction du dosage du ciment, du dosage d'argile. Le dosage idéal de la matrice ciment-argile pour la stabilisation du sable, est celui qui donne la plus grande résistance mécanique de l'éprouvette (sable-ciment-argile).

IV.3.4- Conclusion

Le ciment est un stabilisant de sol très efficace et donne d'excellents résultats. Ce liant ciment est un stabilisant remarquable qui est d'un grand intérêt dans les problèmes de la stabilisation : à l'état sec et à la tenue à l'eau.

Ces essais montrent que la façon dont est pratiquée la cure du sol ciment-chaux et ciment-argile ont une grande influence sur la résistance à l'état sec et à l'action de l'eau. Comme pour le béton,

La résistance du produit stabilisé augmente avec l'âge. Pendant les premiers jours de cure, le maintien de l'humidité du matériau est une condition déterminante pour une amélioration conséquente du comportement du matériau à l'état sec et saturé. Le mode de conservation dans l'eau du matériau peut assurer cette condition.

IV.4- Coefficient de ramollissement (A. Komar)

Le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau (après immersion pendant 24h) R_{sat} à la résistance à la compression du matériau à sec R_{sec} s'appelle coefficient de ramollissement

$K_{ram} = R_{sat}/R_{sec}$

Ce coefficient caractérise la résistance à l'eau des matériaux. Pour les uns, se détrempant facilement (argile), il est égal à 0, pour les autres (métaux, verres) dont la résistance à l'action de l'eau est stable, le coefficient de ramollissement est égal ou supérieur à 1. Les matériaux dont le coefficient de ramollissement est supérieur à 0,8 sont considérés comme résistant à l'eau. Il est interdit d'utiliser les matériaux au coefficient de ramollissement inférieur à 0,8 comme matériau de construction dans les régions, où l'humidité est un facteur constant.

IV.4.1 - Evaluation du coefficient de ramollissement du sable traité par le ciment

IV.4.1.2 - Sable traité par le ciment seul

(%) du ciment	Mode de conservation								
	Air libre			Sec légèrement humidifié			Conservation dans l'eau 7jours		
	Rsec	Rsat	Kram	Rsec	Rsat	Kram	Rsec	Rsat	Kram
5%	3.863	1.827	0.47	3.253	2.615	0.80	3.092	2.384	0.77
10%	8.019	5.786	0.72	9.925	6.784	0.68	7.28	3.42	0.47
15%	16.62	10.36	0.62	14.5	11.14	0.77	17.07	18.76	1.10

Tableau IV.7 : Evaluation du coefficient de ramollissement du sable traité par le ciment

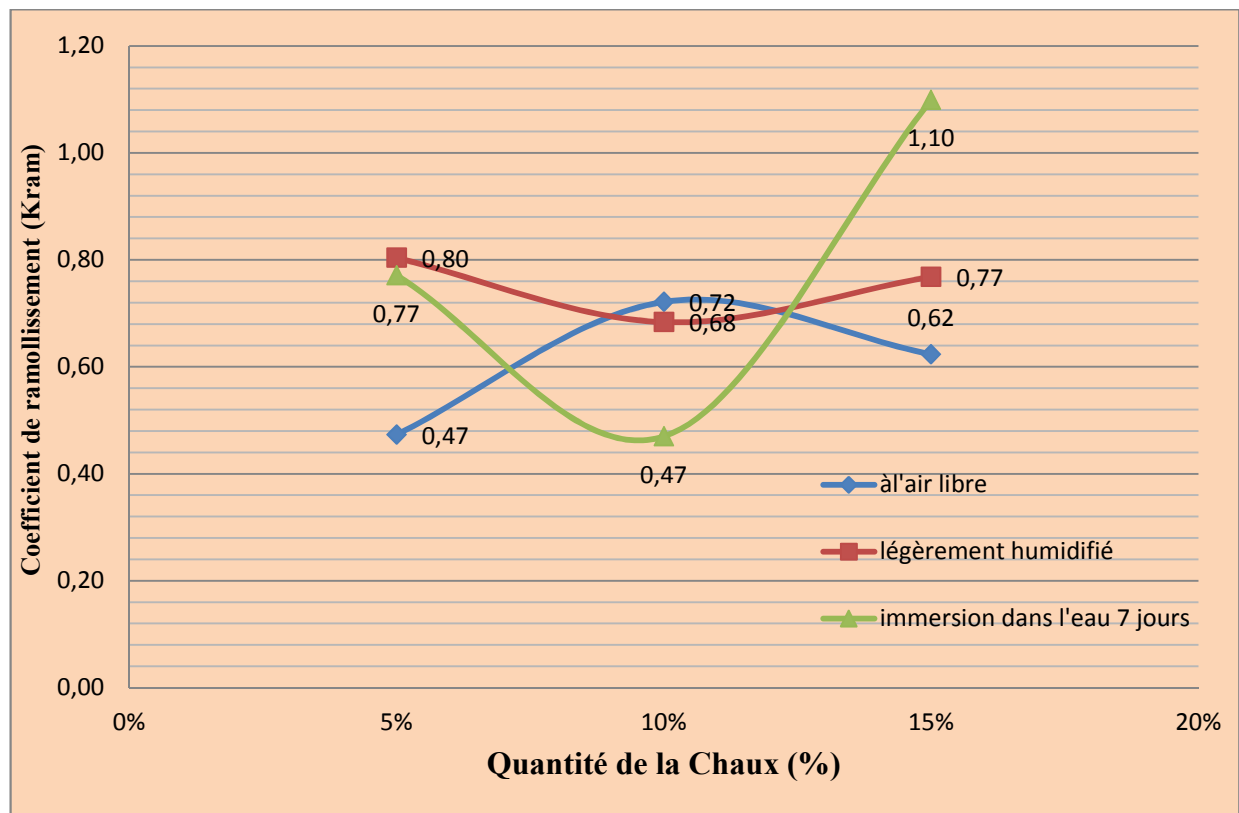


Figure IV.30 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment

IV.4.1.2 - Sable traité par le ciment et la chaux

(% du ciment)	(% de chaux)	Mode de conservation								
		Air libre			Sec légèrement humidifié			Conservation dans l'eau 7jours		
		Rsec	Rsat	Kram	Rsec	Rsat	Kram	Rsec	Rsat	Kram
5	0	3.863	1.827	0.47	3.253	2.615	0.80	3.092	2.384	0.77
	2	3.6	2.655	0.74	4.053	1.984	0.49	4.283	3.48	0.81
	4	2.014	1.974	0.98	3.964	2.198	0.55	5.109	2.832	0.55
	16	2.005	1.33	0.66	1.932	1.263	0.65	2.764	1.224	0.44
10	0	8.019	5.786	0.72	9.925	6.784	0.68	7.28	3.42	0.47
	2	7.793	5.141	0.66	10.83	5.71	0.53	6.515	7.195	1.10
	4	7.123	4.718	0.66	7.716	5.346	0.69	8.202	8.108	0.99
	16	1.244	1.0577	0.85	3.628	2.142	0.59	0.584	0.946	1.62
15	0	16.62	10.36	0.62	14.5	11.14	0.77	17.07	18.76	1.10
	2	15.3	7.906	0.52	11.39	12.09	1.06	15.06	13.29	0.88
	4	11.94	10.67	0.89	13.12	7.545	0.58	16.63	13.05	0.78
	16	2.492	1.435	0.58	2.533	1.991	0.79	2.426	1.893	0.78

Tableau IV.8 : Evolution du coefficient de ramollissement en fonction du pourcentage de chaux pour différentes teneurs en ciment et modes de conservation.

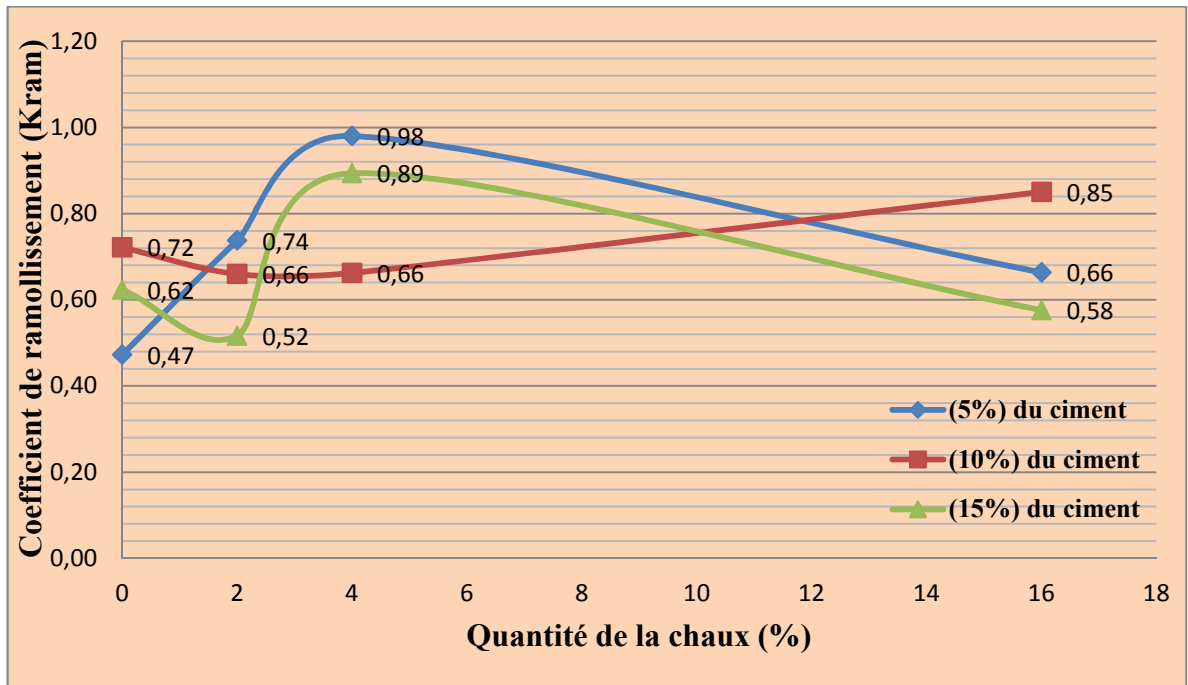


Figure IV.31 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et chaux (à l'air libre)

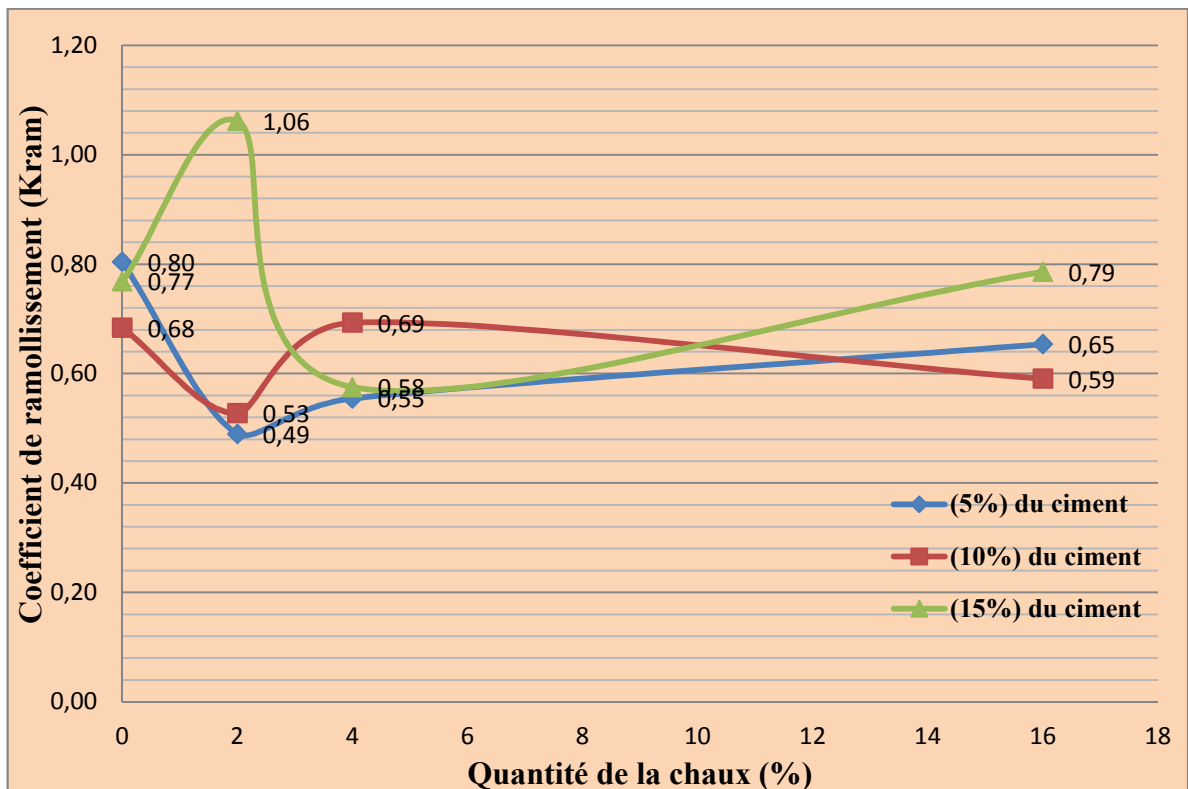


Figure IV.32 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et chaux (dans un sac légèrement humidifié)

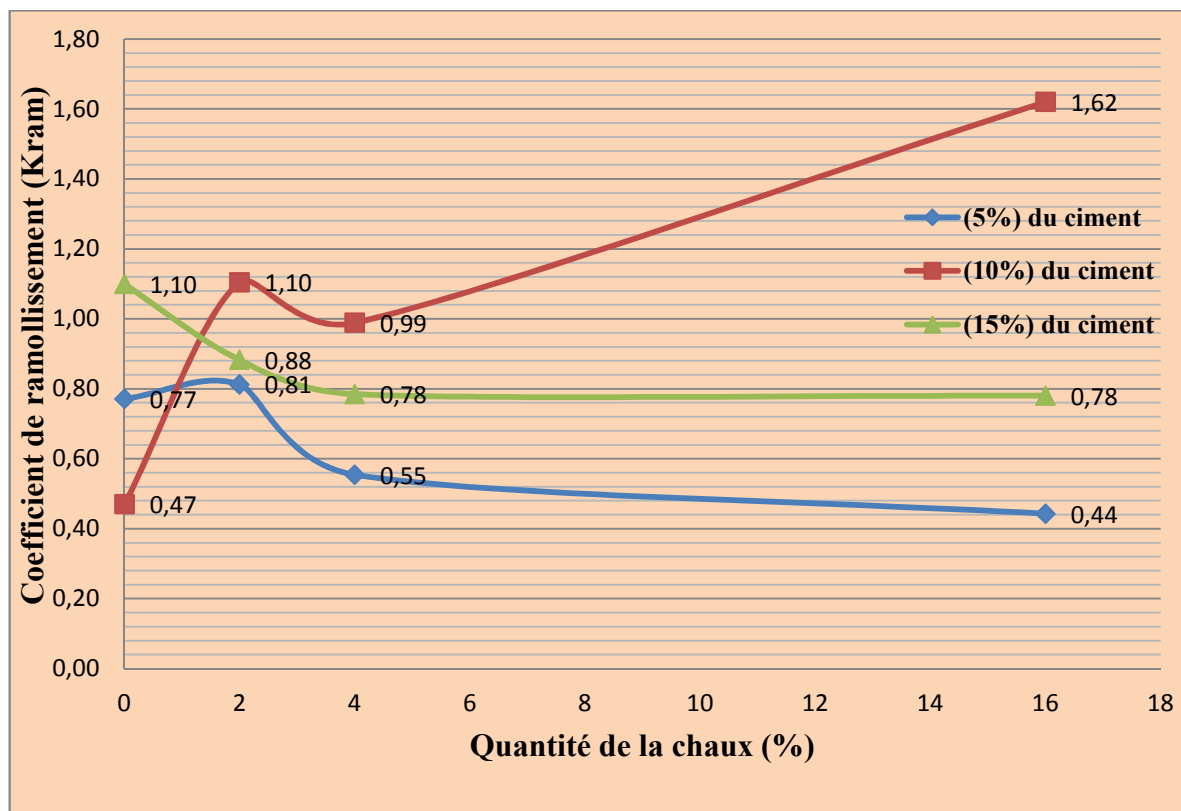


Figure IV.33 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et chaux (conservation dans l'eau 7 jours)

IV.4.1.3 - Sable traité par le ciment et l'argile

(% du ciment)	(% d'argile)	Mode de conservation								
		Air libre			Sec légèrement humidifié			Conservation dans l'eau 7jours		
		Rsec	Rsat	Kram	Rsec	Rsat	Kram	Rsec	Rsat	Kram
5	0	3.863	1.827	0.47	3.253	2.615	0.80	3.092	2.384	0.77
	2	3.305	2.191	0.66	3.816	2.056	0.54	3.731	3.506	0.94
	4	2.764	2.856	1.03	4.25	2.344	0.55	3.628	2.834	0.78
	16	2.468	1.585	0.64	2.11	1.741	0.83	5.558	3.06	0.55
10	0	8.019	5.786	0.72	9.925	6.784	0.68	7.28	3.42	0.47
	2	7.307	5.812	0.80	5.536	6.052	1.09	9.334	6.512	0.70
	4	8.195	7.033	0.86	6.098	3.834	0.63	9.655	5.697	0.59
	16	5.636	2.561	0.45	5.969	2.976	0.50	7.46	4.789	0.64
15	0	16.62	10.36	0.62	14.5	11.14	0.77	17.07	18.76	1.10
	2	14.45	9.164	0.63	11.12	7.791	0.70	11.78	9.629	0.82
	4	9.569	5.895	0.62	6.593	11.45	1.74	17.89	13.14	0.73
	16	2.389	3.226	1.35	12.4	5.62	0.45	12.12	4.896	0.40

Tableau IV.9 : Evolution du coefficient de ramollissement en fonction du pourcentage de l'argile pour différentes teneurs en ciment et modes de conservation.

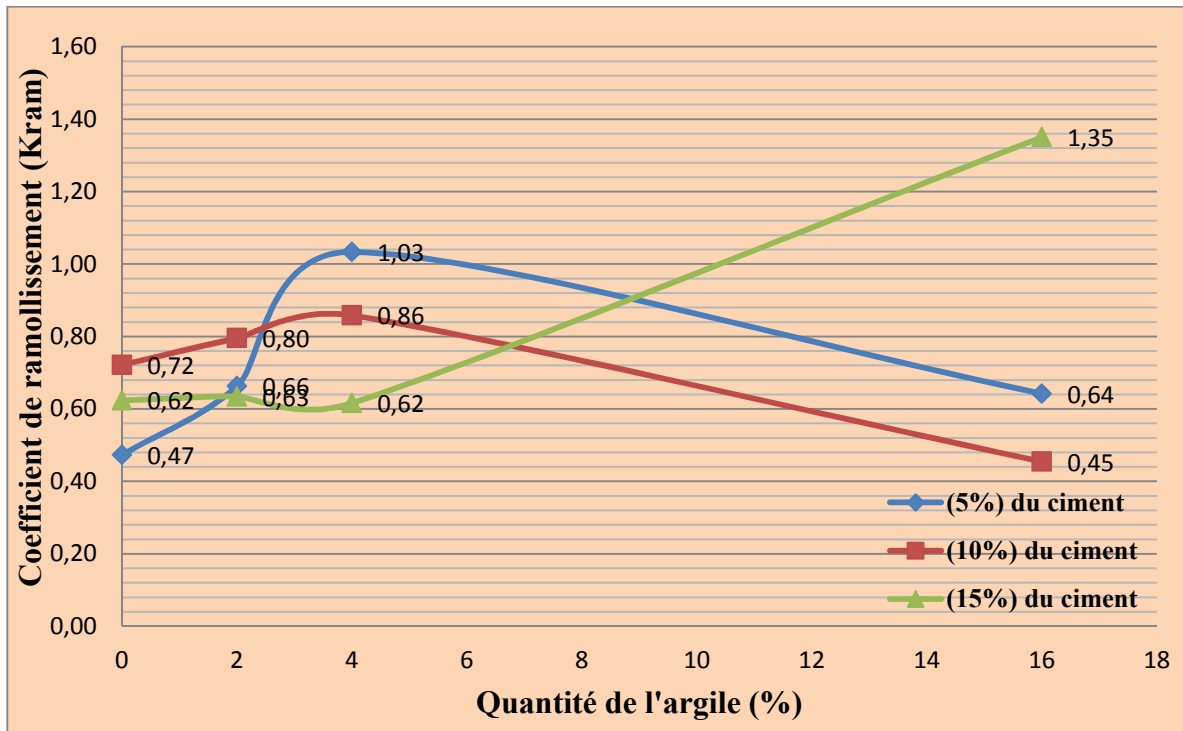


Figure IV.34 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et argile (à l'état libre)

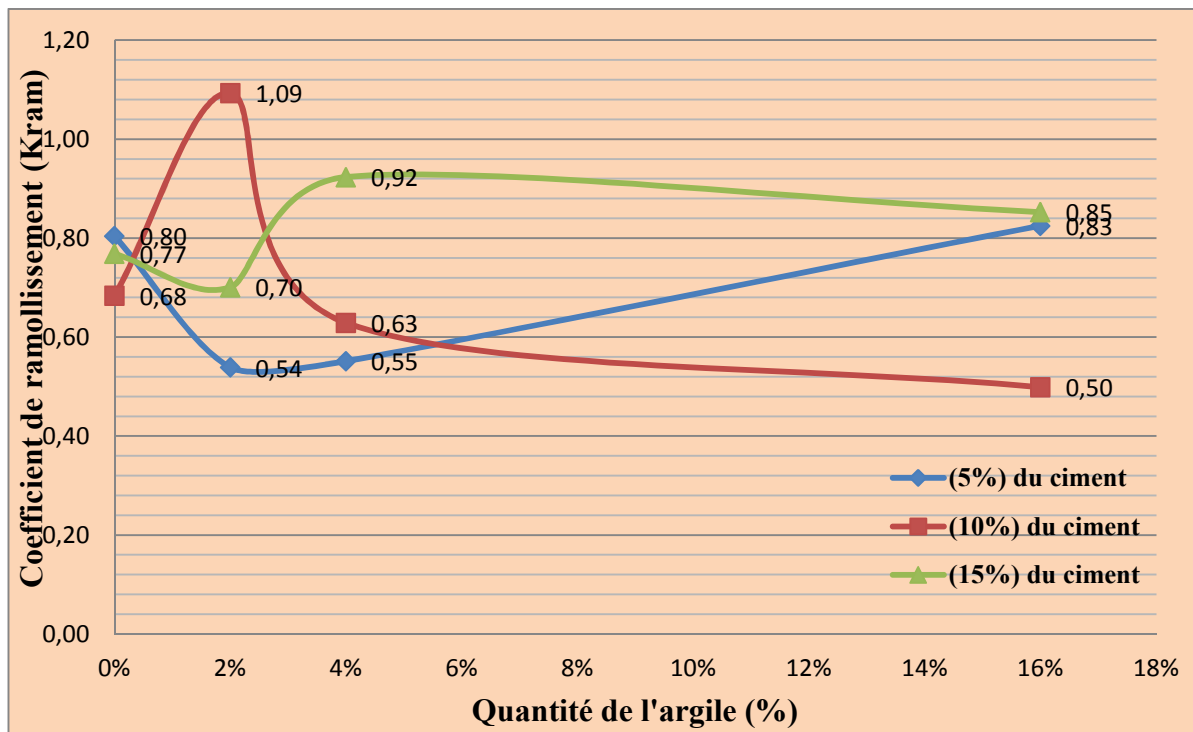


Figure IV.35 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et argile (dans un sac légèrement humidifié)

