

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° :.....



DOMAINE: SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par:

BENMAMMAR Badis

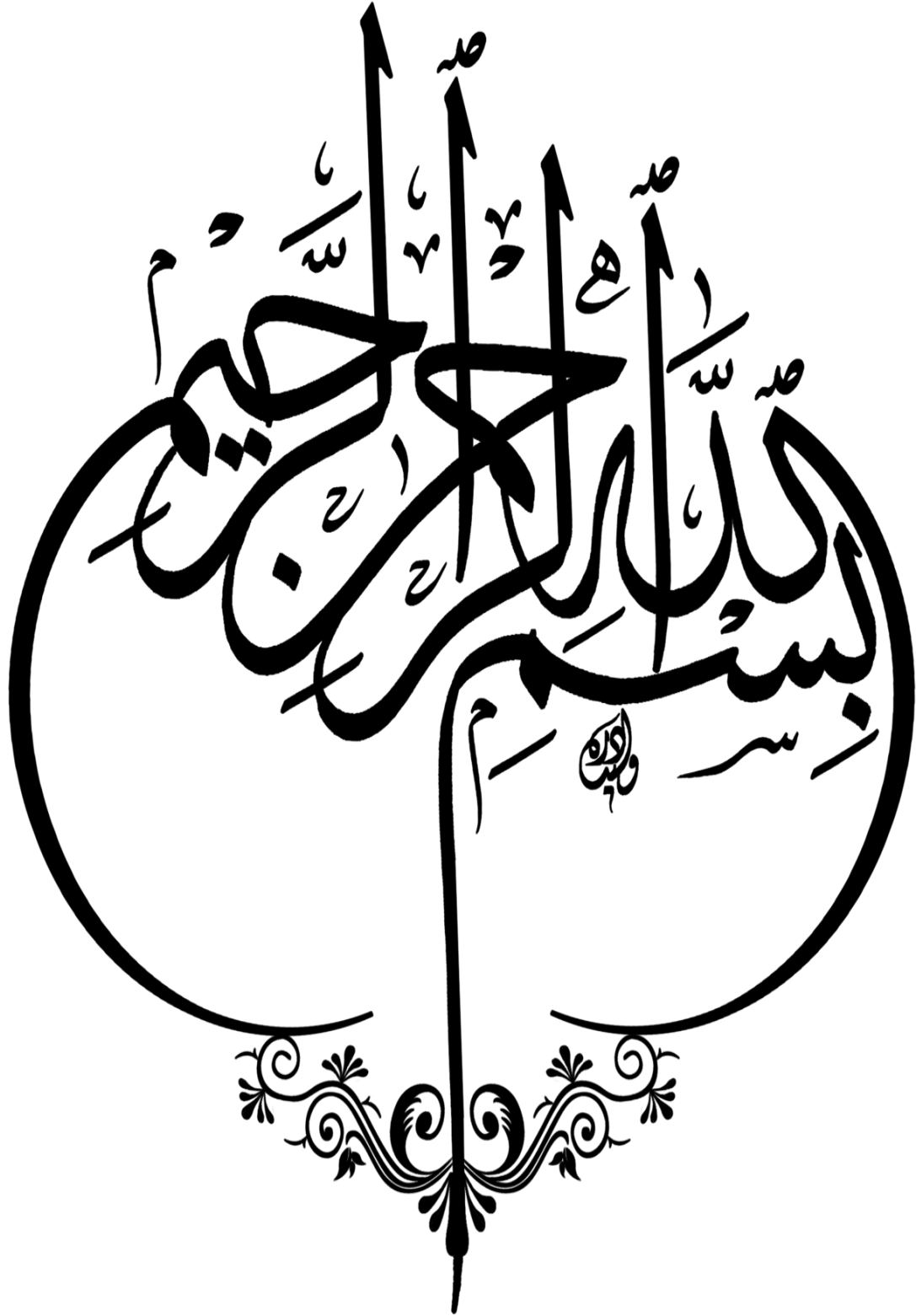
THEME

**Etude Comparative De La Stabilisation
Chimique D'une Argile Expansive**

Proposé et Dirigé par :

- KHEMISSA Mohamed, Professeur
- MAHAMEDI Abdelkrim, M.C.A

Année universitaire : 2022-2023



SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Notation	
Introduction générale	01
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I- Introduction.....	05
II- Les argiles et le gonflement des argiles	05
III- Les techniques de stabilisation	30
IV- Les caractéristiques chimique et physique des liants utilisés.....	35
Chapitre II : Présentation des résultats	
II-1 Introduction.....	38
II-2 Sol témoin (non traité)	38
II-3 Sol traité.....	50
Chapitre III : Comparaison des résultats de stabilisation	
III-1 Introduction.....	76
III-2 Interprétation et comparaison des résultats des essais d'identification	76
III-3 Interprétation et comparaison des résultats des essais mécanique.....	80
Chapitre IV : Conclusion et recommandations	
IV-1 Conclusion	87
IV-2 Recommandations et perspectives	88
Références bibliographiques	90
Annexes	

Remerciements

Toute ma gratitude et remerciements vont à Dieu le tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette thèse. Tout d'abord, je souhaite exprimer ma gratitude envers mes enseignants et encadreurs, Messieurs **MAHAMEDI Abdelkrim** et **KHEMISSA Mohamed**, qui m'ont accordé leur confiance, aide et soutien dans l'élaboration de ce travail.

Je tiens également à remercier le président et les membres de jury pour avoir accepté de consacrer leur temps à évaluer mon travail et pour leurs commentaires constructifs.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes collègues qui ont partagé leurs connaissances et leur expérience avec moi. Leurs idées et leurs discussions ont grandement enrichi mon travail de recherche.

Je voudrais également remercier ma famille et mes amis pour leur soutien inconditionnel tout au long de ce parcours académique. Leur amour, leurs encouragements et leurs encouragements ont été essentiels pour moi.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes anonymes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, que ce soit en fournissant des données, en participant à des entretiens ou en offrant leur expertise. Votre contribution a été précieuse et a enrichi mes recherches.

La réalisation de ce mémoire a été une aventure passionnante et stimulante, et je suis reconnaissant envers tous ceux qui ont contribué à sa réussite. Merci encore pour votre soutien et votre confiance

Je ne saurai oublier d'exprimer mes remerciements à tous les enseignants du département de génie civil, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

BENMAMMAR BADIS

Dédicaces

Je dédie ce travail à:

✠ *A mes chers parents.*

✠ *A ma chère femme*

✠ *A mon cher fils Mohamed Rachid*

✠ *A mes chères sœurs.*

✠ *A mon cher frère.*

✠ *A mes encadreurs Messieurs MAHAMEDI Abdelkrim et
KHEMISSA Mohamed*

✠ *A Tous les enseignants du département de Génie Civil*

✠ *A mes chers frères : BOUBAYA Abdelmadjid, BELMOKHTAR
EL Houssyne , BERRA Ibrahim , BRIKI Abdelhafid , SOUDA
Mohamed et BENSALAH Oussama*

✠ *A tous mes collègues de la promotion 2023*

✠ *A tous ceux qui sont très chers pour moi*

BENMAMMAR BADIS

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001)

Tableau I-2 : Caractéristiques de la structure des principaux minéraux argileux.

Tableau I-3 : Potentiel de gonflement d'après Almeyer (1955)

Tableau I-4 : Potentiel de gonflement d'après Seed, Woodward et Lungreen (1962)

Tableau I-5 : Potentiel de gonflement d'après Ranganatham et Satyanarayana (1965)

Tableau I-6: Potentiel de gonflement d'après Snethen

Tableau I-7: Potentiel de gonflement d'après l'établissement de recherche en bâtiment(1980).

Tableau I-8 : Potentiel de gonflement d'après Ghen (1988).

Tableau I-9 : Potentiel de gonflement d'après Holtz et Gibbs (1956).

Tableau I-10 : Potentiel de gonflement d'après Holtz, Dakshanamurthy et Raman (1973).

Tableau I-11 : Valeurs indicatives pour les sols susceptibles de variation de volume.

Tableau I-12 : Modèles empiriques de calcul du taux de gonflement (ϵ_g) et de la pression de gonflement.

Tableau I-13 : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation.

Chapitre II

Tableau II-1 : Détermination de la teneur en eau et de la masse volumique sèche et humide.

Tableau II.2 : Résultats des essais analyse granulométrique.

Tableau II-3: La moyenne des tamisats à 0.080mm et à 0.002 mm des trois essais de sédimentométrie.

Tableau II-4: Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg.

Tableau II-5: Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche.

Tableau II-6 : Caractéristiques d'identification du sol témoin étudié.

Tableau II-7: Résumé des résultats des essais Proctor normal.

Tableau II-8 : Résultats des essais du C.B.R immédiate

Tableau II-9 : les résultats des essais du C.B.R après imbibition

Tableau II-10: Les moyennes de l'indice C.B.R. immédiat, imbibé et gonflement linéaire

Tableau II-11: Résultats des essais de gonflement libre de deux échantillons remaniés.

Tableau II-12: Résultats de l'essai de cisaillement.

Tableau II-13: Récapitulatif des résultats moyennes de cisaillement par couche.

Tableau II-14 : Comparaison des potentiels de gonflement déterminés par différentes méthodes.

Tableau II-15 : Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en chaux

Tableau II-16: Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en en ciment.

Tableaux II-17 : Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-18: Résultats de VBS et SST en fonction de teneur en chaux.

Tableau II-19: Résultats de VBS et SST en fonction de teneur en ciment

Tableau II-20: Résultats de VBS en fonction de teneur en ciment à différentes teneurs en chaux-ciment

Tableau II-21 : Récapitulation des essais Proctor normal à différentes teneur en chaux

Tableau II-22 : Récapitulation des essais Proctor normal à différentes teneurs en ciment.

Tableau II-23 : Résumé des résultats de la densité sèche pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-24: Résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux

Tableau II-25 : Résultats des indices C.B.R immédiats pour différentes teneurs en chaux.

Tableau II-26: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes

Tableau II-27: Résultats des indices C.B.R immédiats pour différentes teneurs en ciment

Tableau II-28 : Résultats des forces de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-29 : Résultats des indices C.B.R. immédiats pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-30 : Résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

Tableau II-31 : Résultats des gonflements linéaires pour différentes teneurs en chaux.

Tableau II-32 : Résultats des indices CBR imbibés pour différentes teneurs en chaux.

Tableau II-33: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en ciment.

Tableau II-34 : Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différentes teneurs en ciment.

Tableau II-35: Résultats des gonflements linéaires après imbibition pour différentes teneurs en ciment.

Tableau II-36 : Résultats des efforts de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-37: Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-38: Résultats des teneurs en eau après imbibition et les gonflements linéaires pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-39 : Efforts de cisaillement maximaux pour différentes teneurs en chaux.

Tableau II-40 : Efforts de cisaillement maximaux pour différentes teneurs en ciment.

Tableau II-41: Résultats des efforts de cisaillement maximaux pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Chapitre III

Figure III-1 : Variation des valeurs du VBS en fonction de type de traitement utilisé.

Figure III-2 : Variation SST en fonction de type de traitement utilisé.

Figure III-3 : Variation des limites de liquidité en fonction de type de traitement utilisé.

Figure III-4 : Variation des indices de plasticité en fonction de type de traitement utilisé.

Figure III-5 : Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988).

Figure III-6 : Histogramme de comparaison de la densité sèche.

Figure III-7: Histogramme de comparaison de l'indice de CBR immédiat.

Figure III-8 : Histogramme de comparaison de l'indice de CBR après imbibition.

Figure III-9 : Histogramme de comparaison du gonflement linéaire.

Figure III-10 : Histogramme de comparaison des efforts de cisaillement.

Liste des figures

Introduction générale

Figure 1 : Quelques exemples de désordres causés par le gonflement.

Figure 2 : Localisation du triangle Boussaâda-Sidi-Aïssa et M'sila

Figure 3 : Localisation de site de l'étude (Source Google Earth) prise le 24-05-2023.

Chapitre I

Figure I-1 : Structure des sols cohérents (d'après Yong et Sheeran)

Figure I-2 : Structure floclée

Figure I-3 : Structure dispersée.

Figure I-4 : Élément tétraédrique.

Figure I-5 : Couches tétraédrique typiques des argiles (Mitchell, 1993).

Figure I-6 : Élément Octaédrique

Figure I-7 : Couches octaédriques typiques des argiles (Mitchell, 1993)

Figure I-8 : Schéma des différents minéraux argileux

Figure I-9 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell,1976)

Figure I-10 : Représentation schématique de la Kaolinite

Figure I-11 : Représentation schématique de la montmorillonite

Figure I-12 : Représentation schématique de l'illite

Figure I-13 : Forces d'attraction s'exerçant entre les minéraux argileux

Figure I-14 : Forces de répulsion s'exerçants entre les minéraux argileux

Figure I-15 : Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides Montes et al, cité par

Figure I-16 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell,1976)

Figure I-17 : La classification Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

Figure I-18 : Classification des sols selon l'abaque de Williams et Donaldson (1980).

Figure I-19 : Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al., 1962)

Figure I-20 : Essais de gonflement libre

Figure I-21 : Essais de gonflement en parallèle

Figure I-22 : Essai de gonflement à volume constant

Figure I-23 : Conditions d'utilisation de la stabilisation chimique (Dept. of the Army,1983).

Chapitre II

Figure II-1 : Analyse diffractométrique aux rayons X de l'argile étudiée.

Figure II-2 : Analyse chimique de l'argile étudiée.

Figure II.3 : Courbes d'Analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).

Figure II.4 Classement du sol dans l'Abaque de Casagrande

Figure II.5 Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

Figure II-5 bis : Résultats de Trois (03) essais de Proctor normal.

Figure II-5 bis1 Résultats des forces de poinçonnement moyenne en fonction des enfoncements

Figure II-6 Résultats des forces de poinçonnement en fonction des enfoncements

Figure II-7 : Courbes d'effort de cisaillement en fonction du déplacement horizontal des différentes couches

Figure II-8 : Williams et Donaldson (1980).

Figure II-9 Classement sur l'Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants

Figure II-10 Limite de liquidité en fonction de la teneur en chaux

Figure II-11: Limite de plasticité en fonction de la teneur en chaux

Figure II-12 : La courbe de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en chaux

Figure II-13 : Limite de liquidité en fonction du teneur en ciment.

Figure II-14 : Limite de plasticité en fonction du teneur en ciment.

Figure II-15 : L'indice de plasticité en fonction du teneur en ciment.

Figure II-16 : Histogramme des limites de liquidité en fonction de la teneur en chaux/ciment

Figure II-17 : Histogramme des limites de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment

Figure II-18 : Histogramme des indices de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment

Figure II-19 : Histogrammes des valeurs du bleu de méthylène en fonction des teneurs en chaux-ciment du sol traité.

Figure II-20 : Histogramme des surfaces spécifiques en fonction des teneurs en chaux-ciment du sol traité.

Figure II-21 : Efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

Figure II-22 : Indices C.B.R immédiats en fonction des teneurs en chaux.

Figure II-23 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en ciment (C.B.R. immédiat).

Figure II-24 : Indices C.B.R. immédiats en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

Figure II-25 : Courbes des forces d'enfoncement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment (C.B.R. immédiat).

Figure II-26 : Courbes des forces de poinçonnement en fonction des teneurs en chaux-ciment de chaque enfoncement.

Figure II-27 : Histogramme des indices CBR immédiat en fonction des teneurs en chaux-ciment

Figure II-28 : Efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

Figure II-29 : Indices CBR imbibé en fonction des teneurs en chaux et leur droite moyenne.

Figure II-30 : Gonflement linéaire en fonction de la teneur en chaux.

Figure II-31 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en ciment (après imbibition).

Figure II-32 : courbes des forces en fonction des teneurs en ciment de chaque enfoncement (après imbibition).

Figure II-33 : Indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne

Figure II-34 : Gonflement linéaires en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

Figure II-35 : Courbes des forces en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment (après imbibition).

Figure II-36 : Histogrammes des forces en fonction des teneurs en chaux-ciment de chaque enfoncement.

Figure II-37 : Histogrammes des indices CBR après immersion en fonction des teneurs en chaux-ciment

Figure II-38 : Histogramme de gonflement linéaire en fonction des teneurs en chaux-ciment.

Figure II-39 : Effort de cisaillement maximal de différentes couches pour différentes teneurs en chaux.

Figure II-40 : Effort de cisaillement moyen pour différentes teneurs en chaux.

Figure II-41 : Effort de cisaillement en fonction des teneurs en ciment.

Figure II-42 : Effort de cisaillement moyen pour différentes teneurs en chaux-ciment

Chapitre III

Figure III-1 : Variation des valeurs du VBS en fonction de type de traitement utilisé

Figure III-2 : Variation SST en fonction de type de traitement utilisé

Figure III-3 : Variation des limites de liquidité en fonction de type de traitement utilisé

Figure III-4 : Variation des indices de plasticité en fonction de type de traitement utilisé

Figure III-5 : Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

Figure III-6 : Histogramme de comparaison de la densité sèche

Figure III-7: Histogramme de comparaison de l'indice de CBR immédiat

Figure III-8 : Histogramme de comparaison de l'indice de CBR après imbibition

Figure III-9 : Histogramme de comparaison du gonflement linéaire

Figure III-10 : Histogramme de de l'amplitude de gonflement libre

Figure III-11 : Histogramme de la pression de gonflement libre.

Figure III-12 : Histogramme de comparaison des efforts de cisaillement

Résumé

Les sols argileux expansifs sont connus pour leur comportement géotechnique problématique, notamment leur tendance à subir des variations de volume importantes en fonction des variations de leur teneur en eau. Cela peut entraîner des problèmes de fissuration, de tassement différentiel et de déformation des structures construites sur ces sols. La stabilisation des argiles expansives est une branche de recherche qui suscite de plus en plus d'intérêt, donc il y a nécessité de définir un procédé de stabilisation efficace et économique.

L'objectif de ce mémoire est de faire une comparaison des résultats de stabilisation Proctor normal, CBR immédiat et imbibé, Compression simple, gonflement linéaire et cisaillement direct d'une argile expansive de la région de Sidi Hadjres, dans la wilaya de M'sila, stabilisé en incorporant différents teneurs en ciment, chaux et une combinaison mixte chaux-ciment.

Mots clés : Argile expansive, stabilisation, chaux, portance, ciment, mixtes.

Abstract

Expansive clay soils are known for their problematic geotechnical behavior, particularly their tendency to undergo significant volume changes based on variations in their water content. This can lead to issues such as cracking, differential settlement, and deformation of structures built on these soils. The stabilization of expansive clays is a research field that is gaining increasing interest, hence the need to define an effective and economical stabilization process.

The objective of this thesis is to compare the results of normal Proctor compaction, immediate and soaked CBR (California Bearing Ratio), unconfined compression, linear swelling, and direct shear tests on an expansive clay from the Sidi Hadjres region in the M'sila province, stabilized with different proportions of cement, lime, and a combined lime-cement mixture.

Keywords: Expansive clay, stabilization, lime, bearing capacity, cement, combinations.

ملخص

الترب الطينية القابلة للانتفاخ معروفة بسلوكها الجيوتقني المشكل، بما في ذلك ميلها لتعرض تغيرات كبيرة في الحجم بناءً على تغيرات محتواها من الماء. يمكن أن يؤدي ذلك إلى مشاكل التشقق والتسوية المتفاوتة وتشوه الهياكل المبنية على هذه التربة. تعد استقرار التربة الطينية القابلة للانتفاخ فرعاً من البحث يثير اهتماماً متزايداً، لذا هناك حاجة إلى تحديد عملية استقرار فعالة واقتصادية.

هدف هذه الرسالة هو مقارنة نتائج استقرار مختلفة، بما في ذلك اختبار بروكتور العادي ، CBR الفوري والمشرب، الانضغاط البسيط، التمدد الحر والقص المباشر، لتربة طينية قابلة للانتفاخ في منطقة سيدي حرجس، بولاية المسيلة، والتي تم معالجتها بإضافة نسب مختلفة من الأسمنت والجير

كلمات مفتاحية: طين توسعية استقرار, كلس, إسمنت جهد و مزيج.

Principales notations utilisées

W_L : Limite de liquidité.

W_P : Limite de plasticité.

W_R : Limite de retrait.

I_P : Indice de plasticité.

I_R : Indice de retrait.

A_c : Activité de la fraction argileuse.

A_{tp} : Argiles très plastiques.

VB : Valeur de bleu.

V_{cc} : volume de la solution utilisée

SST : Surface spécifique totale.

CEC : la capacité d'échange cationique

$LCPC$: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

C_2 : Pourcentage des éléments inférieurs à 2μ

$M.E.B$: Microscope Electronique à Balayage

W_{opt} : La teneur en eau à l'optimum Proctor normal

γ_{dopt} : La masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal.

$C.B.R$: Californian Bearing Ratio

ε_g : Le potentiel de gonflement

P_g : pression de gonflement

γ_d : La masse volumique sèche

γ_h : La masse volumique humide

I_c : indice de consistance

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'étude comparative de la stabilisation chimique d'une argile expansive est une démarche visant à évaluer et comparer différentes méthodes de stabilisation chimique utilisées pour traiter les sols argileux expansifs. Les sols argileux expansifs sont connus pour leur comportement géotechnique problématique, notamment leur tendance à subir des variations de volume importantes en fonction des variations de leur teneur en eau. Cela peut entraîner des problèmes de fissuration, de tassement différentiel et de déformation des structures construites sur ces sols.

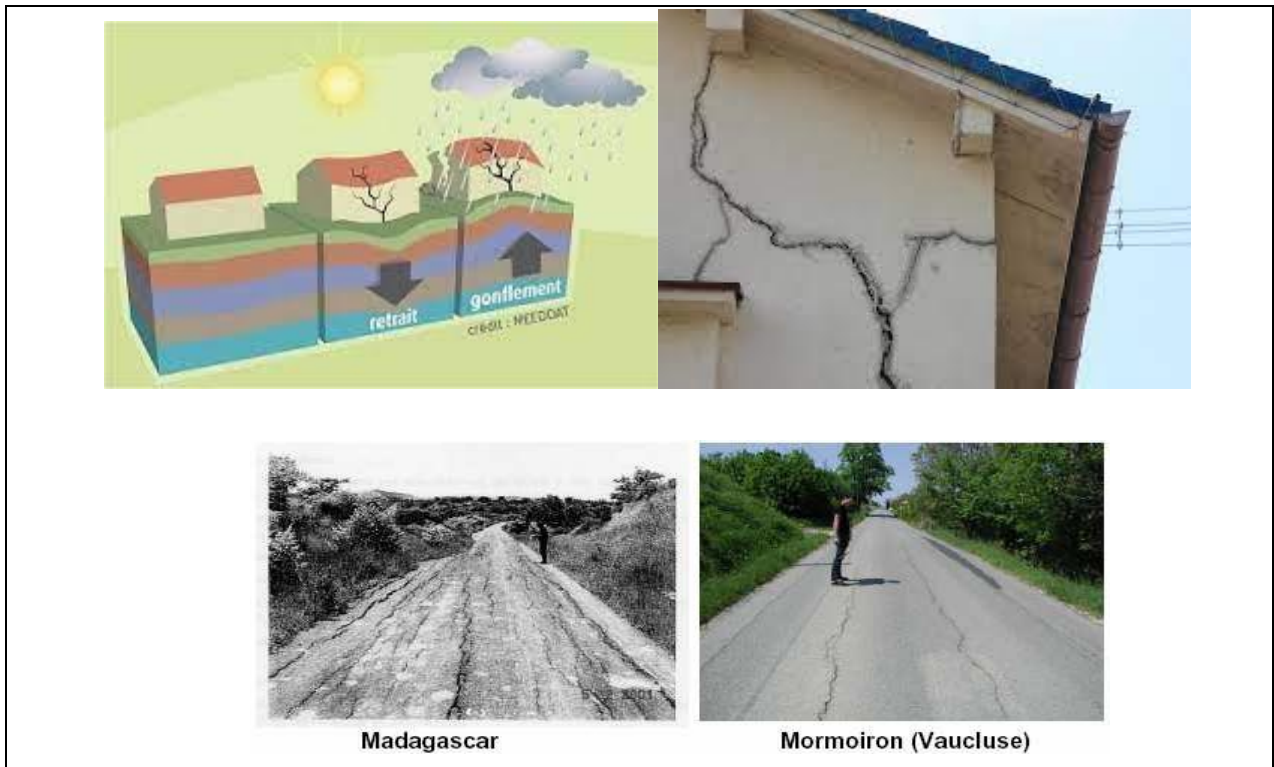


Figure 1: Quelques exemples de désordres causés par le gonflement.

En Algérie, les estimations ne sont pas disponibles mais plusieurs cas de désordres très préjudiciables, liés au gonflement, ont été signalés dans plusieurs régions : la raffinerie de In Amenas, l'hôpital de N'Gaous (Batna), la ligne de chemin de fer Ramdane Djamel (Jijel), l'hôpital de Sidi Chahmietla briqueterie de Mers El Kébir (Oran) HACHICHI et Foureau. Groupement de Tlemcen-Mansourah- Chetouane (Bekkouche et al.2001).

De nombreux désordres apparaissent fréquemment dans les constructions légères (pavillons, bâtiments de faible hauteur, routes) dans la région délimitée par le triangle Boussaâda-Sidi-Aïssa et M'sila) (figure 2) . Cette région est située dans une zone à climat semi-aride, dont la géologie comporte des formations argileuses caractérisées par une forte variation de volume dès que les conditions de leur équilibre sont modifiées (phénomènes climatiques naturels

dus à une sécheresse prolongée, activité humaine par modification du niveau des nappes phréatiques du fait de pompages excessifs, configuration des constructions dans leur environnement).

Localisation du site de l'étude:

La commune de Sidi Hadjres fait partie du triangle cité ci-dessus, est située sur la route nationale RN40 à 50 km à l'ouest de la ville de M'sila (figure 3). L'extension du site urbain de cette commune vers des zones à risque comporte la construction des nouveaux sièges de l'Assemblée Populaire Communale (APC) et la Garde Communale (GC) et un centre culturel (CC).

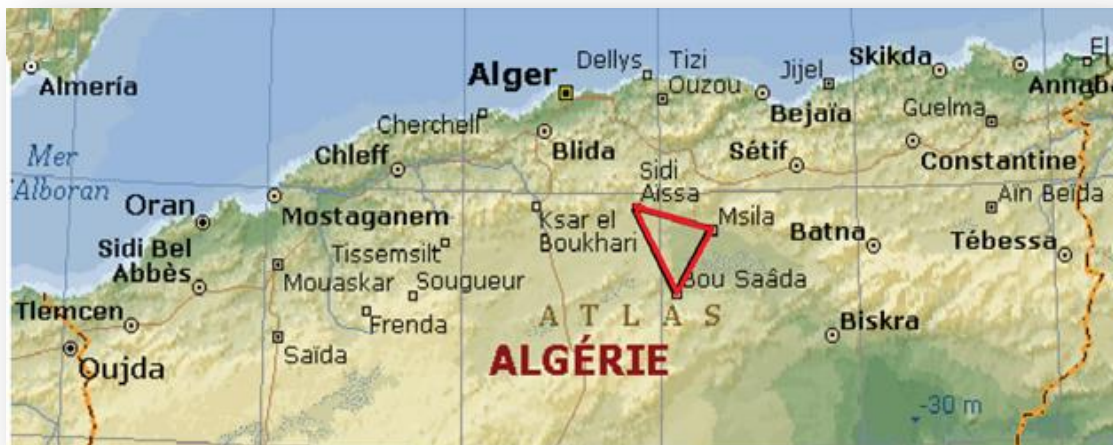


Figure 2 : Localisation du triangle Boussaâda-Sidi-Aissa et M'sila



Figure 3: Localisation de site de l'étude (Source Google Earth) prise le 24-05-2023.

Topographie :

Du point de vue topographique, le projet est situé sur un terrain légèrement en pente régulière.

Climatologie :

La région de Sidi-Hadjres est caractérisée par un climat semi-aride caractérisé par de faibles précipitations (300 mm en moyenne par an), et des écarts de température importants entre l'hiver et l'été (la température moyenne du mois le plus chaud est 32° et la température moyenne du mois le plus froid est 10°). Avec ces températures contractées des régions semi-arides, les hivers sont froids et humides et les étés chauds et sec.

Hydrologie et hydrogéologie :

Aucune autre source résurgence ou venue d'eau n'ont été observées sur le site.

Objectifs du mémoire :

Ce travail vise à comparer les résultats de trois (03) études basées sur différentes techniques de stabilisation chimique d'une argile expansive de la région de Sidi Hadjres wilaya de M'sila par l'incorporation de différents teneurs en: ciment, chaux et une combinaison mixte chaux-ciment.

Organisation du mémoire :

Ce mémoire comporte Quatre (04) chapitres :

- **Chapitre I :** Constitue une synthèse bibliographique sur des généralités sur les argiles notamment celles qui gonflent, et les techniques de stabilisation.
- **Chapitre II :** Constitue une Synthèse des résultats de stabilisation à la chaux, au ciment et au mélange chaux-ciment
- **Chapitre III :** La comparaison des résultats de stabilisation (Proctor normal et modifié, CBR immédiat et imbibé, Compression simple, gonflement libre et cisaillement direct.
- **Chapitre IV :** Porte sur une conclusion générale et des recommandations aux constructeurs et projeteurs, et se termine par des perspectives.

Chapitre I
Synthèse bibliographique

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I- : Introduction :

Les argiles gonflantes, également appelées argiles expansives, sont caractérisées par leur aptitude à absorber l'eau et à se dilater, ce qui peut entraîner des problèmes d'instabilité dans les constructions. Ces argiles sont couramment rencontrées dans les sols et sont responsables de phénomènes tels que le retrait-gonflement des sols, qui peut causer des dommages aux bâtiments, aux infrastructures et aux fondations.