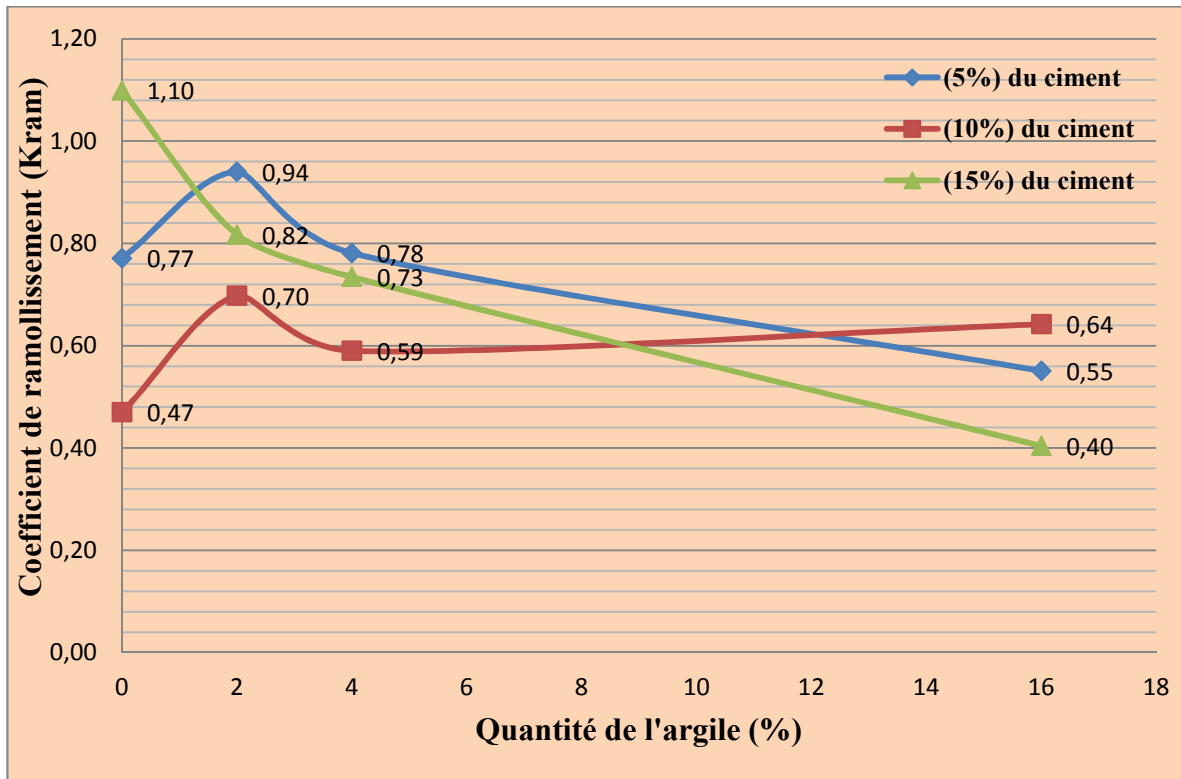


Figure IV.36 : Coefficient de ramollissement (Kram) pour le sable-ciment et argile (conservation dans l'eau 7 jours).

IV.4.2- Analyse des résultats

Le coefficient de ramollissement donne de meilleurs résultats lors que :

- la quantité de l'ajout (chaux ou argile) est égale à 2 % dans le cas de conservation de l'éprouvette dans un air humide ou immergé dans l'eau 7 jours.
- la quantité de l'ajout (chaux ou argile) est égale à 4 % dans le cas de conservation de l'éprouvette dans un air libre.

L'ajout de l'argile au sable-ciment donne plus de résistance que l'ajout de la chaux ; mais le coefficient de ramollissement obtenu par l'ajout de la chaux est plus satisfaisant que celui obtenu par l'ajout de l'argile.

IV.5- Etude comparative entre l'ajout de la chaux et l'ajout de l'argile

Nous présentons dans les graphes suivants une étude comparative entre les deux stabilisateurs (Chaux et Argile) en fonction du pourcentage de ciment (5%) et du mode conservation des éprouvettes traitées. Les courbes de comparaisons en fonction du pourcentage de ciment (10% ; 15%) et du mode conservation sont présentées dans (**I'Annexe I**).

a- A l'état sec

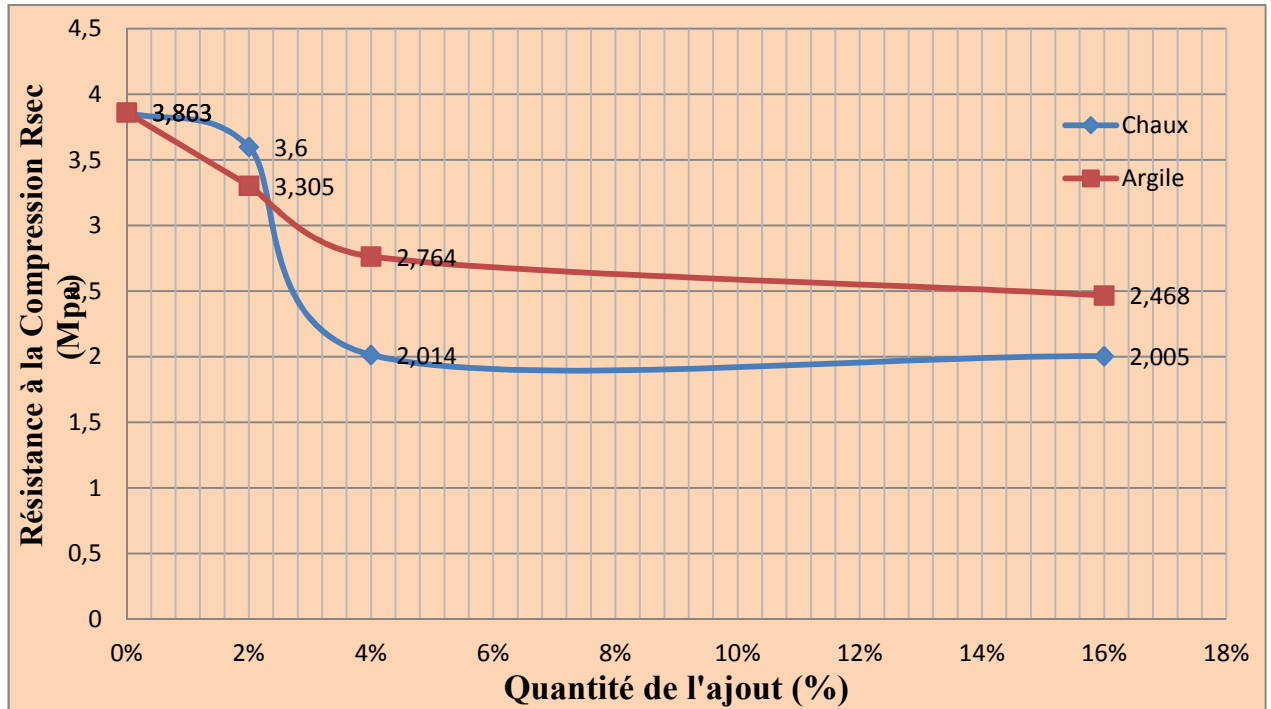


Figure IV.37 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment+ à l'air libre).

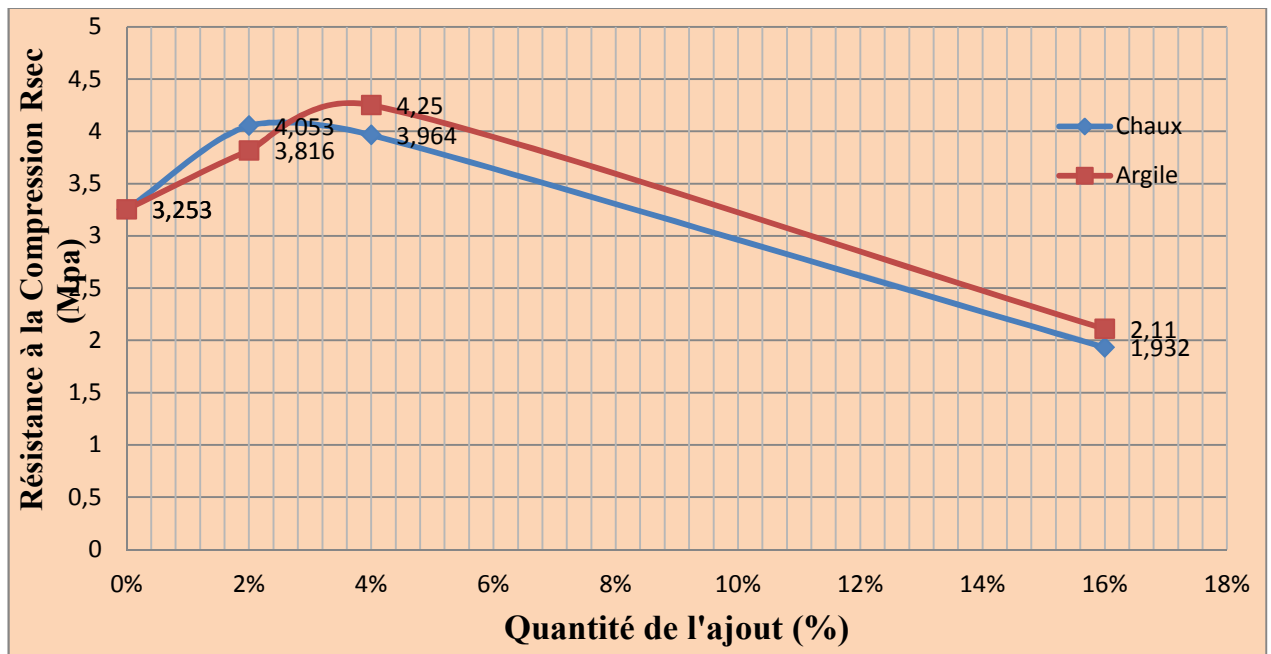


Figure IV.38: Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux
(5% de ciment + dans un sac humidifié).

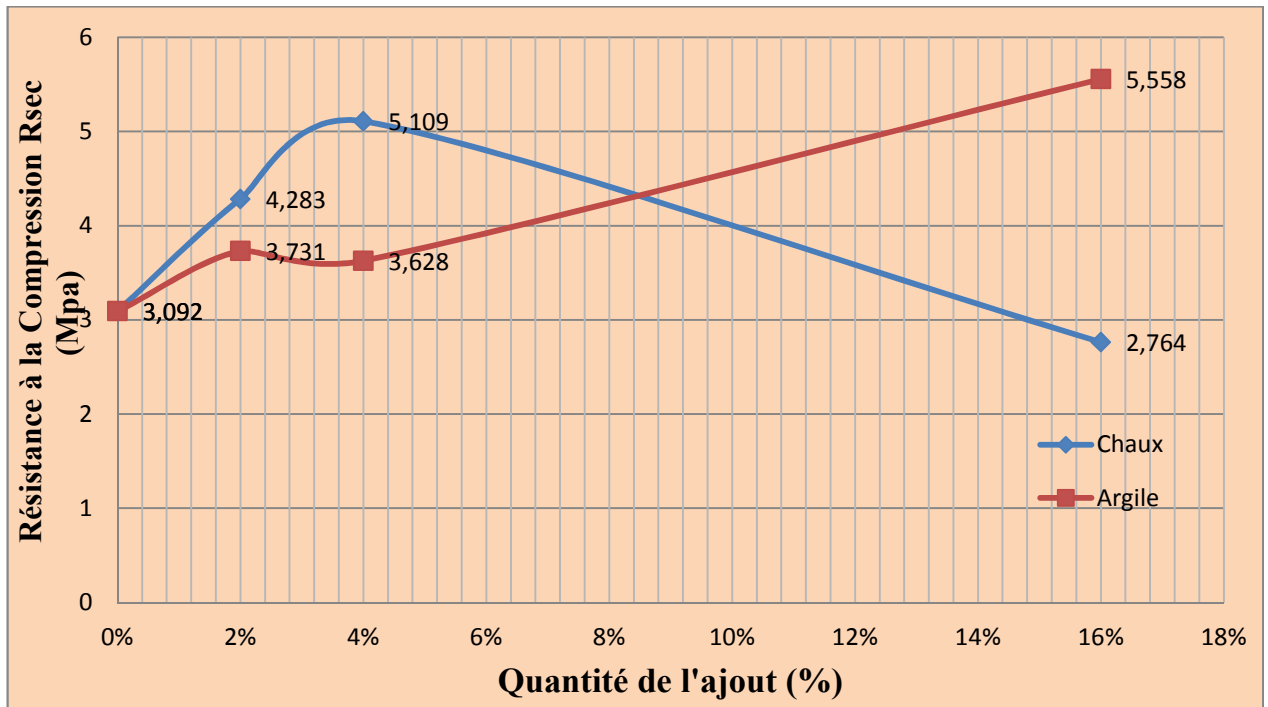


Figure IV.39 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux (5% de ciment + immergé dans l'eau 7 j).

b- A l'état de saturation

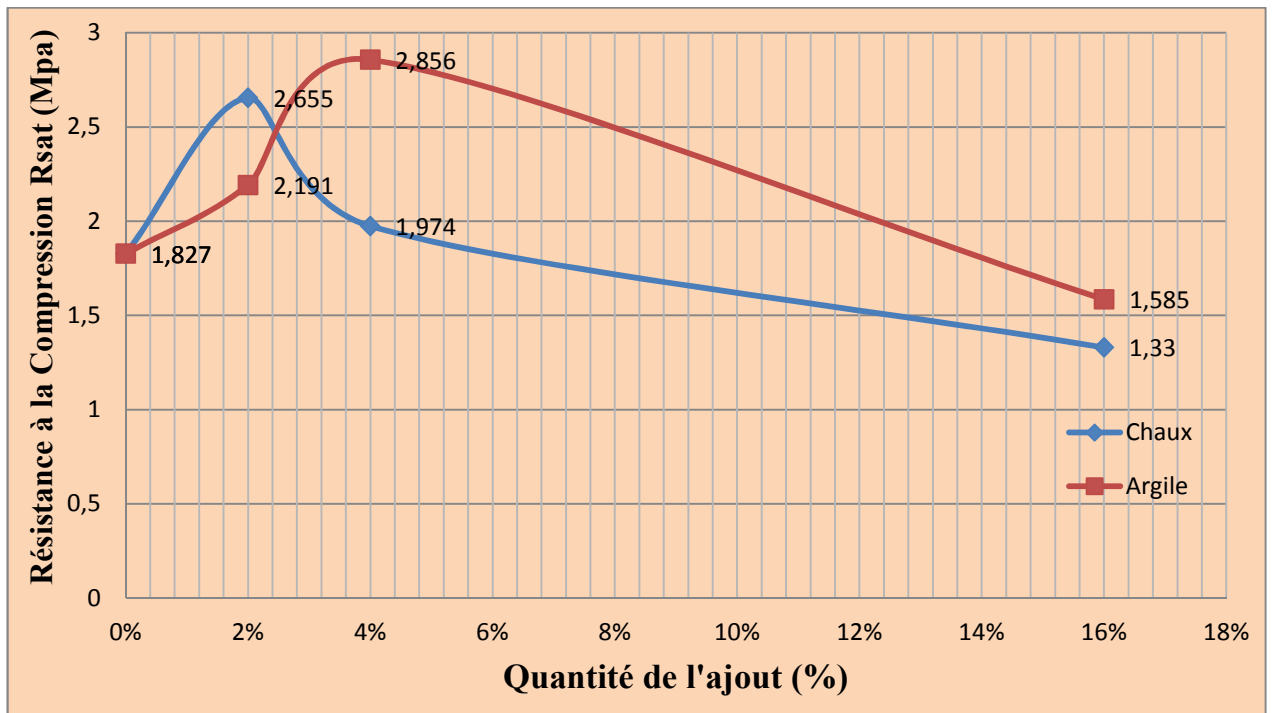


Figure IV.40 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux (5% de ciment + à l'air libre).

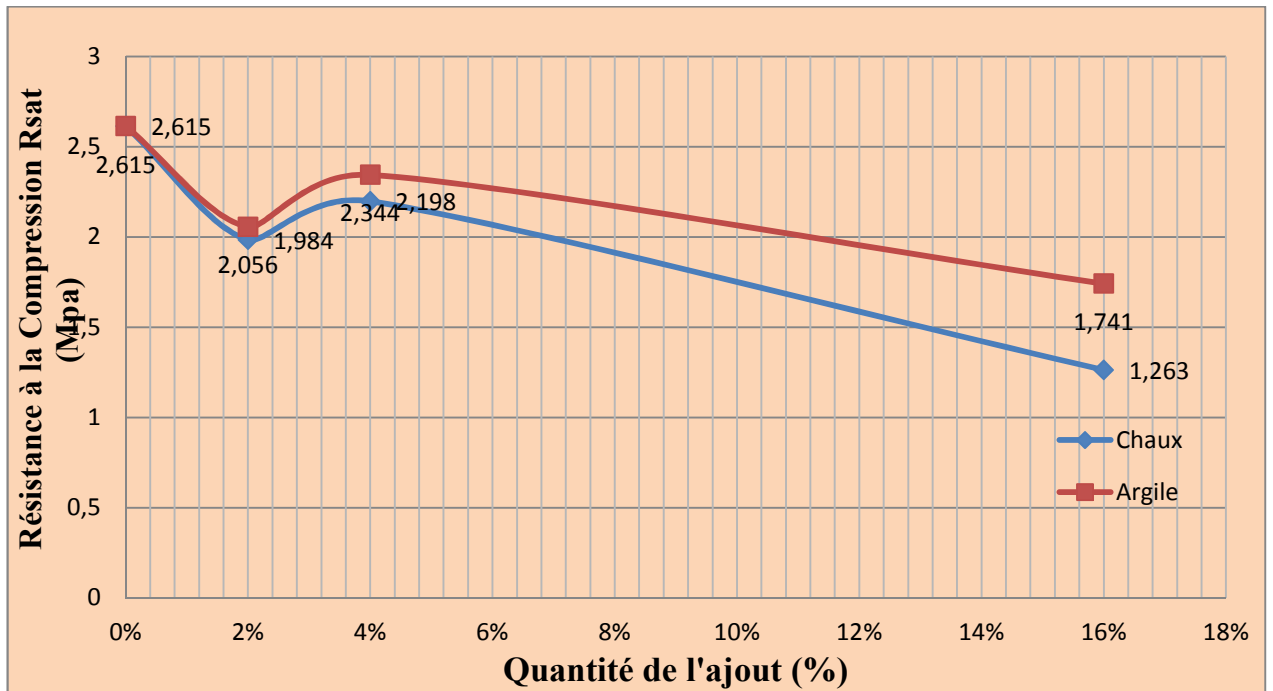


Figure IV.41: Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux (5% de ciment + dans un sac humidifié).

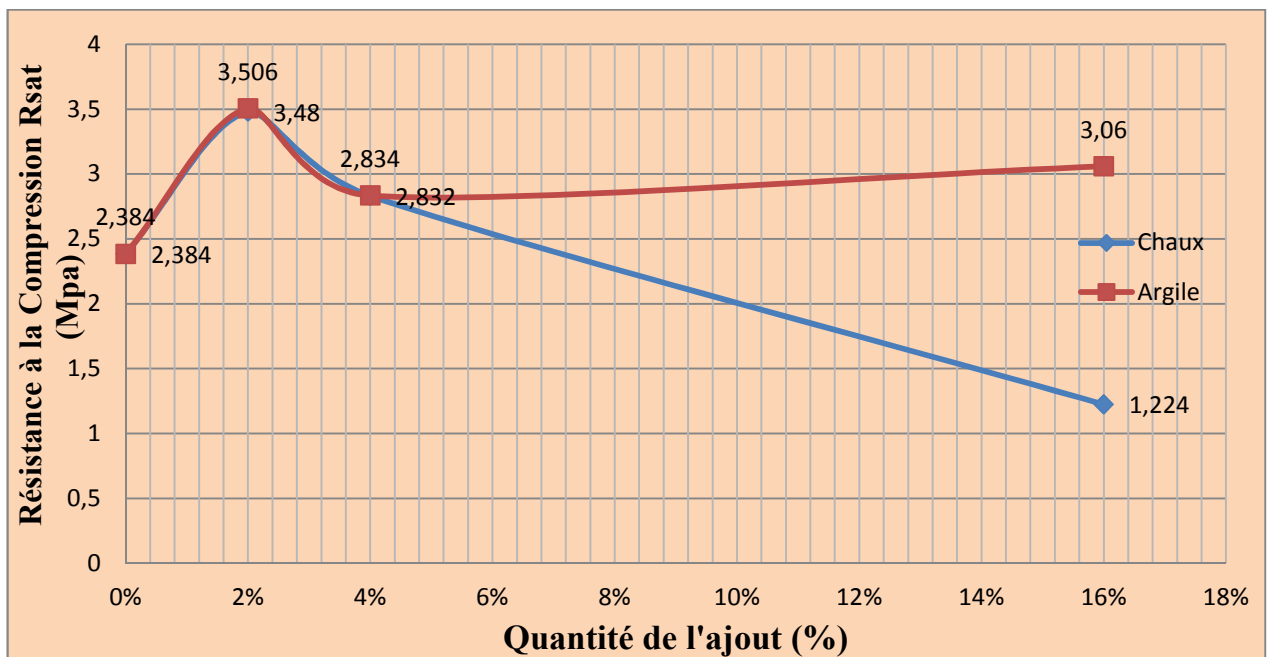


Figure IV.42 : Comparaison des résultats de stabilisation par l'argile et à la chaux (5% de ciment + immergé dans l'eau 7 j).

c- Analyse des résultats

D'après les graphes précédents on constate que :

- L'argile a presque le même comportement que la chaux dans la stabilisation du sable.
- A l'état sec la chaux donne de meilleurs résultats que l'argile dans tous les cas de conservation ; mais dans le cas du pourcentage de l'ajout élevé la résistance donnée par la chaux est inférieure à celle donnée par l'argile.
- A l'état de saturation la chaux donne plus de résistance au mortier sable-ciment à l'air libre ; mais dans tous les cas de conservation l'argile donne de meilleurs résultats. (voir l'annexe)

IV.6 – Conclusion

Le ciment incorporé au sable développe un réseau de liaison entre les grains qui le composent. La réaction d'hydratation du ciment présente l'avantage d'une évolution rapide, ce qui permet d'obtenir des résistances mécaniques nécessaires dans un délai court.