On dispose pour cela plusieurs classes de solutions parmi eux la stabilisation par la chaux, le ciment, et le mélange chaux-ciment.

La synthèse bibliographique a été répartie en trois (03) grandes parties :

- Une première partie a été menée, pour recueillir des informations sur les argiles et le gonflement des sols argileux.
- Une deuxième partie, qui regroupe les techniques de stabilisation.
- Une troisième partie qui représente les caractéristiques des liants chimique utilisés dans notre étude (chaux et ciment).

II- Les argiles et le gonflement des sols argileux

II-1-Les Argiles :

Les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches : altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines. Leur diamètre équivalent varie approximativement de 1 nm à 0,002 mm. L'argile est pratiquement imperméable, toutefois sa compressibilité est élevée et, en général, les charges qu'elle peut supporter sont de loin inférieures à celles que supportent le gravier et le sable. [4]

II-2-La structure des Argiles :

Influencée par les forces de cohésion qui unissent les particules d'argile, la structure des sols argileux consiste en un arrangement très complexe de particules.

Selon certaines études réalisées à l'aide de microscopes à balayage électronique (Scanning electron microscope (SEM)) permettant de détecter les reliefs, les particules d'argile sont regroupées en structures microscopiques unitaires appelées domaines. Les domaines sont à

leur tour regroupés en grappes assez grosses pour qu'on les observe à l'aide d'un microscope optique. Enfin les grappes sont assemblées et forment des agrégations visibles à l'œil nu. La figure I-1 illustre très schématiquement ce type d'arrangement. [4]

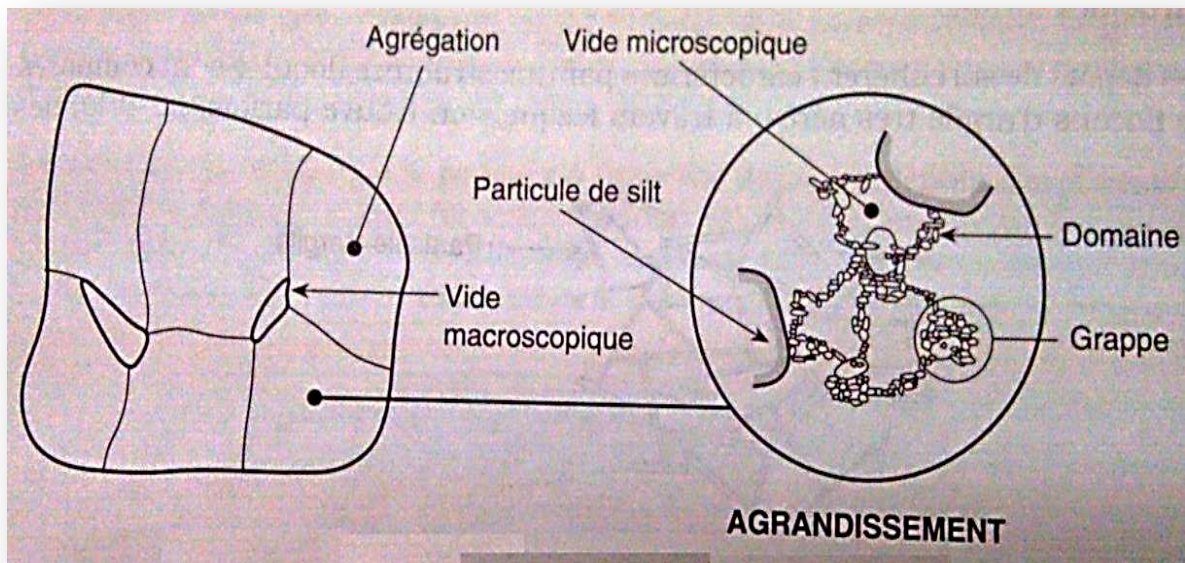


Figure I-1 : Structure des sols cohérents (d'après Yong et Sheeran)

II-2-1 : La structure macroscopique des argiles:

Les agrégations, les fissures, les couches de silt et de sable, les vides macroscopiques, les trous de racines et d'autres anomalies sont les composantes de cette structure qui peuvent avoir une grande influence sur le comportement des argiles. Par exemple la présence de fines couches de silt ou de sable tend à augmenter considérablement la perméabilité d'un dépôt d'argile. [4]

II-2-2 : La structure microscopique :

Le domaine cité plus haut, aide à comprendre, de façon générale, le comportement des argiles. D'après ce qu'on a pu observer, le domaine peut adopter l'une des structures microscopiques suivantes: la structure floculée, la structure dispersée. [2]

❖ La structure floculée :

On rencontre la structure floculée dans les milieux sédimentaires riches en impuretés inorganiques et organique, comme l'eau de mer. Ces impuretés, qui jouent le rôle d'agent floculant, favorisent le regroupement des particules d'argile en flocons (figure I-2). Sa résistance au cisaillement peut atteindre des valeurs assez grandes, car les liens entre les particules sont forts.

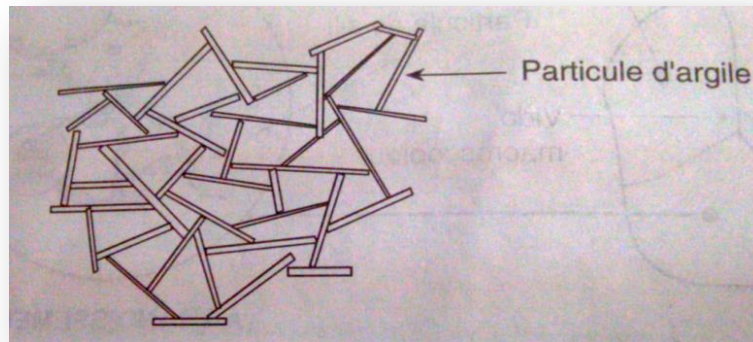


Figure I-2 : Structure floculée

❖ La structure dispersée :

La structure dispersée est un arrangement de particules d'argile parallèles, normalement orientés à l'horizontale (figure I-3). A l'occasion, la structure dispersée est présente dans des dépôts d'argile qui se sont formés dans un milieu de sédimentation très pauvre en agents flocculent, comme l'eau douce dans des lacs. Elle peut aussi résulter du remaniement d'une structure floculée.

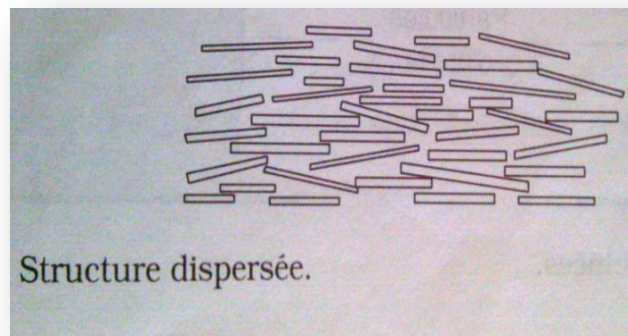


Figure I-3: Structure dispersée.

II-3-Minéraux argileux :

Les minéraux argileux sont des particules très fines dont le diamètre équivalent est normalement inférieur à 0,002 mm. Ce sont, pour la plupart, des silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes sont disposés de façon à former des figures géométriques très régulières.

II-3-1-Les structures cristallines fondamentales des minéraux argileux :

Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopiques qui portent habituellement le nom de feuillets en raison de leur apparence similaire à celle d'une

lamelle ou d'une feuille extrêmement mince. Ces feuillets sont eux-mêmes constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales. Celles-ci se juxtaposent dans un seul plan, et c'est pourquoi les feuillets ont une surface très grande par rapport à l'épaisseur. On évalue l'épaisseur des feuillets et des structures fondamentales à environ 0,5 nm (5×10^{-7} mm).

On a observé qu'il n'existait que deux structures fondamentales :

a- la structure fondamentale tétraédrique (Tétraèdre de silice SiO_4) :

Dans l'élément tétraédrique, l'ion central est la silice (Si^{4+}) qui est entouré par 4 ions d'oxygène (O^{2-}) (figure I-4). Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (figure I-5).

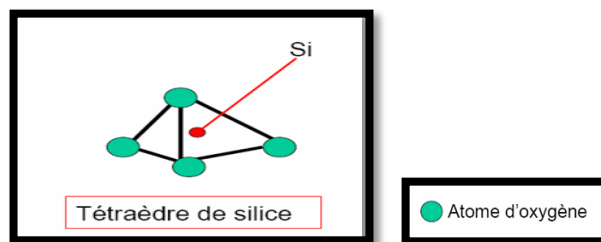


Figure I-4 : Élément tétraédrique.

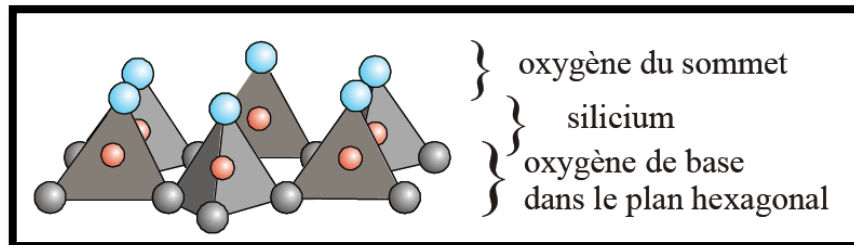


Figure I-5 : Couches tétraédrique typiques des argiles (Mitchell, 1993) .

b- la structure fondamentale octaédrique d'alumine $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ et éventuellement de magnésium $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$

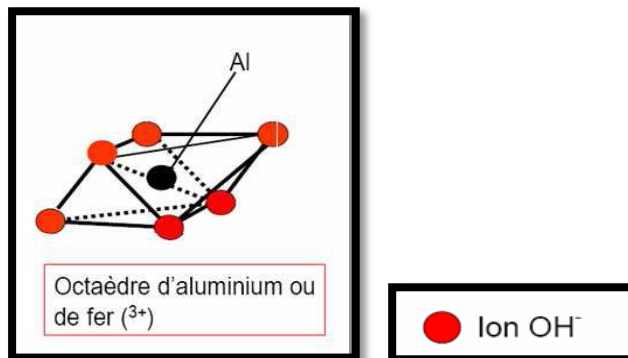


Figure I-6 : Élément Octaédrique

Dans l'élément octaédrique, l'ion central est soit un ion d'aluminium (Al^{+3}), soit un ion de magnésium (Mg^{+2}) (Figure I-6). Ces derniers sont entourés par six ions d'hydroxyde (OH^-). Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (Figure I-7).

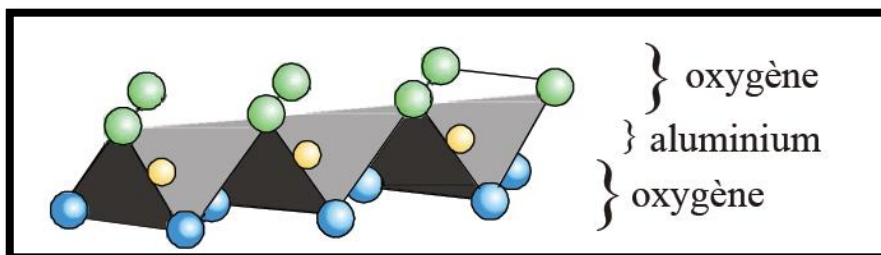


Figure I-7 : Couches octaédriques typiques des argiles (Mitchell, 1993)

II-3-2-Les relations entre les minéraux argileux et l'eau :

Le comportement des sols argileux peut être considérablement modifié par une variation de la teneur en eau.

a- La traction entre les minéraux argileux et l'eau :

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes :

❖ La surface spécifique :

La surface spécifique d'une particule est le rapport entre sa surface et son volume ou sa masse (on l'exprime généralement en m^2/g). Elle est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire.

Pour déterminer la surface spécifique totale, on considère que les molécules de bleu sont disposées d'une façon telle que la surface couverte est de 130 \AA^2 par molécule (les molécules de bleu de méthylène sont disposées parallèlement aux couches d'argile et forment une couche monomoléculaire). La surface spécifique totale est donnée par la relation suivante : [5]

$$Ss(m^2/g) = V_{BS} \times \frac{6,023 \cdot 10^{23} \times 130 \cdot 10^{-20}}{374 \times 100} = 20,93 \times V_{BS} (g/100g)$$

L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. [3]

On peut déduire, que plus les particules sont petites, plus leur surface spécifique est grande et que, par conséquent il faut une plus grande quantité d'eau pour la mouiller, ce qui se traduit par un potentiel de gonflement plus élevé.

En outre, on constate que la forme des particules peut influencer sur la valeur de la surface spécifique. En effet, un cube et une sphère de 1mm^3 , ont à peu près la même surface spécifique alors qu'un disque de même volume ayant 0,1 mm d'épaisseur présente une surface spécifique de trois à quatre fois supérieure. En fait, plus un disque est mince, plus sa surface spécifique est grande. Les dimensions microscopiques et la forme en feuillet des particules d'argile, une forme qui s'apparente à celle d'un disque, leur confère une surface spécifique extrêmement grande.

❖ Substitutions isomorphes :

L'insertion des atomes dans les structures fondamentales peut se faire par substitution, lors de la formation des minéraux argileux. Les substitutions surviennent principalement dans les structures octaédriques, où les atomes d'aluminium sont le plus souvent remplacés par des atomes de magnésium ou de fer. Dans les structures tétraédriques, un atome d'aluminium peut parfois remplacer l'atome de silicium. Comme la plupart de ces atomes ont approximativement la même taille, les structures fondamentales conservent sensiblement la même forme; c'est pourquoi on parle de substitution isomorphes.[4]

❖ Activité électrochimique:

Les substitutions isomorphes provoquent l'apparition des charges électriques négatives à la surface des minéraux argileux. Ces charges sont majoritairement responsables de l'activité électrochimique des argiles. plus la surface spécifique des particules est grande, plus le nombre de substitutions est grand, plus l'activité électrochimique des minéraux argileux est d'autant plus élevée. [4]

❖ La capacité d'échange cationique (CEC):

Mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle mesure la concentration en cations non fixés dans la couche diffuse et dépend de la charge totale (i.e., charge de surface et structurale). La CEC est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles, elle est fonction du pH.

Connaissant la masse molaire du bleu de méthylène, et en admettant que le bleu est entièrement adsorbé sous forme monovalente (Clément, 1988), la capacité d'échange cationique de l'argile est déterminée par la relation suivante :[5]

$$CEC (meq/100g) = \frac{V_{BS} (g/100g)}{374} \times 1000$$

Les cations sont attirés par les charges négatives à la surface des minéraux argileux, se combinant aux molécules d'eau, ils entraînent ces dernières et les maintiennent en contact avec les particules d'argile.

La plupart des cations sont métalliques, et on les trouve sous forme d'impuretés dans les eaux souterraines. ceux que l'on rencontre le plus souvent dans l'eau des sols sont les cations de calcium (Ca^{++}) et le magnésium (Mg^{++}). Les moins courants sont les cations de potassium (K^+) et de sodium (Na^+). Dans les sols acides, on trouve fréquemment des cations d'aluminium (Al^{+++}) et d'hydrogène (H^+). Les argiles d'origines marines se caractérisent par la présence de cations de sodium et de magnésium, les principaux cations présents dans l'eau de mer.

La surface d'attraction qui existe entre les cations et la surface des minéraux argileux varie selon le type de cation. Habituellement, les cations fortement attirés remplacent les cations plus mobiles au cours d'une substitution que l'on appelle échange cations. La série qui suit illustre, en ordre croissant, la facilité qu'ont les cations à se remplacer :



On voit que le cation de calcium (Ca^{++}) est plus fortement attiré par la surface des minéraux argileux que les cations de sodium (Na^+) ou de potassium (K^+), et qu'il les remplace aisément.

Les cations peuvent avoir une influence sur les dimensions du film d'eau adsorbée. Par exemple, lorsqu'il y a infiltration d'eau dans un dépôt d'argile contenant une forte proportion de montmorillonite, la présence de cations de sodium (Na^+) à la surface des particules favorise l'insertion de molécules d'eau entre les minéraux argileux. L'épaisseur des films d'eau adsorbée augmente alors de façon appréciable, ce qui se traduit généralement par des gonflements importants.[4]

a- Différents types d'eau :

Le caractère dipolaire de la molécule d'eau lui confère la propriété d'être attirée par l'intermédiaire de ses extrémités positives à la surface négative des minéraux argileux. Cette attraction modifie les propriétés hydrodynamiques de l'eau et cela dépend de la distance entre les molécules d'eau et la surface argileuse. [3]. Trois types d'eau, existant dans la matrice argileuse, peuvent être distingués :

❖ L'eau libre:

Remplissant les espaces inter-agrégats et les macrospores entre les particules : elle peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température de 105 °C. [3].

❖ L'eau liée ou adsorbée :

Occupant les espaces inter-feuillets par des interactions chimiques et électriques : elle a besoin d'une température élevée de 200 °C pour être évacuée. [3]. Sa densité et surtout sa viscosité sont plus élevées que celles de l'eau libre. Sa quantité totale dépend de la surface spécifique et de la capacité d'échange cationique des minéraux argileux. [2]

❖ L'eau cristalline:

Se situe au niveau des feuillets argileux et a besoin d'une température de 550 °C pour être éliminée. [3].

Le changement de la teneur en eau liée et cristalline peut être le seul facteur de changement de la structure interne du matériau argileux (M.R. Santos, A. Diek, J.C. Roegiers, et A.B. Fantoura), cité par [3].

Ces trois types d'eau sont influencés par l'activité électrochimique à la surface des minéraux argileux, la polarité de l'eau, les liens d'hydrogène de l'eau, les cations présents dans l'eau.

II-3-3-Les principaux types de minéraux argileux:

Tous les minéraux argileux sont constitués de feuillets tétraédriques et octaédriques. L'ordre dans lequel les feuillets sont empilés et les liens qui existent entre eux et les divers atomes métalliques ou non, qu'on trouve à l'intérieur des structures fondamentales déterminent les différents types de minéraux argileux. [4]

Jusqu'à maintenant, il a été possible d'identifier plusieurs douzaines de minéraux argileux. On les a divisés en trois grands groupes, qui portent le nom du minéral argileux le plus commun dans chaque groupe :

- la kaolinite.
- la montmorillonite.
- l'illite.

La figure I-8 donne une description schématique des différents minéraux argileux.

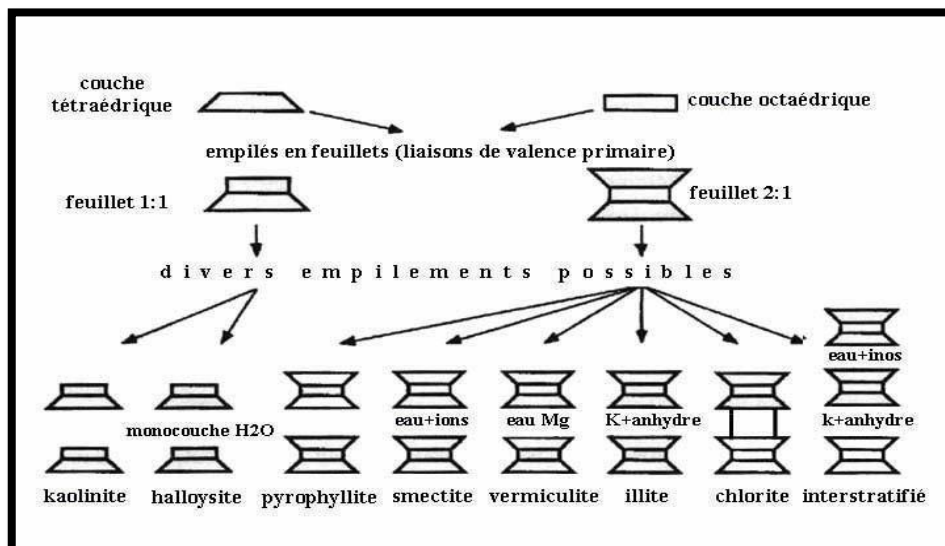


Figure I-8 : Schéma des différents minéraux argileux

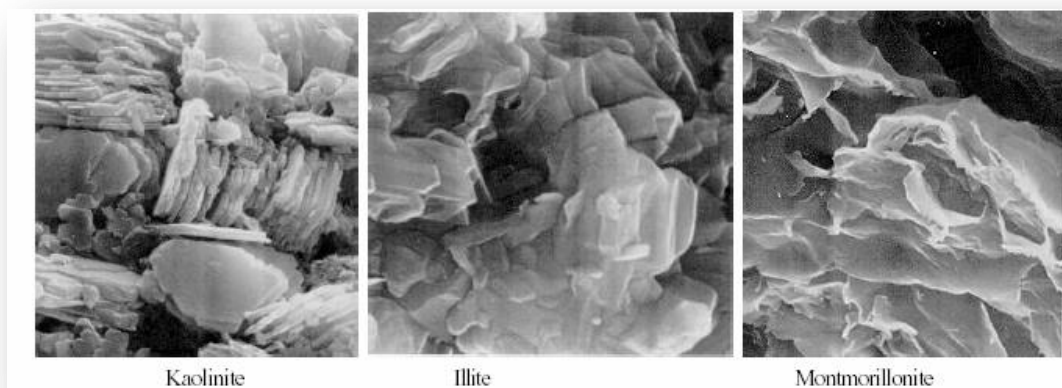


Figure I-9: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell,1976), cite par [13].

a- La kaolinite [(Si₂O₅) Al₂ (OH)₄]:

Le nom kaolinite vient du mot Kauling, qui désigne le haut sommet d'une colline située près de Jaucha Fu, en Chine. C'est à cet endroit, il y a quelques siècles, qu'on a découvert cette argile blanchâtre.

La kaolinite est formée de couches élémentaires comprenant chacune un feuillet tétraédrique et un feuillet octaédrique qui renferme des atomes d'aluminium (gibbsite).

Chaque couche élémentaire a une épaisseur d'environ 0,7 nm et peut s'étendre considérablement en longueur et en largeur. Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène agissant sur les hydroxyles des feuillets octaédriques et sur les atomes d'oxygène des feuillets tétraédriques (figure I-10).

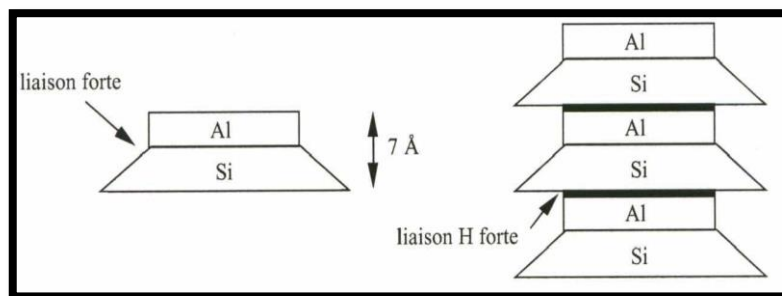


Figure I-10: Représentation schématique de la Kaolinite

Ces liens d'hydrogène étant très forts, l'eau qui est toujours présente dans les dépôts d'argile s'infiltré 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 plupart des minéraux argileux.

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 certaines cas, atteindre 2000 nm.

Si on la compare à celle des autres minéraux argileux, l'activité électrochimique de la kaolinite est une des moins importantes. En effet, à cause du nombre limité de ses substitutions isomorphes et de la petite surface spécifique de ses particules, la quantité de charges électriques disponibles y est relativement faible.

Les dépôts argileux constitués majoritairement de kaolinite sont donc généralement très stables et peu sujets aux gonflements ou aux autres retraits.

b- La montmorillonite n [(Si₄O₁₀) (Al_{5/3} Mg_{1/3})Na_{1/3}(OH)₂] :

La montmorillonite est un minéral argileux qui a été découvert à Montmorillon, en France. Elle est formée de couches élémentaires constituées de deux feuillets tétraédriques placés de part et d'autre d'un feuillet octaédrique contenant des atomes d'aluminium (gibbsite). Elle porte parfois le nom de smectite.

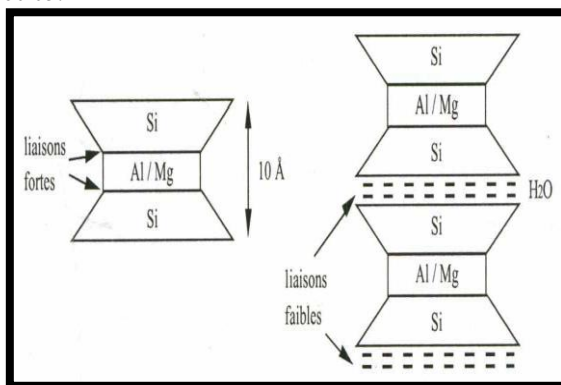


Figure I-11 : Représentation schématique de la montmorillonite

Les couches élémentaires de la montmorillonite ont une épaisseur d'environ 0,96 nm et, comme celles de la kaolinite, elles peuvent s'étendre considérablement en longueur et en largeur. Des molécules d'eau fortement attirées vers les surfaces chargées des feuillets tétraédriques assurent les liens entre les couches (figure I-11). 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 compte 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.

Contrairement à la Kaolinite, la montmorillonite se caractérise par une très grande activité électrochimique à la surface de ses particules. Cette activité s'explique par le nombre élevé de substitutions isomorphes qui surviennent, surtout dans le feuillet octaédrique, là où les atomes de magnésium ou de fer peuvent remplacer les atomes d'aluminium. De plus, la grande surface spécifique des particules contribue à y accroître la quantité des charges électriques négatives.

Les dépôts de sol contenant de la montmorillonite ont tendance à manifester de forts gonflements lorsque leur teneur en eau augmente. Ces gonflements peuvent engendrer des pressions suffisantes pour détériorer la structure des routes ou des constructions légères comme les petits bâtiments.

Afin de remédier à cet inconvénient, on peut procéder à un échange de cations et ainsi stabiliser le sol. Pour ce faire on utilise habituellement de la chaux (CaOH) qu'on incorpore à l'argile. Les cations de calciums (Ca^{++}) provenant de la chaux seront fortement attirés vers la surface des particules de montmorillonite et remplaceront les cations de sodium responsables des changements de volume de l'argile.

b- L'illite:

L'illite a été identifiée pour la première fois à l'université de l'Illinois. On la considère comme un des minéraux argileux les plus abondants sur la terre. La structure de l'illite ressemble à celle de la montmorillonite puisque ses couches élémentaires, dont l'épaisseur atteint 1 nm, sont elles aussi formées d'un feuillet octaédrique emprisonné entre deux feuillets tétraédriques.

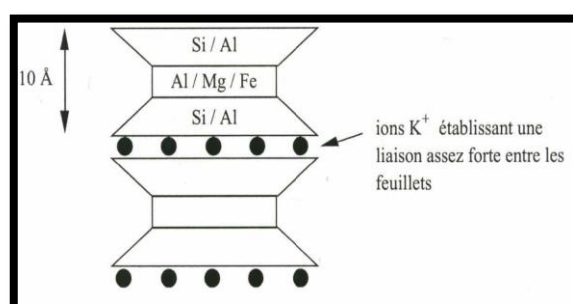


Figure I-12 : Représentation schématique de l'illite

Ce qui diffère, ce sont les liens qui unissent les couches élémentaires : ils sont assurés par des atomes de potassium (K) (figure I-12). Bien qu'étant plutôt forts comparativement à ceux de la montmorillonite, ils demeurent inférieurs aux liens d'hydrogène de la kaolinite. 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.

L'activité électrochimique de l'illite est plus importante que celle de la kaolinite. En effet, étant donné le nombre de ses substitutions isomorphes et sa surface spécifique, qui sont plus grands que ceux de la kaolinite, on trouve plus de charges électriques négatives à la surface de ses particules, qui sont-elles mêmes plus actives en présence d'eau que celles de la kaolinite. Cette activité est toutefois bien inférieure à celle de la montmorillonite.

Les dépôts de sols contenant de l'illite demeurent assez stables. Lorsque leur teneur en eau augmente, ils peuvent subir des gonflements, mais beaucoup moins importants que ceux observés dans les dépôts de montmorillonite.

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau I-1 et tableau I-2

Tableau I-1 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001)

Argile	Type	Nombre De feuillets par particule	Diamètre d'une particule (µm)	Epaisseur d'une particule (µm)	Surface spécifique (m ² /g)	C.E.C (Capacité d'Echange Cationique) (meq/1 00g)
Kaolinite	1 : 1	100 - 200	0,1 - 4	1 - 10	10 – 20	3 - 15
Illite	2 : 1	1 – 10	0,1 - 1	0,003 – 0,01	65 – 100	10 - 40
Montmorillonite	2 : 1	1	0,1	0,001	700 - 840	80 - 150

Tableau I-2:Caractéristiques de la structure des principaux minéraux argileux.

Minéraux argileux	Type et qualité des liens entre les couches élémentaires	Substitutions isomorphes	Activité électrochimique	Gonflements
Kaolinite	Liens d'hydrogène parmi les plus forts chez les minéraux argileux	Peu nombreuses	Une des plus faibles chez les minéraux argileux	Assez faibles
Illite	Liens assurés par des atomes de potassium (K), moins forts que ceux de la kaolinite, mais plus fort que ceux de la montmorillonite	Plus nombreuses que celles de la kaolinite, mais moins nombreuses que celles de la montmorillonite	Supérieure à celle de la Kaolinite, mais inférieure à celle de la montmorillonite	Faibles à moyens
Montmorillonite	Liens assurés par des molécules d'eau, parmi les plus faibles chez les minéraux argileux	Très nombreuses	Une des plus fortes chez les minéraux argileux	Importants

II-3-4-Les forces d'attraction et de répulsion entre les minéraux argileux :

Les forces d'attraction et de répulsion entre les minéraux argileux sont en grande partie engendrées par la structure même de ces minéraux. Les films d'eau adsorbée jouent aussi un rôle très important, puisque ces forces s'exercent par leur intermédiaire.

a- Les forces d'attraction :

Les forces d'attraction ou forces de cohésion sont produites avant tout par les surfaces chargées des minéraux et par les cations des films d'eau adsorbée et de l'eau libre. Il peut aussi y avoir attraction directe entre les minéraux argileux (figure I-13).