L'argile et la chaux ont un rôle de stabiliser la granulométrie du sable et de renforcer les liaisons entre les grandes particules.

La chaux vive ajoutée au sable-ciment provoque:

- Une réduction de la teneur en eau du sol par adjonction de poudre sèche. L'utilisation de chaux vive entraîne un séchage du sol complémentaire par réaction chimique exothermique (extinction de la chaux): $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{chaleur}$
- Une modification des caractéristiques de compactage: augmentation de la teneur en eau optimale et diminution de la masse volumique apparente sèche
- Un accroissement avec le temps de la résistance et de la stabilité vis-à-vis de l'eau.

CHAPITRE V : Traitement des argiles par la chaleur

V.1 – INTRODUCTION

Le traitement thermique des sols n'est pas un moyen de stabilisation nouveau, des ingénieurs romains l'ont employé pour accroître la résistance et abaisser la compressibilité des sols cohérents.

Plus l'énergie calorifique par unité de masse de sol à traiter est grande, plus l'effet produit est important. Une augmentation de la température même légère peut améliorer la résistance d'une argile en réduisant la répulsion électrique entre les particules, en provoquant un écoulement de l'eau interstitielle dû au gradient thermique appliqué, et en diminuant la teneur en eau du fait que le d'évaporation augmente. Une température plus élevée, supérieure à 100°C, chasse l'eau adsorbée par une argile et augmente ainsi sa résistance. Des températures de l'ordre de 400°C à 600°C changent d'une façon irréversible certains minéraux argileux en des matériaux moins sensibles à l'eau.

A 800°C ou 1000°C, certaines argiles commencent à se transformer en briques

(Mc Graw-Hillciment, 1962).

Ce chapitre contient deux parties qui s'intéressent au traitement thermique des sols :

- **La première partie** traite la stabilisation des sols à chaud et son effet sur leur résistance mécanique (résistance à la compression simple).
- **La deuxième partie** est consacrée à l'étude de l'influence des sulfates de cuivre et des sulfates de fer sur la couleur des argiles traitées par la chaleur.

V.2 – Traitement des argiles à chaud

Pour mener cette étude on a prélevé trois échantillons d'argile, de couleurs différentes, de trois régions de la grande Kabylie. Une argile rouge d'Oued Aissi, une argile jaune de l'Habitat (Tizi-Ouzou Chef lieu de wilaya) et une argile grise provenant de Takhoukht.



Figure V.1: éprouvettes témoin (Jaune, Grise et Rouge).

Le traitement par la chaleur de chaque type d'argile se fera comme suit :

Les éprouvettes conservées à l'air libre sont chauffées à de hautes températures et pour tester l'effet apporté par la stabilisation à la chaleur elles sont immergées dans l'eau et ensuite écrasées

V.2. 1. Principe de l'essai

La résistance à l'écrasement à l'état sec est la première qualité exigée du matériau terre, en deuxième lieu sa tenue à l'eau. L'essai consiste à porter à différentes températures les éprouvettes de béton de terre et de les soumettre à l'essai d'écrasement par compression. Les essais d'écrasement se feront à sec et après immersion des éprouvettes.



Figure V.2: Four à haute température.

L'essai se fera sur des éprouvettes confectionnées à la teneur en eau optimale, 15% pour l'argile rouge, 15% pour l'argile jaune et 8% pour l'argile grise. Les éprouvettes du béton de terre sont introduites dans le four à 400°C, 600°C, 800°C et 1000°C. Le chauffage est maintenu pendant 4 heures.

V.2.2. Description et observations

V.2.2.1. Argile rouge

- **A la sortie du four**, les éprouvettes d'argile rouge portées à diverses températures, présentent des couleurs différentes les unes des autres.
- Les dimensions des éprouvettes du sol ne sont pas les mêmes. Avant passage au four, les éprouvettes avait les dimensions du moule Proctor (h=117 mm, D=101,6mm). Après cuisson, les dimensions des éprouvettes sont réduites.

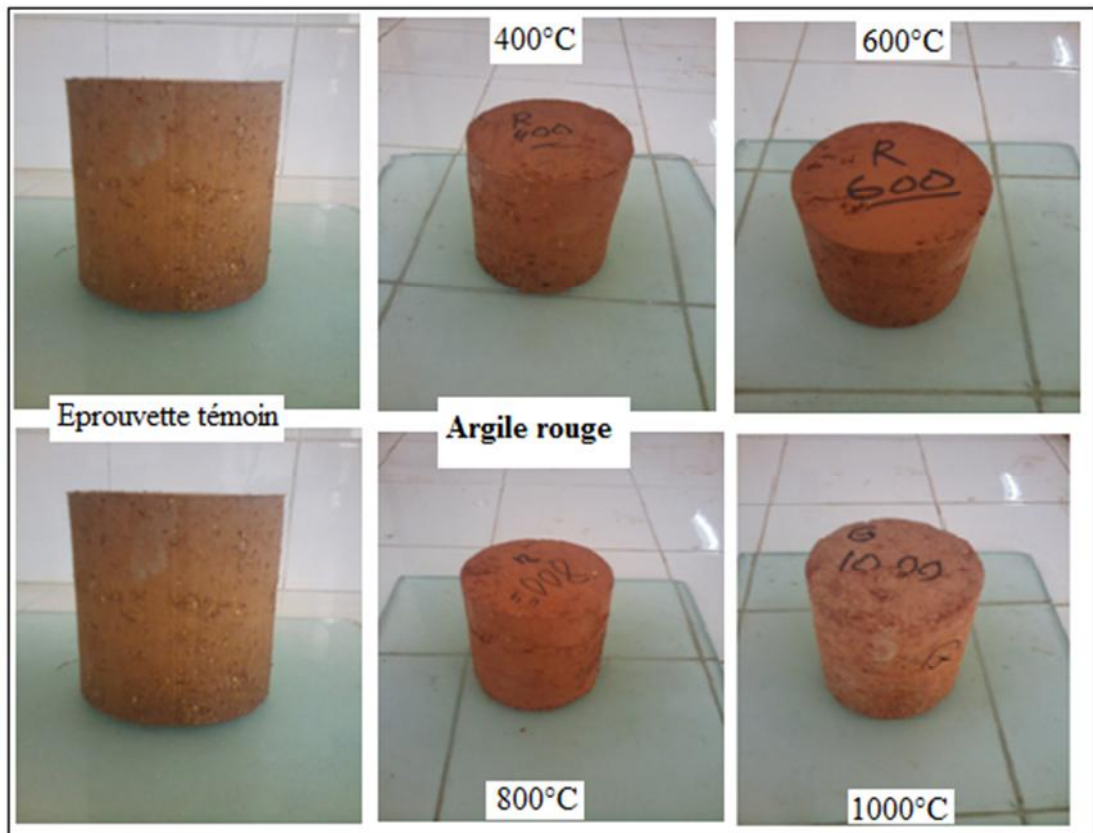


Figure V.3: Argile rouge cuite à différentes températures.

- **Après immersion** Après immersion, les éprouvettes d'argile rouge absorbent de l'eau alors leur poids augmente.

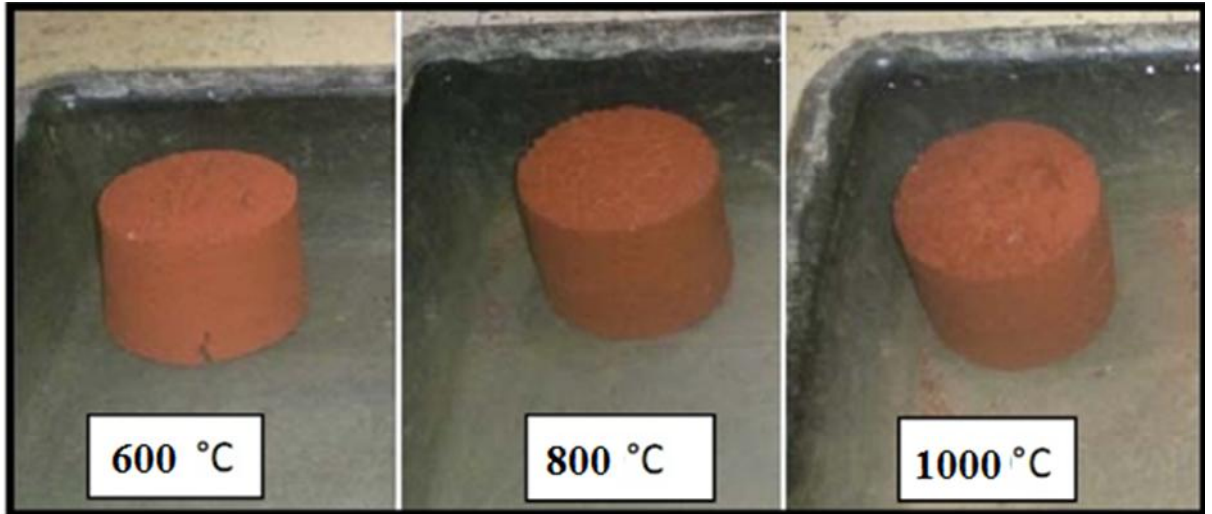


Figure V.4: Argile rouge cuite immergée.

V.2.2.2. L'argile jaune

- Après cuisson de la marne, on constate que pour chaque température correspond une couleur différente du sol
- Le volume des éprouvettes à la sortie du four diminue par rapport à leur volume avant la cuisson.

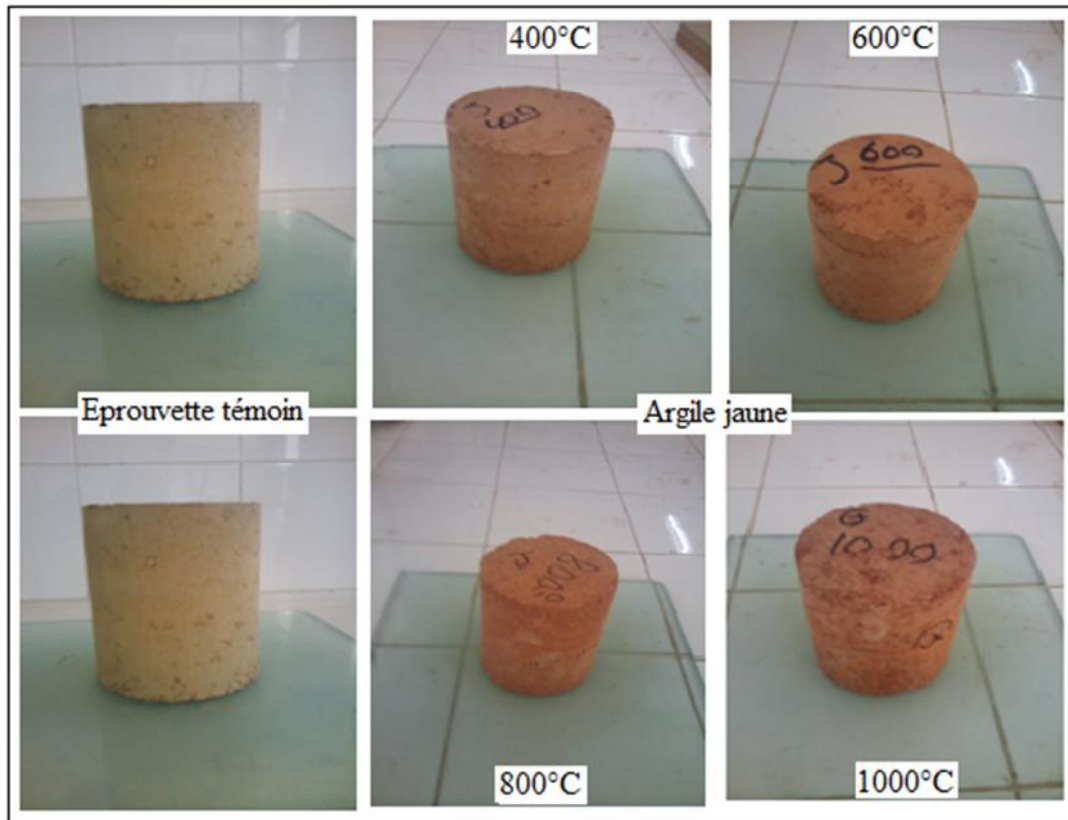


Figure V.5: Argile jaune cuite à différentes températures.

➤ **Après immersion**

- Quelques minutes après l'immersion des éprouvettes de marne cuite, on constate l'apparition de points blancs à leurs surfaces. Ces taches blanches observées sur la figure sont inexistantes à 600°C, rares à 800°C et croissent avec la température. Le nombre de taches blanches apparues est important pour le sol cuit à 1000°C,

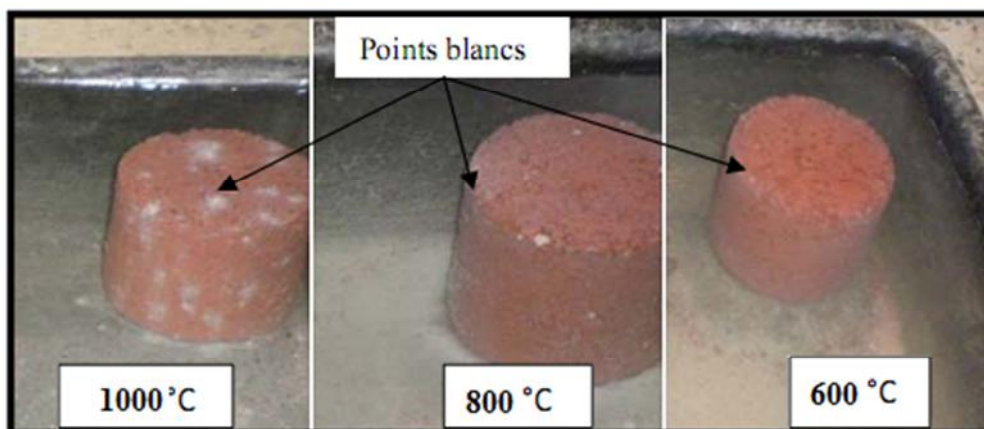


Figure V.6: Argile jaune cuite immergée

L'apparition de ces diverses taches blanches appelées inclusions est due à la présence des impuretés dans le sol. Nous présentons quelques impuretés des argiles qui peuvent être à l'origine de ce phénomène.

✓ **Impuretés diverses dans les argiles**

Toutes les argileuses sans exception comportent un certain nombre d'impuretés neutres nuisibles ou utiles. La plupart de ces impuretés sont insoupçonnables à l'œil nu malgré une observation attentive et avertie, sauf lorsqu'elles présentent des teneurs importantes.

✓ **Inclusions carbonatée (calcaires ou dolomitiques) :** est la réunion de différents grains cristallisés de calcite ou de dolomite qui se solidifient ensemble. Ces carbonates donnent par cuisson des grains de chaux vive très expansive au contact de l'eau ou de l'air humide.

✓ **La microfaune :**

La plupart des argiles recèlent un grand nombre de squelettes de très petits organismes. A l'œil nu ces squelettes sont très difficilement distinguables car ils sont enrobés de particules argileuses. Ces squelettes sont appelés : la microfaune.

Dans beaucoup de cas et plus particulièrement dans les marnes argileuses et les marnes, on peut trouver des coquilles pouvant atteindre 10 centimètre comme les coquilles d'huitres. Etant carbonatées, ces coquilles fourniront au broyage des grains ou nodule de carbonates

✓ **Les matières organiques :** au cours de la cuisson, ces matières organiques se décomposent en donnant des gaz qui ne peuvent s'échapper facilement.

✓ **Quartz :** les grains de quartz déterminent l'usure du matériel de préparation en fonction de leur granulométrie et proportion. Au cours de la cuisson les grains de quartz subissent des modifications assez brutales accompagnées de changement de volume. Cette transformation se fait à 573°C.

✓ **Chlorures :** les chlorures sont extrêmement nocifs même en très petites proportions. C'est ainsi que des teneurs de 0,2% sont considérées comme très dangereuses. La nocivité des chlorures réside dans l'apparition d'efflorescences au séchage et à la cuisson, de corrosion intense et même de destruction du produit fini. La détermination

de la teneur de ces chlorures dans une argile ne peut se faire qu'au moyen de l'analyse chimique.

L'échantillon introduit initialement dans le four est de couleur jaune il en ressort avec une couleur rouge brique après cuisson. L'analyse minéralogique de cette argile révèle qu'elle contient 21% de calcite (CaCO_3) donc ce sont les carbonates qui sont responsables de ces inclusions très nuisibles.

Ainsi les carbonates donnent par cuisson des grains de chaux vive très expansive au contact de l'eau. Cette expansion crée des tensions qui s'accumulent et provoquent des ruptures dans le produit fini à titre indicatif 1 cm^3 de chaux vive donne par hydratation 1.8 cm^3 de chaux éteinte.

Ces inclusions agissent à la manière des grains qui germent sous l'éprouvette et qui finissent d'abord par la fissurer, la percer et la désagréger totalement.

V.2.2.3. L'argile grise

➤ A la sortie du four

Après cuisson des éprouvettes du même sol, on constate que pour chaque température correspond une couleur différente (figure). Les dimensions des éprouvettes sont réduites.

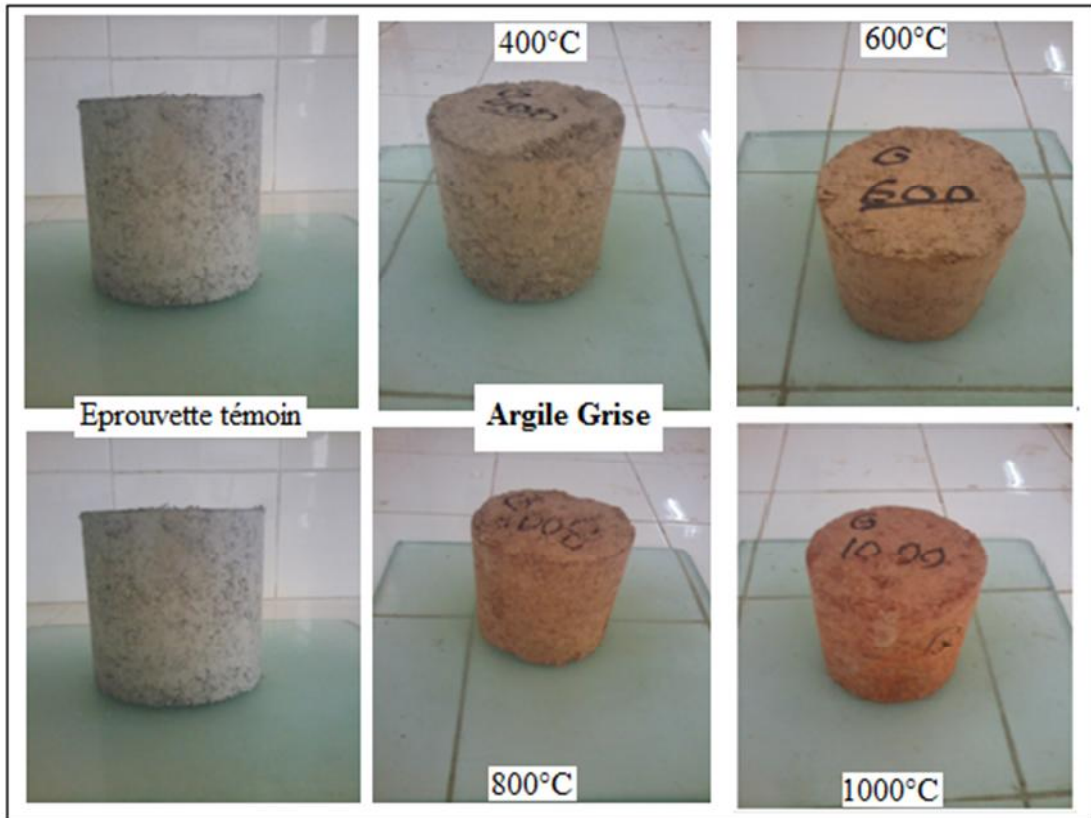


Figure V.7: Argile grise cuite à différentes températures.

➤ **Après immersion**

Les éprouvettes absorbent l'eau après leur immersion ce qui fait augmenter leur poids.

Celles qui sont cuites à 600°C se désagrègent dans l'eau, quelques minutes après leur immersion.

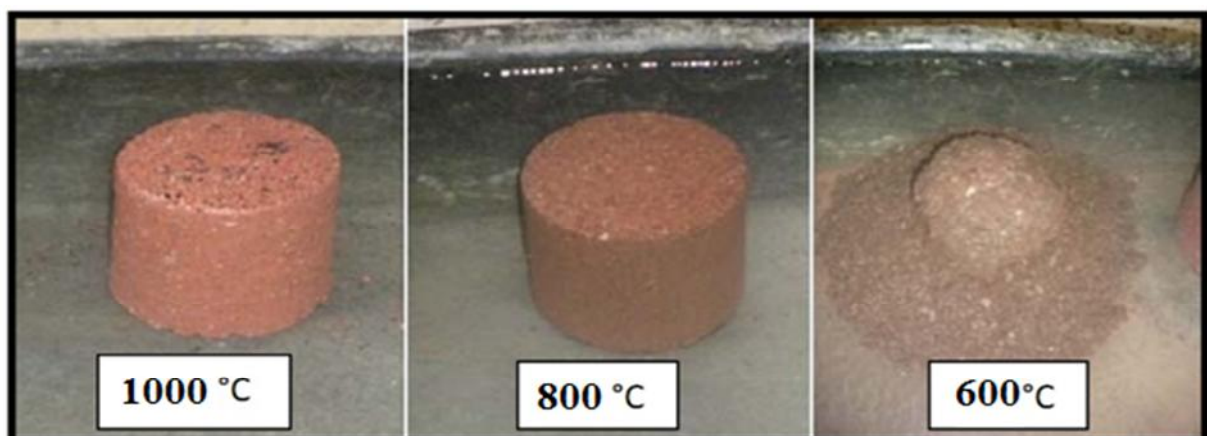


Figure V.8: Argile grise cuite, immergée.

V.2.3 - Résistance à l'écrasement

Après cuisson les éprouvettes de sol ont été soumises à l'essai de compression simple, pour caractériser leur résistance à l'écrasement après immersion de (R_{sat}) 24 h dans l'eau. L'essai appliqué aux éprouvettes, par une presse digitale, est destructif

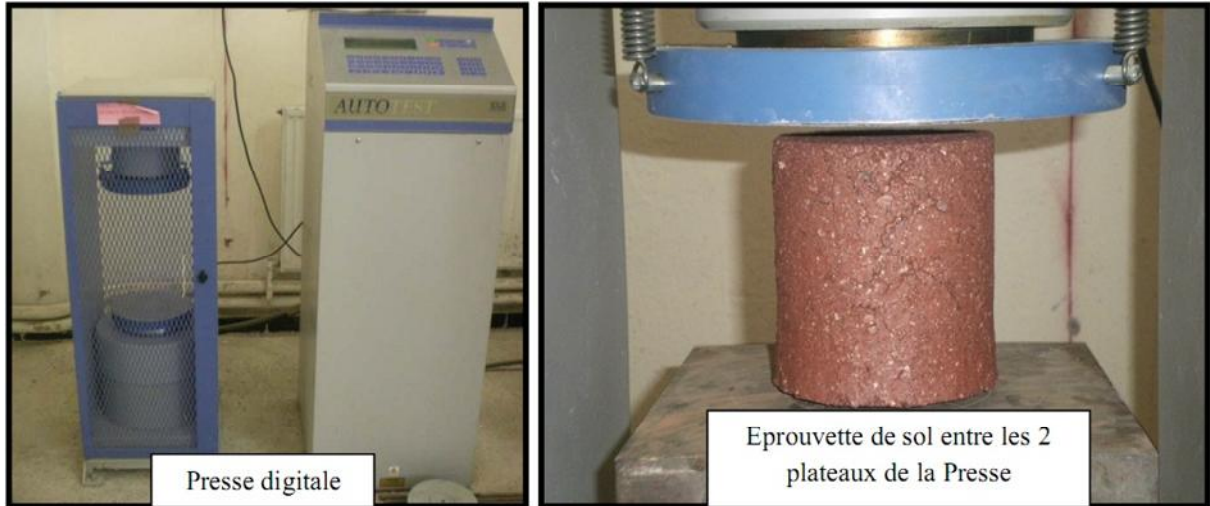


Figure V.9: Essai d'écrasement.

V.2.3.1- Résistance à l'écrasement à l'état sec (R_{sec})

En sortant du four, les éprouvettes sont soumises à l'écrasement par compression simple à l'état sec.

- La résistance à l'écrasement à l'état sec des trois argiles augmente à partir d'une température de cuisson 800°C jusqu'à 1000°C. Donc la courbe présente un minimum de résistance à 800°C.

Température	Type d'Argile					
	Argile Rouge		Argile Jaune		Argile Grise	
	R _{sec} (Mpa)	Force (KN)	R _{sec} (Mpa)	Force (KN)	R _{sec} (Mpa)	Force (KN)
400	2.904	22.8	5.338	41.9	0.651	5.1
600	3.169	51.1	5.349	42	0.701	5.5
800	4.888	24.9	5.85	45.9	1.091	8.6
1000	6.501	38.4	10.03	78.8	6.304	49.5

Tableau V.1 : Variation de la résistance R_{sec} en fonction de la température

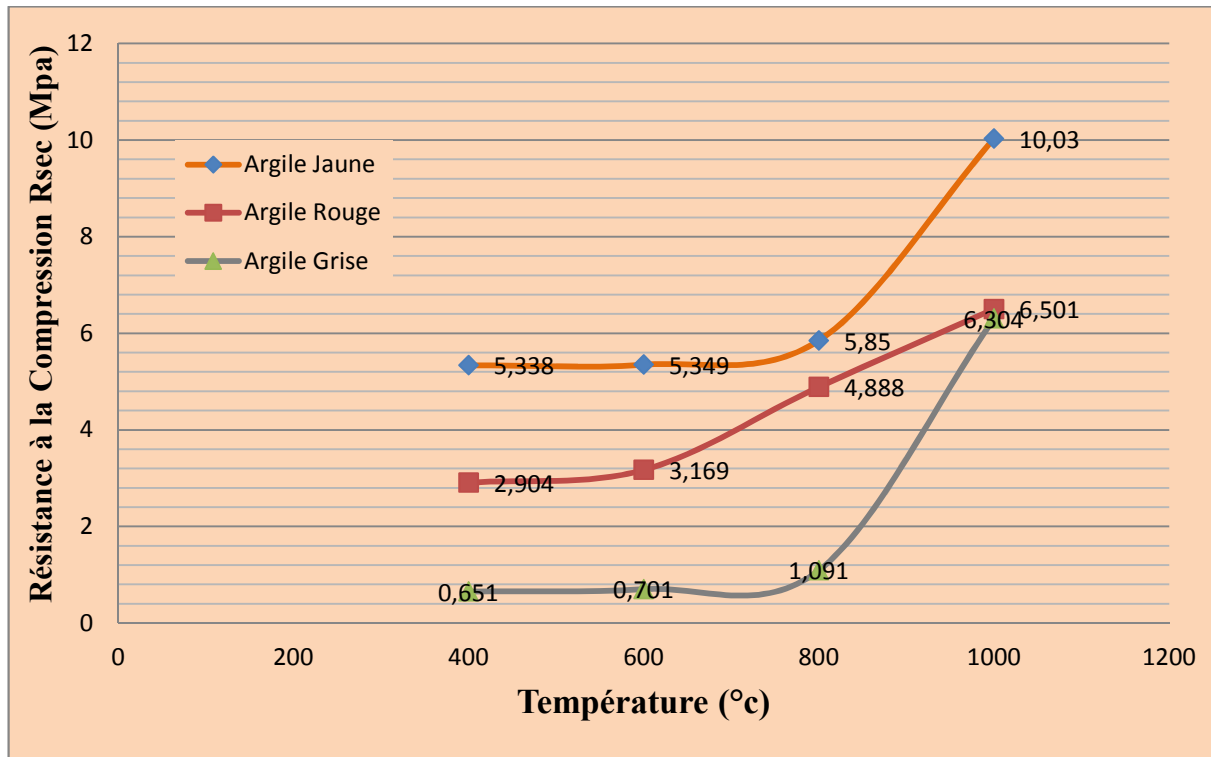


Figure V.10: Résistance à l'écrasement Rsec - Température des 3 argiles.

V.2.3.2- Résistance à l'écrasement après immersion de 24 heures (Rsat)

À la sortie du four, les éprouvettes de sol sont immergées dans l'eau pendant 24 heures, puis elles sont écrasées par compression simple.

Température	Type d'Argile					
	Argile Rouge		Argile Jaune		Argile Grise	
	Rsat (Mpa)	Force (KN)	Rsat (Mpa)	Force (KN)	Rsat(Mpa)	Force (KN)
400	0	0	0	0	0	0
600	1.765	24.8	0.886	7	0	0
800	4.162	19.6	5.063	39.8	0.923	5.7
1000	5.643	36.5	8.251	64.8	5.125	40.3

Tableau V.2 : Variation de la résistance après immersion Rsat - Température

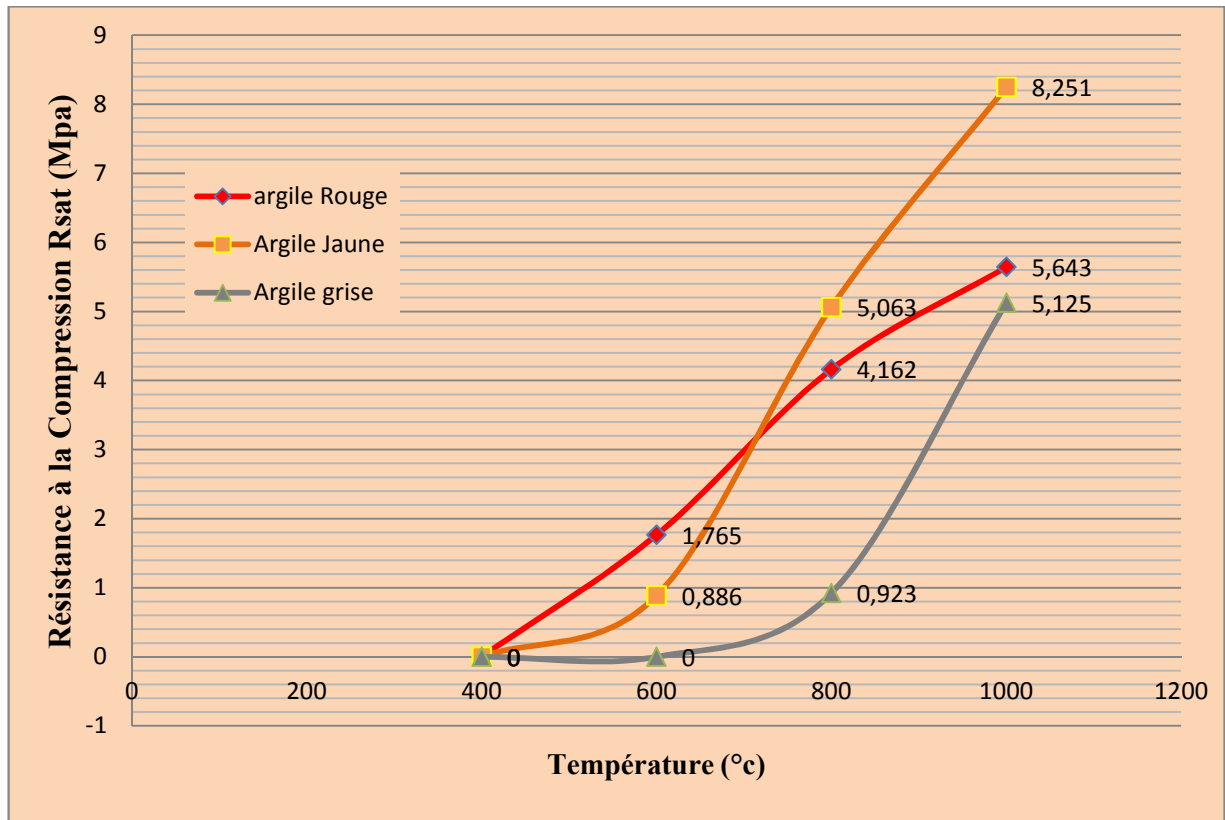


Figure V.11 Resistance à l'écrasement après immersion R_{sat} – Température.

V.2.3.3. Le coefficient de ramollissement (K_{ram})

Le coefficient de ramollissement (K_{ram}) est le rapport entre la résistance à la compression après immersion (R_{sat}) sur la résistance à la compression à sec (R_{sec}) du même matériau.

$$K_{ram} = \frac{R_{sat}}{R_{sec}}$$

Température	Coefficient de ramollissement des trois argiles		
	Argile Rouge	Argile Jaune	Argile Grise
400	0	0	0
600	0.56	0.17	0.00
800	0.85	0.87	0.85
1000	0.87	0.82	0.81

Tableau V.3: Coefficient de ramollissement des trois argiles.

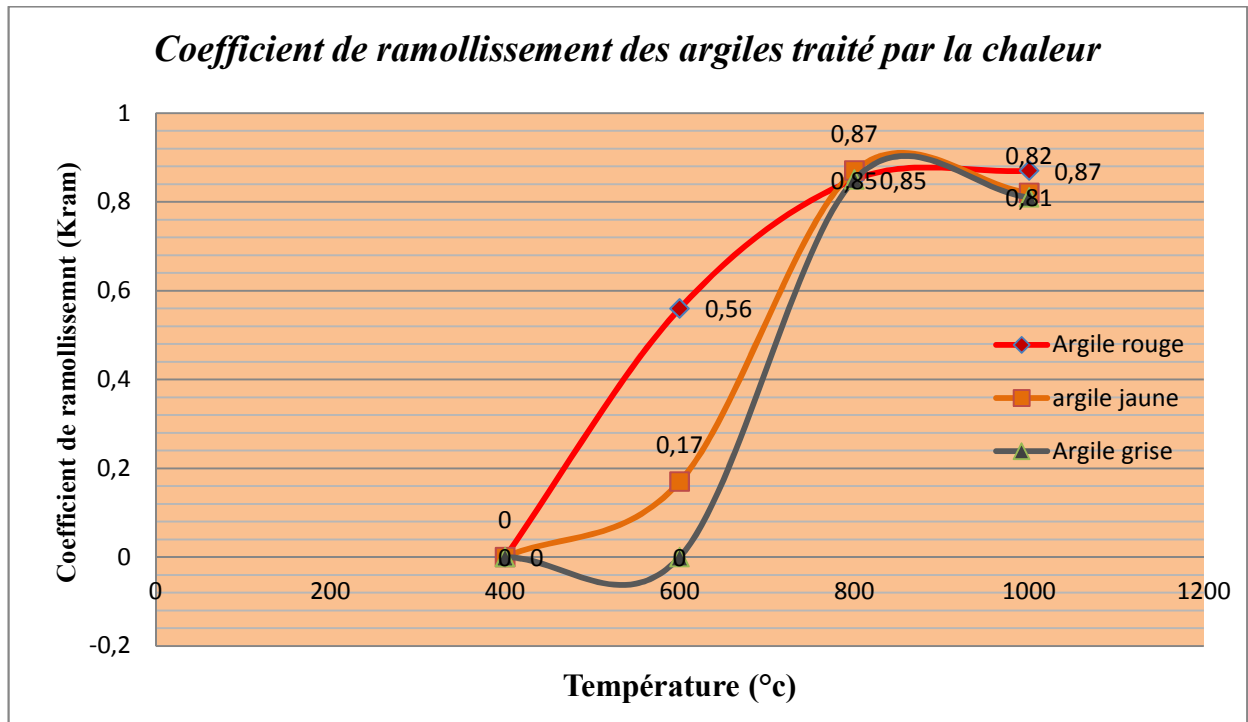


Figure V.12: Coefficient de ramollissement des argiles traité par la chaleur.

L'argile rouge cuite à une température supérieure ou égale à 800°C présente un coefficient de ramollissement supérieur à 0,8 ce qui fait d'elle un matériau résistant à l'action de l'eau. Sa résistance à l'eau est proportionnelle à la température de cuisson.

L'argile jaune cuite à 800°C présente une très bonne résistance à l'eau (Kram= 0,87) Tandis que la grise a un meilleur comportement à l'eau à des températures supérieures à 800°C.

Nous pouvons déduire de ces essais que la stabilisation par chauffage est efficace pour des températures de cuisson supérieures à 800°C. Les hautes températures changent d'une façon irréversible certains minéraux argileux en des matériaux moins sensibles à l'eau. Le traitement à chaud augmente les caractéristiques mécaniques d'un matériau et améliore considérablement la tenue à l'eau.

V.3 - Ajouts des sulfates de fer et de cuivre aux argiles

L'aspect visuel des argiles (rouge, jaune, grise) a changé après avoir traité les éprouvettes à différentes températures (400, 600, 800 et 1000 °C) : changement des couleurs. Cette observation nous a mené à poser la question : Quels sont les agents actifs responsables de ce changement ?

Ce sont principalement les divers oxydes et hydroxydes de fer, de manganèse de titane etc...qui confèrent aux argiles les diverses teintes que l'on observe dans la nature.

Cependant de tels oxydes avec les proportions que l'on rencontre habituellement dans les argiles ne sont pas nuisibles

La composition chimique et minéralogique des argiles nous a conduits à penser d'en ajouter des ions métalliques aux trois argiles afin d'étudier l'influence de ces ions sur le changement des couleurs.

V.3.1 – mode opératoire

On reprend le même mode opératoire utilisé pour le traitement des argiles par la chaleur, et on fabrique 4 séries d'éprouvettes de la façon suivante :

Chaque série comporte 2 éprouvettes, après séchage à l'air libre et cuisson à 800°C, l'une sera écrasée à l'état sec (Rsec) et l'autre après immersion (Rsat)

Deux solutions ioniques ont été essayées (Fe_2SO_4 et CuSO_4) à 2 teneurs différentes l'une à l'optimum et l'autre à la saturation.

- 1^{ère} cas teneur en eau optimale.

La première série d'éprouvettes est fabriquée avec un volume, de solution de FeSO_4 concentrée à 25% (250g/l), égal au volume d'eau de fabrication des éprouvettes correspondant à l'optimum Proctor. La deuxième série est réalisée, dans les mêmes conditions, à la même concentration avec la solution CuSO_4 .

- 2^{ème} cas teneur en eau de saturation.

La troisième série est identique à la première mais avec une solution de FeSO_4 égale au volume d'eau de saturation et enfin la dernière série est pareille à la précédente mais avec une solution de CuSO_4

V.3.2 Présentation des résultats et discussions

V.3.2.1- Description et observations

Après la sortie du four des échantillons testés, des photos ont été prises et sont présentées dans les figures V12 V13.

Les éprouvettes situées à gauche de la photo V12 sont fabriquées avec une teneur en eau et celles de droite avec une teneur en solution de FeSO_4 . Elles sont toutes chauffées à la même

température 800°C. Il en ressort que les éprouvettes confectionnées avec de l'eau ont conservé leur couleur d'origine alors que celles qui sont réalisées avec la solution FeSO_4 ont viré comme suit :

- L'argile rouge devient marron foncé.
- La jaune vire vers le marron clair
- La grise devient rouge brique

Avec les sulfates de cuivre, l'argile rouge vire à la couleur marron, l'argile jaune et grise prennent la couleur marron clair. Les figures V12 V13 illustrent d'importants changements dans la couleur du matériau étudié.

On peut conclure qu'à la même température de cuisson 800°C, les éprouvettes fabriquées à l'eau ont conservé leur couleur d'origine. Celles qui sont traitées aux sulfates de fer ou aux sulfates de cuivre ont subi d'importants changements de couleur comme l'illustrent les figures V12 V13.



Figure V.13: Les éprouvettes d'argiles traitées par le sulfate de fer.



Figure V.14: Les éprouvettes d'argiles traitées par le sulfate de cuivre.

Après cuisson les éprouvettes d'argile traitée par le sulfate de fer et le sulfate de cuivre ont été soumises à l'essai de compression simple, pour caractériser leur résistance à l'écrasement

V.3.2.2- Résistance à l'écrasement à l'état sec

Les tableaux suivants présentent le résultat de l'essai de l'écrasement d'éprouvette traitée par le sulfate de fer et de cuivre à l'état sec :

CHAPITRE V : Traitement des Argiles par la Chaleur

argiles	teneur en eau optimale	contrainte de compression (Wopt)	contrainte de compression (Wsat)
argile rouge	15,08	4.933	3.117
argile jaune	13,6	4.2	1.484
argile grise	6,74	3.46	0.919

Tableau V.4: résistance à l'écrasement R_{sec} des argiles+ $FeSO_4$ traitées à la chaleur (état sec).

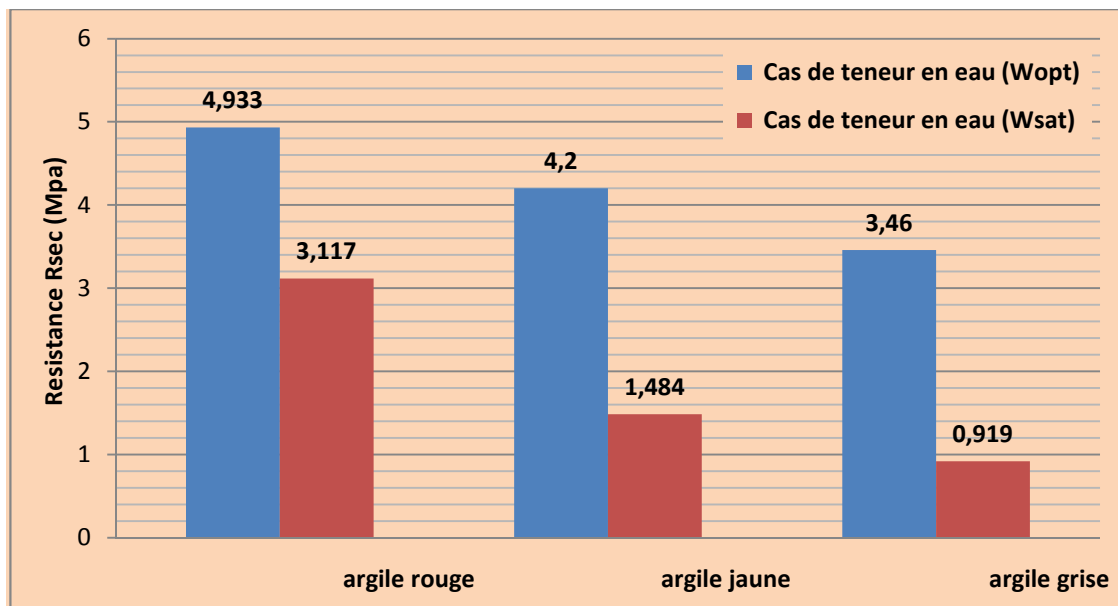


Figure V.15 : résistance mécanique des argiles+ $FeSO_4$ traitées à la chaleur (état sec).

argiles	teneur en eau optimale	contrainte de compression (Wopt)	contrainte de compression (Wsat)
argile rouge	15,08	4.26	1.846
argile jaune	13,6	6.051	3.366
argile grise	6,74	3.078	0.661

Tableau V.5: résistance à l'écrasement des argiles + $CuSO_4$ traitées par la chaleur (état sec).

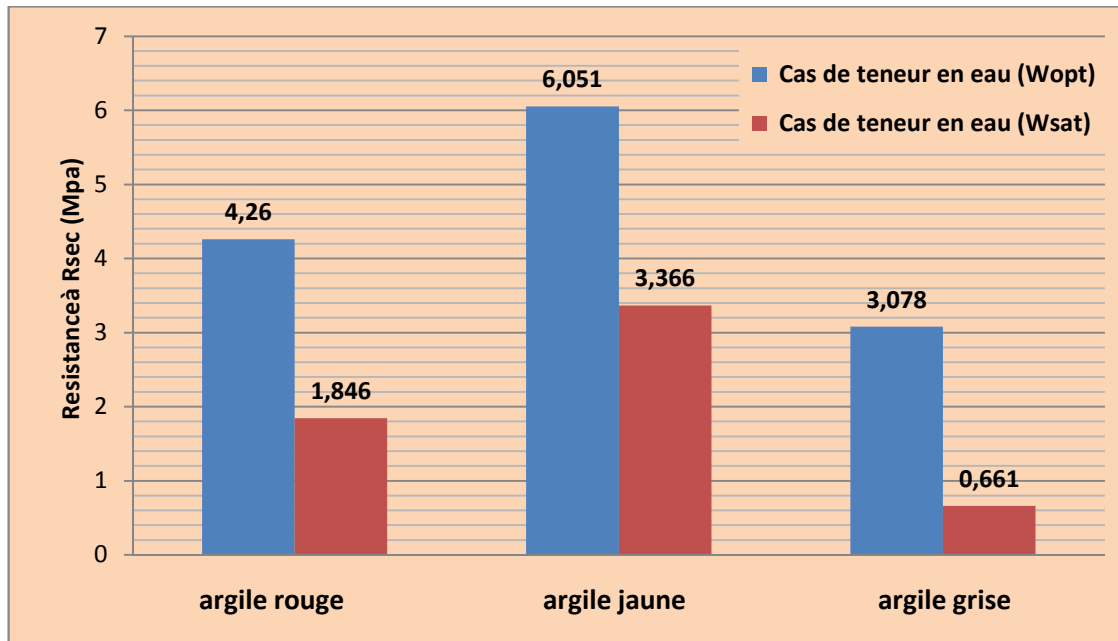


Figure V.16 : résistance mécanique des argiles+CuSO₄ traitées à la chaleur (état sec).