Les forces d'attraction favorisent la floculation et le dépôt des minéraux argileux.

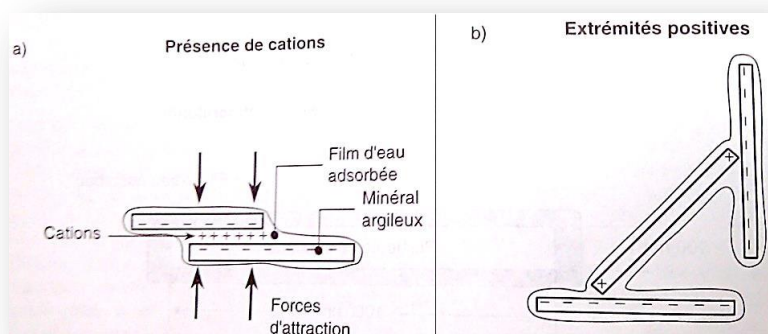


Figure I-13: Forces d'attraction s'exerçant entre les minéraux argileux

b- Les forces de répulsion:

Les forces de répulsion s'exercent d'abord entre les minéraux argileux eux-mêmes : ceux dont les surfaces portent le même type de charges se repoussent tout simplement.

Ces forces peuvent aussi dépendre de la différence entre les concentrations de cations des films d'eau adsorbée et de l'eau libre.

La répulsion est plus ou moins grande selon les types d'argile. Par exemple, les forces à l'œuvre dans la montmorillonite sont généralement plus élevées que celles qu'on observe dans la kaolinite. Cela s'explique par le fait que les particules de montmorillonite, caractérisée par une activité électrochimique très forte, portent une plus grande quantité de charges à leurs surfaces et peuvent donc se repousser plus violemment. En outre, toujours en raison de cette plus grande activité, la concentration de cations entre les particules de montmorillonite a des chances d'être plus importante, et l'eau peut alors s'infiltrer plus facilement entre les particules et les séparer.[4]

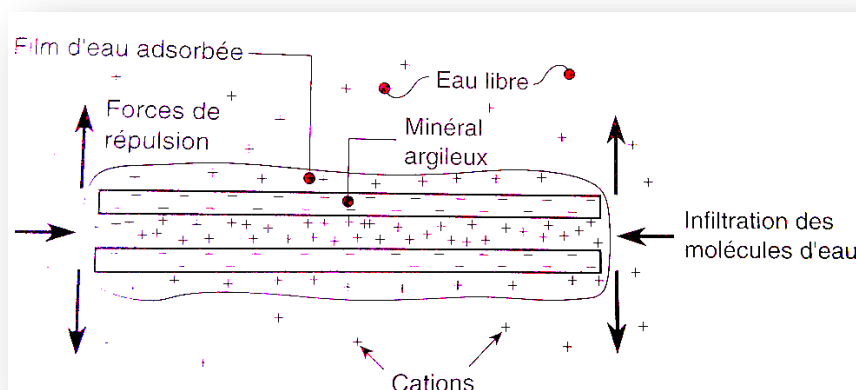


Figure I-14 : Forces de répulsion s'exerçant entre les minéraux argileux

c- L'équilibre des forces :

Les forces d'attraction et de répulsion s'opposent continuellement et finissent par atteindre un état d'équilibre. Lorsqu'un échantillon de sol est prélevé dans un dépôt d'argile, les contraintes de compression dues au poids du sol disparaissent, ce qui diminue les forces d'attraction. Le

volume de l'échantillon augmente alors jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint entre les forces d'attraction et de répulsion.

II-4 : Gonflement des argiles

II-4-1 le gonflement :

Le gonflement des argiles est un phénomène géotechnique qui se produit lorsque certaines argiles, également appelées argiles gonflantes, absorbent de l'eau et augmentent considérablement leur volume. Ce comportement est dû à la structure cristalline des argiles et à leur capacité à retenir et à libérer de l'eau.

II-4-2-Gonflement inter-foliaire et inter-particulaire :

L'analyse minéralogique montre que certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillettes sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins (c'est le cas de smectites telles que la montmorillonite, et de certaines chlorites). L'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires, il s'agit alors d'un gonflement intraparticulaire ou interfoliaire (Didier, 1972), [9]. Il intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse mais peut présenter une ampleur très importante.

En dehors de ce cas particulier, qui définit les argiles dites "gonflantes", le gonflement est interparticulaire, c'est-à-dire que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argiles. Ce gonflement interparticulaire, contrairement au gonflement interfoliaire, a une ampleur assez limitée, mais affecte toutes les argiles. [9].

Le processus de gonflement Interparticulaire met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Il dépend aussi de la texture du matériau.

II-4-3-Evolution de la texture des argiles :

La texture des minéraux argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope. [3].

Les matériaux argileux ne sont pas uniquement composés des argiles. Au sein de la fraction argileuse, plusieurs types de minéraux peuvent coexister. La texture des matériaux

argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés. [3]. Les observations microscopiques effectuées par Montes et al, [3] sur les argilites, subissant des cycles d'humidification dessiccation, confirment des fracturations le long des surfaces localisées à proximité des matériaux rigides non gonflants (Figure. 11).

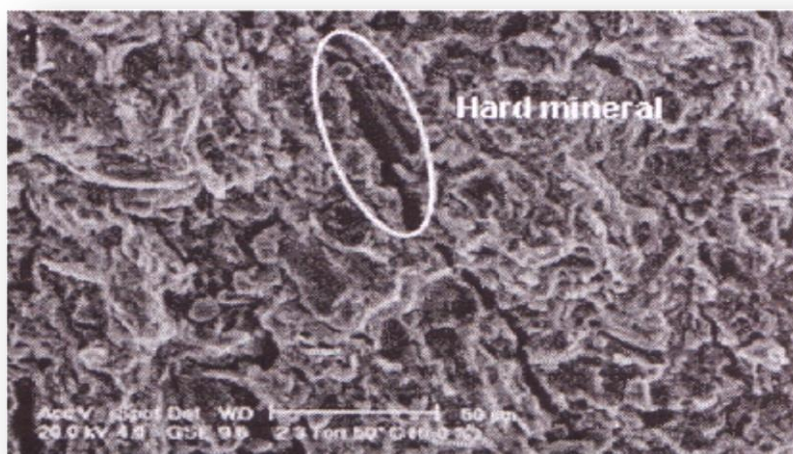


Figure I-15 : Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides Montes et al, cité par [4].

L'évolution de la microtexture en fonction de l'hydratation peut être observée à l'aide du microscope électronique à balayage (M.E.B.) ou de la tomographie à rayons X (M. Gasc-Barbier, H. Freissmuth et X. Daupley) [3].

La figure II-2 présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage. Les observations au microscope électronique à balayage permettant d'analyser l'évolution de la texture au cours du gonflement montrent que, pour la kaolinite, le gonflement est uniquement de type inter-agrégats, au niveau des pores interstitiels alors que pour les smectites, le gonflement est de type intra-agrégats, c'est-à-dire entre les feuillets. [9].

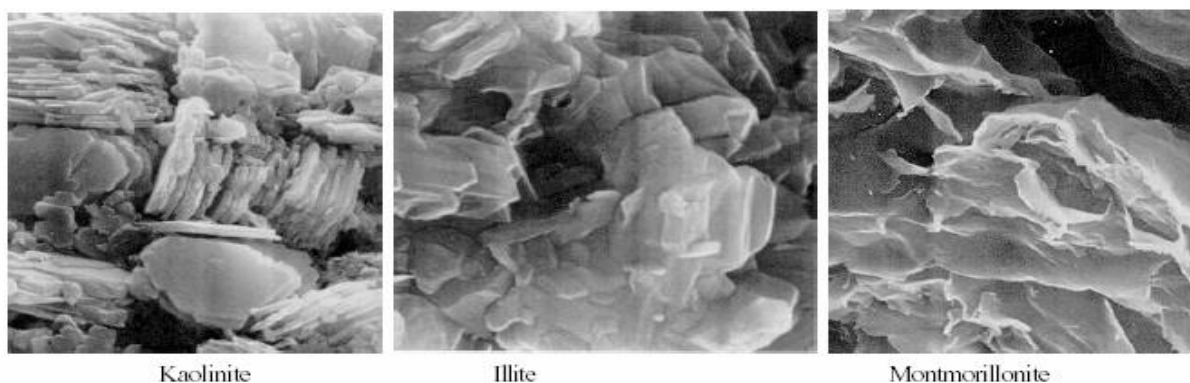


Figure I-16 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell,1976), [9].

Ces observations microscopiques confirment une nouvelle organisation des feuillets argileux qui se manifeste par un écartement parallèle observable dans le cas des roches argileuses ou par un effet combiné d'un écartement et d'une rotation comme c'est le cas pour les sols argileux non indurés. [3]. Globalement, le pourcentage en minéraux gonflants, les carbonates, les minéraux non gonflants d'une part, et la nature de la consolidation d'autre part, présentent une influence notable sur le gonflement.

II-4-4-Identification des sols gonflants :

Les paramètres d'identification des sols gonflants sont nombreux et dépendent surtout de leur minéralogie. Cependant, l'analyse minéralogique seule n'informe pas sur les paramètres quantitatifs caractérisant le phénomène de gonflement. Il est par contre possible de définir dès la phase de reconnaissance préliminaire un certain nombre de paramètres géotechniques simples qui sont en relation avec le caractère expansif des sols. Ainsi, on peut soupçonner le caractère expansif d'un sol à travers sa granulométrie, ses limites d'Atterberg et son activité. Ces méthodes indirectes, qui relient le gonflement aux paramètres géotechniques, permettent d'identifier les sols gonflants; alors que les méthodes directes comportant des essais de gonflement en caractérisent plus précisément le comportement gonflant.

II-4-4-1-Définition des paramètres de gonflement :

On distingue deux paramètres de gonflement : la pression de gonflement et l'amplitude de gonflement. Ces deux paramètres dépendent des conditions dans lesquelles se déroule le gonflement et des méthodes de leur détermination (procédures d'essais et techniques d'interprétation). Ils ne peuvent pas être considérés comme des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant et ne peuvent donc pas recevoir de définition objective. Néanmoins :

la pression de gonflement P_g d'un sol, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contraintes à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion. Cette définition de la pression de gonflement est la plus utilisée, mais elle n'est pas la seule ;

l'amplitude du gonflement ϵ_g (ou gonflement libre) d'un sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque son imbibition sous un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.

II-4-4-2-Méthodes indirectes d'identification :

II-4-4-2-1- Identification qualitative :

L'identification des sols gonflants peut s'effectuer à l'échelle microscopique. Les formes et les assemblages de la structure de ces matériaux sont très particuliers. Seulement, cette reconnaissance est très coûteuse et n'informe pas quantitativement sur les paramètres du retrait gonflement.

Une identification primaire, à partir des résultats d'essais simples, peut présenter un intérêt considérable puisqu'elle permet de gagner en temps et en coût. En effet, le fait de soupçonner qu'un sol puisse être expansif permet de recommander la réalisation d'une campagne de reconnaissance appropriée et conduit à concevoir une infrastructure adaptée (Bekkouche et al., 2001). Ces méthodes indirectes, qui relient le gonflement des sols à leurs paramètres géotechniques sont décrites ci-après.

a- Essais visuels :

Les minéraux argileux gonflants présentent des formes et s'assemblent de manière caractéristique. On peut les identifier à l'aide des essais suivants :

- Diffractométrie des rayons X.
- Thermométrie différentielle.
- Microscope électronique à balayage (M.E.B).

Ces essais, qui permettent une identification minéralogique plus qu'une analyse quantitative, sont utilisés en complément des essais mécaniques.

b- Classification des sols gonflants selon les paramètres géotechniques :

De nombreux auteurs ont tenté de relier la pression de gonflement P_g (ou le potentiel de gonflement ε_g) aux paramètres classiques de mécanique des sols (teneur en eau initiale (w_I), densité sèche initiale γ_{d0} , limite de liquidité w_L , indice de plasticité I_p , limite de retrait w_r , pourcentage des particules d'argiles $< 2\mu m, \dots$) qui semblent être les facteurs les plus influents sur le gonflement des argiles.

Le recensement à partir de la bibliographie (Djedid et al, Bultel .F,2001 et Khemissa M. et al.,2005) des classifications permet de les ranger en trois classes en fonction du nombre de paramètres physico-chimiques utilisés.

❖ La classification basée sur un seul paramètre :

Cette classification est donnée par les tableaux I-3 à II-6

Tableau I-3 :Potentiel de gonflement d'après Almeyr (1955)

WR	Potentiel de gonflement
< 10	Fort
10 - 12	Critique
> 12	Faible

Tableau I-4 : Potentiel de gonflement d'après Seed, Woodward et Lungreen (1962)

IP	ϵ_g (%)	Potentiel de gonflement
0 - 10	0 – 1.5	Faible
10 - 20	1.5 - 5	Moyen
20 - 35	5 - 25	Elevé
> 35	> 25	Très élevé

Tableau I-5 : Potentiel de gonflement d'aprèsRanganatham et Satyanarayana (1965)

IR	Potentiel de gonflement
0-20	Faible
20 - 30	Moyen
30-60	Fort
>60	Très fort

Tableau I-6: Potentiel de gonflement d'après Snethen

IP (%)	Potentiel de gonflement
>35	Très élevé
22-48	Elevé
22-32	Moyen
<18	Faible

❖ **La classification basée sur deux paramètres :**

Cette classifications est données par les tableaux I-7 à I-8 et les abaques (figure I-17; figure I-18 ; figure I-19)

Tableau I-7 : Potentiel de gonflement d'après l'établissement de recherche en batiment(1980).

IP (%)	% < 2 μ m	Potentiel de gonflement
> 35	> 95	Très élevé
22 -48	60 - 95	Elevé
18 - 22	30 - 60	Moyen
< 18	< 30	Faible

Tableau I-8 : Potentiel de gonflement d'après Ghen (1988).

% < 74 μm	WL (%)	Pression de gonflement (bars)	Potentiel de gonflement
>95	>60	10	Très élevé
60-95	40-60	2.5 - 5	Elevé
30-60	30-40	1.5 - 2.5	Moyen
<30	<30	<0.5	Faible

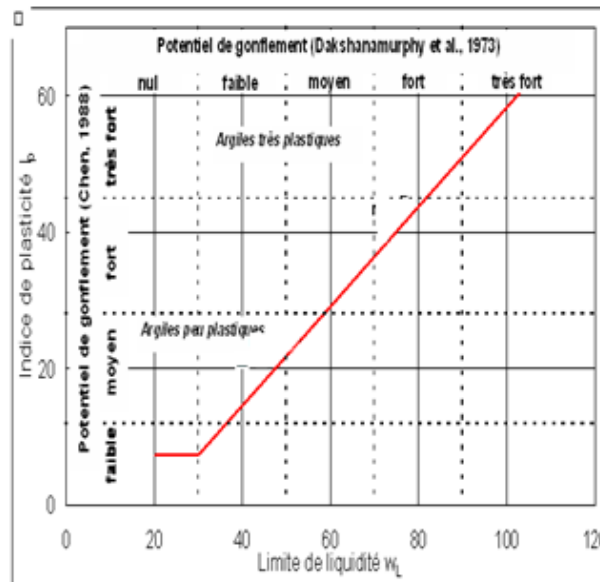


Figure I-17 : La classification Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

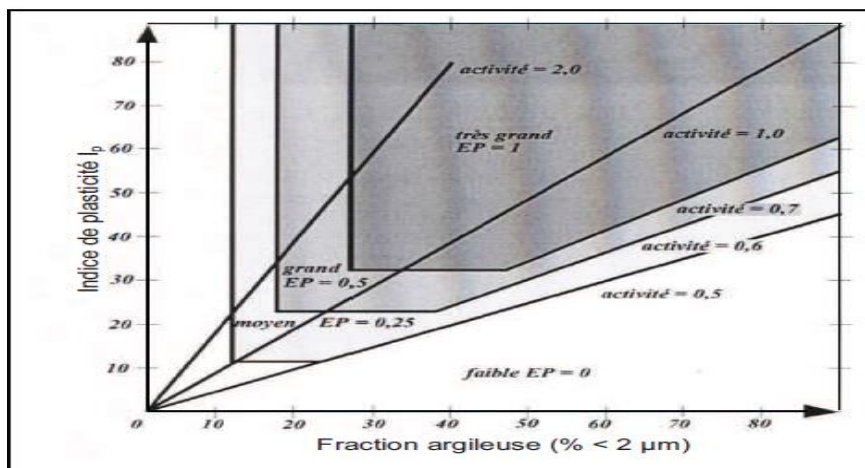


Figure I-18 : Classification des sols selon l'abaque de Williams et Donaldson (1980).

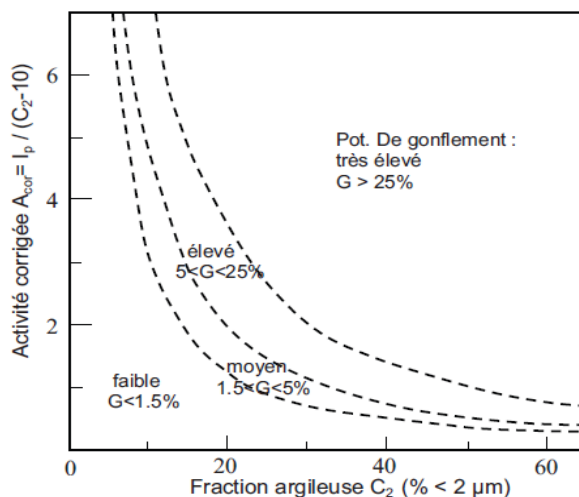


Figure I-19: Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al., 1962)

❖ La classification basée sur trois paramètres :

Cette classification est donnée par les tableaux I-9 à I-11

Tableau I-9 : Potentiel de gonflement d'après Holtz et Gibbs (1956)

P < 2µm (%)	IP (%)	WR (%)	% de retrait	Potentiel de retrait
>28	> 35	> 10	> 30	Très élevé
20-13	25 < IP < 40	7-10	20-30	Elevé
13-23	15-30	10-15	10-30	Moyen
<15	<18	>15	<10	Faible

Tableau I-10 : Potentiel de gonflement d'après Holtz, Dakshanamurthy et Raman (1973)

IP (%)	WR (%)	WL (%)	Potentiel de retrait
< 18	> 15	20-35	Faible
15-25	10-15	35-50	Moyen
25-35	7-12	50-70	Fort
> 35	< 11	> 70	Très fort

Tableau I-11 : Valeurs indicatives pour les sols susceptibles de variation de volume (Bigot et Zerhouni, 2000).

IP (%)	% < 80 µm	VBS	Susceptibilité de variation de volume du sol
> 30	> 90	> 6	Fort
15 < IP < 30	> 50	2 > VBS > 6	Moyen
< 15	< 50	< 2	Faible

II.4-4-2-2- Identification quantitative (estimation des paramètres de gonflement) :

Dans la phase de reconnaissance primaire et une fois le sol gonflant soupçonné, il est possible d'obtenir une estimation des paramètres de gonflement (amplitude et pression) à partir des nombreuses corrélations proposées dans la littérature. Ces relations empiriques mettent en relation les paramètres de gonflement avec les paramètres géotechniques déterminés à partir de essais classiques d'identification. Bien sûr, il faut se garder d'une utilisation abusive de ces relations, les valeurs obtenues ne doivent servir que lors des études d'avant-projet sommairement notamment pour orienter les concepteurs.

Plusieurs relations empiriques ont été proposées. Les principales équations sont regroupées dans le tableau II-10 (Modèles empiriques de calcul du taux de gonflement (ε_g) et de la pression de gonflement (P_g)).

Tableau I-12 : Modèles empiriques de calcul du taux de gonflement (ε_g) et de la pression de gonflement (P_g), [2].

Auteur(s)	Équations	Paramètres
Seed <i>et al.</i> (1962)	$\varepsilon_g = 2,16 \cdot 10^{-3} (I_p)^{2,44}$	ε_g et I_p sans unités (-)
Ranganatham et Satyanarayana (1965)	$\varepsilon_g = 41,13 \cdot 10^{-5} (w_L - w_s)^{2,67}$	ε_g , w_L et w_s sans unités (-)
Komornik et David (1969)	$\varepsilon_g = 6,7 + 2,4 I_p \rightarrow$ marnes $\varepsilon_g = 0,9 + 2,1 I_p \rightarrow$ argiles $\log \sigma_g = -2,132 + 0,0208 w_L + 6,66 \cdot 10^{-4} \gamma_{so} - 0,0269 w_i$	ε_g (%) σ_g (kPa) w_i (%) w_L (%) γ_{so} (kg/m ³)
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973)	$\log \varepsilon_g = 0,033 w_L - 0,083 w_i + 0,458$ $\log \sigma_g = 0,033 w_L - 0,083 w_i - 1,967$	ε_g (%) σ_g (kPa) w_L (%) w_i (%)
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973)	$\log \varepsilon_g = 0,033 w_L + 0,0032 \gamma_{so} - 6,692$ $\log \sigma_g = 0,033 w_L + 0,0032 \gamma_{so} - 5,154$	ε_g (%) σ_g (kPa) w_L (%) γ_{so} (kg/m ³)
Didier <i>et al.</i> (1973)	$\log \sigma_g = u w_L + v \gamma_{so} - t w + k = 2,55 \frac{\gamma_{so}}{\gamma_w} - 1,705$	u, v, t et k sont des constantes w : teneur en eau naturelle (%) w_L (%) ; γ_{so} (g/cm ³) et σ_g (bars)
Brackley (1983)	$\varepsilon_g = (5,3 - 147 \frac{e}{I_p} - \log P)(0,525 I_p + 4,1 - 0,85 w_i)$ $\log \sigma_g = 5,3 - 147 \frac{e}{I_p}$	ε_g (%) σ_g (kPa) e : indice des vides P : surcharge extérieure (kPa) w_i (%) et I_p (-)
Nagaraj <i>et al.</i> (1983)	$\sigma_g = 17,86 - \frac{100 \frac{e_0}{e_1}}{4 - \log P_c}$	e_0 : indice des vides initial e_1 : indice des vides correspondant à la limite de liquidité P_c : pression de consolidation (kg/cm ³)
Komine et Ogata (1994)	$\varepsilon_g = (K \gamma_{so} - 1) \times 100$	ε_g (%) K est un constant γ_{so} (g/cm ³).
Guiras-Skandaji (1996)	$\varepsilon_g = -117,59 + 3,0571 \times w_i$	ε_g (%) w_i (%)

II-4-4-3-Méthodes directes d'identification :

La plupart des méthodes de détermination des paramètres caractéristiques de gonflement se font en laboratoire bien que certains auteurs (Mariotti, 1976 ; Ofer et Blight, 1985 ; Magnan, 1993) aient réalisé des essais in situ. Ces derniers sont coûteux et souvent très longs. C'est pour cela qu'on préfère réaliser des essais sur des échantillons de sols intacts ou remaniés à l'aide d'appareils classiques de laboratoire. Par ailleurs, il existe de nombreuses méthodes de caractérisation du gonflement au laboratoire, reflétant la complexité du phénomène et la diversité des situations rencontrées. Les méthodes fréquemment utilisées sont (Alonso et al., 1987) :

- la méthode de gonflement libre.
- la méthode de gonflement sous charges constantes.
- la méthode de gonflement à volume constant.

Ces essais peuvent être exécutés sur des échantillons intacts ou compactés. Le choix de la méthode dépend de la problématique posée et du but recherché. Chaque méthode tente de simuler le plus possible les conditions réelles du terrain, en fonction du comportement de l'ouvrage. Les essais sont exécutés couramment dans la cellule œdométrique. Conventionnelle à chargement par poids. Les principales méthodes utilisées sont décrites ci-après

II-4-4-3-1-Méthode de gonflement libre :

Dans l'essai de gonflement libre, l'échantillon, soumis à une faible pression correspondant au poids du piston et de la pierre poreuse, est laissé en contact avec l'eau. Une fois le phénomène de gonflement stabilisé, l'échantillon quasi-saturé suit un chemin de chargement par paliers avec stabilisation des déformations sous chaque palier. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener le volume de l'échantillon à sa valeur initiale (figure I-20).

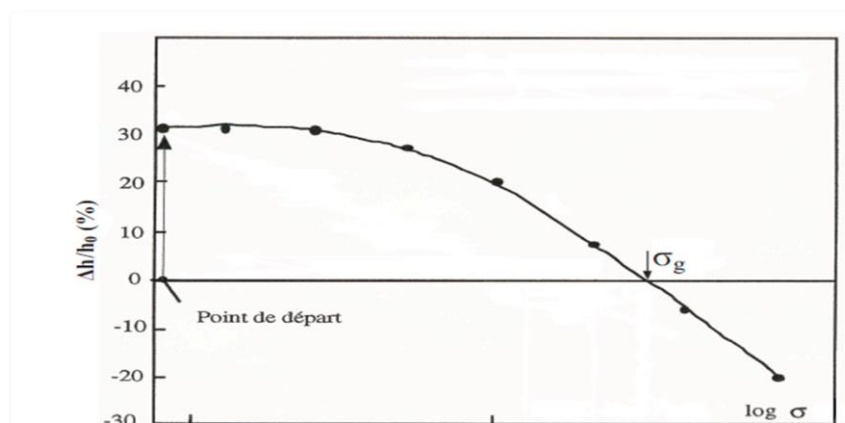


Figure I-20: Essais de gonflement libre [1].

II-4-4-3-2- Méthode de gonflement sous charges constantes :

Cette méthode est utilisée pour éviter l'inconvénient de la stabilisation de chaque palier de la méthode précédente. On peut utiliser une méthode dite « méthode de gonflement sous charges constantes » ou « méthode de gonflement en parallèle ». Elle nécessite plusieurs échantillons identiques : chaque échantillon est soumis à une humidification sous charge constante (pression verticale à l'œdomètre ou contrainte). Selon la valeur de la charge, il se produit un gonflement ou un effondrement du sol. En traçant la courbe des déformations volumiques en fonction des contraintes appliquées lors de l'humidification, on peut déterminer la contrainte correspondant à une déformation nulle, qui est la pression de gonflement (figure I-21).

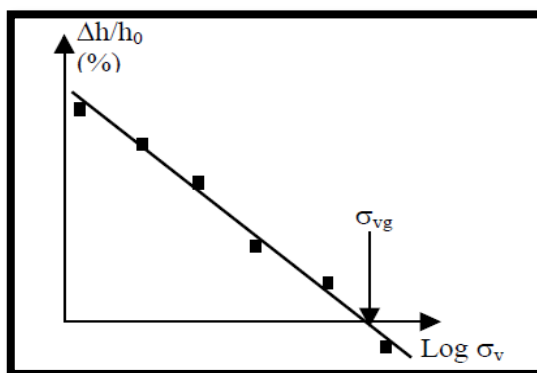


Figure I-21 : Essais de gonflement en parallèle [1].

II-4-4-3-3-Essai à volume constant :

Contrairement à la méthode de gonflement libre, la méthode de gonflement à volume constant ou empêché consiste à imbiber l'éprouvette sous une charge donnée, en maintenant sa hauteur constante par l'ajout successif de charges par petits paliers. Cette méthode a été fortement décriée car elle est délicate à mettre en œuvre (l'essai doit impérativement se dérouler par accroissement continu du chargement jusqu'à l'équilibre qui est atteint lorsque la charge est égale à la pression de gonflement) (figure I-22).

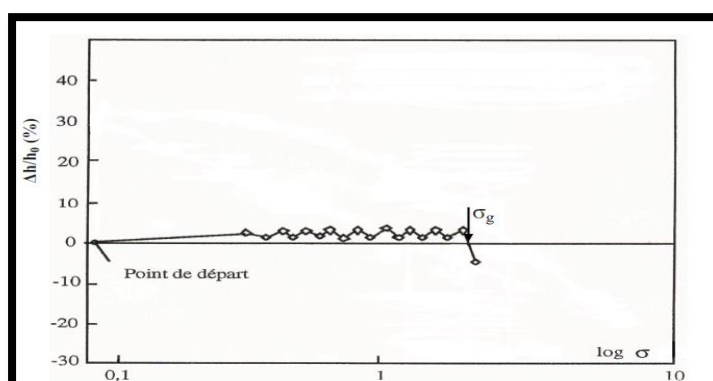


Figure I-22: Essai de gonflement à volume constant [1].

II-4-4-3-4 Comparaison des différentes méthodes :

La méthode de gonflement libre donne toujours des valeurs de la pression de gonflement plus élevées que les autres, pouvant aller jusqu'au double de celles des autres méthodes. La méthode de gonflement sous charges constantes donne des valeurs plus faibles et la méthode de gonflement empêché donne des valeurs moyennes qui se situent entre les deux.

La méthode de gonflement libre est très lente (plusieurs semaines). La mesure du gonflement empêché est délicate à mettre en œuvre et demande un appareillage particulier permettant un contrôle précis de la déformation de l'échantillon (déformation presque nulle). Mais, elle semble être la plus avantageuse car l'essai peut se faire sur un seul échantillon et elle est rapide (quelques jours) cependant, la méthode de gonflement sous charge constantes, bien qu'elle nécessite plusieurs échantillons identiques qui sont difficiles à réaliser, est plus rapide, car elle ne nécessite aucune augmentation de la charge exercée sur les échantillons et permet de définir la pression de gonflement après avoir obtenu l'équilibre sur chacun d'entre eux.

En comparant les déformations de gonflement mesurées in situ et celles déterminées avec les différentes procédures expérimentales, il semble que les valeurs de la pression de gonflement obtenues par la méthode à volume constant (empêché), soient les plus proches de celles effectivement constatées sur le terrain (Erol et al.,1987) et soient donc les plus pertinentes. Khaddaj (1992) est arrivé aux mêmes conclusions et a préconisé l'utilisation systématique de la méthode à volume constant, d'une part, pour éviter les hétérogénéités inhérentes à l'utilisation de différents échantillons (essais de gonflement sous charge constantes) et, d'autre part, pour limiter les problèmes de mesure, dus notamment aux frottements parasites survenant à l'intérieur des odomètres lors d'essais à gonflement libre.