Les meilleures résistances sont obtenues à l'optimum Proctor

V.3.2.3- Résistance à l'écrasement à l'état sec

Les tableaux suivants présentent le résultat de l'essai de l'écrasement d'éprouvette traitée par le sulfate de fer et de cuivre à l'état saturé :

argiles	teneur en eau optimale	contrainte de compression (opt)	contrainte de compression (sat)
argile rouge	15,08	3.709	2.128
argile jaune	13,6	3.283	2.315
argile grise	6,74	0	0.999

Tableau V.6: résistance mécanique des argiles + FeSO₄ traitées par la chaleur (état saturé).

CHAPITRE V : Traitement des Argiles par la Chaleur

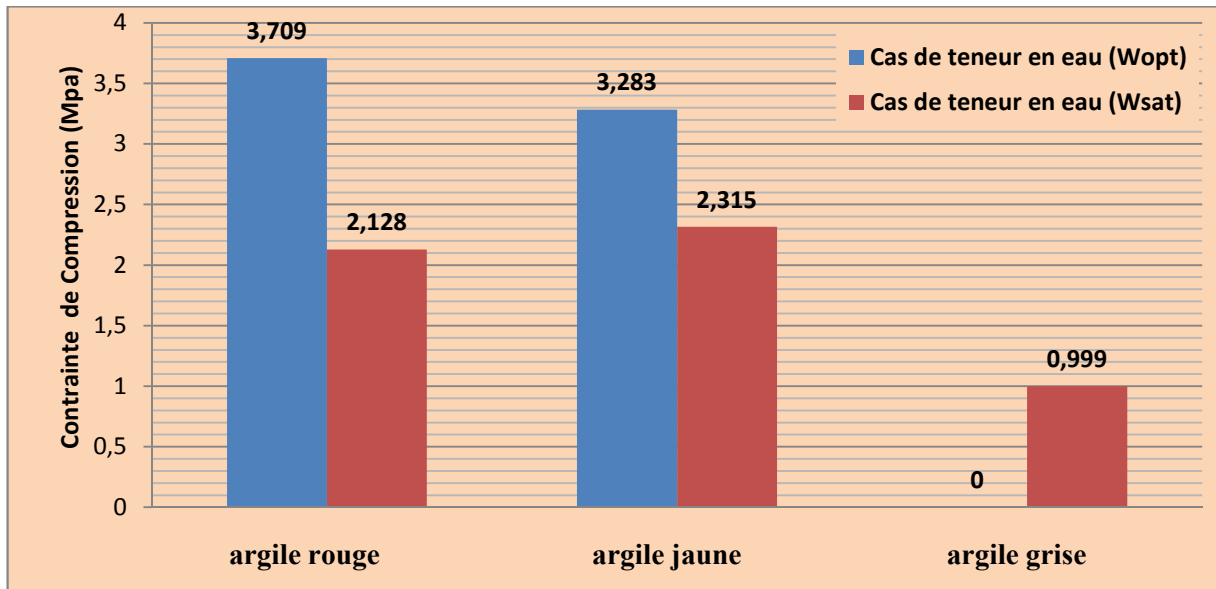


Figure V.17: Résistance mécanique des argiles+FeSO₄ traitées à la chaleur (état saturé).

argiles	teneur en eau optimale	contrainte de compression (opt)	contrainte de compression (sat)
argile rouge	15,08	5.188	0.94
argile jaune	13,6	4.468	2.934
argile grise	6,74	0.747	0.657

Tableau V.7: résistance mécanique des argiles +CuSO₄ traitées par la chaleur (état saturé).

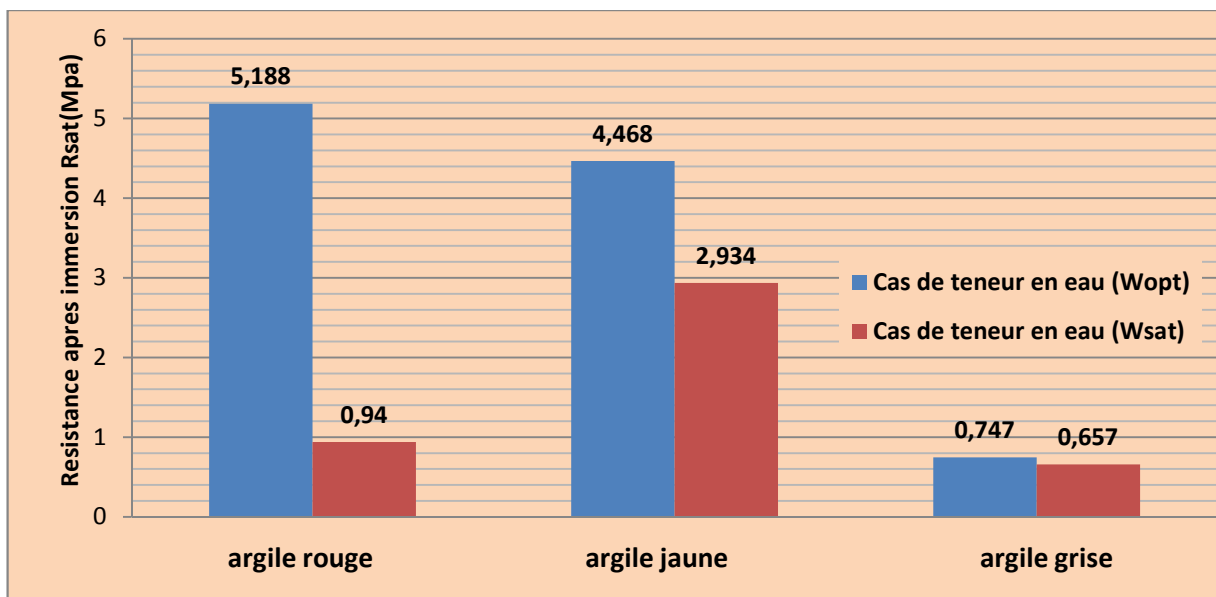


Figure V.18: Résistance mécanique des argiles+CuSO₄ traitées à la chaleur (état saturé).

V.3.2.4- Le coefficient de ramollissement (Kram)

	Coefficient de ramollissement	
	Wop	Wsat
argiles + Fe		
argile rouge+Fe	0.75	0.68
argile jaune+ Fe	0.78	1.56
argile grise+ Fe	0.00	1.09

Tableau V.8 : Coefficient de ramollissement des argiles traité par le sulfate de cuivre.

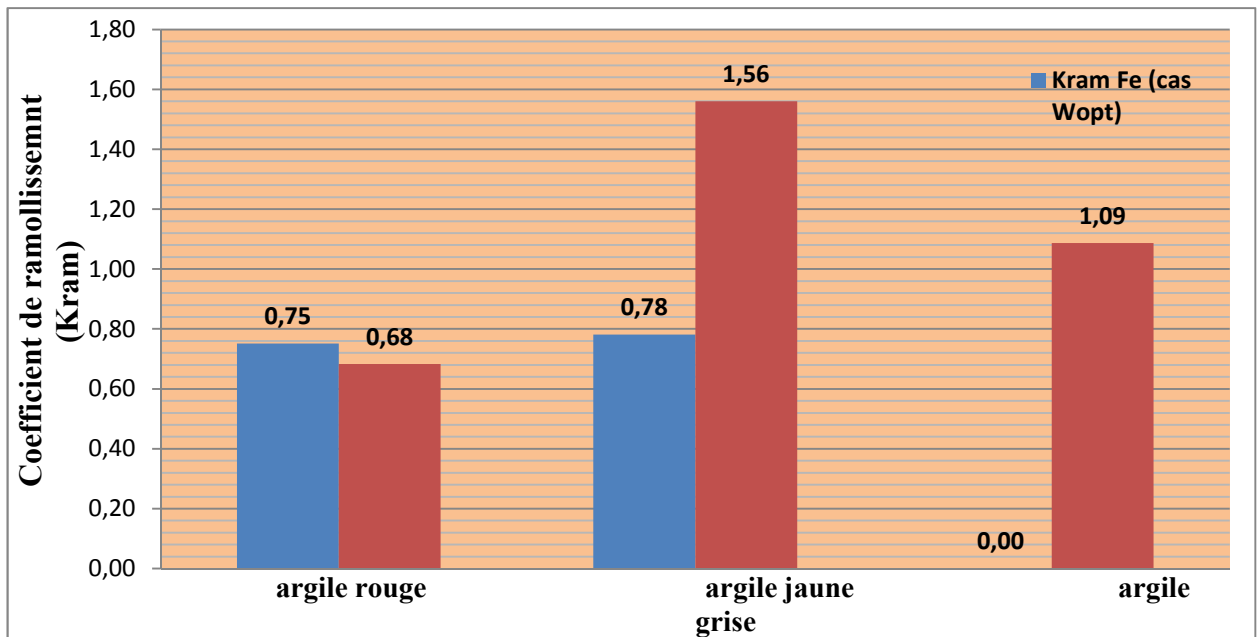


Figure V.19: Coefficient de ramollissement des argiles traité par le sulfate de Fer.

	coefficient de ramollissement	
	Wop	Wsat
argiles + Cu		
argile rouge+ Cu	1.22	0.51
argile jaune+ Cu	0.74	0.87
argile grise+ Cu	0.24	0.99

Tableau V.9 : Coefficient de ramollissement des argiles traitées par le sulfate de cuivre.

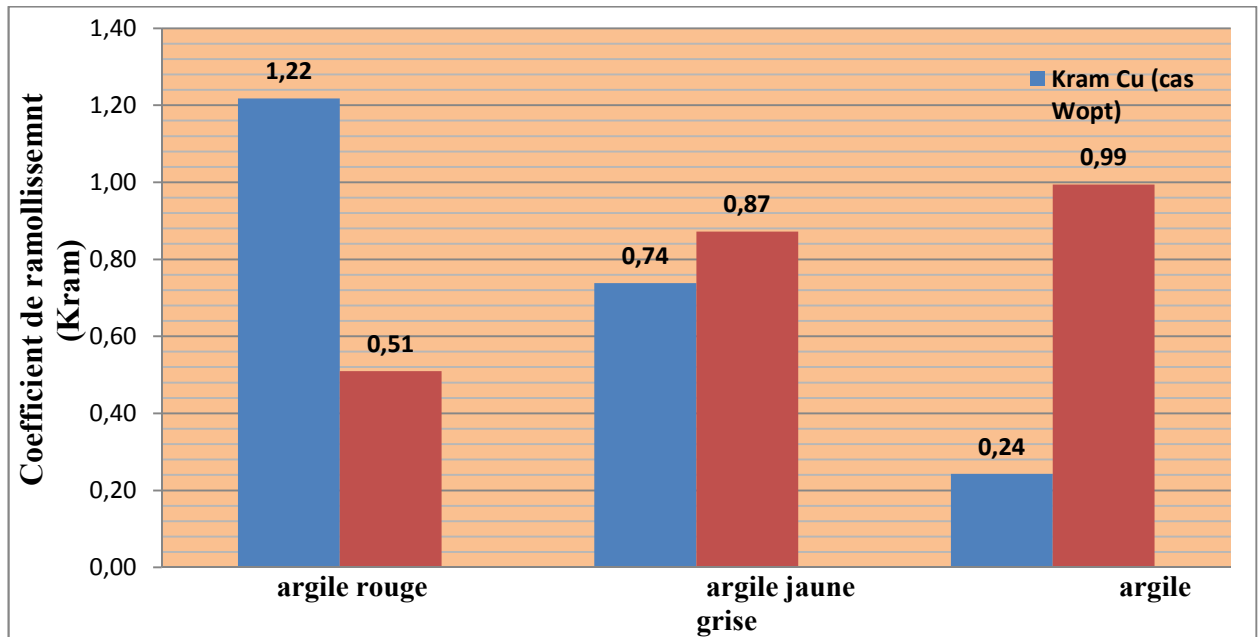


Figure V.20: Coefficient de ramollissement des argiles traité par le sulfate de Cu.

On constate d'après les résultats obtenus que la résistance mécanique des argiles a légèrement augmenté dans les cas suivants :

- ✓ Argile rouge :
 - l'ajout du sulfate de fer en teneur en eau égale à W_{op} et à l'état sec.
 - l'ajout du sulfate de cuivre en teneur en sulfate égale à W_{op} et à l'état de saturation.
- ✓ Argile grise :
 - l'ajout du sulfate de fer et de cuivre en teneur en sulfate égale à W_{op} et en teneur en sulfate égale à W_{sat} à l'état sec.

L'ajout de sulfate à l'argile jaune n'a pas amélioré sa résistance mécanique.

Plus un sol est fin, plus la surface spécifique des grains est grande et plus l'eau, molécule polarisée, a un rôle important en étant à l'origine de forces d'attraction électrique entre les grains. L'eau adsorbée est attirée par polarité par les particules d'argiles. Elle constitue une fine pellicule qui entoure le grain, et qui peut être éliminée totalement, seulement par un chauffage très intense (200 à 300°). Cette eau, très visqueuse, joue le rôle de lubrifiant des grains.

La stabilisation à chaux est très efficace pour les argiles rouge et jaune car le coefficient de ramollissement est très supérieur à 0,8.

V.4- Conclusion

L'expérience a montré qu'à cause des impuretés des argiles, ces dernières ne peuvent pas être stabilisées à la chaleur. La diversité des inclusions nuisibles susceptibles d'être contenue dans les roches argileuses incitent donc à la rechercher ou à prouver leur absence, déterminer leurs natures, leurs proportions et leurs formes de présentation afin de se prémunir des problèmes ultérieurs inattendus.

L'avantage principal de ce traitement est dû aux hautes températures qui changent d'une façon irréversible certains minéraux argileux en des matériaux moins sensibles à l'eau.

Le chauffage d'un sol peut provoquer des modifications notables dans ses propriétés qui font augmenter les caractéristiques mécaniques d'un matériau et améliore considérablement la tenue à l'eau.

C'est pour des températures supérieures à 800°C que la stabilisation par la chaleur est efficace car elles changent d'une façon irréversible certains minéraux argileux en des matériaux moins sensibles à l'eau. A 800°C ou 1000°C, certaines argiles commencent à se transformer en briques.

Bien que la stabilisation thermique paraisse au premier abord très séduisante, elle présente plusieurs particularités propres qui sont indésirables et qui ont sérieusement limité son emploi.

L'inconvénient majeur est le prix qui est rarement compétitif avec celui des autres techniques.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail expérimental de stabilisation des sols nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ L'ajout du Ciment Portland conjointement avec la chaux aide à augmenter les propriétés mécaniques du sol traité. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile tel que les sables et moins de silice et d'alumine, ont besoin de cet apport en ciment.
- ❖ Le traitement des sols sableux par la chaux vive ou par l'Argile donne de bons résultats. Le traitement par l'argile en place évite le transport et valorise les matériaux locaux, ce qui permet de stabiliser des sols à des coûts très intéressants avant la mise en place des couches superficielles des routes.
- ❖ Le grand intérêt de la stabilisation des argiles à chaud ainsi effectuée, réside dans le fait que les produits obtenus sont stables à l'eau et que le gain de résistance obtenu est irréversible. Il ressort de tout cela que :
 - La connaissance minéralogique des argiles permet de prévoir et d'expliquer le comportement d'une argile au traitement thermique.
 - Le traitement thermique des sols Argileux ; le chauffage des argiles est un traitement très efficace pour les sols fin car la stabilisation à la chaleur améliore la résistance mécanique et la tenue à l'eau.
- ❖ Les minéraux d'argiles possèdent des ions négatifs (anions) qui les rendent susceptibles d'attirer et de s'unirent aux cations (Fe^{++} , Cu^{++} , Na^+ , Ca^{++} , ou K^+) présentent dans l'eau. Par cette réaction les particules fines se retrouvent donc entourées d'une pellicule d'eau et augmente la résistance mécaniques des argiles après traitement à la chaleur.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Conclusion Générale et Perspectives

Comme perspective de cette étude, nous envisageons d'élargir le plan expérimental de la stabilisation des sables par l'utilisation d'autres argiles ayant une composition minéralogique et chimique différentes que celles utilisées.

Appliquer les essais de stabilisation du sable sur le chantier et comparer les résultats obtenus à ceux du laboratoire.

Reprendre l'essai de stabilisation des sables par le ciment et la chaux en commençant par la chaux puis on rajoute le ciment et faire une étude comparative entre les deux modes d'exécution.

Bibliographie

Babasaki .R, Terashi .M, Suzuki .T, Maekawa .A, Kawamura .M, and Fukazawa .E, (1996): “ *Japanese Geotechnical Society Technical Committee Report - Factors influencing the strength of improved soil, Grouting and Deep Mixing*”; 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Grouting and Deep Mixing, Tokyo, 913-918.

Belmedrek Sonia (2006) : « *Granulométrie et minéraux lourds des ables dunaires et de plage des secteurs de Oued Zhou et de Béni Bélaïd (Jijel, Algérie nord orientale)*». Mémoire de Magister en géologie, option : Géologie des substances utiles ; université de Constantine, faculté de science de la terre. pp 115.

Boualba Abdellah (2008):« Caractérisation des Argile de bordj Omar Driss-Illizi » ; Projet de fin d'étude d'Ingénieur d'état en travaux public ; Ecole Nationale des Travaux Publics de Kouba (algérie) ; pp 114.

Bultel .F, (2001) : “*Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels*”, Thèse docteur, ENPC, 298 pages.

CAILLERE, SIMONNE, (1982) : « *Minéralogie des argiles.1 structures et propriétés physicochimiques* », Paris, Masson.

Chen .F.H, (1988): “*Foundation on Expansive Soils*”, Elsevier Scientific Publishing Company INC., New York, USA.

COUSSY, Olivier DIR (2002) : « *Mécanique des sols non saturés* ». Paris, *Hermes sciences publication* ».

CROISÉ.R: « *TRAITEMENT DES SOLS AUX LIANTS HYDRAULIQUES* » ; Ingénieur Principal des Eaux et Forêts, chargé de cours à l'Ecole Forestière des Barres ; revue forestière française ; pp427.

Bibliographie

DERRICHE¹.Z et LOUAFI².B, (2005) : « *Effet d'un ajout de sable et l'influence de sa granularité sur les caractéristiques de gonflement d'une argile pure* » 1. Ecole Nationale des Travaux Publics, Kouba, Algérie 2. Faculté de génie Civil, USTHB, Bab Ezzouar, Algérie ; Mai 2005. Pp7.

Département Ingénierie Novembre, (2004) :« *Traitement des sols à la chaux ou au ciment* »; Librairie des Haras nationaux les écuries du Bois 61310 Le PIN Au HARAS.pp3-4.

DJAANI Mabrouka et BENMANSOUR Samah Farah (2011) : « *Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des hydrauliques (Chaux et Ciment* » ; Mémoire de Master II en génie Civil ; Université KASDI MERBAH Ouargla (Algérie), Faculté des Sciences et Technologie et Sciences de la Matière Département d'Hydraulique et de Génie Civil, Laboratoire Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides.

Fabien Szymkiewicz, (2011) : « *Evaluation des propriétés mécaniques d'un sol traité au Ciment* » ; Thèse de Doctorat en Géotechnique, Université de Paris-Est, 2011. France.04 Octobre 2011; pp245.

Fatima Zohra AZZOUZ, (2006): « *Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflante de la région de Tlemcen* », Mémoire de magister, spécialité mécanique des sols et géotechnique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen ; pp 267.

Freeah .F, (2006): “*Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations superficielles*”, Thèse présentée pour obtenir le diplôme de magister en Génie Civil, Université de Batna (Algérie).

Guide du Sol : « *L'argile et Lamotte* » ; ENESAD - Unité Informatique Pédagogique Lucie Pasquier.

Bibliographie

GHEDDACHE HORA, (2012): « *Stabilisation des Sols à la Chaux et à Chaud* » ; Mémoire de Master II Académique en génie Civil, option Géotechnique et environnement ; Université de mouloud Maameri de Tizi-Ouzou ; pp 159.

GLEN LÉGÈRE, (2001): « *Étude Technico-Économique de la Stabilisation à la Chaux des Sols Argileux en Voirie Forestière* » ; Mémoire de 21 crédits présenté a l'école de technologie supérieure ; Université du Québec; pp126.

Jean-Pierre MAGNAN : « *Description, identification et classification des sols* » ; Ingénieur en chef des Ponts et chaussées Directeur technique au Laboratoire central des ponts et chaussées, Professeur de mécanique des sols et des roches à l'École nationale des ponts et chaussées ; pp17.

Kenai .S; Bahar .R ; benazzoug .M (2003): “Experimental analysis of effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil”; Laboratoire géotechnique et environnement de l’université Mouloud Maameri (Tizi-Ouzou) Algérie; p1- p9.

Kitazume. M, (2005): “*State of Practice Report: field and laboratory investigation, properties of binders and stabilised soils*”; Deep Mixing '05, Stockholm, 660-684.

Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, MacLeod et McGrath, (2004): « Dosage et contrôle des mélanges de béton », 7^{ème} édition page 22.

Mahmoud EL GONNOUNI, (2010) : « *essais d'Identification de Classification* », Ingénieur en génie Civil à l'Université d'AIN Chock CASABLANCA HASSAN II Faculté Des Sciences Royaume du Maroc, Octobre 2010 ; pp1-7.

Mellal Fatima (2009) : « *Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte; Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana* » ; Thèse de magister en Génie civil Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef (algérie), Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, p1- p8.

Bibliographie

Mc Graw-Hillciment, (1962): “stabilisation des sols”, book company, Ink, 1962.

Nelson .J. D, Miller .D. J, (1992), “Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering”, Edition John Wiley et Sons, INC.