II-4-5-Facteurs affectant le gonflement :

Les résultats de nombreuses études ont montré que l'amplitude du gonflement dépend de deux types de facteurs :

II-4-5-1-Facteurs intrinsèques :

Ce sont des facteurs propres à la microstructure du sol, parmi ces facteurs, on peut citer :

- L'influence de la composition minéralogique
- L'influence du type de cations compensateur
- L'influence de la capacité d'échange en cations (CEC)
- L'influence de la surface spécifique
- L'influence de la structure du sol
- L'influence la quantité de minéraux non argileux

II-4-5-2-Facteurs externes :

Ce sont des facteurs qui dépendent de l'environnement extérieur au sol, on peut citer :

- Conditions de compactage (statique ou dynamique)
- Influence de l'énergie de compactage
- Influence de la teneur en eau initiale
- Influence de la densité sèche
- Influence de l'effet d'échelle
- Influence du régime de contraintes
- Influence du frottement latéral
- Influence de la température
- Influence des cycles retrait-gonflement
- Influence de la durée des essais
- Influence de l'épaisseur

III- LES TECHNIQUES DE STABILISATION

III-1 : Introduction :

Les techniques de stabilisation des sols gonflants sont utilisées pour contrôler et réduire les problèmes associés au gonflement des argiles et des sols expansifs. Ces techniques visent à minimiser les variations volumétriques des sols, à renforcer leur capacité portante et à prévenir les mouvements indésirables des fondations

III-2 : But de la stabilisation :

le but de la stabilisation des sols gonflants est de préserver la stabilité, la solidité et la durabilité des constructions en contrôlant les effets indésirables du gonflement des argiles et des sols expansifs.

III-3 : Techniques de stabilisations utilisées :

La stabilisation des sols expansifs est souvent opérée pour augmenter leur résistance, ainsi que pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.

Les techniques de stabilisation les plus utilisées sont :

- la stabilisation mécanique.
- la stabilisation thermique.
- la stabilisation chimique.

Le choix de l'une de ces méthodes 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.

III-3-1 : stabilisation mécanique :

a- Compactage :

La plupart des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'augmenter leur stabilité mécanique et d'améliorer leur performance. La technique de stabilisation la plus reconnue est sans doute le compactage physico-mécanique qui augmente la stabilité mécanique de n'importe quel sol (Little. 1995). Par contre, le compactage à lui seul n'est pas toujours suffisant et ceci est particulièrement vrai pour les sols à granulométrie fine [7].

Dawson recommande de compacter les argiles à des densités minimales et Seed (1961) note que les argiles compactées du côté sec de l'optimum ont plus tendance à gonfler que si elles sont compactées du côté humide. Malheureusement, du côté humide, les argiles sont moins résistantes. Il faudrait donc retrouver un compromis [8].

b- Pré-humidification :

Le principe est de créer un gonflement avant la construction et si une forte teneur en eau est maintenue Le volume restera sensiblement constant par la suite. Deux techniques sont utilisées [8]:

- Simple arrosage par jet.
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

c- Substitution :

C'est la suppression de la couche du sol gonflant. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec du sable ou autres matériaux graveleux [8]. C'est une solution très coûteuse.

III-3-2 : Traitement thermique :

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile. En réduisant la répulsion électrique entre les particules sous l'effet de la chaleur, on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué [8].

II-3-3 : Stabilisation chimique (par additifs) :

Deux techniques de stabilisation chimique peuvent être effectuées :

❖ Stabilisations chimiques par ajouts des matériaux inertes :

Par exemple les sables, les graviers, utilisés en mélange avec les argiles gonflantes. Ces matériaux inertes réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns) et réduisent l'activité du gonflement de l'argile. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.

❖ Stabilisation chimique par additifs :

Elle est employée surtout pour des sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

Parmi les stabilisations les plus couramment utilisées, on distingue :

- Stabilisation par ajout de chaux.
- Stabilisation mixte (chaux-ciment).
- Stabilisation par ajout du ciment.

L'organigramme donné par la figure I-23, aide à choisir la stabilisation chimique appropriée pour un projet :

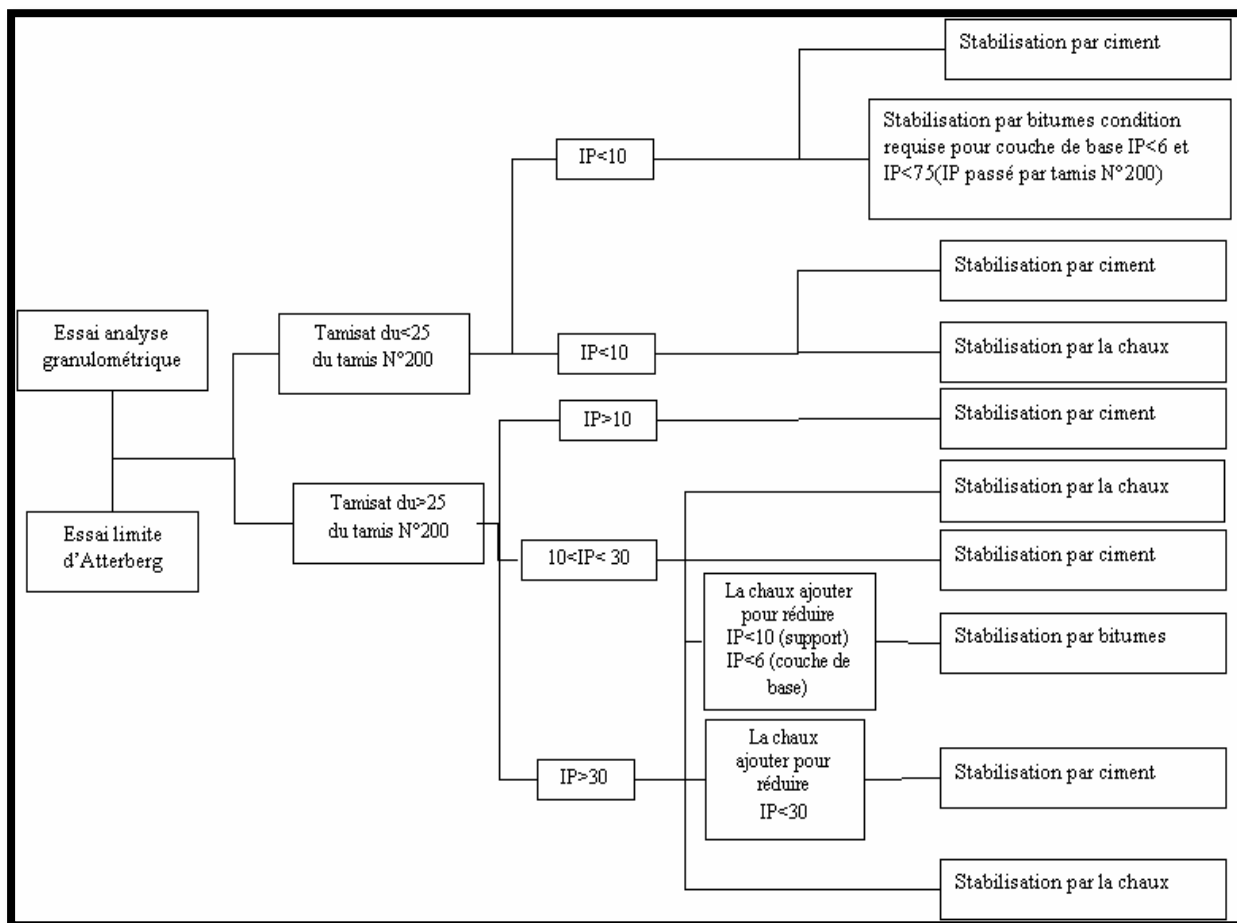


Figure I-23: Conditions d'utilisation de la stabilisation chimique (Dept. of the Army,1983).

a- Stabilisation par ajout de chaux :

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente (Biczysko, 1996; Greaves, 1996; Kelley, 1988). Little (1995), rapporte qu'en général, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurale équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé.

Plusieurs réactions sont initiées lors de l'ajout de la chaux à un sol à granulométrie fine : l'échange cationique et la floculation modifient presque instantanément la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation sous charge d'un sol (Moore, 1987).

b- Stabilisation par ajout de ciment :

Le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes :

- L'échange cationique.

- La floculation et l'agglomération de l'argile.
- L'hydratation par cimentation.
- Les réactions pouzzolanique.

Le ciment Portland possède des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux, soit celle de l'hydratation par cimentation. L'hydratation produit des matériaux de cimentation. Lorsque le ciment Portland est hydrate, en plus du C-S-H, il forme également l'hydrate d'alumine-calcique (C-A-H) et le Ca(OH)_2 . Le C-S-H et le C-A-H forment un réseau servant de « colle » donnant une structure et de la résistance au mélange (Prusinski et al. 1999), [10].

c- Stabilisation mixte chaux-ciment

L'ajout du ciment Portland conjointement avec la chaux aide à augmenter les propriétés mécaniques du sol traité. Généralement, le sol est traité dans un premier temps avec la chaux et en préparation à l'ajout du ciment. Cette première étape permet d'assécher le sol par absorption et évaporation de l'eau et nécessite seulement une faible application de chaux de l'ordre de 1 %. Ce processus de modification réduit considérablement l'indice de plasticité rendant le sol friable et donc plus maniable. L'ajout du ciment vient ensuite fournir au mélange les pouzzolanes nécessaires afin que le sol puisse gagner de la résistance mécanique dans le temps. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine, ont besoin de cet apport en ciment si les réactions pouzzolaniques (stabilisation) sont désirées.

Prusinski et al. (1999) rapportent également que, contrairement à la croyance populaire, le ciment Portland peut stabiliser efficacement des sols ayant un I_p pouvant atteindre 50.

Enfin. Chaddock (1996) rapporte que de plus grandes résistances ont été atteintes après sept jours sur une argile sableuse et une argile silteuse avec un traitement de chaux-ciment comparativement à un traitement à la chaux seule.

Il existe d'autres techniques de stabilisation tel que :

- Stabilisations par solutions salines
- Stabilisation par ajout des cendres volantes
- Drainage
- Applications à forts pressions

Le tableau I-13 présente les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation.

Tableau I-13 : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation, [11].

Technique	Procédés	Avantages	Inconvénient
Stabilisation mécanique	compactage	-Le compactage est le plus économique. -Réduire le potentiel expansif.	-Il faut une grande quantité d'eau.(compacteur au-dessus de l'optimum avec une W_n élevée).
	Substitution	-	-L'épaisseur de la couche -La disponibilité du matériau.
	Préhumidification	-	-Le temps de l'opération. -La distribution uniforme de W_n
	Méthode de contrôle	-Minimiser l'humidification ou dessèchement.	-La sensibilité a la variation de la teneur en eau.
Stabilisation thermique	Augmenter la température	-Réduire la répulsion électrique entre les particules.	-Très coûteuse.
Stabilisation chimique (par ajout de matériaux)	Les sels	-Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange.	-Le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation)
	Le ciment	-augmenter la résistance. -diminuer la plasticité -réduire le potentiel de variation de volume. -Augmenter la limite de retrait.	-utilisation d'un dosage important.
	La chaux	-diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement. -Augmenter la résistance et W_{opt} . -utilisation d'un faible dosage.	-Carbonation de la chaux.

IV- les caractéristiques chimique et physique des liants utilisés (Chaux et ciment).

IV-1 Caractérisation du ciment utilisée :

Le ciment utilisé pour ce traitement est le ciment Mâtine qui présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, en EN 197-1 et à la norme NF P 1-301 /94, fabriqué localement par l'usine LAFARGE M'sila .

IV-1-1 Caractéristique chimique :

- perte au feu (%), (NA 5042) : 7,50 – 12,00
- résidus insolubles (%), (NA 5042) : 0,70– 2,00
- teneur en sulfates SO_3 (%) (NA 5042) : 2,00 – 2,70
- teneur en oxyde de magnésium MgO (%) : 1,00 -2,20
- teneur en chlorures (%), (NA 5042) : 0,01 – 0,05
- teneur équivalent en alcalis (%) : 0,3 – 0,75

IV-1-2 Caractéristique physiques :

- consistance normale de la pâte de ciment (%) : 25 – 28,50

- finesse suivant la méthode de blataine (NA 231) : 4150 – 5250
- retrait a 28 jours en $\mu\text{m} / \text{m}$: < 1000
- expansion en mm : 0,3 – 2,5
- début de prise (min) : 140 – 195
- fin de prise (min) : 195 – 290
- 02 jours (MPA) : $\geq 10,0$
- 28 jours (MPA) : $\geq 42,5$

IV-2 Caractérisation de la chaux utilisée :

La chaux utilisée pour ce traitement est la chaux broyée (vive) fabriqué par l'unité chaux de la Briqueterie Moderne de Saida (BMSD).

IV-2-1-Les caractéristiques chimiques :

Les caractéristiques chimiques de la chaux de Saida:

- Humidité >5
- CaO >83.3
- MgO <0.5
- Fe_2O_3 <2
- Al_2O_3 <1.5
- SiO_2 <2.5
- SO_3 <2.5
- $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ <0.47 à 0.5
- CO_2 <5
- CaCO_3 <10
- Rendement >26
- Insoluble dans HC <1

IV-2-2-Les caractéristiques mécaniques :

- Densité 600 à 900 g/L
- Coefficient d'absorption <5
- Sensibilité au gel <30
- Volume d'extinction 2.73 / cm^3
- Poids spécifique 20 g/ cm^3
- Constance volumique Bonne
- Refus 630 μ 0%
- Refus 90 μ < 10.00%

Chapitre II

Présentation des résultats

Chapitre II

Présentation des résultats

II-1- Introduction

Dans ce chapitre on présente en deux parties les résultats des essais réalisés sur le sol de Sidi Hadjres:

- Une première partie concernant le sol témoin (non traité), qui comporte les essais d'identification (paramètres d'état, l'analyse minéralogique et chimique et limites d'Atterberg), et les essais mécaniques (Proctor normal, la portance immédiate avant et après imbibition, cisaillement direct et enfin le gonflement libre).
- Une deuxième partie portant sur le sol traité aux liants chimiques utilisés dans notre étude (Chaux, ciment et le mélange chaux-ciment), qui regroupe des essais d'identification (valeur de bleu de méthylène, limites d'Atterberg) et les essais mécaniques (portance immédiate avant, et après imbibition, cisaillement direct et le gonflement libre).

II-2 -Sol témoin (non traité) :

Cette partie présente en premier lieu les résultats des essais d'identification (paramètres d'état, analyse minéralogique et chimique, granularité, limites d'Atterberg), la classification du sol étudié selon la classification LPC (Magnan, 1980), la norme française NF P11-300 et ensuite les résultats des essais mécaniques (Proctor normal, la portance immédiate avant et après imbibition, cisaillement direct et le gonflement libre de deux échantillons remaniés).

II-2-1- Les essais d'identification :

II-2-1-1-Analyse minéralogique :

Il s'agit d'une analyse diffractométrique aux rayons X sur le sol témoin.

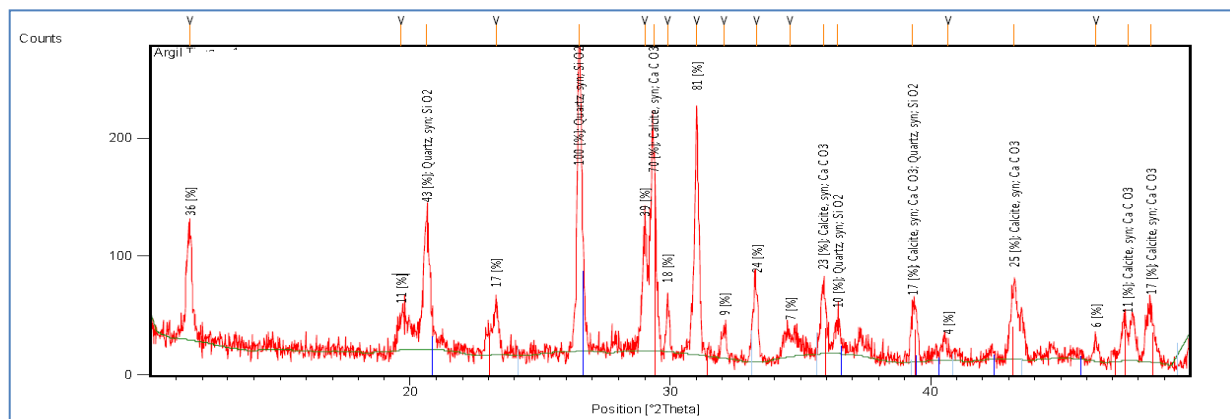


Figure II-1 : Analyse diffractométrique aux rayons X de l'argile étudiée.

II-2-1-2- Paramètres d'état :

L'argile étudiée est prélevée à une profondeur moyenne de 1,50 m.

Tableau II-1 : Détermination de la teneur en eau et de la masse volumique sèche et humide.

Désignation	Moule 1	Moule 2
Masse du moule (g) : m_1	265,66	661,64
Masse humide totale (g) : m_2	469,46	1 145,61
Masse sèche totale (g) : m_3	445,28	1 089,14
Volume du moule (cm ³) : V	100,00	200,00
Masse de l'eau (g) : $m_w = m_2 - m_3$	24,18	56,47
Masse du sol humide (g): $m_h = m_2 - m_1$	203,80	483,97
Masse du sol sec (g): $m_d = m_3 - m_1$	179,62	427,50
Teneur en eau (%) : $W_n = (m_w/m_d) \times 100$	13,46	13,21
La moyenne (%) : W_{nat}	13,34	
Masse volumique humide (g/cm ³) : $\gamma_h = m_h/V$	2,04	2,42
La moyenne: γ_h (g/cm ³)	2,23	
Masse volumique sèche (g/cm ³): $\gamma_d = m_d/V$	1,80	2,14
La moyenne: γ_d (g/cm ³)	1,97	

II-2-1-3- Analyse chimique :

Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans la figure II-2

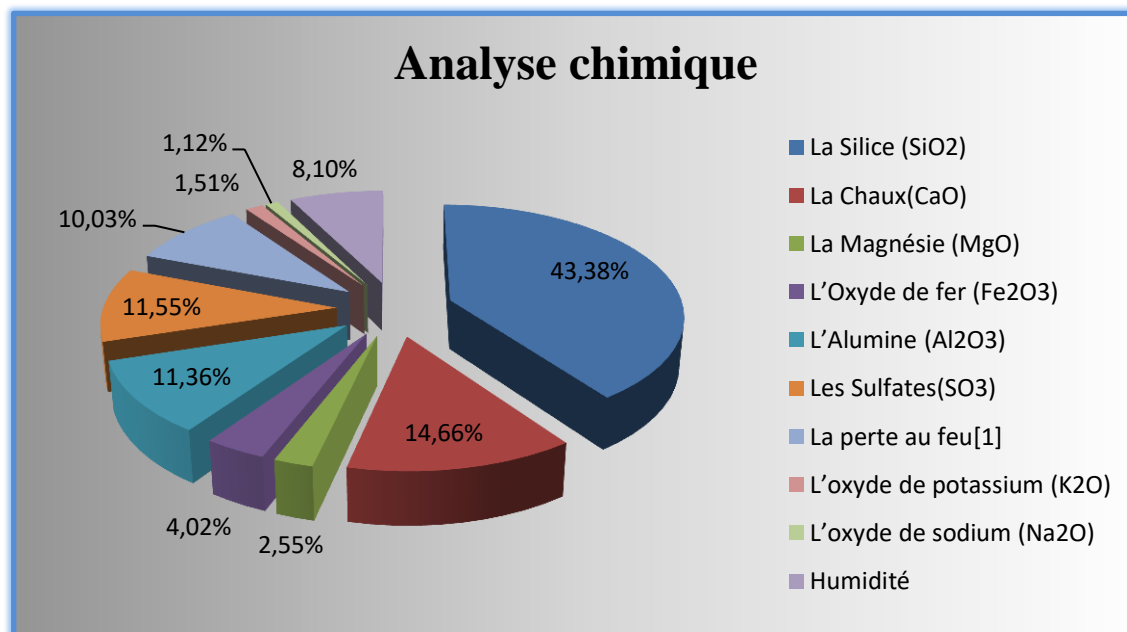


Figure II-2 : Analyse chimique de l'argile étudiée.

II-2-1-4-Analyse granulométrique :

a-Analyse granulométrique par tamisage :

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

Le tableau II.2 Est issu de Trois (03) essais d'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.

Tableau II.2 : Résultats des essais analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Tamisas (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy
5	97,74	97,81	99,06	98,2
2	95,01	95,59	95,98	95,53
1	92,45	92,98	94,54	93,33
0,4	87,44	87,59	90,21	88,41
0,1	80,99	81,7	87,14	83,28
0,08	80,39	64,6	81,85	75,61
0,066	79,12	63,57	74,75	72,48
0,047	78,16	62,8	73,12	71,36
0,034	76,57	61,52	71,5	69,86
0,02	74,97	60,24	70,2	68,47
0,015	71,78	57,68	68,9	66,12
0,011	66,68	53,58	66,62	62,29
0,008	60,62	48,71	65	58,11
0,006	52	41,78	61,75	51,85
0,003	28,71	23,07	39	30,26
0,001	22,33	17,94	22,75	21,01

Tableau II-3: La moyenne des tamisats à 0.080mm et à 0.002 mm des trois essais de sédimentométrie.

Tamis (mm)	Tamisat (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
0,080	80,35	80,39	81,85	80,86
0,002	25,52	25,53	30,87	27,31

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

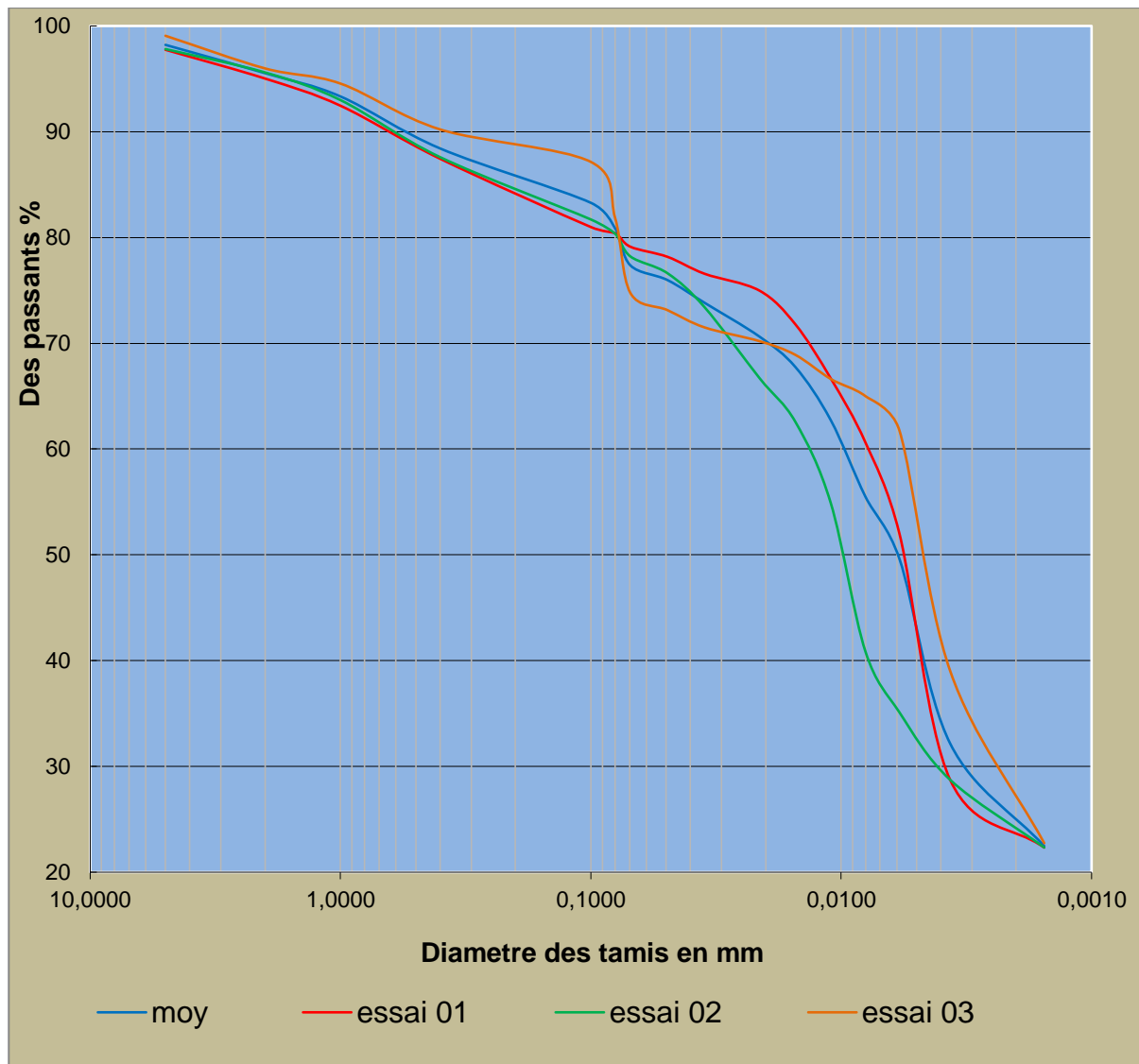


Figure II.3 : Courbes d'Analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).

II-2-1-5- Limites d'Atterberg :

Trois essais ont été réalisés pour la détermination des limites d'Atterberg, le tableau ci-dessous représente la récapitulation des résultats de ces essais.

Tableau II-4: Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg.

Essai N°	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	$I_c = (W_L - W_{nat}) / I_p$	$Ac = I_p / C_2$	$Acor = I_p / (C_2 - 10)$
1	81,46	30,61	50,85	1,34	1,86	2,94
2	83,07	31,19	51,88	1,34	1,90	3,00
3	86,68	36,57	50,11	1,46	1,83	2,89
La Moyenne	83,74	32,79	50,95	1,38	1,87	2,94

La figure ci-dessous représente le classement du sol dans l'Abaque de Casagrande

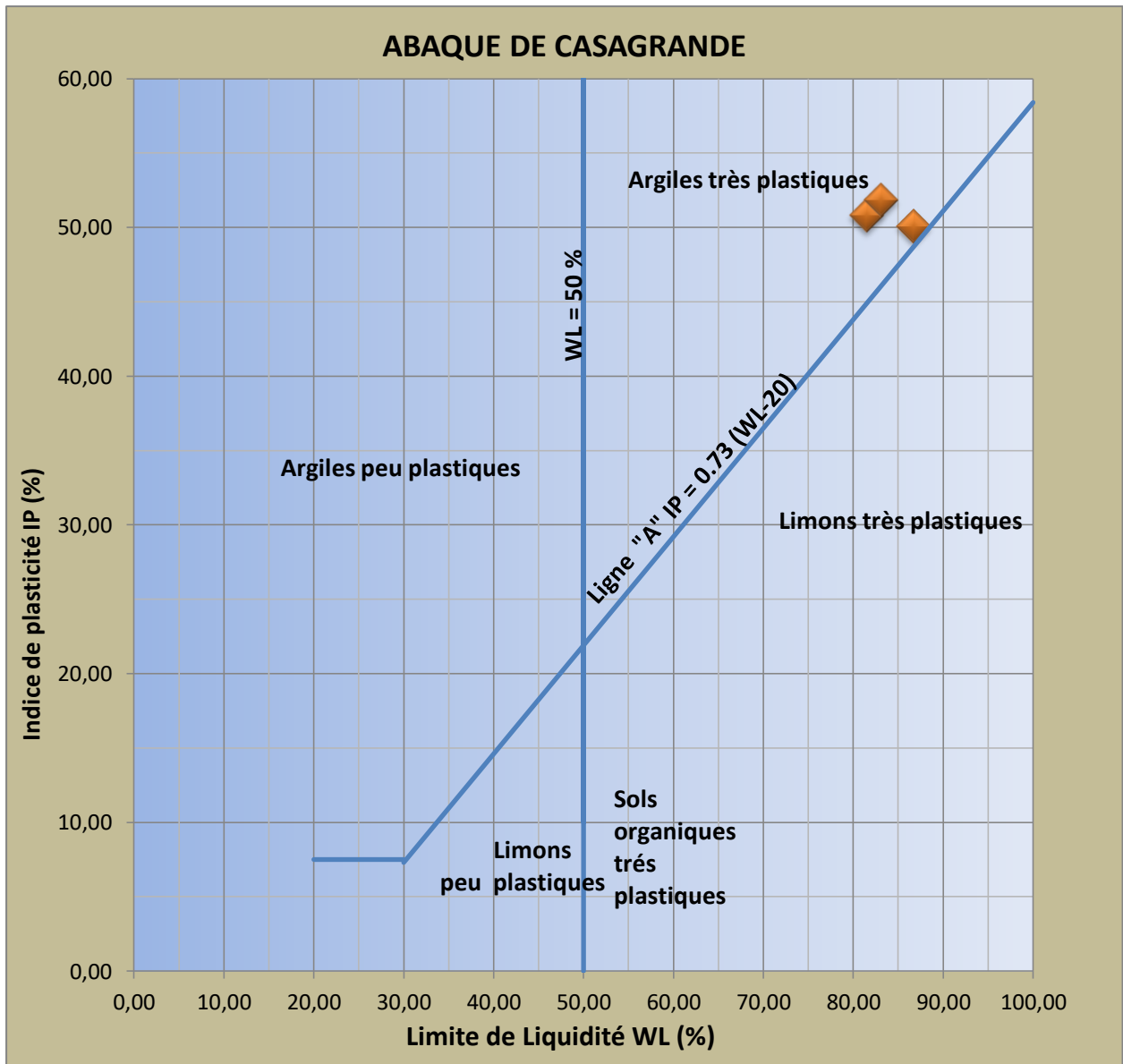


Figure II.4 Classement du sol dans l'Abaque de Casagrande

La figure ci-dessous représente le classement du sol dans l'Abaque de Casagrande adapté aux sols gonflants.

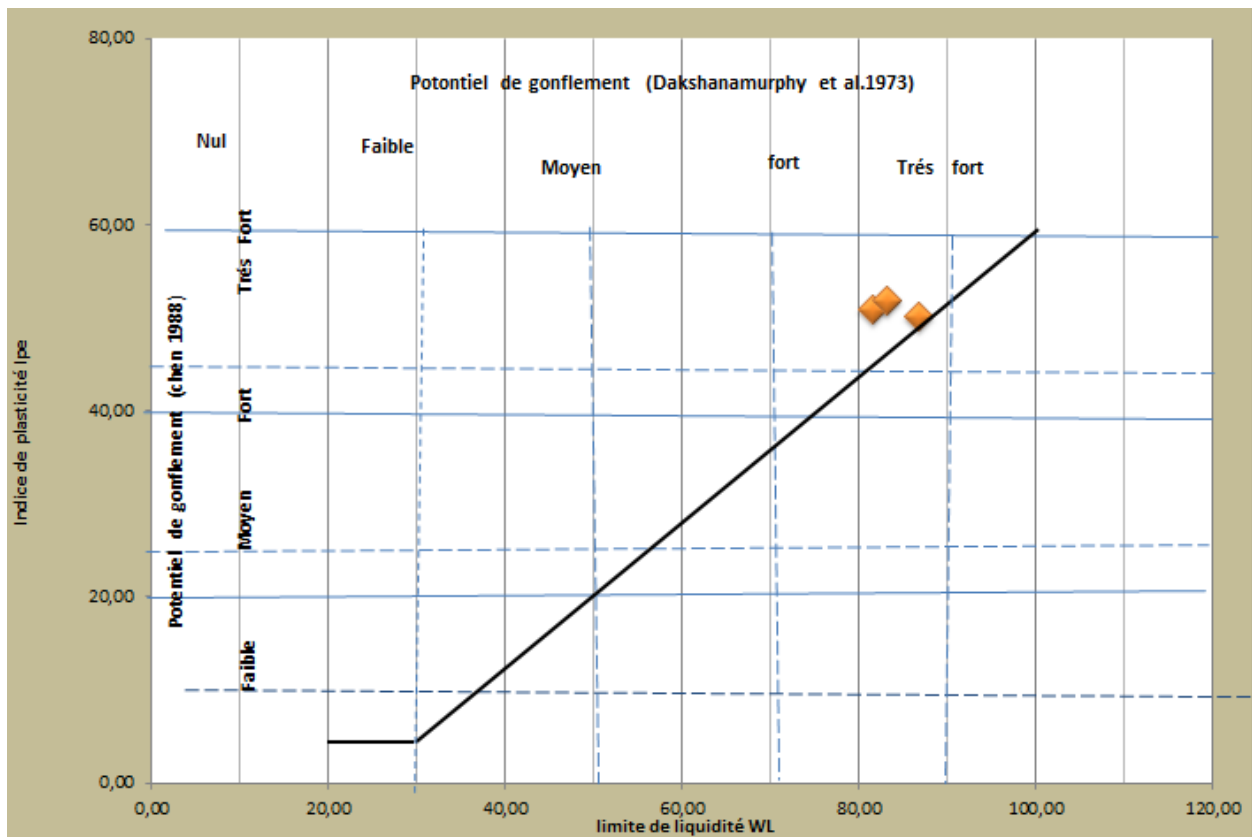


Figure II.5 Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

II-2-1-6 Essai au bleu de méthylène

Six essais réalisés dont le résumé est indiqué au tableau ci-dessous.

Tableau II-5: Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche.

	Masse du sol (g)	Volume de la solution (cm ³)	VBS (g/cm ³)	SST (m2/g)
Essai 1	30	230	7,67	160,46
Essai 2	30	225	7,50	156,98
Essai 3	30	222	7,40	154,88
Essai 4	30	280	9,33	195,35
Essai 5	30	293	9,77	204,42
Essai 6	30	245	8,17	170,93
La moyenne	30	249,17	8,31	173,84

Le tableau II-6 résume les caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau II-6 : Caractéristiques d'identification du sol témoin étudié.

Profondeur	1,4-1,60	1,5
Paramètres	Plages de variation	Moyenne
Teneur en eau naturel W_{nat} (%)	13,462 – 13,209	13,34
Poids volumique humide γ_h (g/cm ³)	2,038 – 2,420	2,23
Poids volumique sec γ_d (g/cm ³)	1,796 – 2,138	1,97
Limite de liquidité W_L (%)	81,46 – 86,68	83,73
Limite de plasticité W_P (%)	30,61 – 36,57	32,79
Indice de plasticité I_p (%)	50,11 – 51,88	50,95
Valeur de bleu de méthylène VBS (%)	7,40 – 9,77	8,31
Surface spécifique totale (m ² /g)	154.88-204.42	173.84
Passants à 2 mm (%)	95,01 – 95,98	95,52
Passants à 80 μ m (%)	80,35 – 81,85	80,86
Passants à 2 μ m (%)	25,52 – 30,87	27,31
Indice de consistance I_c (%)	1,34 – 1,46	1,38
Activité de la fraction argileuse (Ac)	1,83-1,90	1,87

-Interprétation des résultats des essais d'identification

L'analyse minéralogique aux rayons X montre que la silice est cristallisée sous forme de quartz et les carbonates sont sous forme de calcites CaCO₃ (carbonate de calcium).

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

La teneur en Silice (<50 %), reflète la faible présence du sable dans cette argile. Cela a un rapport avec l'analyse granulométrique qui sera traitée par la suite. Cette teneur en Silice reste inférieure à 80 %, qui est la frontière entre les sols gonflants et non gonflants.

Les analyses granulométriques réalisées donnent un pourcentage des passants à 80 μ m compris entre 80,35 % et 81,85 % avec une moyenne de 80,86 %. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie très fine. Le pourcentage de passants à 2 μ m varie entre 25.52 % et 30.87 % avec une moyenne de 27.31 %. La limite de liquidité varie entre 81,46 % et 86,68 % avec une moyenne de 83,73 % et l'indice de plasticité I_p varie entre 50,11 % et 51,88 % avec une moyenne de 50,94 % .

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

Selon la classification LPC en vigueur (Magnan, 1980), il s'agit d'une argile très plastique (Atp) très consistante avec une activité importante de sa fraction argileuse qui indique la

présence de montmorillonite calcique. Les modifications de la teneur en eau de ce type de sol sont généralement accompagnées de retrait ou gonflement considérable.

La valeur de bleu VBS est égale à 8,30. D'après la norme française NF P 11-300, il s'agit d'un sol très argileux et la valeur de la surface spécifique totale (SST) correspondante est égale à 173,84 m²/g. Cette valeur dépasse largement 100 m²/g, ce qui implique que notre argile est constituée essentiellement de minéraux de type vermiculite, qui sont **des argiles gonflantes**.

II-2-2 -Les essais mécaniques :

II-2-2-1 Essais Proctor normal :

Le tableau II-7 résume les caractéristiques des essais de Proctor normal effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau II-7: Résumé des résultats des essais Proctor normal.

	W_{opt} (%)	γ_d (g/cm ³)
Essai 01	19,2	1,61
Essai 02	19,5	1,61
Essai 03	19,6	1,59
Moyenne	19,43	1,60

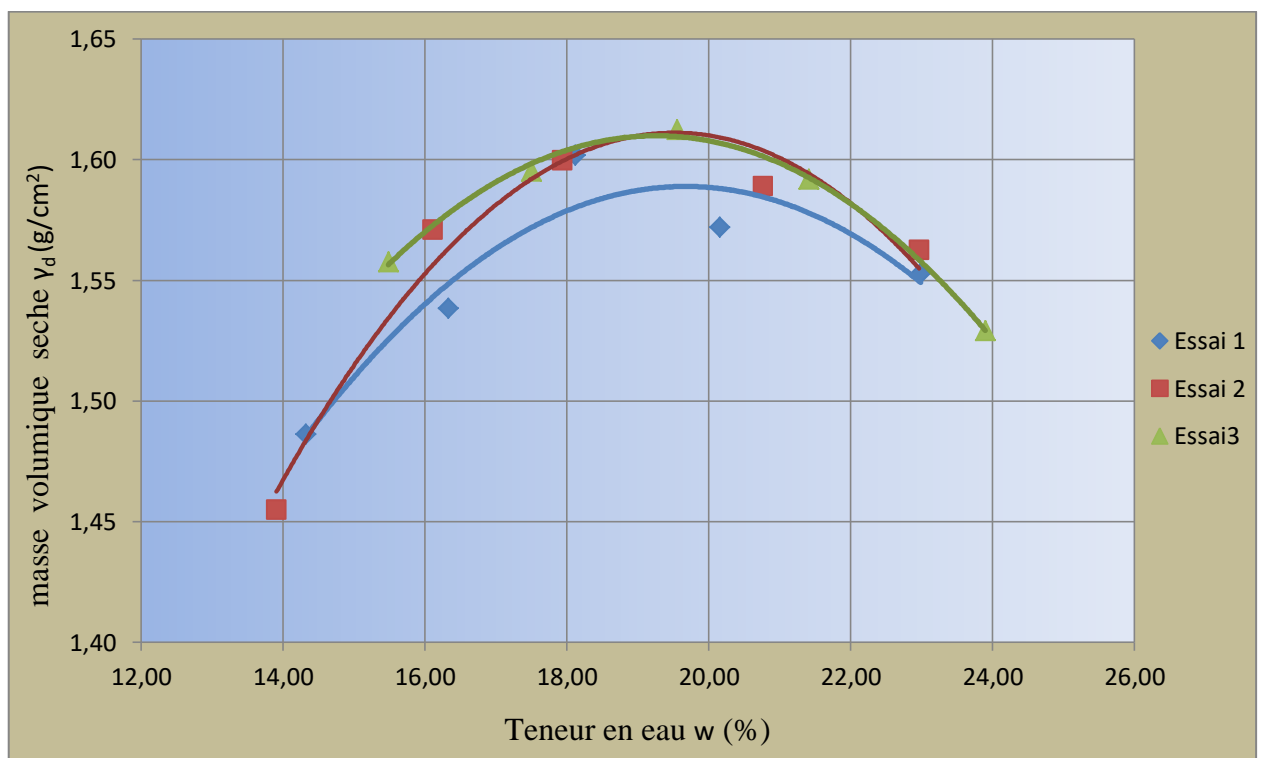


Figure II-5 bis : Résultats de Trois (03) essais de Proctor normal.

La teneur en eau à l'optimum Proctor normal $W_{opt} = 19,43$ % et le poids volumique sec à l'optimum Proctor normal $\gamma_{dopt} = 1,60$ g/cm³.

II-2-2-2 Essai C.B.R. immédiat et imbibé

a- C.B.R. immédiat :

Le tableau II-8 résume les résultats des essais du C.B.R immédiat effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau II-8 : Résultats des essais du C.B.R immediate

Enfoncements (mm)	Pressions (kg/cm ²)		Coefficient de l'anneau K=0.0222			
	Essai 1	Essai 2	Pressions moyenne (kg/cm ²)	Indice C.B.R immédiat à 2,5 mm	Indice C.B.R immédiat à 5 mm	Indice C.B.R immédiat max
0,625	44,40	44,40	44,40	8,32	6,69	8,32
1,250	66,60	66,60	66,60			
2,000	88,80	88,80	88,80			
2,500	111,00	111,00	111,00			
5,000	133,20	133,20	133,20			
7,500	144,30	155,40	149,85			
10,000	155,40	155,40	155,40			
12,500	155,40	177,60	166,50			

L'indice C.B.R immédiat maximum recherché qui correspond à l'indice de 2.5 mm d'enfoncement est égale à 8.32.

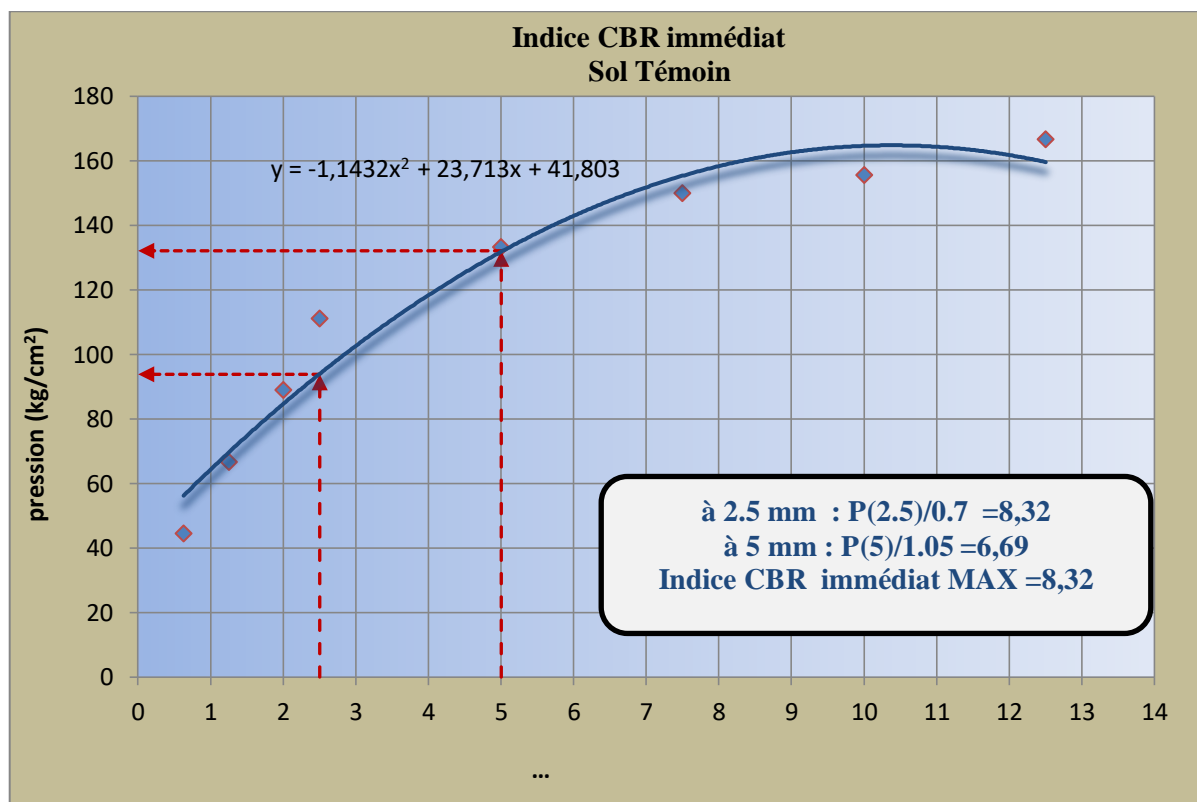


Figure II-5 bis1 : Résultats des forces de poinçonnement moyenne en fonction des enfoncements indice C.B.R. immediat MAX

b- C.B.R après imbibition :

Les tableau II-9 présentent les valeurs des forces de pénétration en fonction des enfoncements et de l'indice C.B.R. après imbibition (04 jours) du sol témoins confectionnée aux caractéristiques optimales de Proctor normal.

Tableau II-9 : les résultats des essais du C.B.R après imbibition

		Coefficient de l'anneau K	0,02331			
Temps	Enfoncements (mm)	Lecture (µm)	Force de poinçonnement (KN)	Indice C.B.R imbibé à 2,5 mm	Indice C.B.R imbibé à 5 mm	Indice C.B.R max
30"	0,625	9,000	0,21	2,79	2,57	2,79
1'	1,250	13,000	0,30			
1'40"	2,000	15,000	0,35			
2'	2,500	16,000	0,37			
4'	5,000	22,000	0,51			
6'	7,500	26,000	0,61			
8'	10,000	30,000	0,70			
10'	12,500	30,000	0,70			

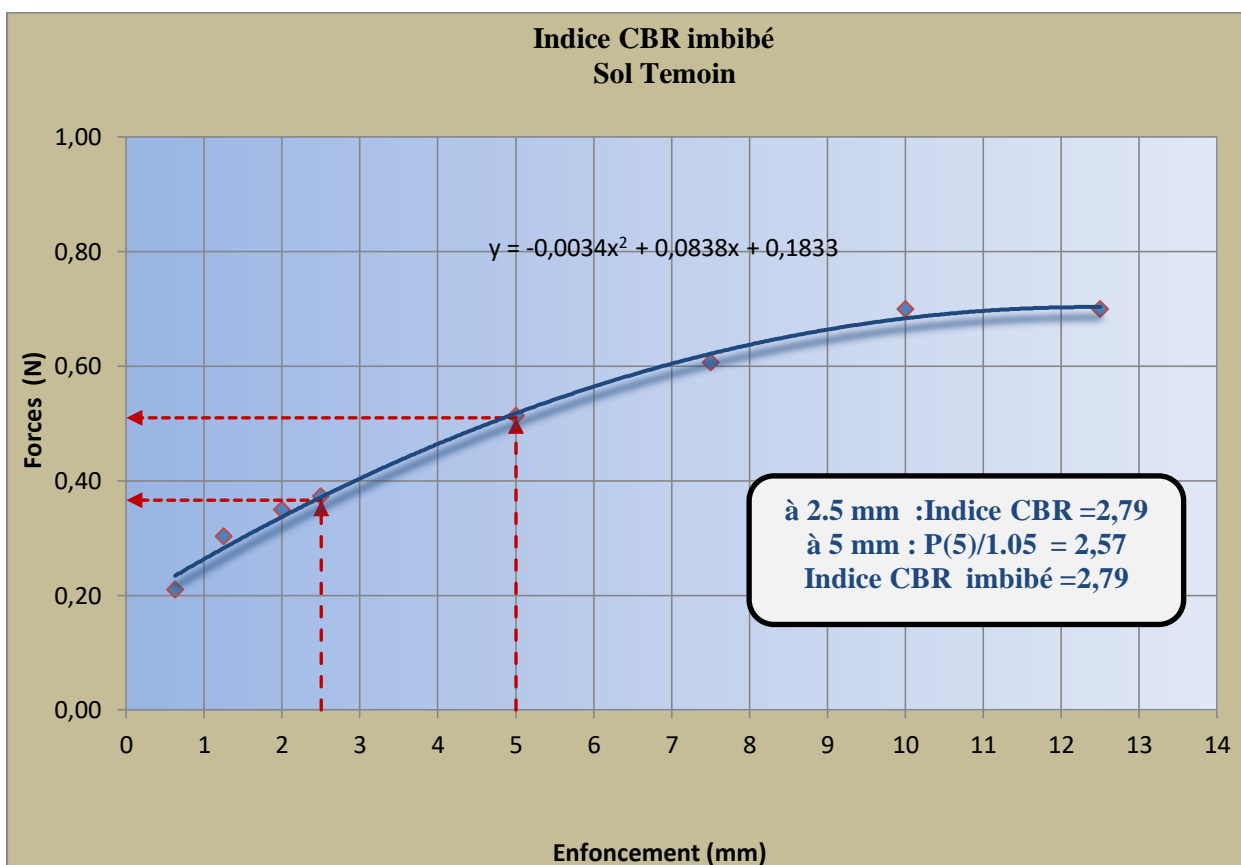


Figure II-6 : Résultats des forces de poinçonnement en fonction des enfoncements indice C.B.R. immédiat MAX

L'indice CBR après imbibition maximum recherché qui correspond à l'indice de 2.5 mm d'enfoncement est égal à 2.79, et un taux de gonflement linéaire égal à 2.04.

Le tableau IV-29 résume les caractéristiques moyennes des essais CBR immédiat et après imbibition effectués sur les deux éprouvettes témoins étudiées.

Tableau II-10: Les moyennes de l'indice C.B.R. immédiat, imbibé et gonflement linéaire du sol témoin

	<i>Indice C.B.R immédiat</i>	<i>Indice C.B.R imbibé</i>	<i>Gonflement g (%)</i>
Eprouvette 01	8,32	2,79	2,06
Eprouvette 02	8,32	2,79	2,01
Moyenne	8,32	2,79	2,04

II-2-2-3 Gonflement libre

Le tableau II-11 présente les résultats des essais de gonflement libre effectués sur deux échantillons remaniés.

Tableau II-11: Résultats des essais de gonflement libre de deux échantillons remaniés.

	Profondeur	γ_h (g/cm ³)	W (%)	γ_d (g/cm ³)	e_0	e_f	ε_g (%) = ($e_f - e_0$)/ e_0	Pg (bar)
Echantillon 1	1,50	1,62	29,12	1,25	1,16	1,43	22,84	6,00
Echantillon 2		1,58	24,04	1,27	1,07	1,30	21,44	3,80
Moyenne		1,60	26,58	1,26	1,12	1,36	22,14	4,90

II-2-2-4 Cisaillement direct (UU)

Le tableau II-12 présente les résultats des essais de cisaillement direct non consolidé, non drainé effectués sur trois échantillons confectionnés à l'optimum Proctor normal. Le tableau II-13 présente les moyennes des forces de cisaillement maximales pour les trois couches.

Tableau II-12: Résultats de l'essai de cisaillement.

Couche Supérieure		Couche intermédiaire		Couche inférieure	
Déplacement horizontal (mm)	Effort de cisaillement (N)	Déplacement horizontal (mm)	Effort de cisaillement (N)	Déplacement horizontal (mm)	Effort de cisaillement (N)
0.432	127	0.405	72	0.405	86
0.863	175	0.860	146	0.886	178
1.339	207	1.293	207	1.315	249
1.860	237	1.782	259	1.797	296
2.353	255	2.291	298	2.318	338
2.828	266	2.782	325	2.809	365
3.319	277	3.264	342	3.293	386
3.854	284	3.755	361	3.784	406
4.362	292	4.279	383	4.311	426
4.847	298	4.772	402	4.805	443

Tableau II-13: Récapitulatif des résultats moyennes de cisaillement par couche.

	Couche supérieure	Couche intermédiaire	Couche inférieure	La Moyenne
Déplacement horizontal max (mm)	4.85	4.77	4.81	4,80
Force de cisaillement max (N)	298	402	443	381

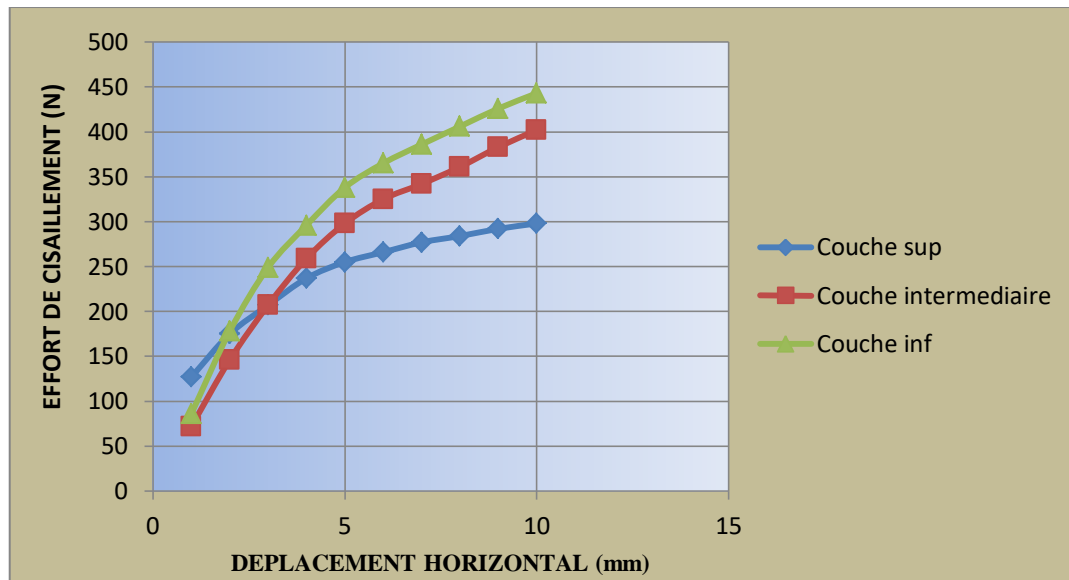


Figure II-7: Courbes d'effort de cisaillement en fonction du déplacement horizontal des différentes couches.

Evaluation de potentiel de gonflement :

Le tableau II-14 expose la comparaison des résultats d'estimation de potentiel de gonflement du sol de Sidi-Hadjress obtenus par différentes méthodes connues dans la littérature scientifique.

Tableau II-14 : Comparaison des potentiels de gonflement déterminés par différentes méthodes.

Classification	Potentiel de gonflement	Potentiel de retrait
Seed et al (1962)	Elevé à très élevé	
Snertzen	Très élevé	
BRE (1980)		Très élevé
Chen(1988)	Elevé à très élevé	
Bigot et Zerhouni (2000)	Fort	
Williams et Donaldson (1980)	Fort	
Dakshanamurphy et al (1973)	Fort	

On constate un bon accord entre ces classifications. Le caractère expansif du sol examiné apparaît clairement à travers l'ensemble des classifications adaptées, elles concluent que l'argile de Sidi-hadjres est caractérisée par un potentiel de gonflement d'élevé à très élevé.

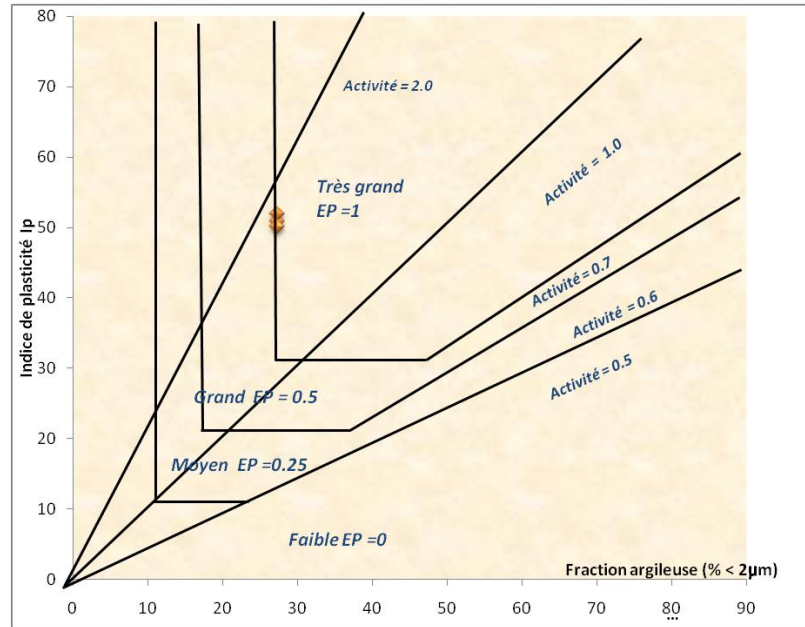


Figure II-8 Williams et Donaldson (1980).

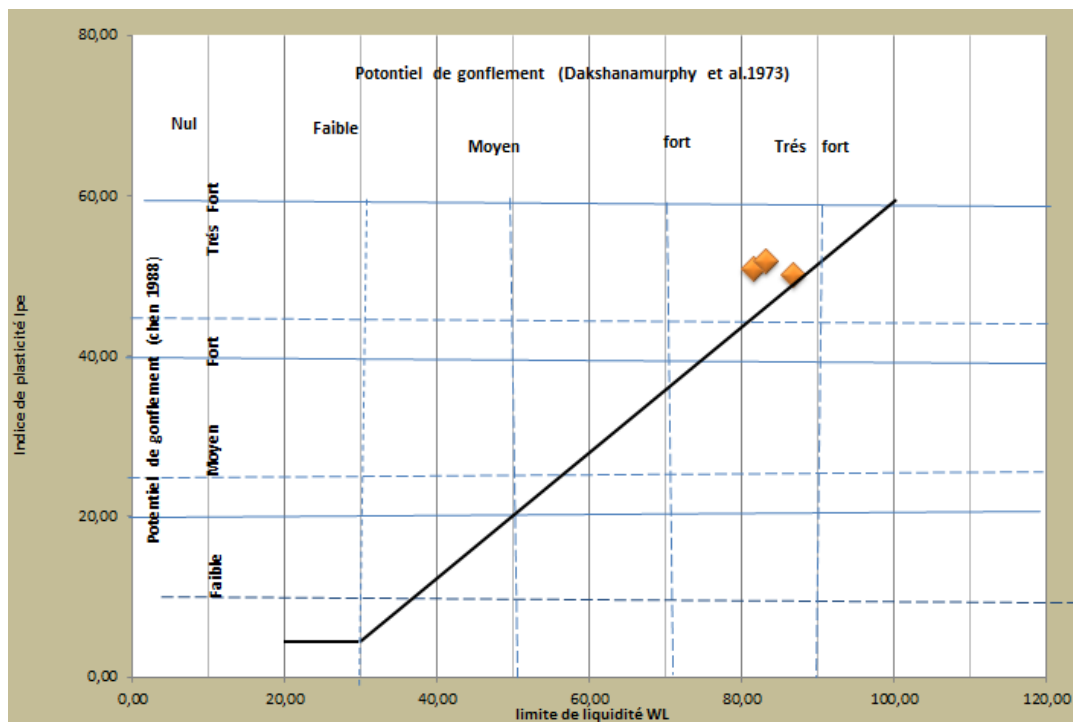


Figure II-9 Classement sur l'Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

II-3- Sol traité:

Cette partie comporte les résultats des valeurs au bleu du sol, des essais des limites d'Atterberg, la portance immédiate et après imbibition avec le gonflement linéaire du sol étudié traité à différentes teneurs aux liants chimique utilisés dans notre étude, ainsi que les résultats des essais de cisaillement direct et le gonflement libre des échantillons obtenus à partir des éprouvettes traitées à différentes valeurs chaux, ciment et le mélange chaux-ciment confectionnées à la teneur en eau optimale ($W_{opt} = 19,43\%$).