Niina .A, Saitoh .S, Babasaki .R, Tsutsumi. I, and Kawasaki .T, (1977): “Study on DMM using cement hardening agent”, (Part 1) 12th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1325-1328.

Norme AFNOR : « granulométrie », NF P 94-056 LTPS

Norme AFNOR : « limite d’Atterberg », NF P 94-051 LTPS

Norme AFNOR : « sédimentation », (NF P94-057).

Norme AFNOR : « Analyse chimique », NF P 15-461 et NF P 94-055.

Norme Française, (1994): “*Méthodologie d’étude en laboratoire des matériaux traité aux liants hydrauliques* » ; NF P 98-114-2, novembre 1994.

Rajasekaran .G, (2005):“*Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays*”; Formerly, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore, Singapore 119260.pp27.

SCHÖN (Ch.), (1965): “ *Classification géotechnique des sols basée sur la classification USCS*”; Bulletin de liaison des Laboratoires routiers, n°16, pp. 3-5 à 3-16 nov.-déc. 1965.

Sivapullaiah .P.V, Sridharan .A, et Ramesh .H.N, (2000), “Strength behaviour of lime treated soils in the presence of sulphate”, Canadian geotechnical journal 37.

Bibliographie

Suppakit, Viyanant, Puppala.A. J. C. et Perrin .L, (2001), “Sulfate heaving problems in stabilized soils: observations from a few case studies” Proceeding of 2nd International Conference on Engineering Materials, San Jose, California.

Terashi .M, Okumura .T and Mitsumoto .T, (1977): “*Fundamental properties of lime treated soil*”, (1st report), Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol 16(1), 3-28.

Puppala .A. J, Griffin .J. A, Hoyos .L. R, et Chomtid .S, (2004), “Studies on sulfate-resistant cement stabilization methods to address sulfate-induced soil heave”, Journal on Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, 130(4).

Unikowski .Z, (1982) : « Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment ». Rapports de recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

Verdeyen .J et Leyder .J.P : « *Code de bonne pratique pour la stabilisation des sols au ciment* » ; recommandation C.R.R. – R 22/60 ; laboratoire et bibliothèque, 21 drève des éleveurs, Sterrebeek, centre de recherches routières Bruxelles ; pp 58.

Youdjari Djonkamla (2010) : « *caractérisation et simulation et simulation numérique du comportement volumétrique de sols argileux gonflants de N’djaména* », Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l’Université Laval dans le cadre du programme de Maîtrise en Génie Civil pour l’obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc); Québec.

Zenkri. A, (2010) : “*Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant application à la région d’In-Aménas*”, Thèse présentée pour obtenir le diplôme de magister en Génie Civil spécialité géotechnique, Université Houari Boumediene.

Zineb BELABBACI, Sidi Mohamed AISSA MAMOUNE, Abdelmalek BEKKOUCHE, (2011) : « Stabilisation d’un sol gonflant par l’ajout de lait de chaux » ; XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

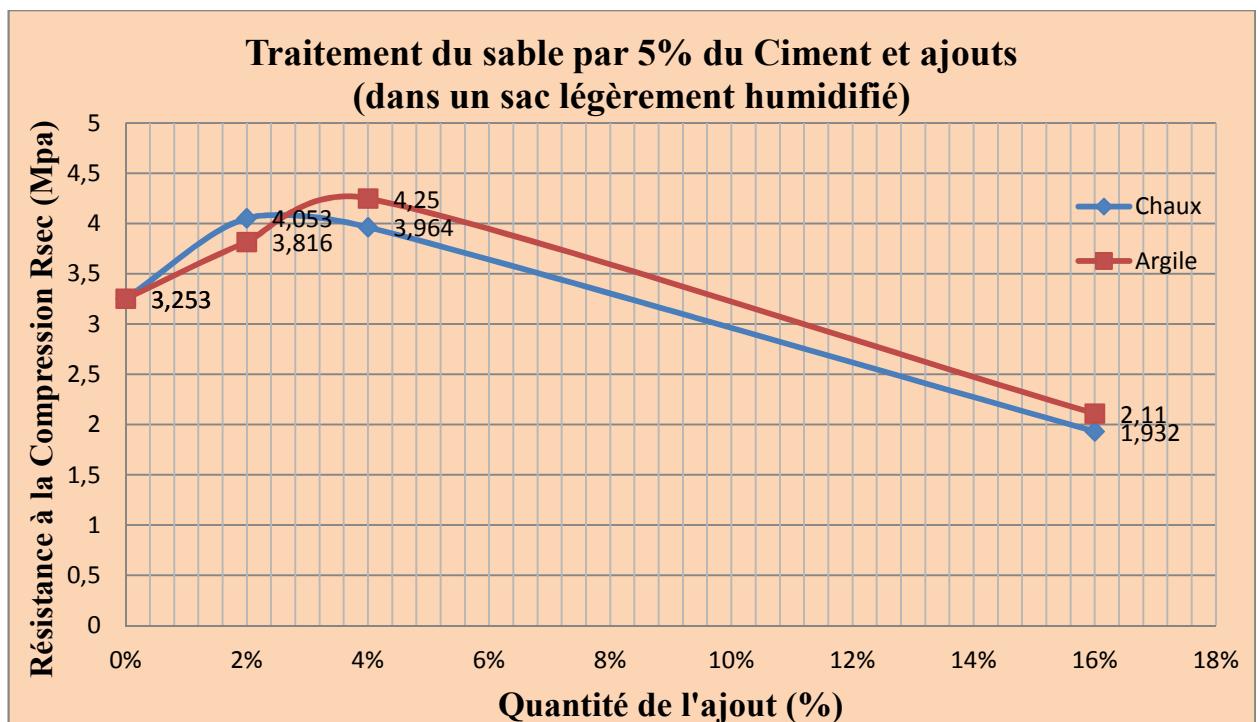
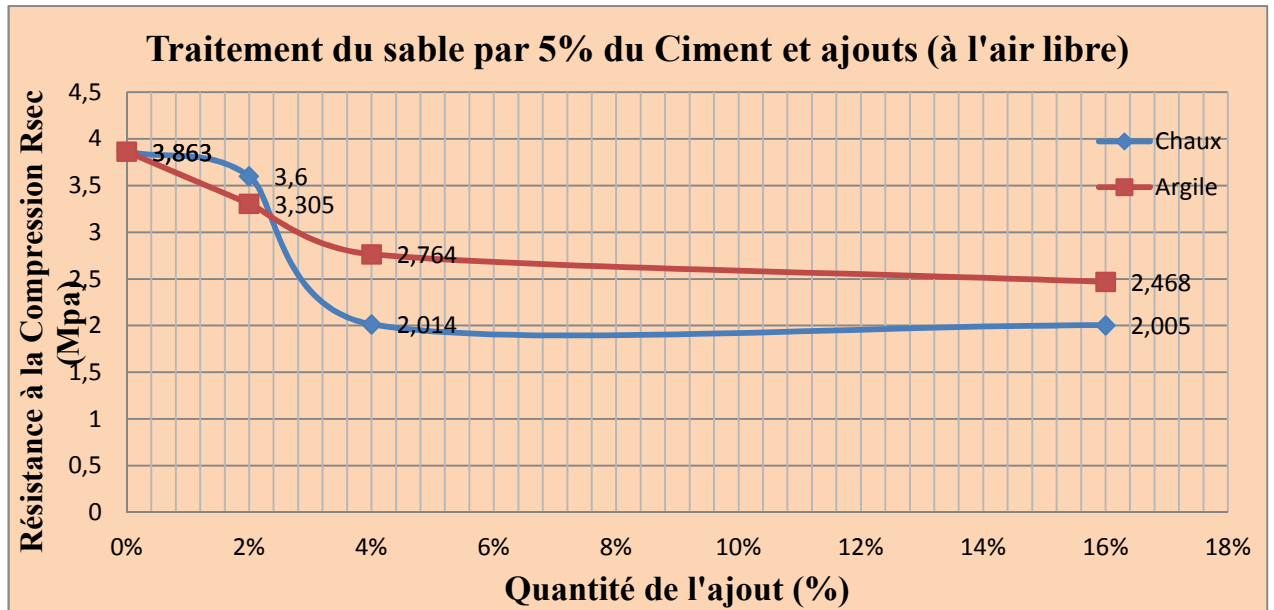
Laboratoire RISAM, faculté de Technologie, Université Aboubekr Belkaïd Tlemcen, BP 230, Algérie. Et Centre Universitaire d’Ain T’émouchent, Algérie. pp 284.

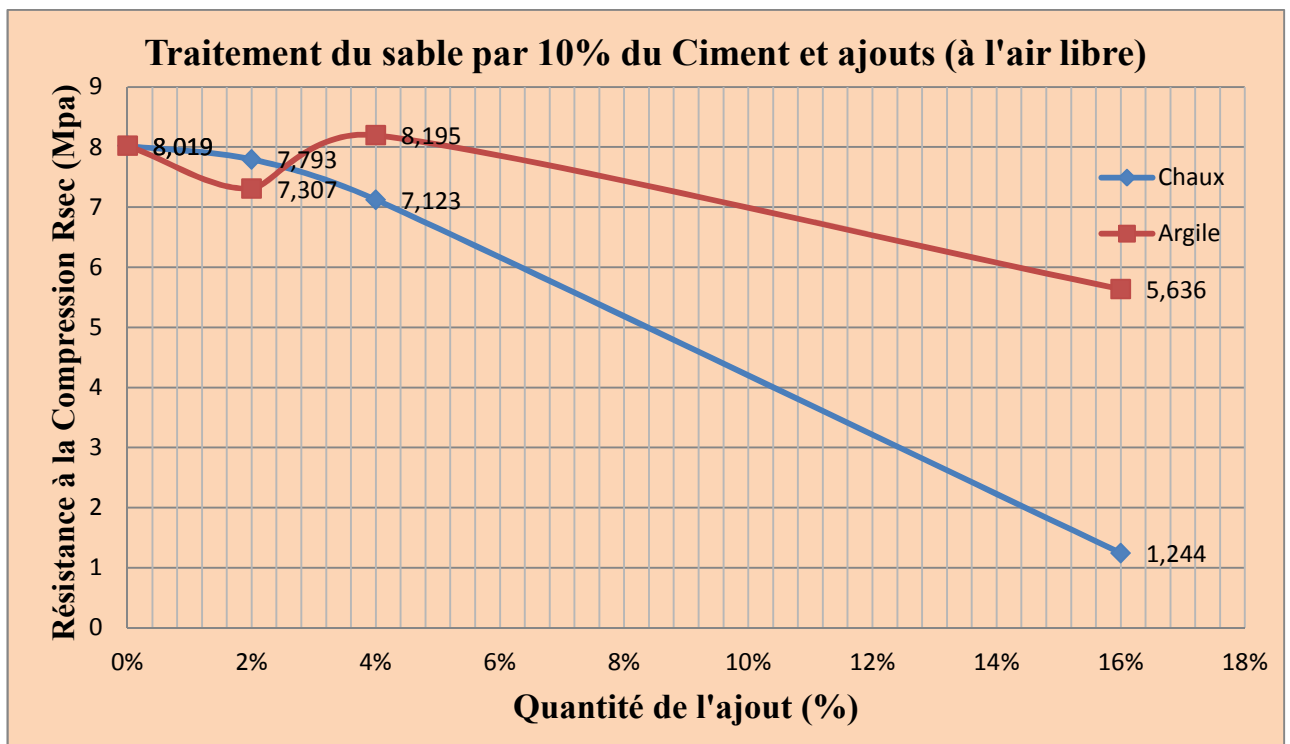
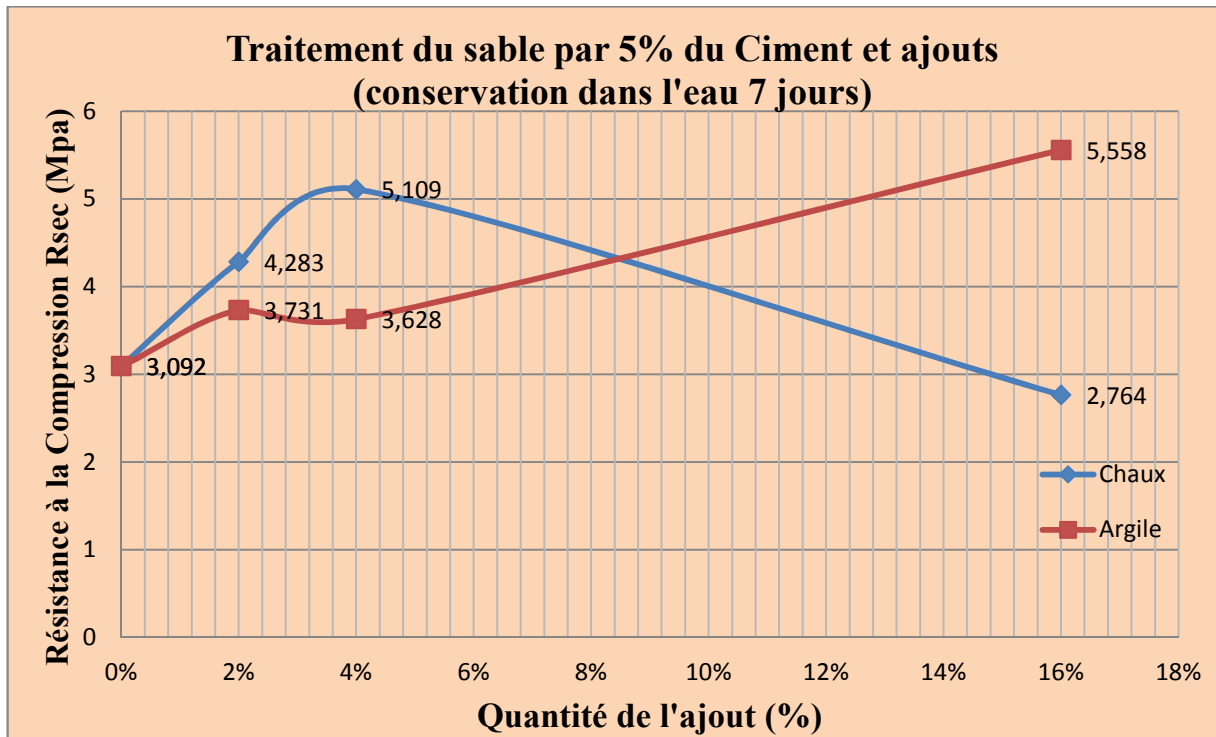
Bibliographie

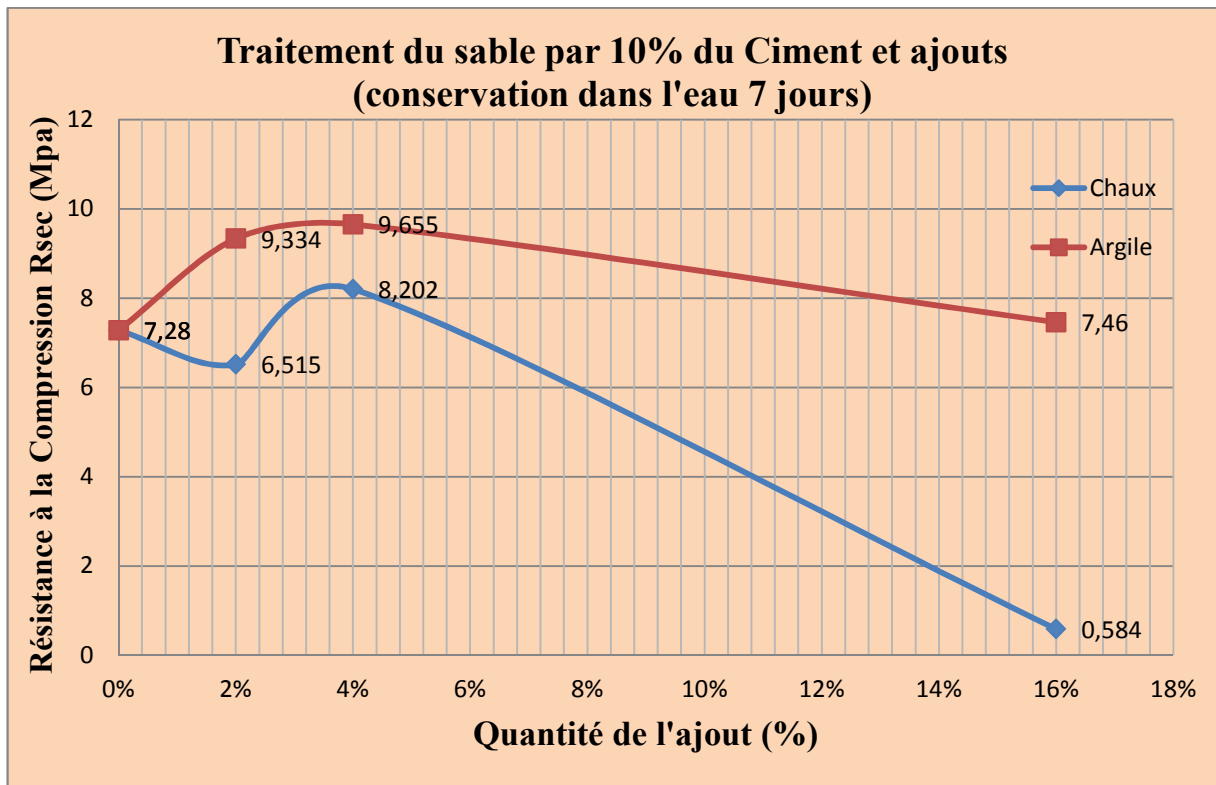
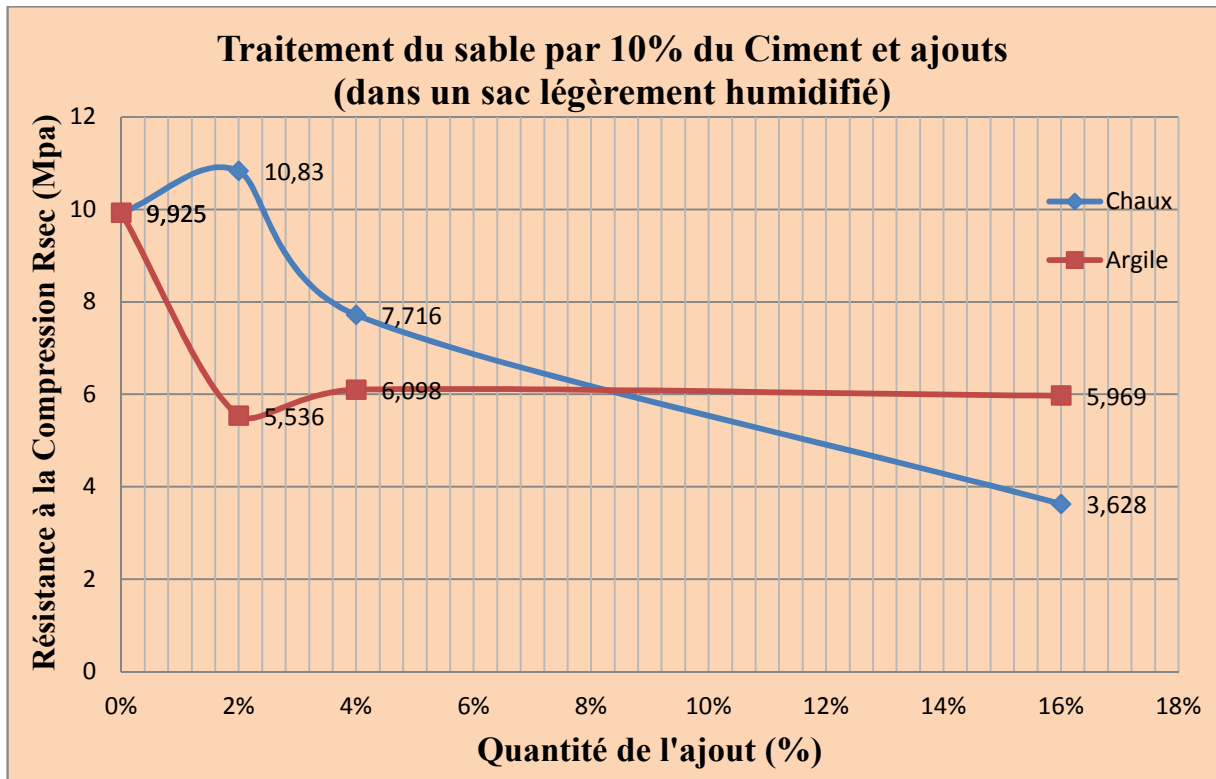
Zouhair ATTIMA¹, Abdelilah DEKAYIR¹, Mohamed Amine Doss BENNANI² et Kamal ELHAMMOUTI³ (2014): « Stabilisation des Sols Argileux par la Chaux » ; 1.Département des sciences de la terre, faculté des sciences, université Moulay Ismail, 11201 Zitoune, Meknès, Maroc. 2. Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes, Meknès. Bd. Saâdyine Q.I. B.P. 5041 AL Bassatine Meknès, Maroc. 3. Département des sciences de la terre, faculté des sciences, université Mohamed 1er, BP 717 60000 Oujda, Maroc. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 ; pp10.