II-3-1- Les essais d'identification :

II-3-1 -1- Les limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg sont des paramètres essentiels dans l'estimation du potentiel de gonflement des sols expansifs, alors il est nécessaire de voir comment l'ajout à différentes teneurs en Chaux, ciment et au mélange chaux-ciment influe sur les limites de liquidité et de plasticité en plus de l'indice de plasticité de l'argile étudiée.

II-3-1 -1-1 traitement à la Chaux

Le tableau II-15 présente un récapitulatif de la limite de liquidité, limite de plasticité ainsi que l'indice de plasticité correspondant à des différents teneurs en chaux.

Tableau II-15 : Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en chaux

<i>Teneur en chaux (%)</i>	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)
<i>Témoin</i>	83,74	32,79	50,95
<i>2%</i>	49.12	35.78	13.34
<i>4%</i>	43.47	34.87	9.07
<i>6%</i>	41.55	30.87	10.67
<i>8%</i>	45.04	33.34	11.70
<i>10%</i>	41.01	33.36	7.64
<i>12%</i>	43.26	30.26	13.00
<i>La Moyenne</i>	43.90	33.08	10.90

La figure II-10 présente la courbe de la limite de liquidité en fonction de la teneur en chaux.

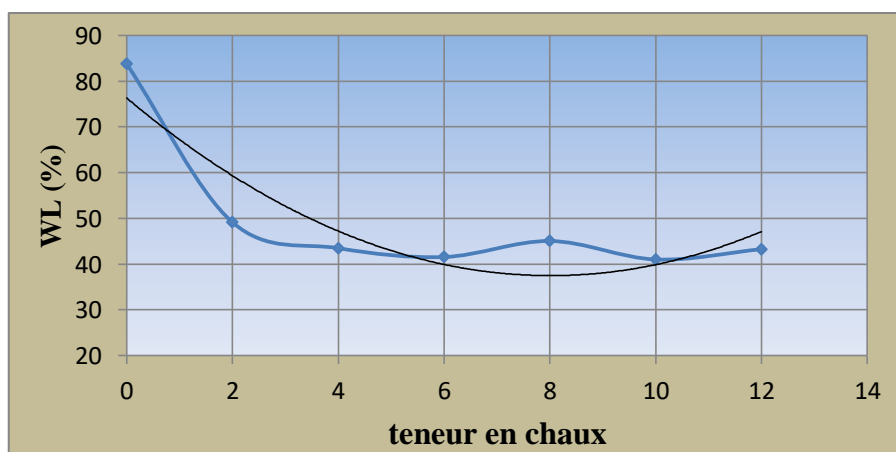


Figure II-10 Limite de liquidité en fonction de la teneur en chaux

La figure II-11 présente la courbe de la limite de plasticité en fonction de la teneur en chaux

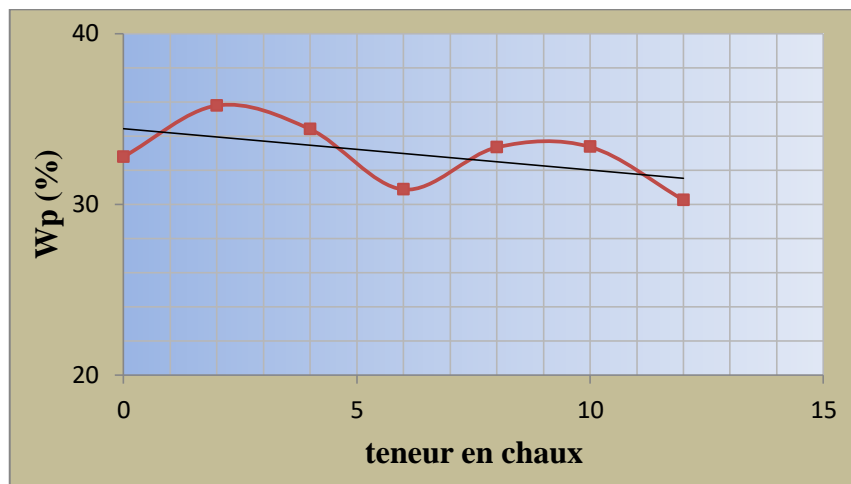


Figure II-11: Limite de plasticité en fonction de la teneur en chaux

La figure II-12 présente la courbe de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en chaux

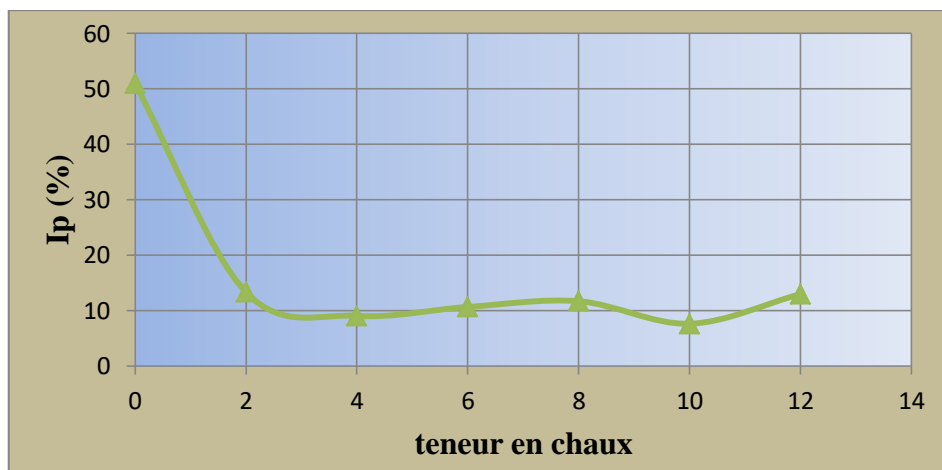


Figure II-12 : La courbe de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en chaux

II-3-1 -1-2 traitement au ciment

Le tableau II-16 résume l'ensemble des valeurs moyennes des limites de liquidité, des limites de plasticité et des indices de plasticité en fonction des teneurs en ciment.

Tableau II-16: Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en en ciment.

Teneur en ciment(%)	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)
Témoin	83,74	32,79	50,95
2%	60,94	26,46	34,49
4%	52,06	29,85	22,20
6%	48,94	32,38	16,56
8%	43,66	28,85	14,81
10%	43,85	31,80	12,05
12%	46,08	33,97	12,11
La Moyenne	49,25	30,55	18,70

La figure II-13 présente la courbe de variation de la limite de liquidité en fonction du teneur en ciment.

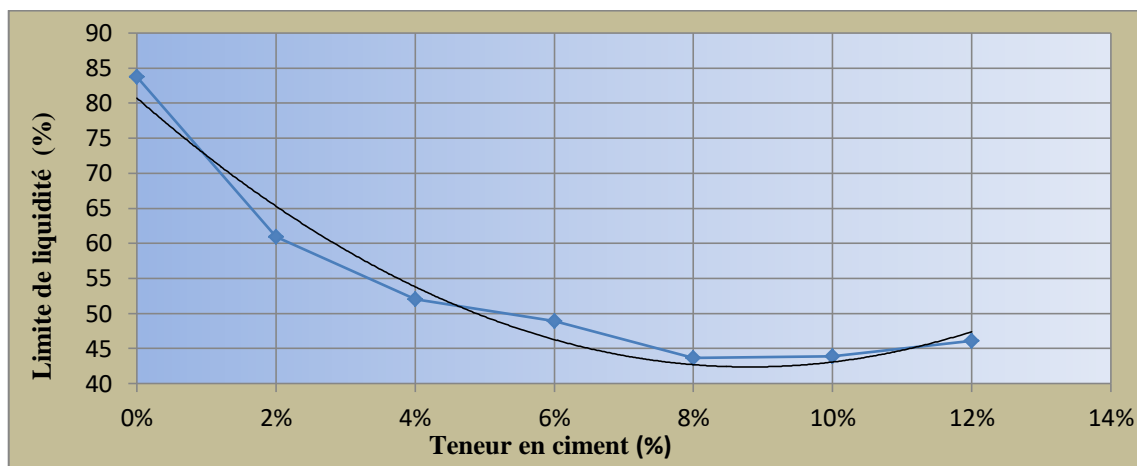


Figure II-13 : Limite de liquidité en fonction du teneur en ciment.

La figure II-14 Présente la courbe de variation de la limite de plasticité en fonction du teneur en ciment.

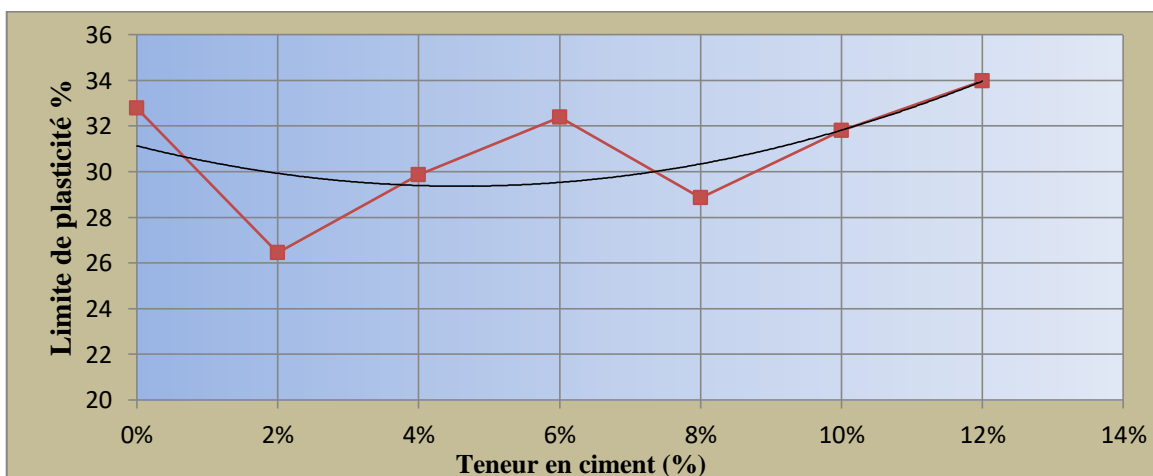


Figure II-14 : Limite de plasticité en fonction du teneur en ciment.

La figure II-15 Présente la courbe de variation de l'indice de plasticité en fonction du teneur en ciment.

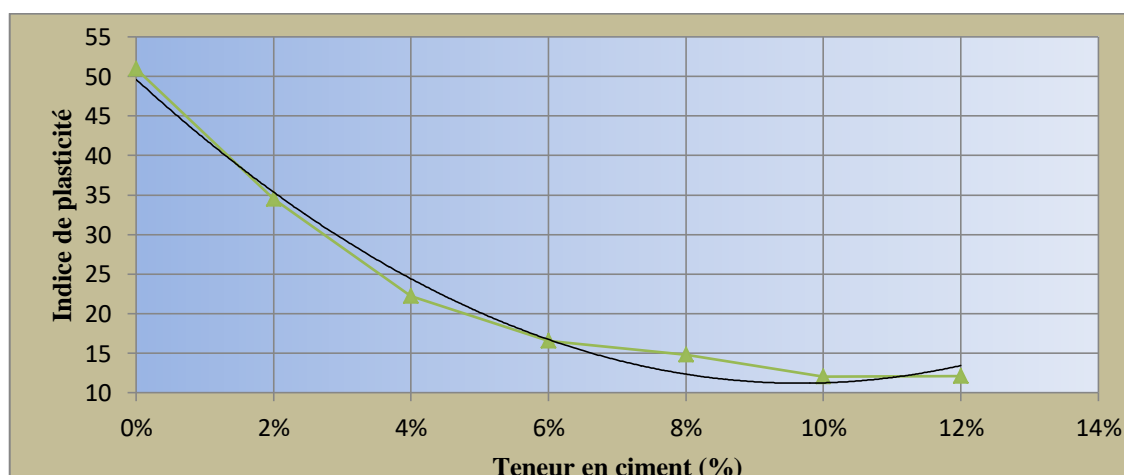


Figure II-15 : L'indice de plasticité en fonction du teneur en ciment.

II-3-1 -1-3 traitement au mélange Chaux/ciment

Le tableau II-17 présente la récapitulation des résultats des essais du sol étudié traité à différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableaux II-17 : Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en chaux-ciment.

Teneur en ciment (%)	W _L (%)	W _p (%)	I _p (%)
Témoin	83,74	32,79	50,95
2/2	48,84	38,60	10,24
2/4	44,52	33,40	11,11
2/10	46,11	36,23	9,88
4/2	47,70	37,52	10,18
4/4	48,90	36,06	12,84
4/8	44,99	35,13	9,86
6/6	45,36	44,27	1,09
8/4	44,80	34,92	9,88
10/2	43,84	33,99	9,84
La Moyenne	45,95	36,87	9,08

La figure II-16 Présente l’histogramme de variation des limites de liquidité en fonction de la teneur en chaux/ciment

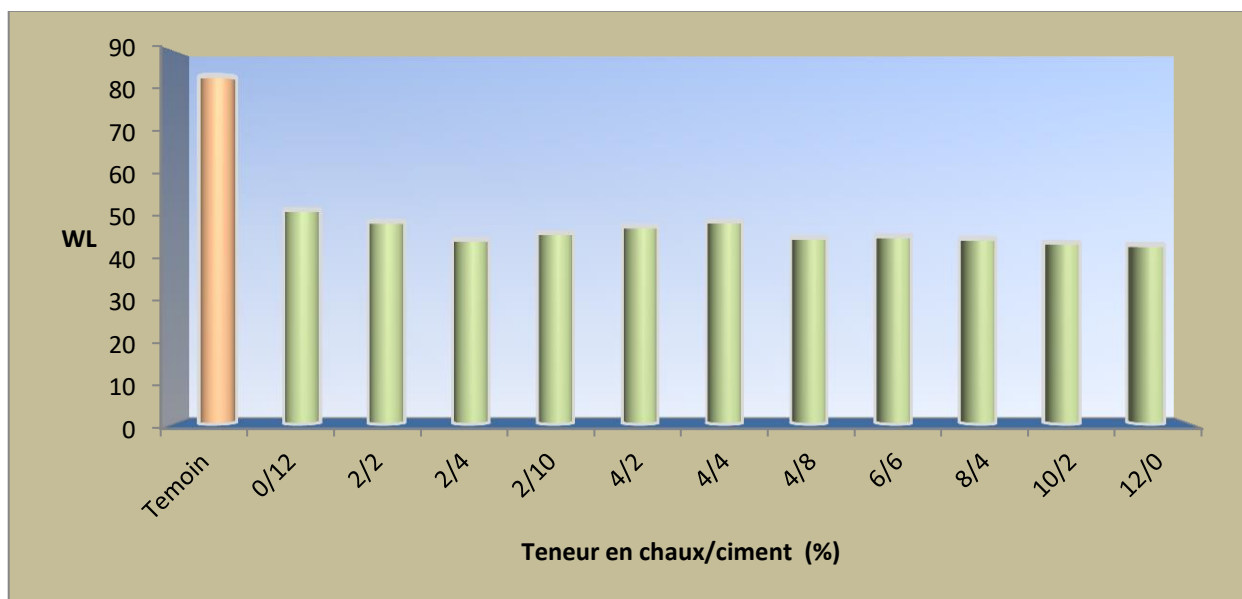


Figure II-16: Histogramme des limites de liquidité en fonction de la teneur en chaux/ciment

La figure II-17 Présente l’histogramme de variation des limites de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment.

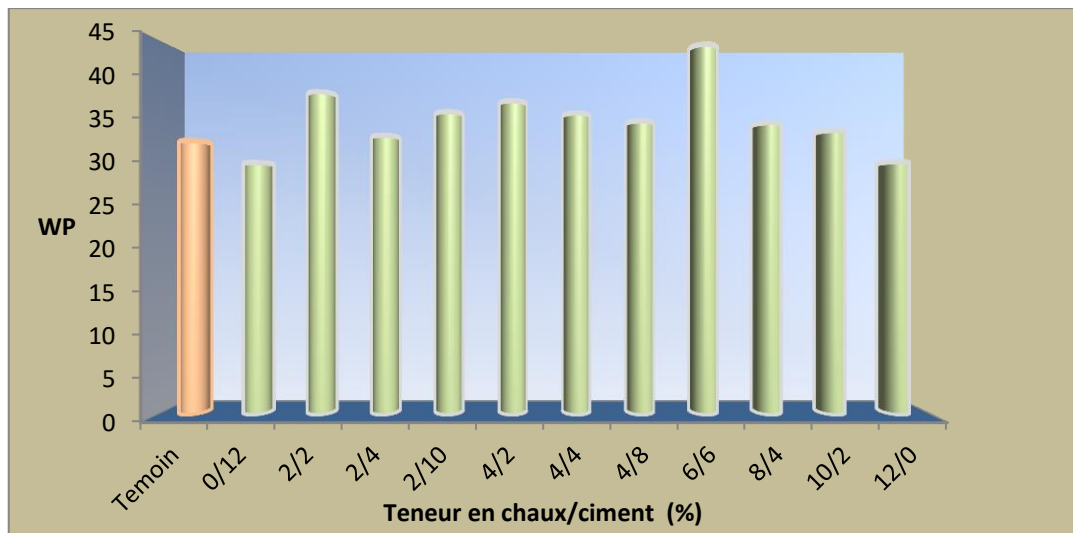


Figure II-17 : Histogramme des limites de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment.

La figure II-18 présente l'historgramme de variation des indices de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment.

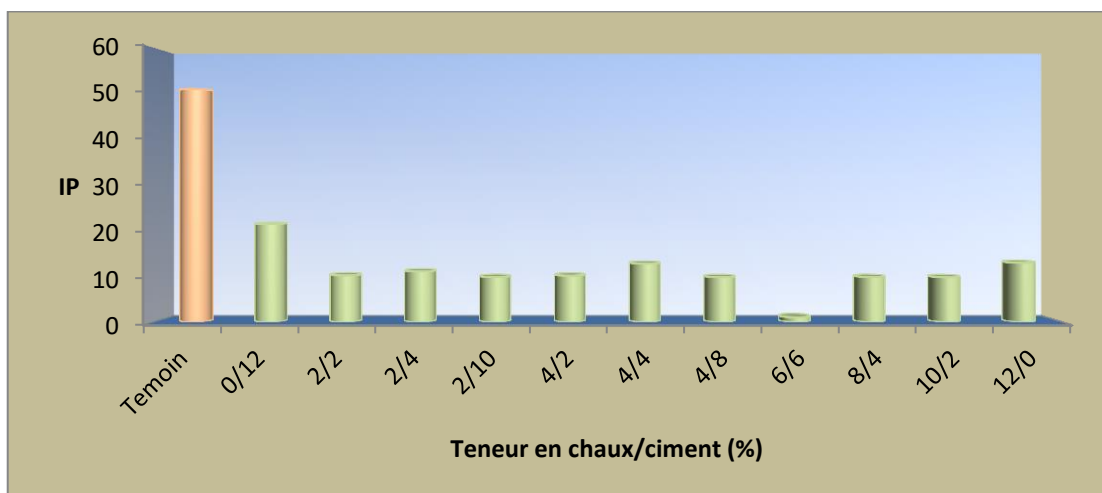


Figure II-18 : Histogramme des indices de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment.

II-3-1-2- Essai au bleu de méthylène :

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

II-3-1 -2-1 traitement à la Chaux

Le tableau II-18 présente les résultats les valeurs au bleu de méthylène et la surface spécifique totale à des différents teneurs en chaux.

Tableau II-18: Résultats de VBS et SST en fonction de teneur en chaux.

Teneur en chaux	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Valeur du bleu (VBS) cm^3/g	4.67	4.00	3.33	2.80	2.16	1.30
Surface spécifique totale (SST) m^2/g	97.67	83.72	69.70	58.60	45.21	27.21

II-3-1 -2-2 traitement au ciment

Le tableau II-19 présente les résultats les valeurs au bleu de méthylène et la surface spécifique totale à des différents teneurs en ciment.

Tableau II-19: Résultats de VBS et SST en fonction de teneur en ciment

<i>Teneur en chaux</i>	<i>Témoin</i>	<i>2%</i>	<i>4%</i>	<i>6%</i>	<i>8%</i>	<i>10%</i>	<i>12%</i>
<i>Valeur du bleu (VBS) cm³/g</i>	8,31	5,07	4,57	4	3,77	3,47	2,5
<i>Surface spécifique totale (SST) m²/g</i>	173,9	106	95,6	83,7	78,8	72,6	52,3

II-3-1 – 2 -3 traitement au mélange Chaux/ciment

Le tableau II-20 fournit l'ensemble des résultats des valeurs du bleu de méthylène su sol étudié traité à différentes teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-20: Résultats de VBS en fonction de teneur en ciment à différentes teneurs en chaux-ciment

<i>Chaux/ciment</i>	<i>VBS (g/cm³)</i>	<i>Surface spécifique totale STT (g/cm²)</i>
<i>Témoin</i>	8,31	173,85
<i>0/12</i>	2,50	52,30
<i>2/0</i>	4,67	97,70
<i>2/2</i>	5,66	118,41
<i>2/4</i>	6,66	139,33
<i>2/10</i>	4,50	94,14
<i>4/0</i>	4,00	83,68
<i>4/2</i>	6,33	132,42
<i>4/4</i>	4,16	87,03
<i>4/8</i>	3,17	66,32
<i>6/0</i>	3,33	69,66
<i>6/6</i>	7,00	146,44
<i>8/0</i>	2,80	58,58
<i>8/4</i>	4,50	94,14
<i>10/0</i>	2,16	45,19
<i>10/2</i>	5,00	104,60
<i>12/0</i>	1,30	27,20

Les figures II-19 et II-20 représentent des histogrammes qui donne les valeurs du bleu de méthylène et des surfaces spécifiques en fonction des teneurs en chaux-ciment.

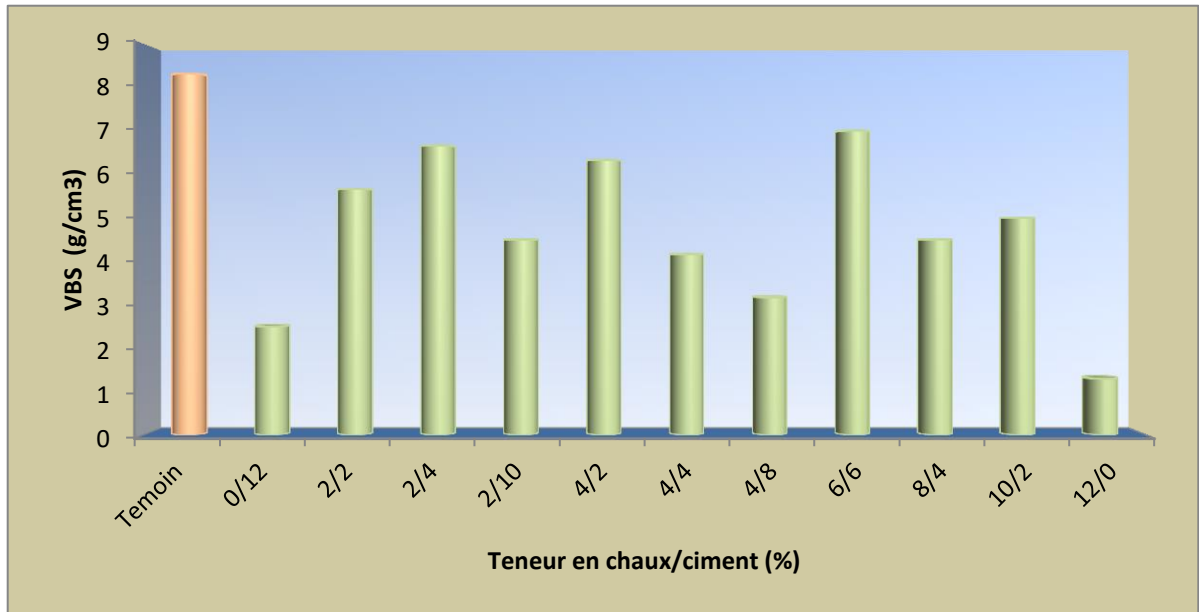


Figure II-19 : Histogrammes des valeurs du bleu de méthylène en fonction des teneurs en chaux-ciment du sol traité.

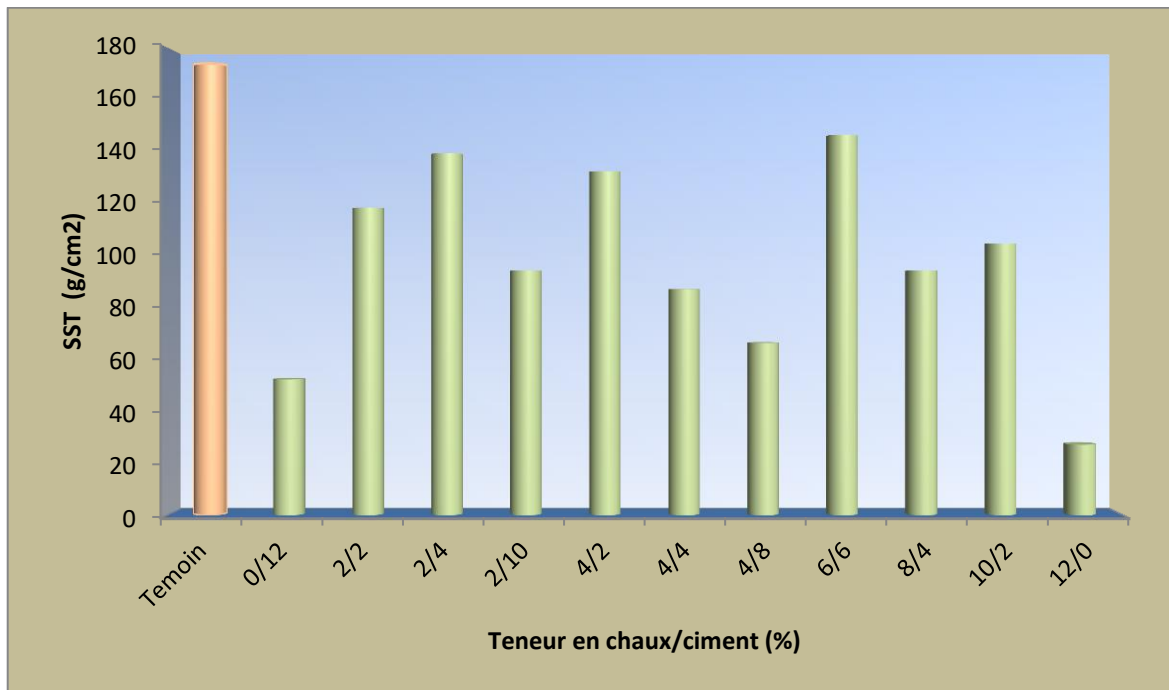


Figure II-20: Histogramme des surfaces spécifiques en fonction des teneurs en chaux-ciment du sol traité.

II-3-2- Les essais mécaniques :

II-3-2-1- Proctor normal :

II-3-2 -1-1 Traitement à la Chaux :

Tableau II-21 : Récapitulation des essais Proctor normal à différentes teneur en chaux

Teneur en chaux	Densité sèche (g/cm ²)					
	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Essai 01	1,533	1,527	1,497	1,491	1,485	1,51
Essai 2	1,555	1,528	1,514	1,518	1,519	1,507
Essai3	1,538	1,538	1,516	1,529	1,503	1,5
La moyenne	1,542	1,531	1,509	1,513	1,503	1,506

II-3-2 -1-2 traitement au ciment :

Tableau II-22 : Récapitulation des essais Proctor normal à différents teneurs en ciment.

Teneur en ciment (%)	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Essai 1	1,49	1,54	1,6	1,57	1,55	1,49
Essai 2	1,45	1,57	1,6	1,59	1,56	1,45
Essai 3	1,56	1,6	1,61	1,59	1,53	1,56
moyenne	1,50	1,57	1,60	1,58	1,55	1,50

II-3-2 – 2 -3 traitement au mélange chaux/ciment

Le tableau II-23 résume les données des quatre essais de Proctor normal du sol traité à différentes combinaisons chaux-ciment.

Tableau II-23 : Résumé des résultats de la densité sèche pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Teneur en chaux/ciment (%)	Densité sèche (g/Cm ²)										
	Témoin	0/12	2/10	4/8	6/6	8/4	10/2	2/2	2/4	4/2	12/0
Essai 1	-	-	1,59	1,60	1,60	1,59	1,60	-	-	-	-
Essai 2	-	-	1,55	1,60	1,59	1,60	1,60	-	-	-	-
Essai 3	-	-	1,60	1,60	1,61	1,60	1,58	-	-	-	-
Essai 4	-	-	-	-	-	-	-	1,60	1,60	1,52	-
Moyenne	1,60	1,55	1,58	1,60	1,60	1,59	1,59	1,60	1,60	1,52	1,51

II-3-2-2 Essai C.B.R. immédiat

II-3-2 -2-1 traitement à la Chaux

Les tableaux II-24 et II-25 présentent l'ensemble des résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements, les indices C.B.R immédiats des éprouvettes traitées à différentes teneurs en chaux.

Tableau II-24: Résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux

Teneur en chaux		Effort de pénétration (KN)					
		2%	4%	6%	8%	10%	12%
enfoncement (mm)	Temps						
0,625	30"	1,233	0,700	1,055	1,144	1,144	0.583
1,25	1'	1,643	1,410	2,285	2,635	2,458	1.321
2	1'40"	1,993	2,635	3,510	4,570	4,337	3.393
2,5	2'	2,198	3,277	3,776	5,358	5,008	4.337
5	4'	2,548	4,453	5,095	8,197	7,380	8.197
7,5	6'	2,460	4,570	5,445	9,490	7,643	9.920
10	8'	2,460	4,337	5,095	10,240	7,555	10.160
12,5	10'	2,460	4,337	4,920	11,323	7,468	9.607

Tableau II-25 : Résultats des indices C.B.R immédiats pour différentes teneurs en chaux.

Teneur en chaux	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R immédiat à 2,5mm	16.46	24.55	28.28	40.13	37.51	32.49
Indice C.B.R immédiat à 5mm	12.78	22.34	25.56	41.13	37.03	41.13
Indice C.B.R immediatmax	16.46	24.55	28.28	41.13	37.51	41.13

La figure II-21 présente les courbes des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

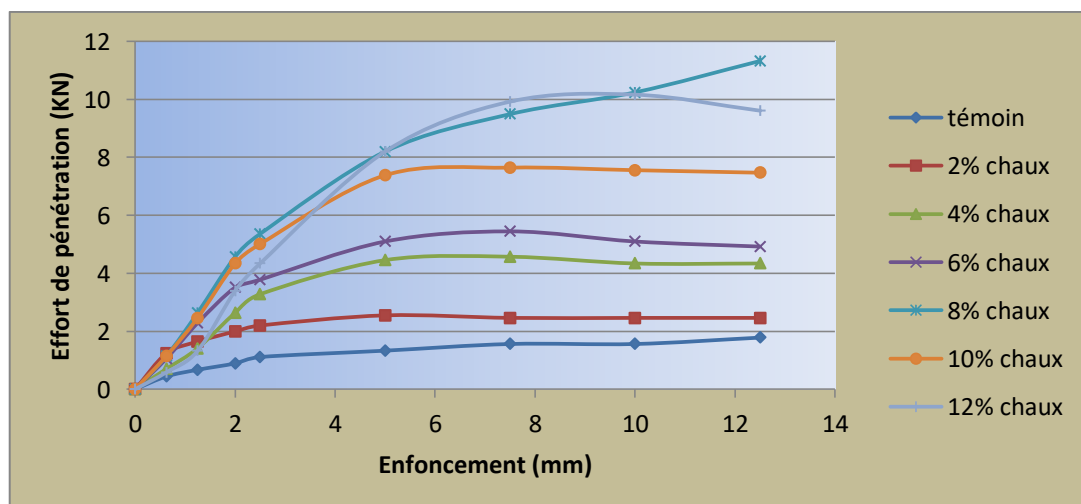


Figure II-21 : Efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

La figure II-22 présente la courbe de la variation des indices C.B.R immédiats en fonction des teneurs en chaux

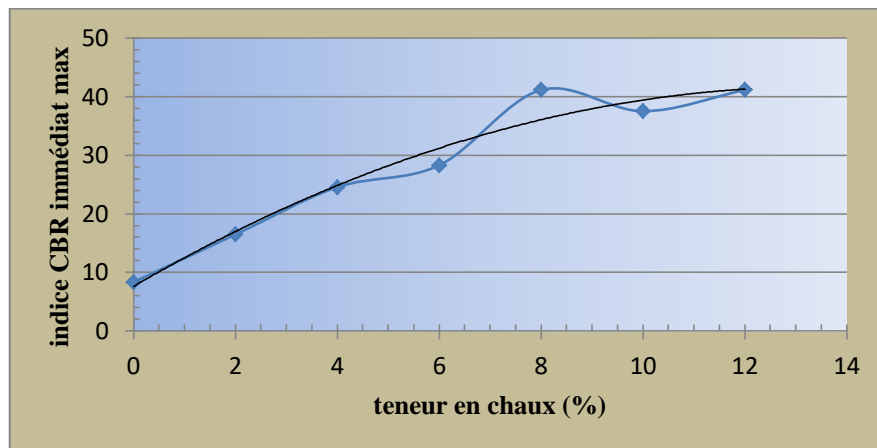


Figure II-22 : Indices C.B.R immédiats en fonction des teneurs en chaux.

II-3-2 -2-2 traitement au ciment :

Les tableaux II-26 et II-27 présentent l'ensemble des résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements, les indices C.B.R immédiats des éprouvettes traitées à différentes teneurs en ciment.

Tableau II-26: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes.

Teneur en ciment		0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Temps	Enfoncements (mm)	Forces de pénétration						
30"	0,625	0,44	0,77	0,70	0,70	1,41	2,28	0,50
1'	1,25	0,67	1,22	1,41	1,64	2,46	3,68	0,70
1'40"	2	0,89	1,55	1,99	3,27	3,86	4,80	1,23
2'	2,5	1,11	1,77	2,11	3,86	4,22	5,18	1,87
4'	5	1,33	2,2	2,46	5,09	5,85	6,44	3,95
6'	7,5	1,44	2,44	2,54	5,44	6,56	5,62	5,27
8'	10	1,56	2,57	2,54	5,62	6,44	5,18	5,53
10'	12,5	1,56	2,66	4,04	5,27	6,21	4,92	5,09

Tableau II-27: Résultats des indices C.B.R immédiats pour différentes teneurs en ciment.

Teneur en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	8,32	13,25	15,8	28,91	21,04	21,87	21,04
Indice C.B.R. immédiat à 5mm	6,69	11,03	12,34	25,53	18,46	18,91	18,46
Indice C.B.R. max	8,32	13,26	15,81	28,61	14,06	38,82	19,84

Les figures II-23 illustrent les forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment.

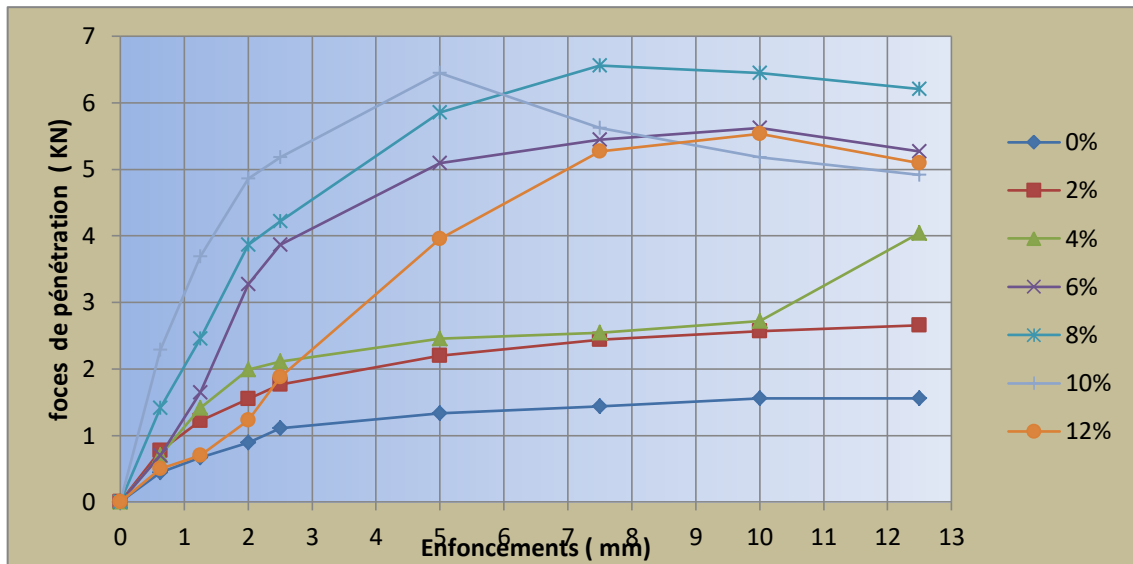


Figure II-23 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment (C.B.R. immédiat).

La figure II-24 présente les indices C.B.R. immédiat en fonction des teneurs en ciment.

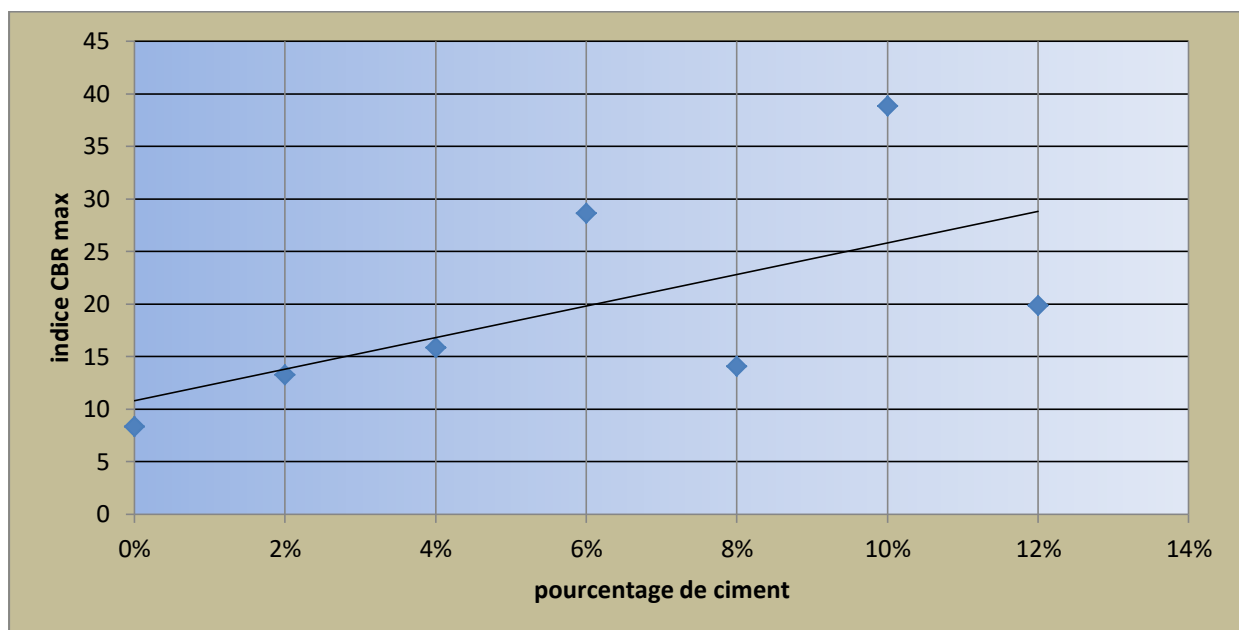


Figure II-24 : Indices C.B.R. immédiats en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

II-3-2-2-3 : Traitement au mélange Chaux/ciment

Les tableaux II-28 et II-29 présentent l'ensemble des résultats des efforts de poinçonnement en fonction des enfoncements, les indices C.B.R. immédiats des éprouvettes traitées à différents teneurs en chaux-ciment.

Tableau II-28 : Résultats des forces de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Temps	Enfoncements (mm)	Forces de poinçonnement (KN)								
		Teneur en Chaux/Ciment	0/12	2/10	4/4	4/8	6/6	8/4	10/2	12/0
30"	0,625		5,56	1,56	1,11	2,89	1,78	1,82	2,00	1,233
1'	1,250		7,78	4,00	2,67	3,78	4,22	4,44	4,89	2,81
1'40"	2,000		8,44	8,22	5,11	10,00	7,78	8,00	7,78	4,92
2'	2,500		8,22	9,33	6,00	11,11	8,89	8,89	8,89	5,27
4'	5,000		7,67	7,11	4,56	8,89	6,67	6,44	8,67	5,358
6'	7,500		8,44	7,11	4,22	7,67	6,89	6,44	8,40	5,738
8'	10,000		9,44	8,67	4,89	8,67	7,78	7,78	9,22	6,447
10'	12,500		10,67	9,11	5,56	9,11	8,89	8,89	10,67	7,293

Tableau II-29 : Résultats des indices C.B.R. immédiats pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Indice C.B.R à 2,5 mm	31,95	31,43	32,13	34,92	41,91	41,91	41,91	45,40	53,60
Indice C.B.R à 5 mm	31,46	27,49	31,58	30,99	38,83	32,16	43,04	43,86	50,53
Indice C.B.R max immédiat	31,95	31,43	32,13	34,92	41,91	41,91	43,04	45,40	53,60

Les figures II-25 et II-26 présentent les courbes des forces d'enfoncement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment,

La figure IV-12 présente l'évolution de l'indice C.B.R. immédiat en fonction de la teneur en chaux-ciment.

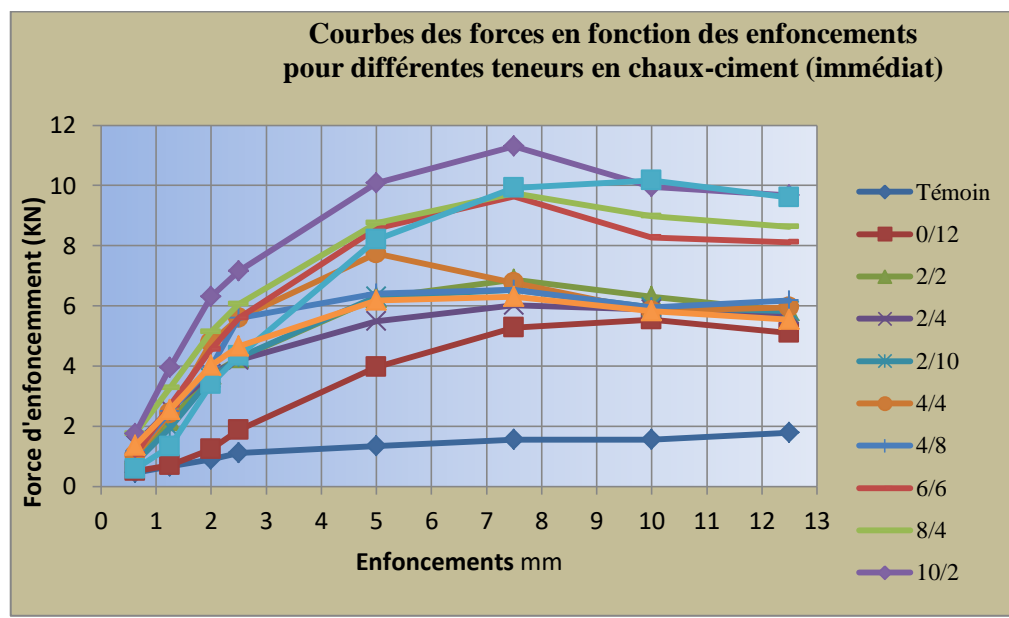


Figure II-25: Courbes des forces d'enfoncement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment (C.B.R. immédiat).

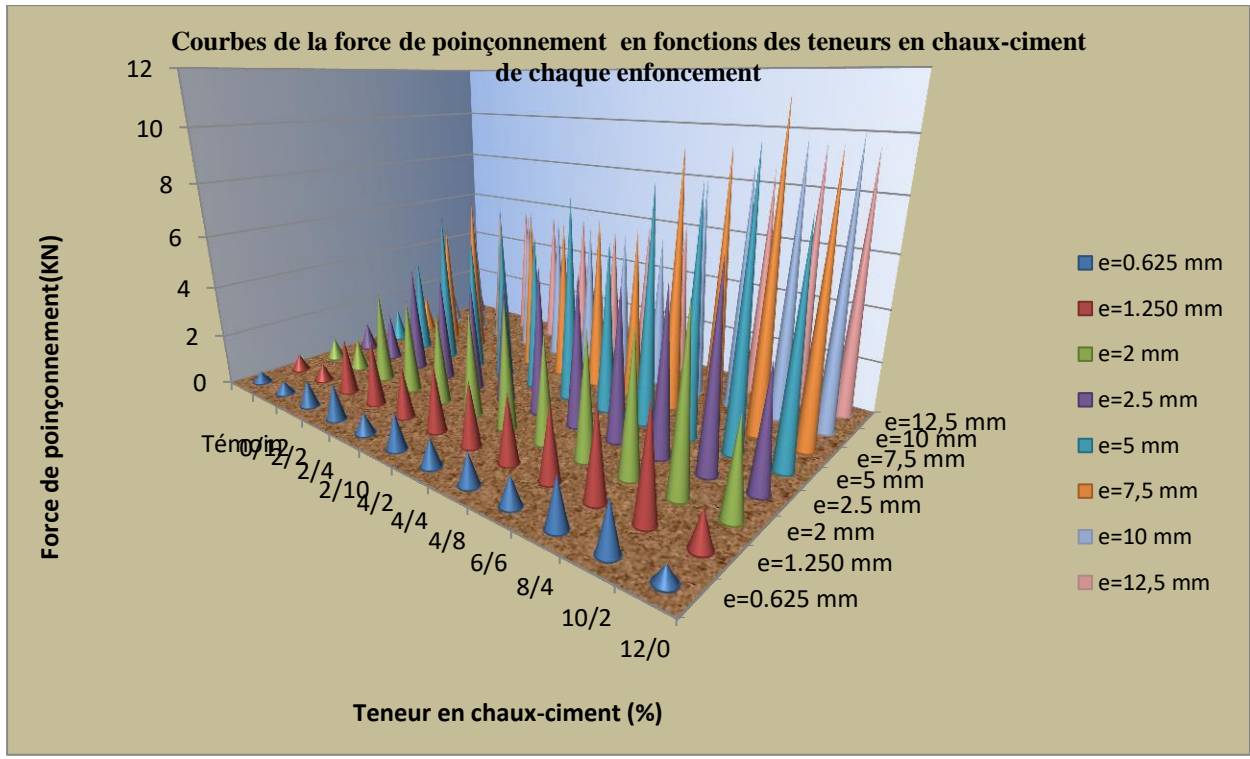


Figure II-26: Courbes des forces de poinçonnement en fonction des teneurs en chaux-ciment de chaque enfoncement.

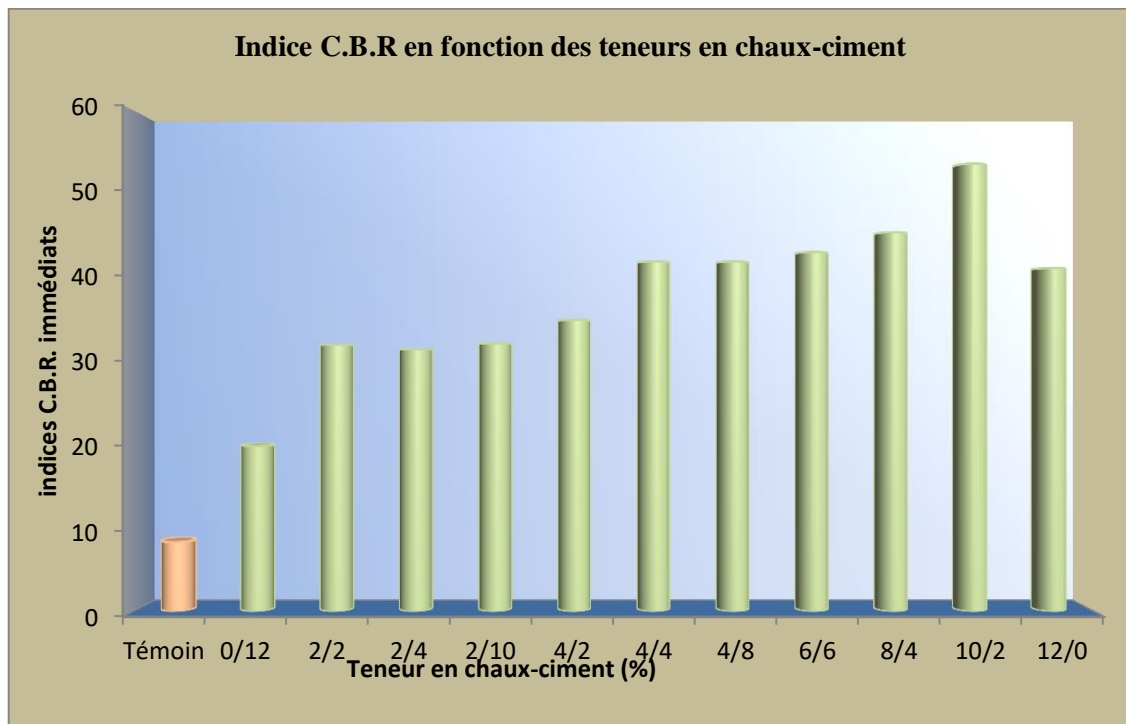


Figure II-27: Histogramme des indices CBR immédiat en fonction des teneurs en chaux-ciment

II-3-2 Essai C.B.R. après imbibition

II-3-2 -3-1 traitement à la Chaux

Les tableaux II-30, II-31 et II-32 présentent l'ensemble des résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements, le gonflement linéaire et les indices C.B.R après imbibition des éprouvettes traitées à différents teneurs en chaux après leur imbibition.

Tableau II-30 : Résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

Teneur en chaux		Effort de pénétration (KN)					
		2%	4%	6%	8%	10%	12%
enfoncement (mm)	temps						
0,625	30 »	2,198	1,877	2,110	1,643	0,700	1,233
1,25	1'	3,043	3,043	3,688	3,510	2,198	2,810
2	1'40 »	3,277	3,688	4,043	4,687	5,095	4,920
2,5	2'	3,277	3,865	4,043	4,920	5,553	5,270
5	4'	3,160	3,865	3,865	4,687	5,445	5,358
7,5	6'	3,277	3,954	4,043	5,095	5,620	5,738
10	8'	3,510	4,043	4,131	5,270	6,093	6,447
12,5	10'	3,688	4,220	4,337	5,620	6,797	7,293

Tableau II-31 : Résultats des gonflements linéaires pour différentes teneurs en chaux.

Teneur en chaux	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Valeur de gonflement G %	0.60	0.68	0.70	0.86	0.45	1.57

Tableau II-32 : Résultats des indices CBR imbibés pour différentes teneurs en chaux.

Teneur en chaux	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R imbibé à 2,5mm	24,55	28,95	30,28	36,85	41,60	39,48
Indice C.B.R imbibé à 5mm	15,86	19,39	19,39	23,52	27,32	26,88
Indice C.B.R imbibé max	24,55	28,95	30,28	36,85	41,60	39,48

La figure II-28 présente les courbes des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en chaux.

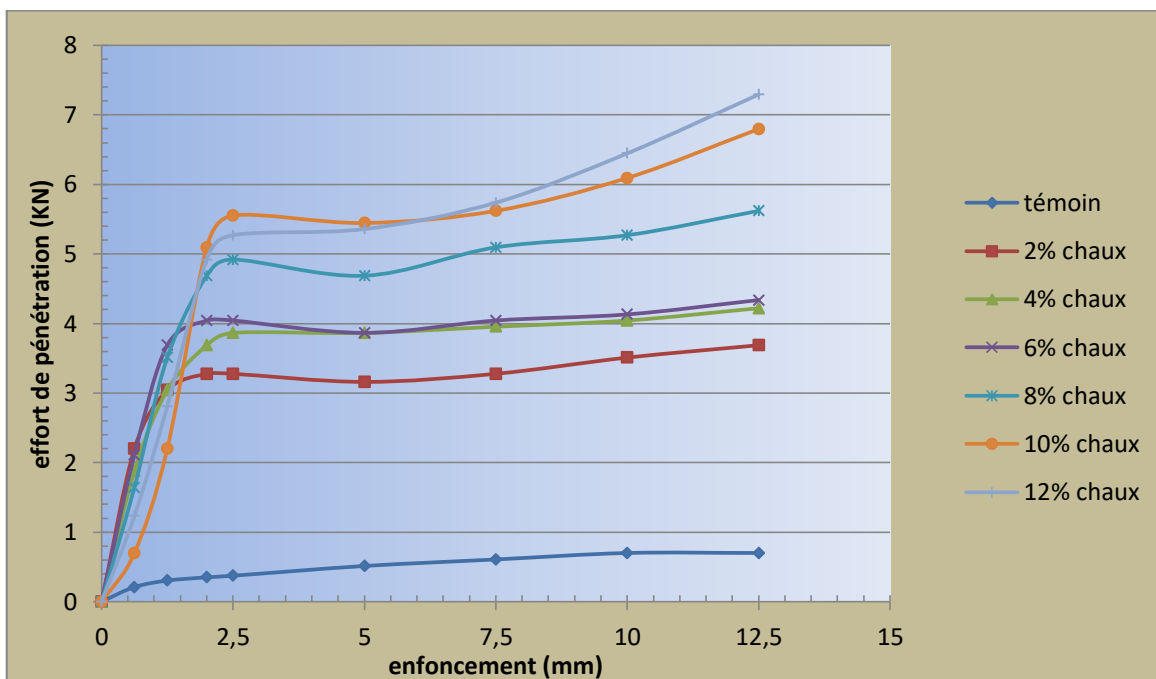


Figure II-28 : Efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en chaux.

La figure II-29 présente la courbe de la variation des indices C.B.R imbibé en fonction des teneurs en chaux.

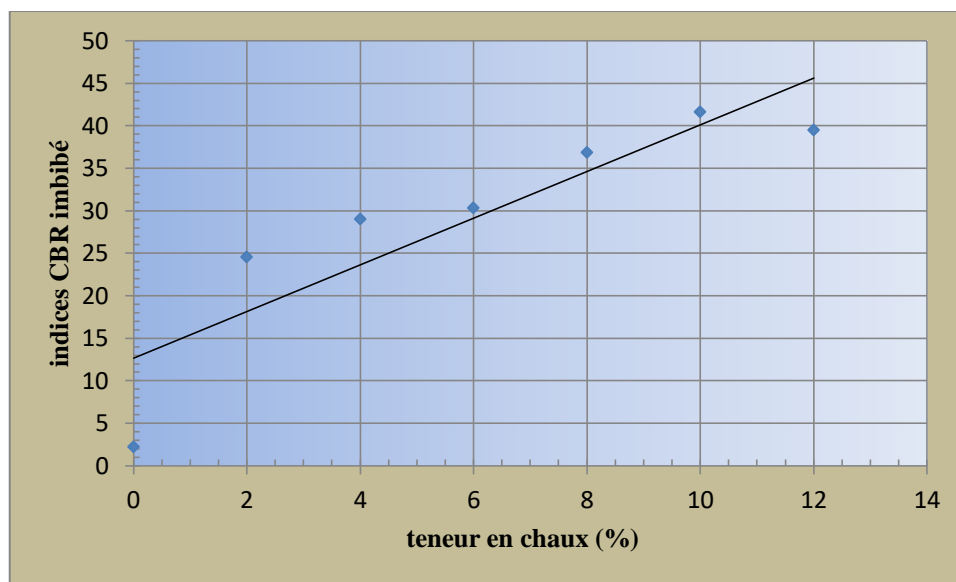


Figure II-29 : Indices CBR imbibé en fonction des teneurs en chaux et leur droite moyenne.

La figure II-30 présente la courbe de la variation du gonflement linéaire en fonction des teneurs en chaux

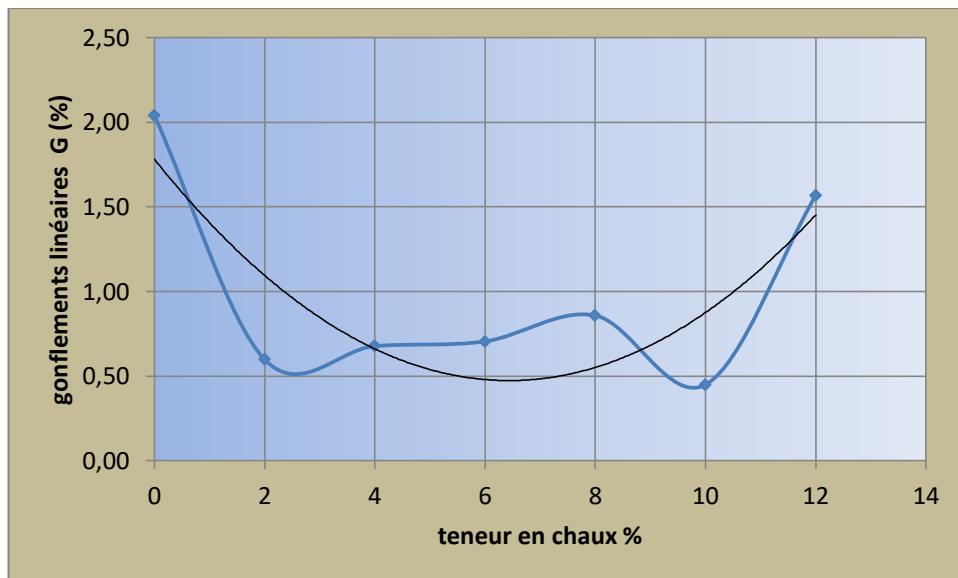


Figure II-30 : Gonflement linéaire en fonction de la teneur en chaux.

II-3-2 -2-2 traitement au ciment :

Les tableaux II-33 et II-34 Présentent les résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements et les indices C.B.R des éprouvettes traitées à différents teneurs en ciment après leur imbibition.

Tableau II-33: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment.

Pourcentage de ciment		0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Temps	Enfoncements (mm)	Forces de pénétration(KN)						
30"	0,625	0,18	0,44	1,11	0,44	2,22	4,89	5,56
1'	1,25	0,23	1,11	2	1,33	5,11	6,89	7,78
1'40"	2	0,27	1,33	2,22	3,56	5,78	7,33	8,44
2'	2,5	0,29	1,33	2	4,00	5,44	7,11	8,22
4'	5	0,41	1,56	2	3,56	4,89	6,67	7,67
6'	7,5	0,48	1,78	2	3,60	5,33	6,89	8,44
8'	10	0,56	2	2,44	4,00	6,44	7,11	9,44
10'	12,5	0,63	2	2,67	4,44	7,33	7,78	10,67

Tableau II-34 : Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différents teneurs en ciment.

Teneur en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R. imbibé à 2,5mm	2,19	9,99	15,81	29,96	40,78	53,26	61,58
Indice C.B.R. imbibé à 5mm	2,04	7,80	10,03	17,84	24,53	33,45	38,46
Indice C.B.R. max	2,19	9,99	15,81	29,96	40,78	53,26	61,58

Les figures II-31, II-32 et II-33 Présentent respectivement les courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment, des forces de pénétration en fonction des teneurs en ciment de chaque enfoncement et des indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en ciment correspondant aux tableaux III.30 et III.31.