Annexe I:: Courbes de comparaison des résultats de traitement de sable par le ciment-chaux et le ciment-argile

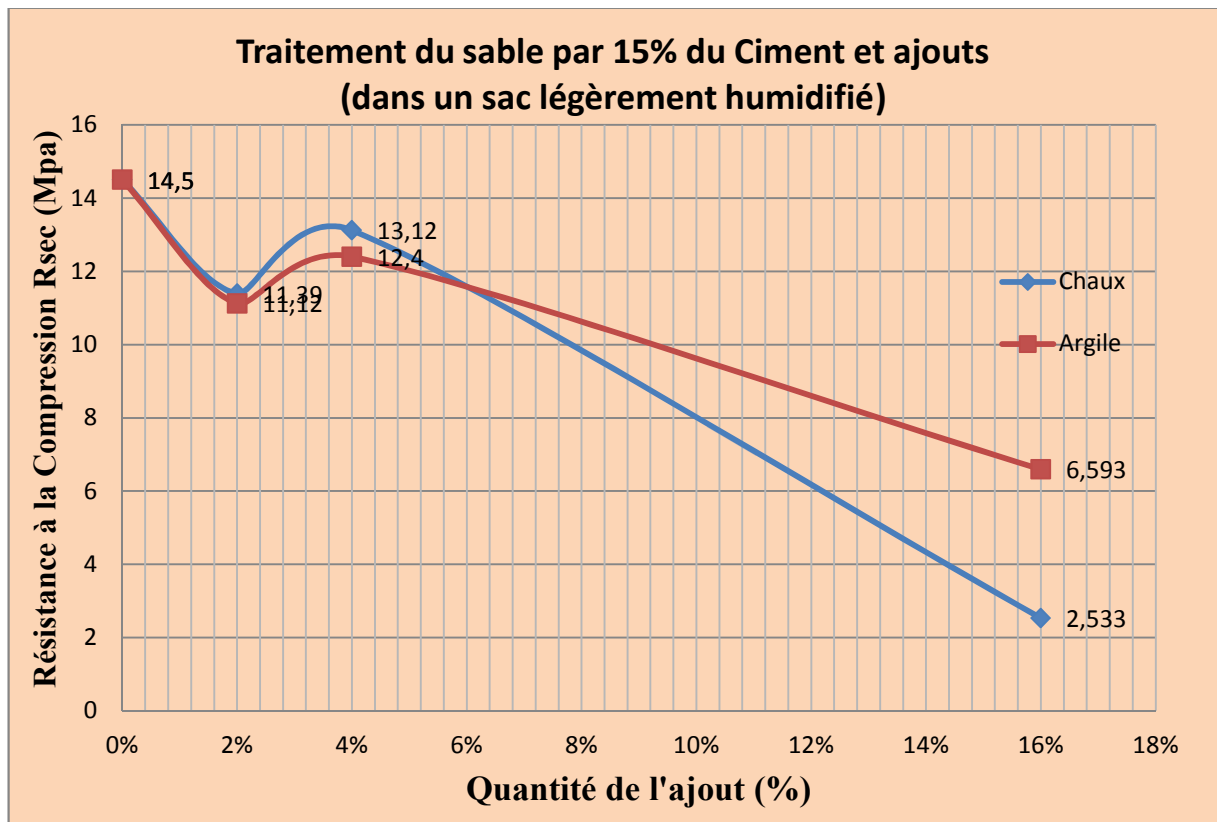
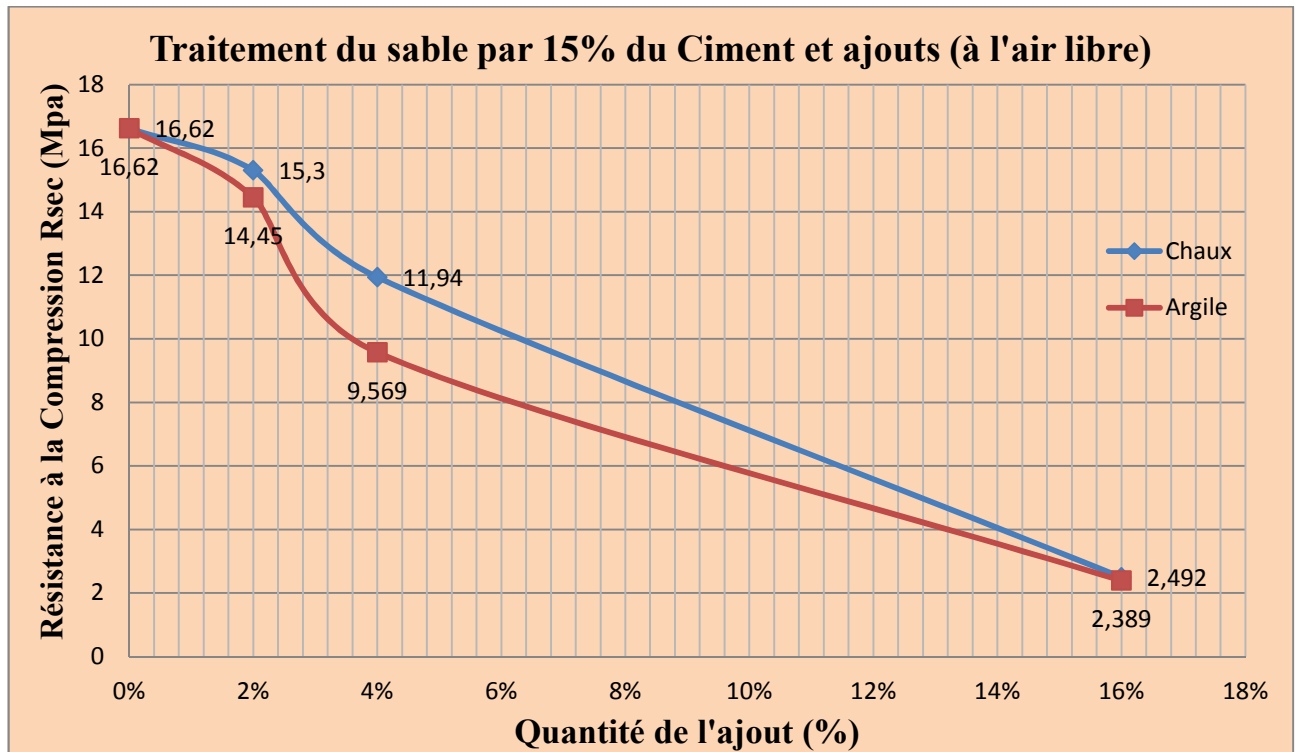
a- A l'état sec

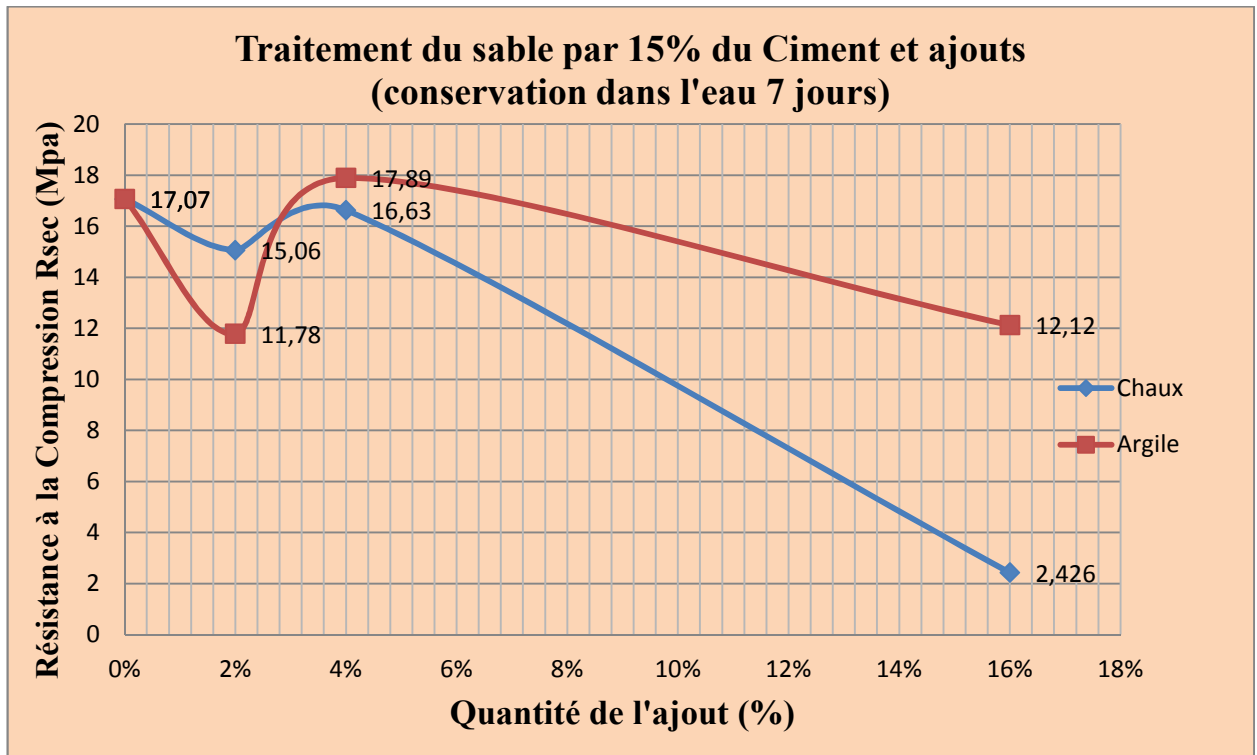




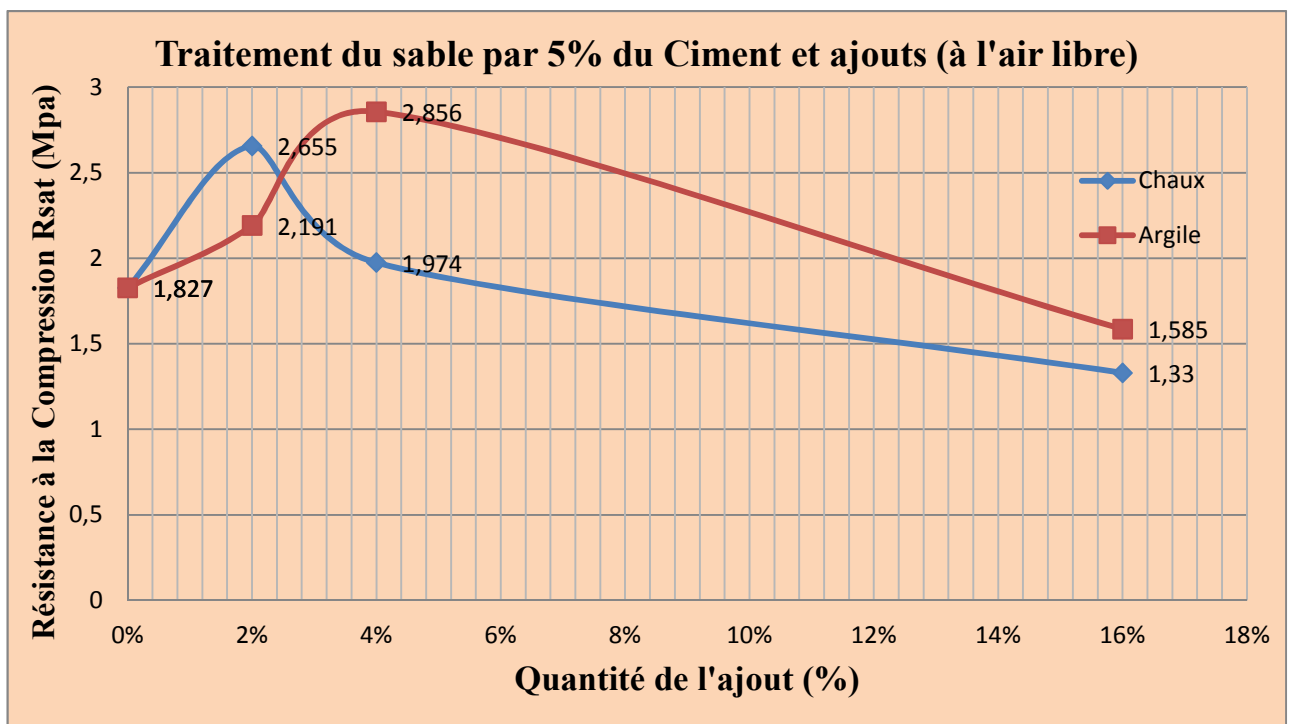


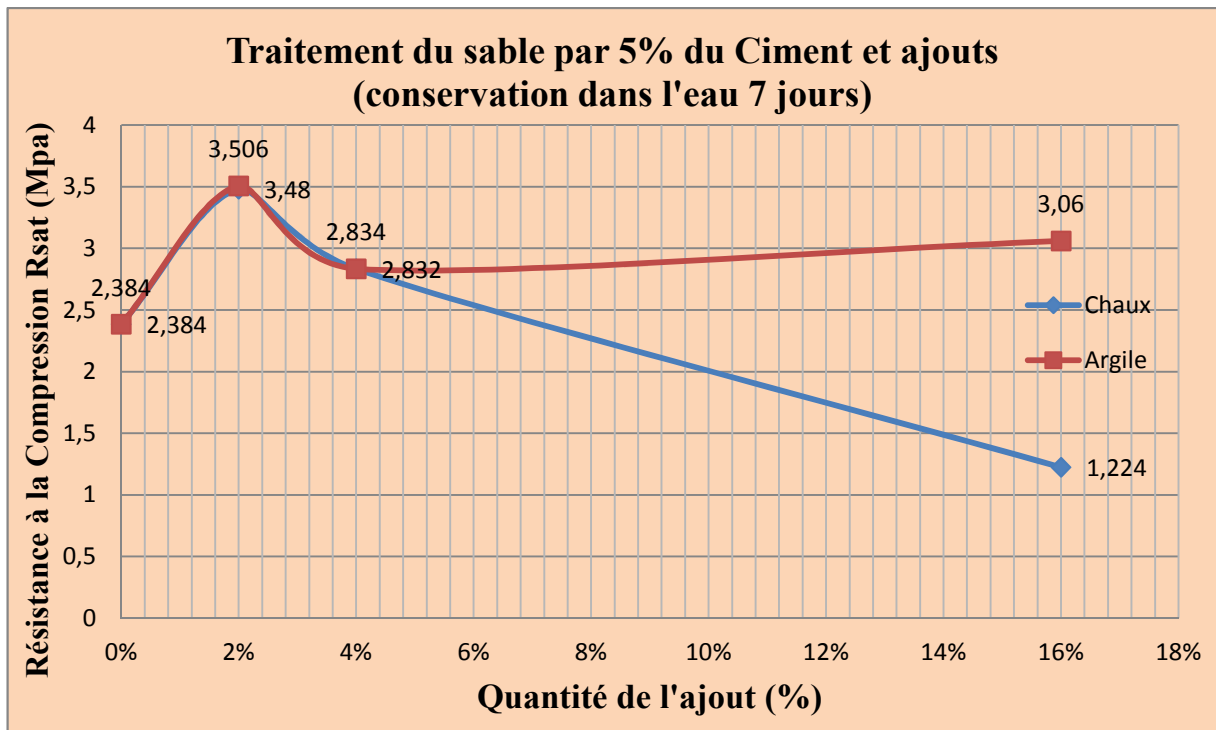
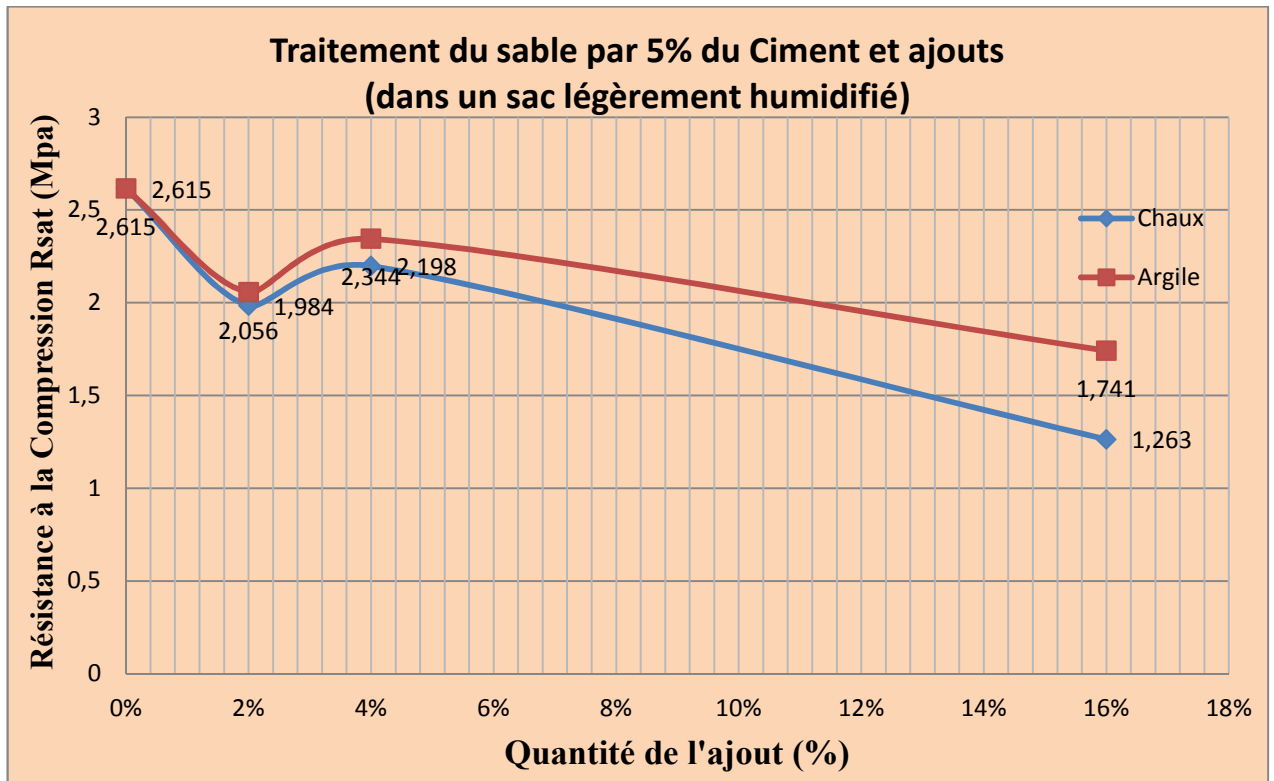
Annexe I

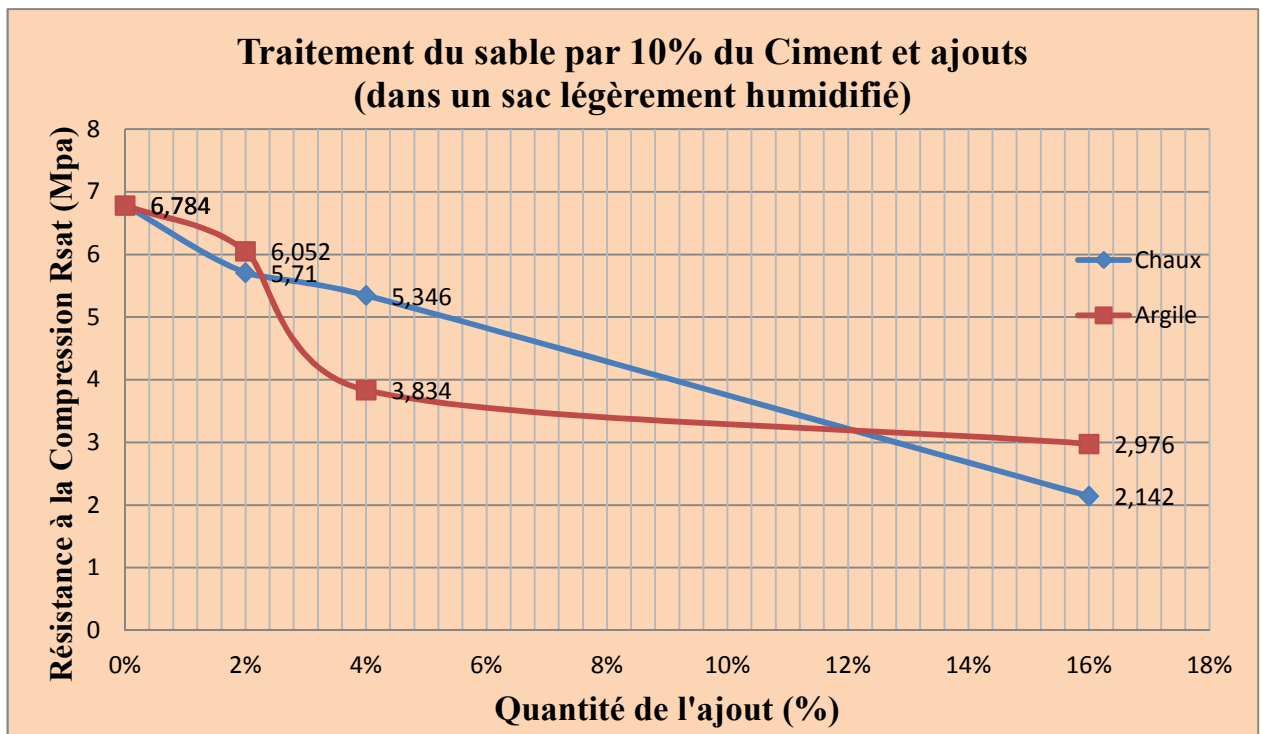
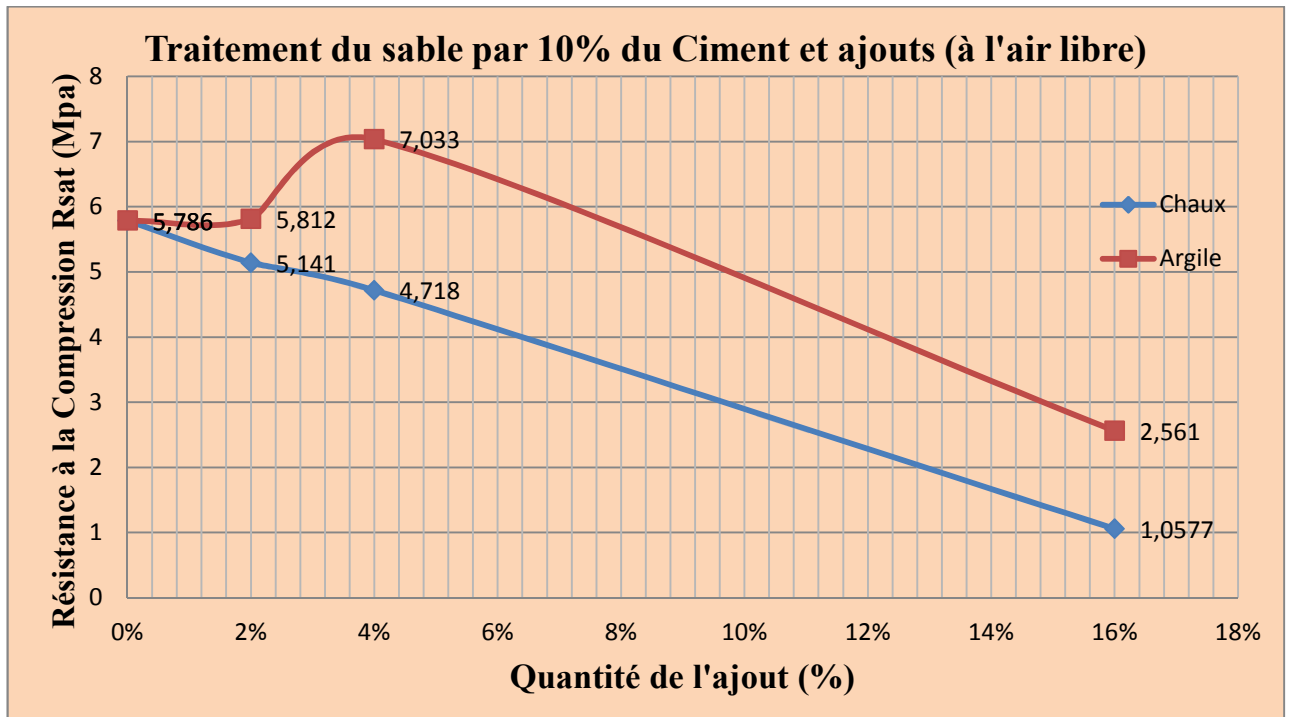


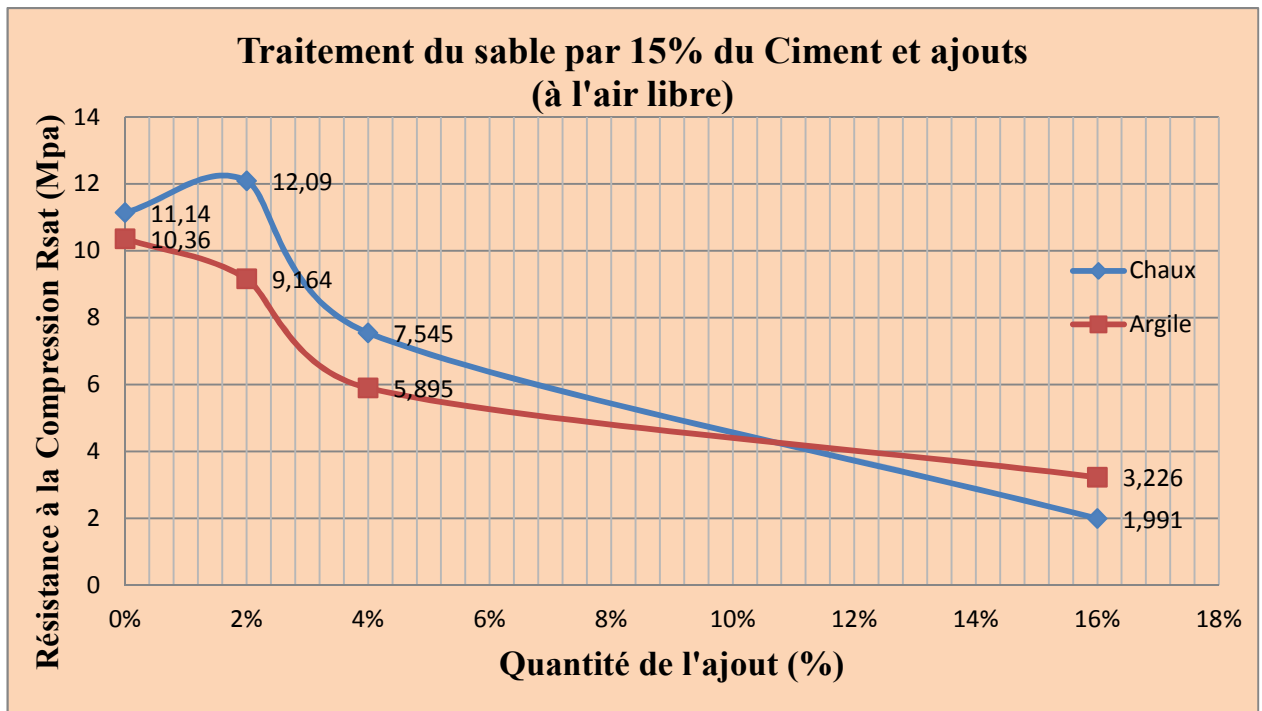
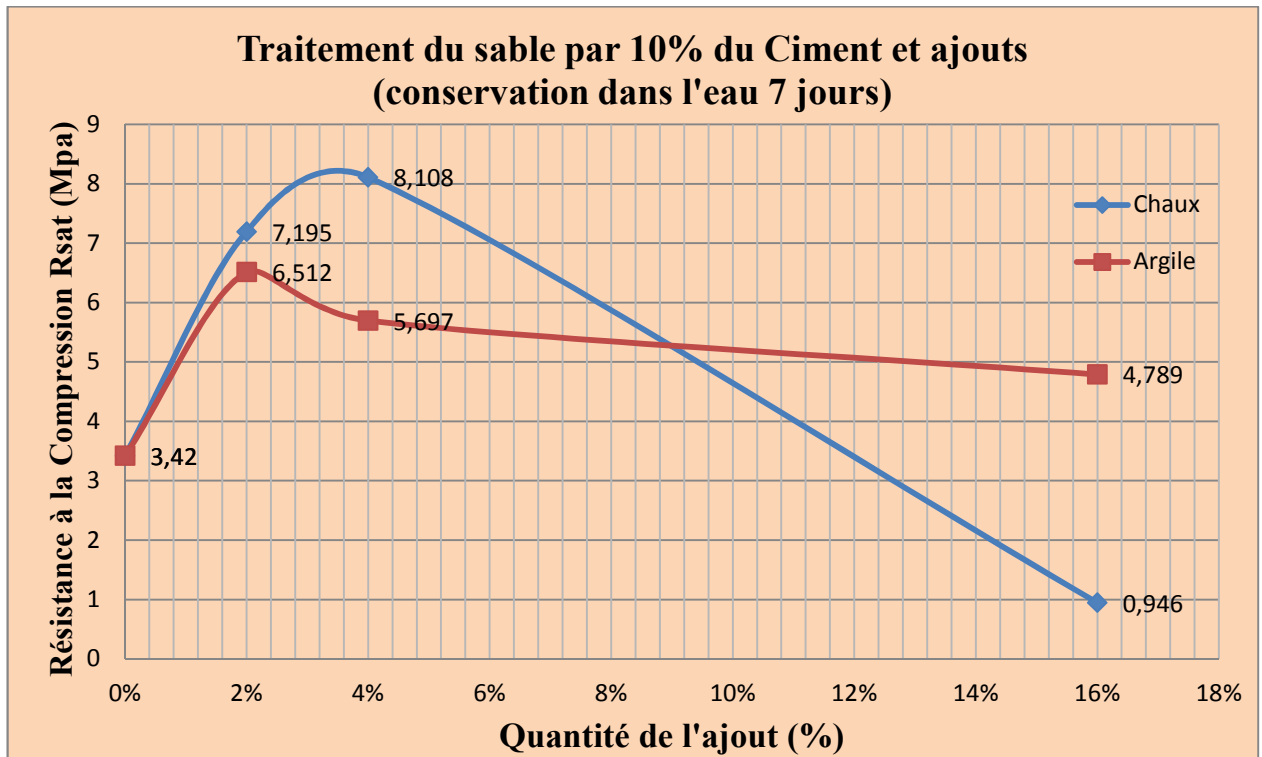


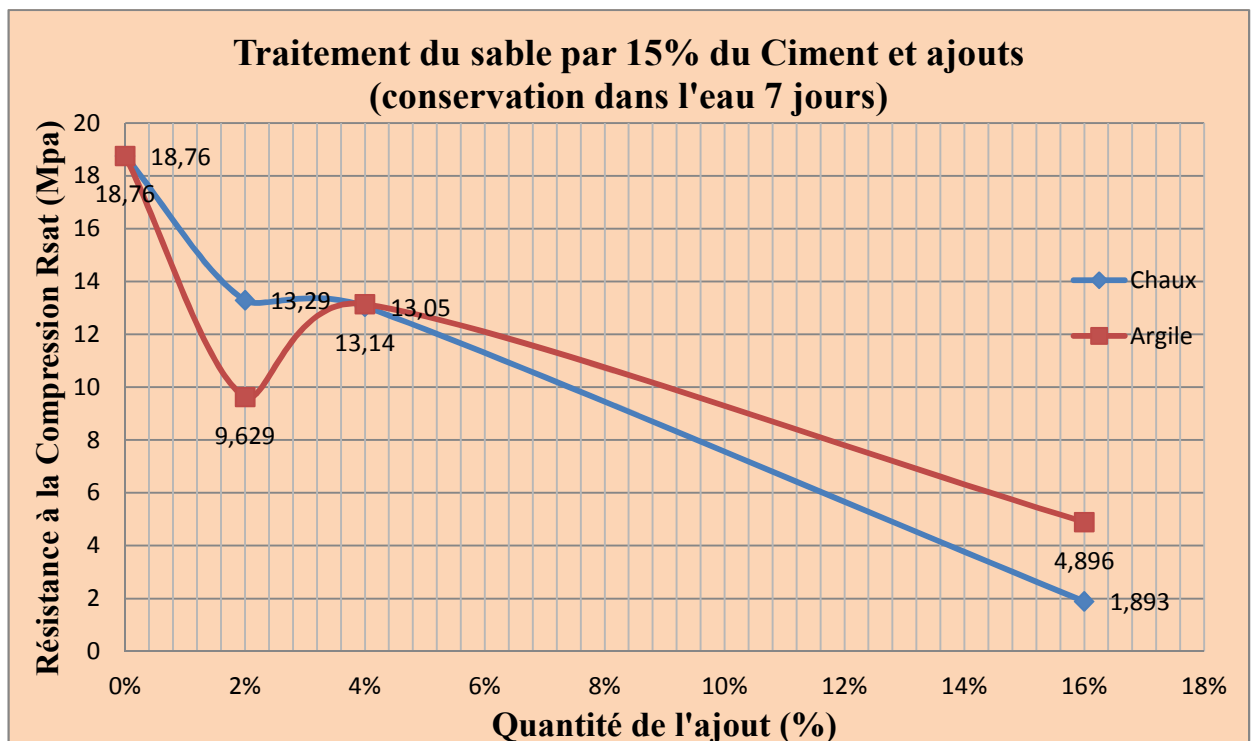
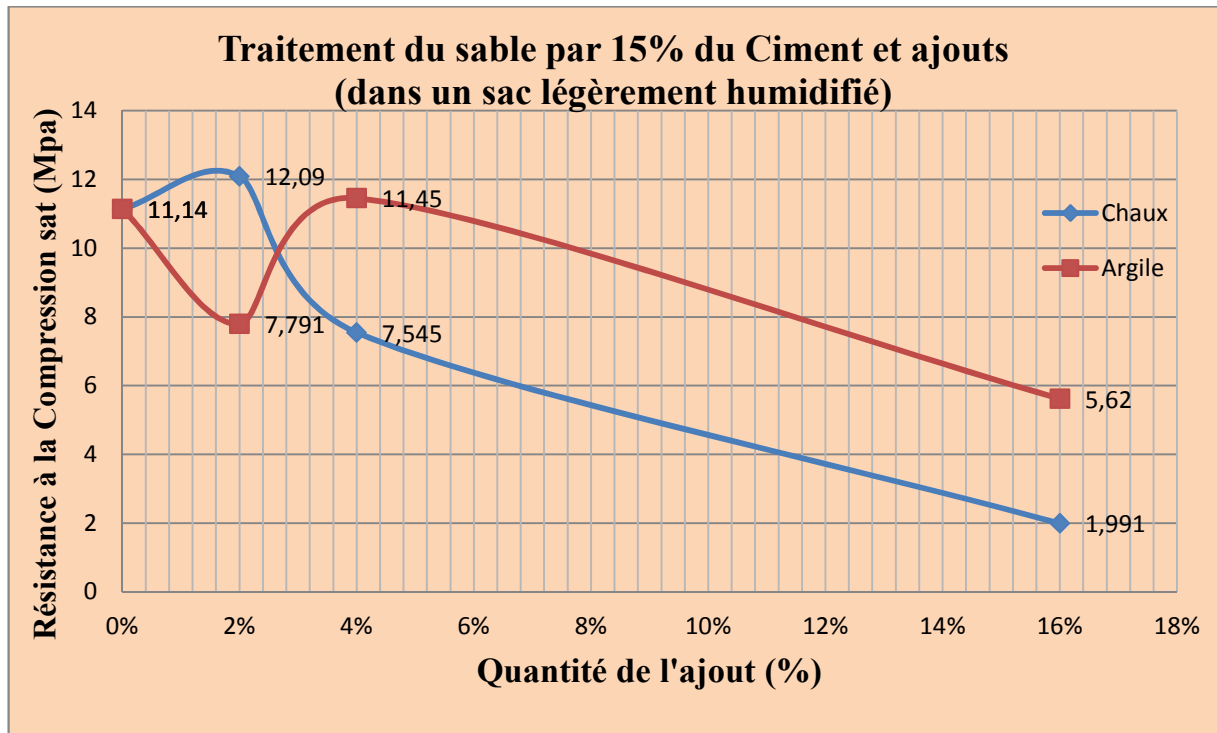
b- A l'état de saturation











Annexe II: les éprouvettes des trois argiles traitées par la chaleur.

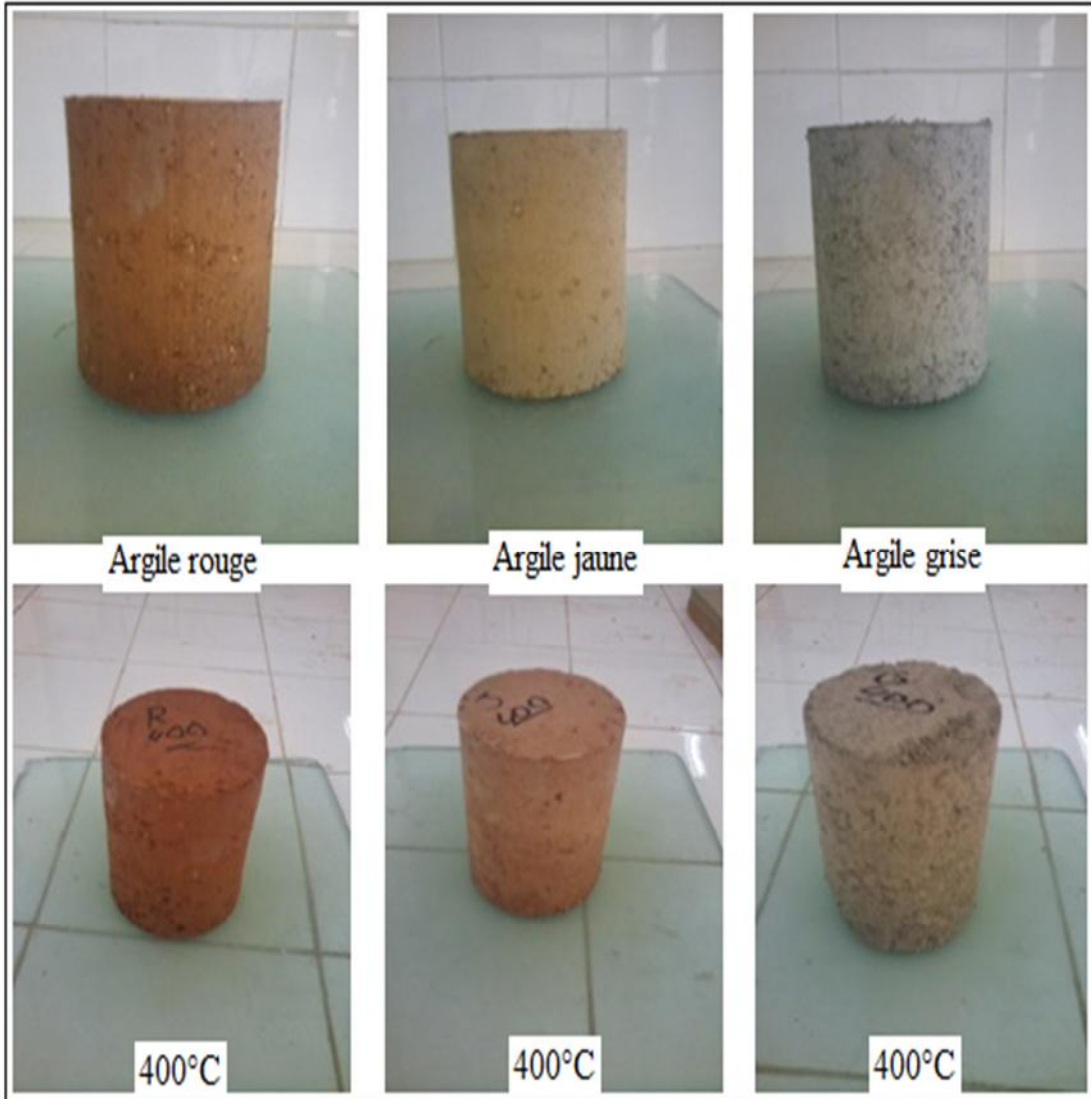


Figure 1: Les éprouvettes d'argile (rouge, jaune et grise) traitées à 400°C.



Figure 2: Les éprouvettes d'argile (rouge, jaune et grise) traitées à 600°C.

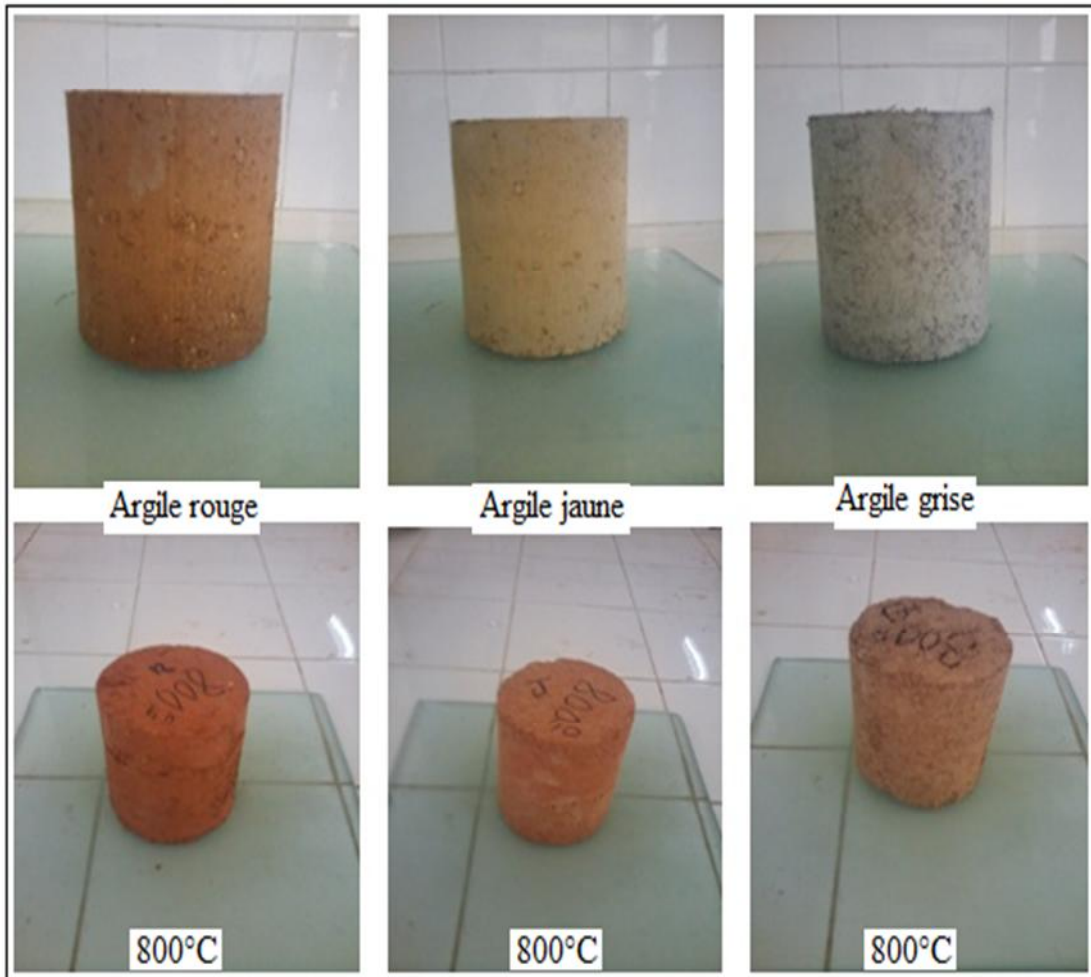


Figure 3: Les éprouvettes d'argile (rouge, jaune et grise) traitées à 800°C.

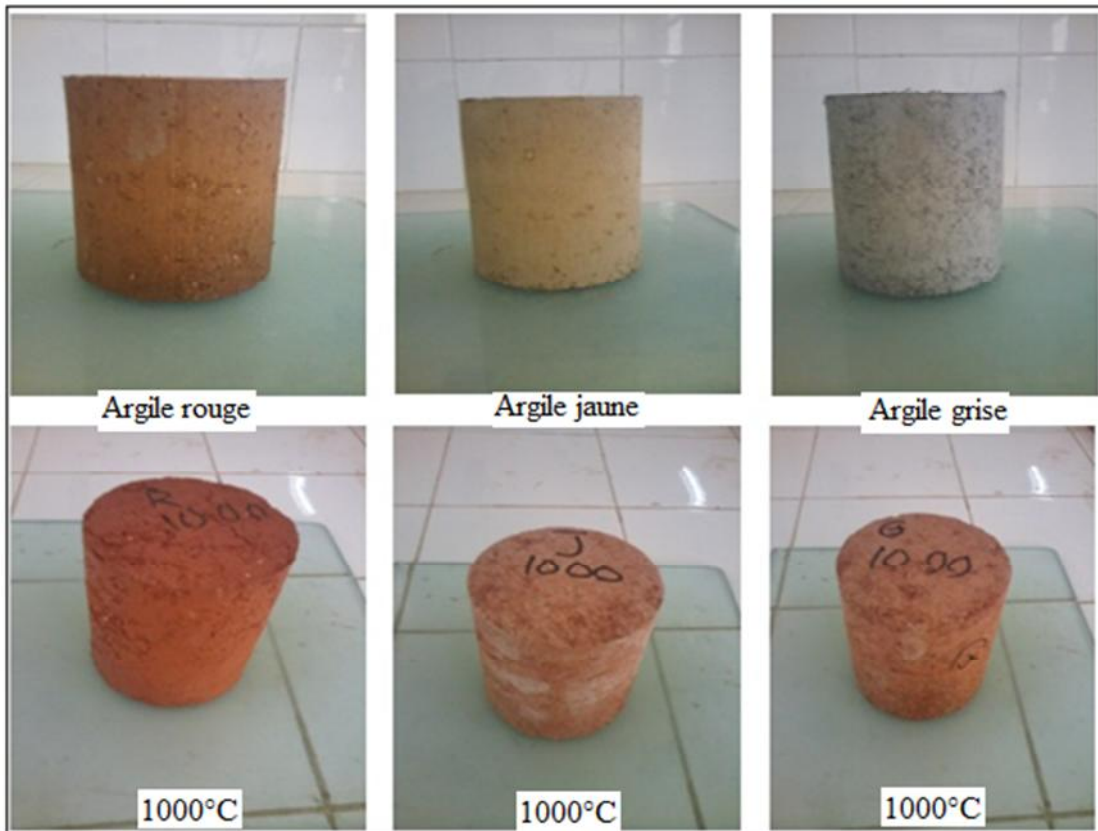


Figure 4: Les éprouvettes d'argile (rouge, jaune et grise) traitées à 1000°C.