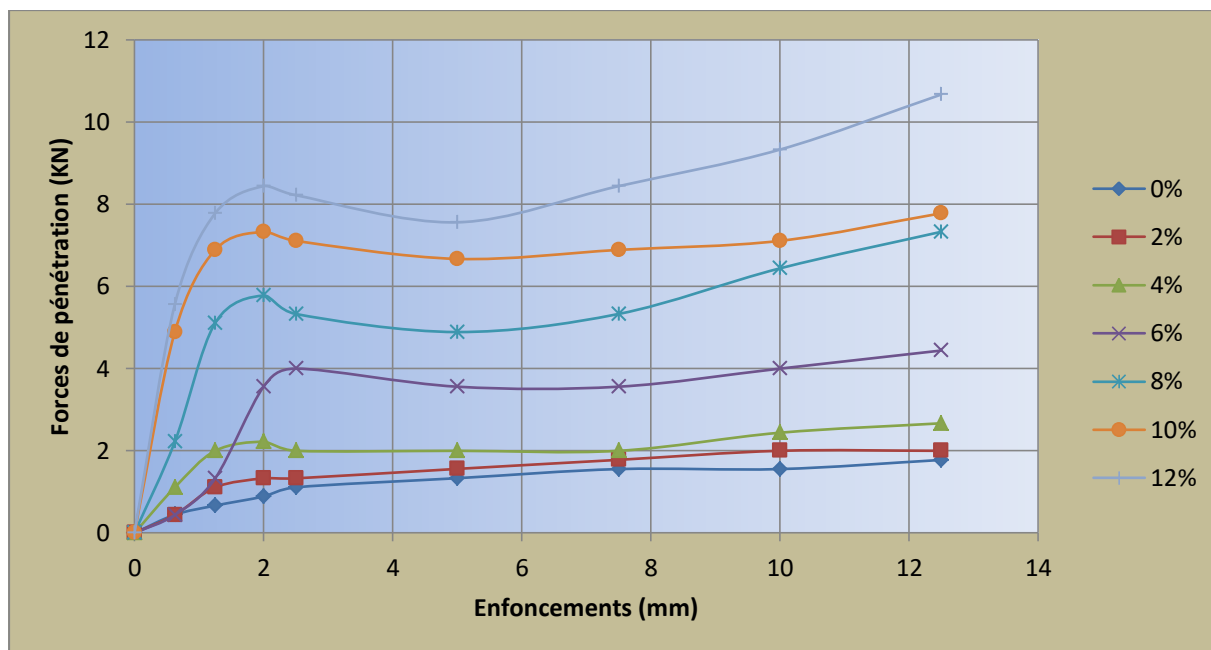


Figure II-31 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment (après imbibition).

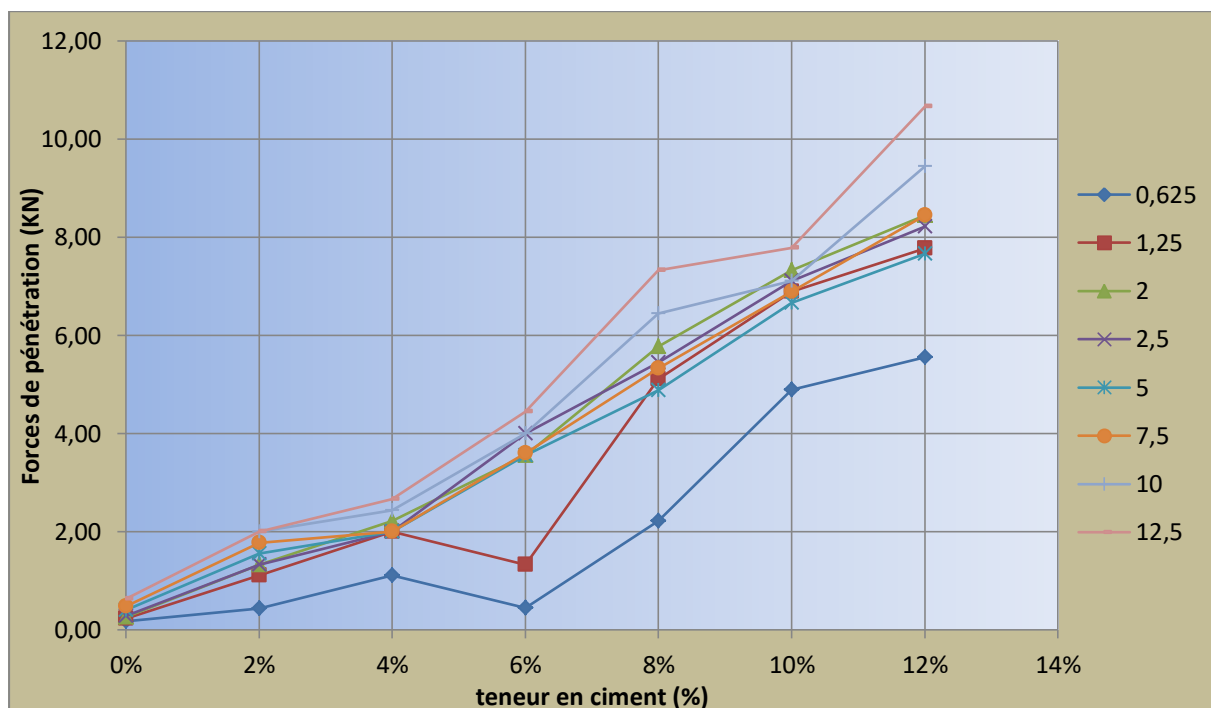


Figure II-32 : courbes des forces en fonction des teneurs en ciment de chaque enfoncement (après imbibition).

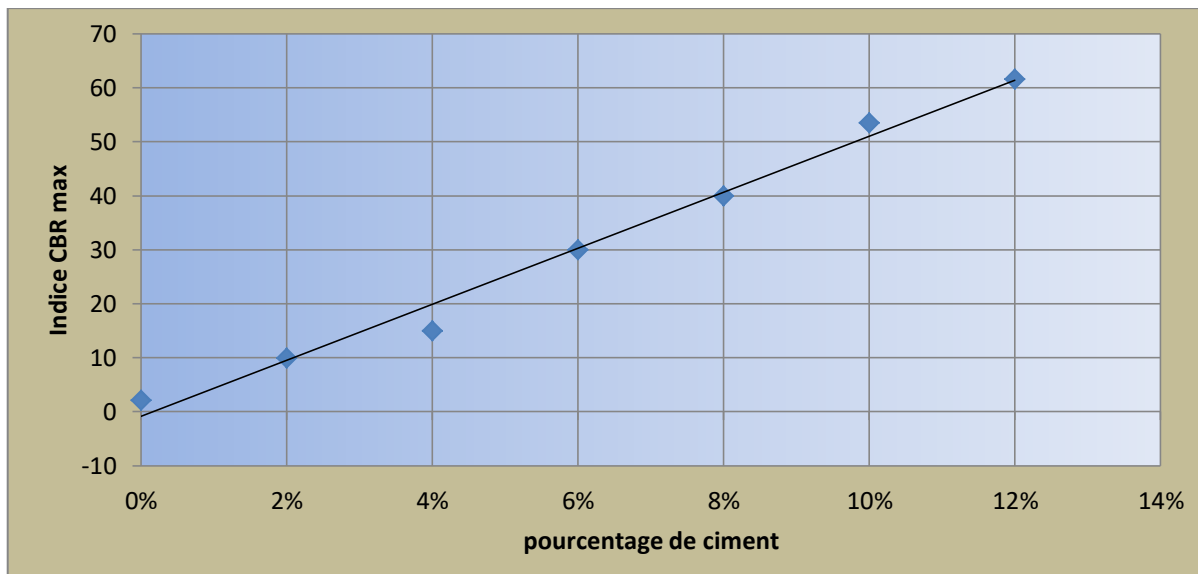


Figure II-33: Indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

Le tableau II.35 : présente les gonflements linéaires après imbibition des éprouvettes traitées à différentes teneurs en ciment après leur imbibition.

Tableau II.35: Résultats des gonflements linéaires après imbibition pour différentes teneurs en ciment.

Teneur en ciment	2%	4%	6%	8%	10%	12%
le gonflement	1,53	1,29	0,68	0,83	0,87	0,66

La figure II-34 Présente le gonflement linéaire et la teneur en eau après imbibition en fonction des teneurs en ciment d'après les résultats qui figurent sur le tableau II.35.

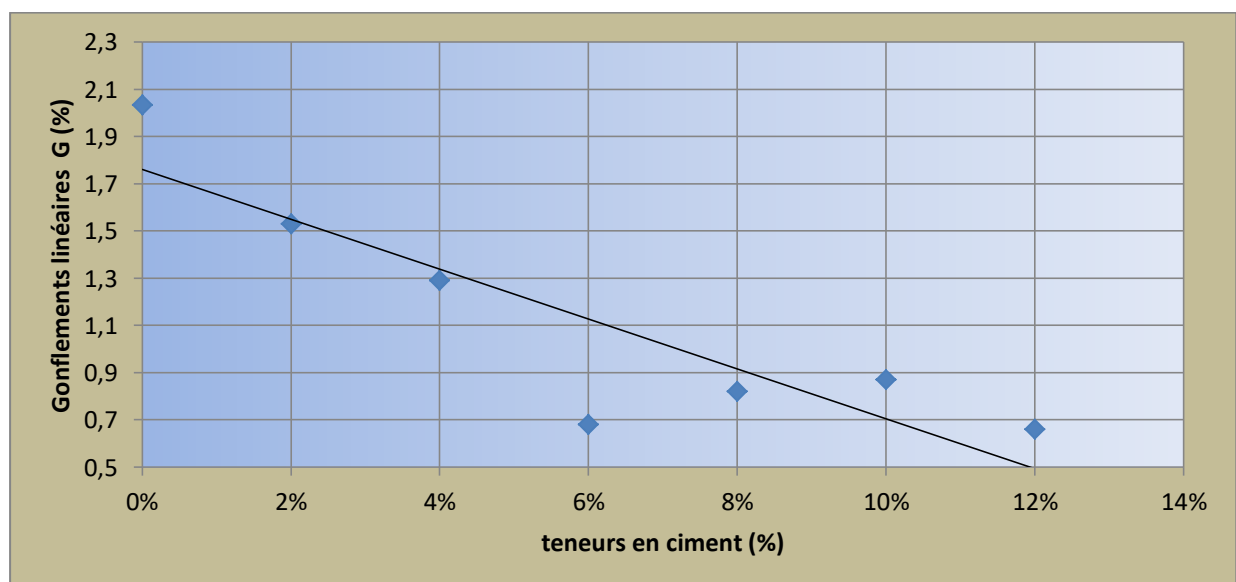


Figure II-34 : Gonflement linéaires en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

II-3-2-2-3 traitement au mélange Chaux/ciment

Les tableaux II-36, II-37 et II-38 présentent l'ensemble des résultats des efforts en fonction des enfoncements, les indices C.B.R, les teneurs en eau et les gonflements linéaires des éprouvettes traitées à différentes teneurs en chaux-ciment après leur imbibition.

Tableau II-36 : Résultats des efforts de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment.

<i>Temps</i>	<i>Enfoncements (mm)</i>	<i>Forces de poinçonnement (KN)</i>							
		<i>0/12</i>	<i>2/10</i>	<i>4/4</i>	<i>4/8</i>	<i>6/6</i>	<i>8/4</i>	<i>10/2</i>	<i>12/0</i>
<i>Teneur en Chaux/Ciment</i>									
30"	0,625	5,56	1,554	1,11	2,886	1,776	1,82	1,998	1,233
1'	1,250	7,78	3,996	2,664	3,774	4,218	4,44	4,884	2,81
1'40"	2,000	8,44	8,214	5,106	9,99	7,77	7,992	7,77	4,92
2'	2,500	8,22	9,324	5,994	11,1	8,88	8,88	8,88	5,27
4'	5,000	7,67	7,104	4,551	8,88	6,66	6,438	8,658	5,358
6'	7,500	8,44	7,104	4,218	7,659	6,882	6,438	8,392	5,738
8'	10,000	9,44	8,658	4,884	8,658	7,77	7,77	9,213	6,447
10'	12,500	10,67	9,102	5,55	9,102	8,88	8,88	10,66	7,293

Tableau II-37: Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différentes teneurs en chaux-ciment.

<i>Teneur en Chaux/Ciment</i>	<i>0/12</i>	<i>2/10</i>	<i>4/4</i>	<i>4/8</i>	<i>6/6</i>	<i>8/4</i>	<i>10/2</i>	<i>12/0</i>
Indice C.B.R à 2,5 mm	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48
Indice C.B.R à 5 mm	38,45	35,61	22,81	44,51	33,38	32,27	43,40	26,86
Indice C.B.R max immédiat	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48

Tableau II-38: Résultats des teneurs en eau après imbibition et les gonflements linéaires pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Indice C.B.R à 2,5 mm	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48
Indice C.B.R à 5 mm	38,45	35,61	22,81	44,51	33,38	32,27	43,40	26,86
Indice C.B.R après imbibition	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48
Gonflement linéaires G(%)	0,66	0,55	1,59	0,58	1,08	1,04	0,91	1,56

Les figures II-35, II-36 et II-37 présentent respectivement les courbes des forces poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment, des forces en fonction des teneurs en chaux-ciment de chaque enfoncement et des indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en chaux-ciment correspondant aux tableaux II-36, II-37 et II-38.

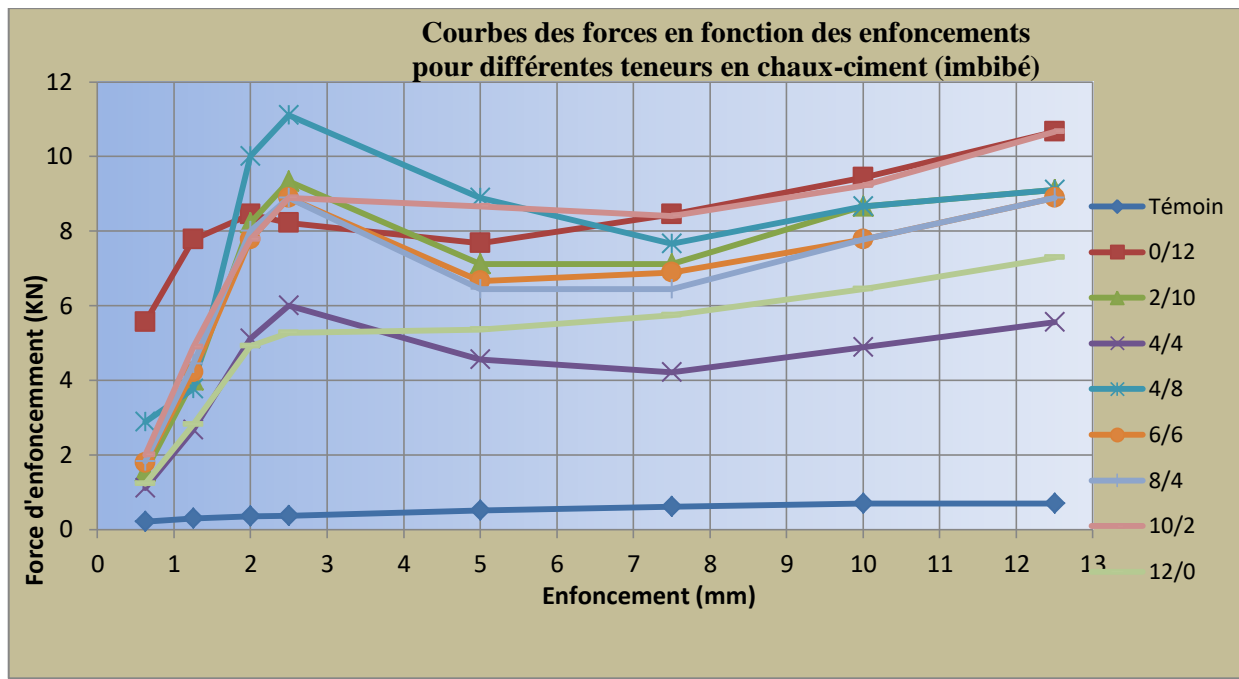


Figure II-35: Courbes des forces en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment (après imbibition).

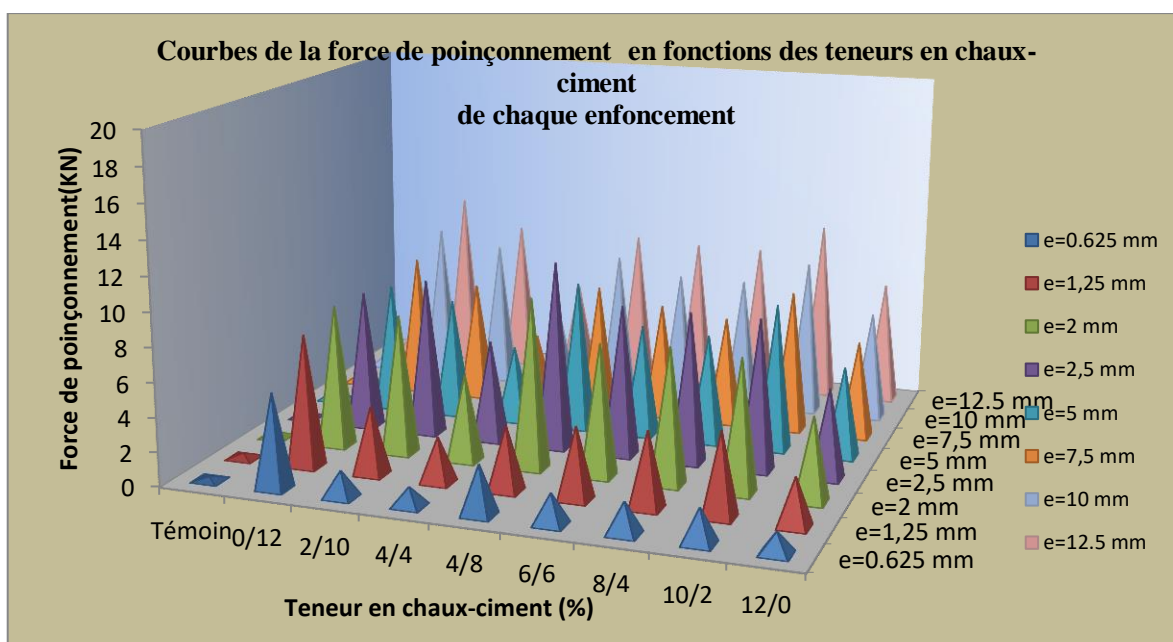


Figure II-36: Histogrammes des forces en fonction des teneurs en chaux-ciment de chaque enfoncement.

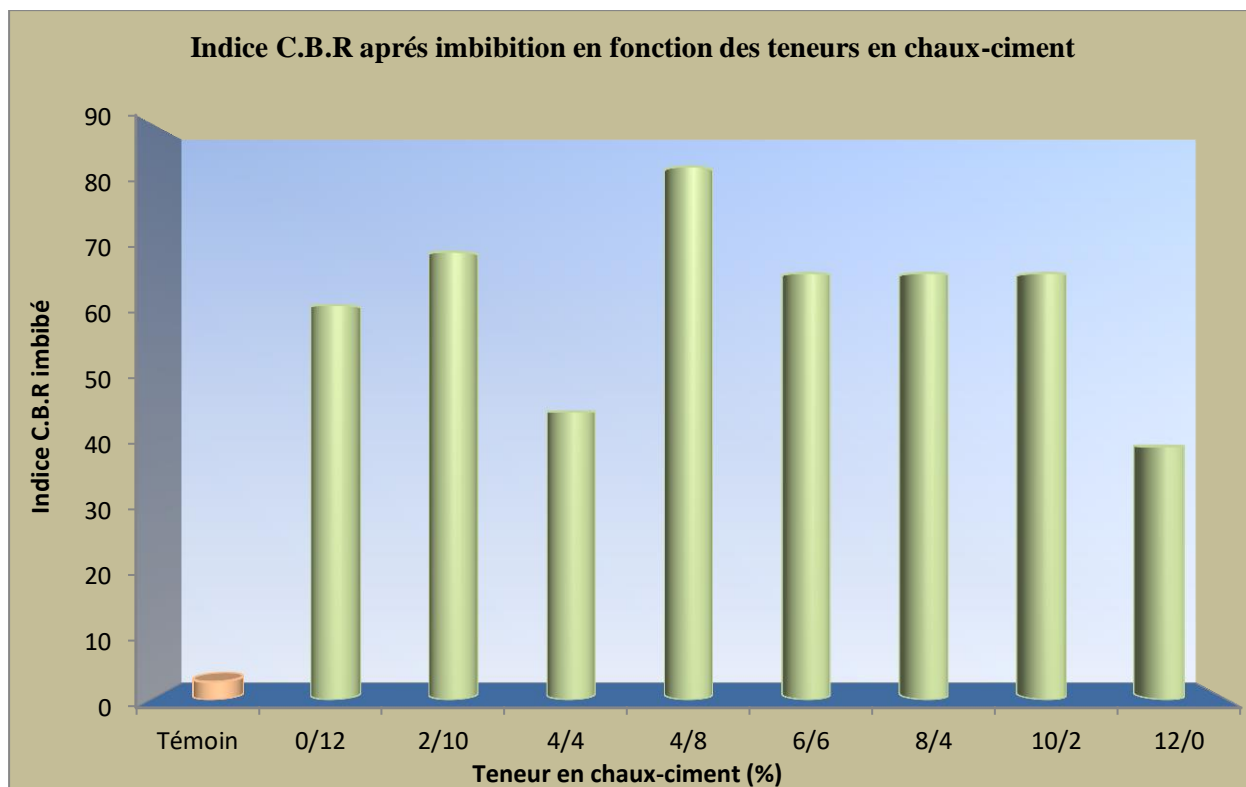


Figure II-37 : Histogrammes des indices CBR après immersion en fonction des teneurs en chaux-ciment

La figure II-38 présente le gonflement linéaire en fonction des teneurs en chaux-ciment d'après les résultats qui figurent sur le tableau (II-38).

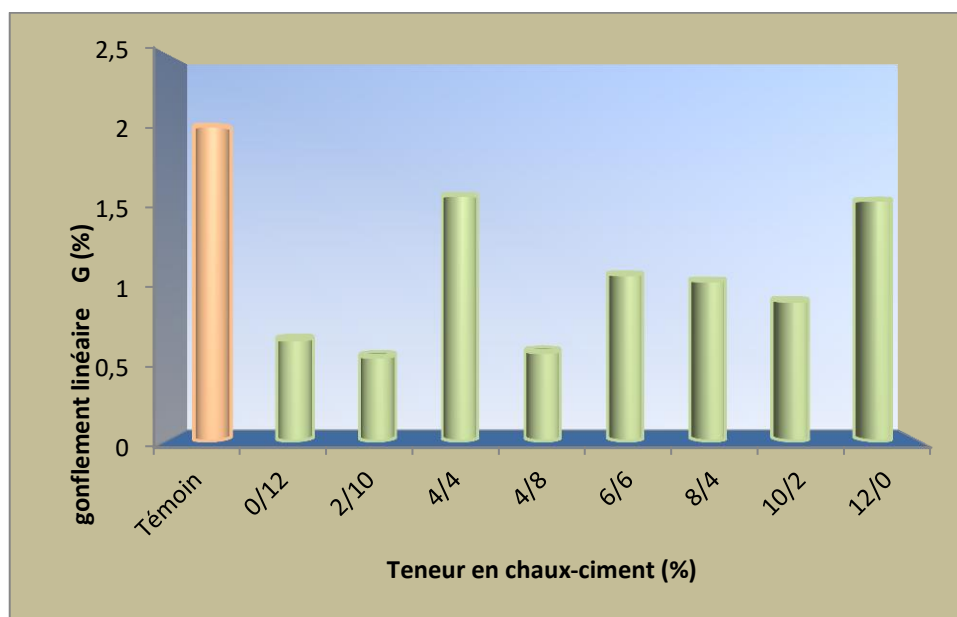


Figure II-38: Histogramme de gonflement linéaire en fonction des teneurs en chaux-ciment.

II-3-2-4: Essai de cisaillement direct:

II-3-2 -3-1 : traitement à la Chaux :

Le tableau II-39 présente les résultats de l'effort de cisaillement max de chaque teneur en chaux de différentes couches.

Tableau II-39 : Efforts de cisaillement maximaux pour différentes teneurs en chaux.

Teneur en chaux (%)		2	4	6	8	10	12
Effort de cisaillement max(N)	couche 1	348	485	403	401	654	518
	couche 2	647	608,0	663	512	720	574
	couche 3	726	788	717	667	798	997
	moyen	573,67	627,00	594,33	526,67	724,00	696,33

La figure II-39 présente la variation de l'effort de cisaillement maximal des trois couches étudiées en fonction de la teneur en chaux.

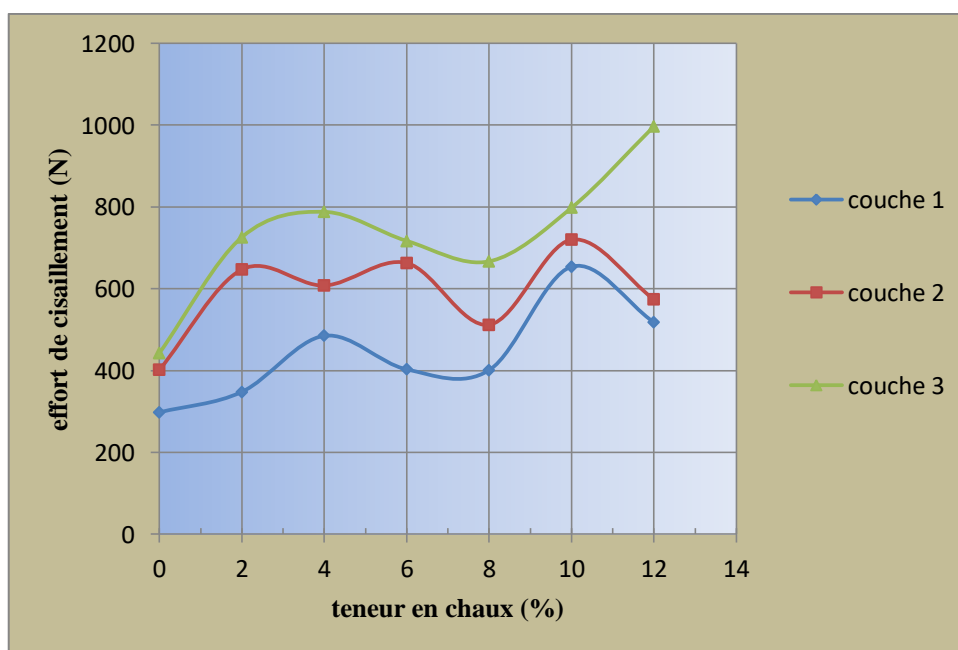


Figure II-39 : Effort de cisaillement maximal de différentes couches pour différentes teneurs en chaux.

La figure II-40 présente la variation de l'effort de cisaillement maximal moyen des trois couches étudiées en fonction de la teneur en chaux.

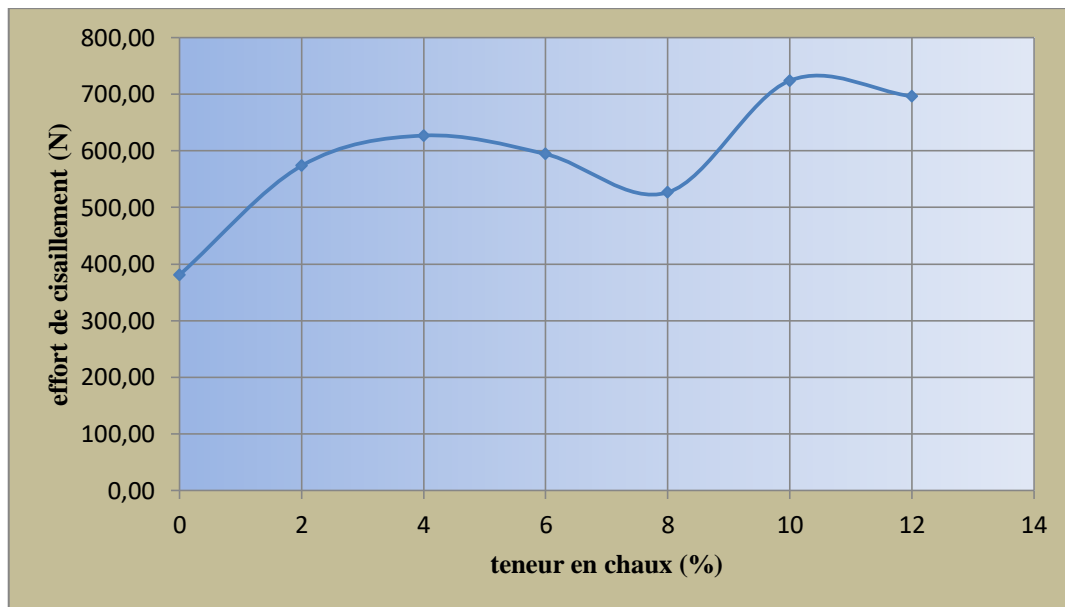


Figure II-40 : Effort de cisaillement moyen pour différentes teneurs en chaux.

II-3-2 -2-2 : Traitement au ciment :

Le tableau II-40 présente les résultats de l'effort de cisaillement max de chaque teneur en ciment de différentes couches.

Tableau II-40 : Efforts de cisaillement maximaux pour différentes teneurs en ciment.

Teneur en Ciment (%)		2	4	6	8	10	12
Effort de cisaillement max(N)	couche 1	512	515	571	554	531	636
	couche 2	414	435	552	502	518	622
	couche 3	243	445	546	450	337	514
	moyen	389,67	465	556,33	502	462	590,67

La figure II-41 Présente les courbes de variation de l'effort de cisaillement en fonction des teneurs en ciment, les figures représentatives des efforts de cisaillement en fonction des déplacements.

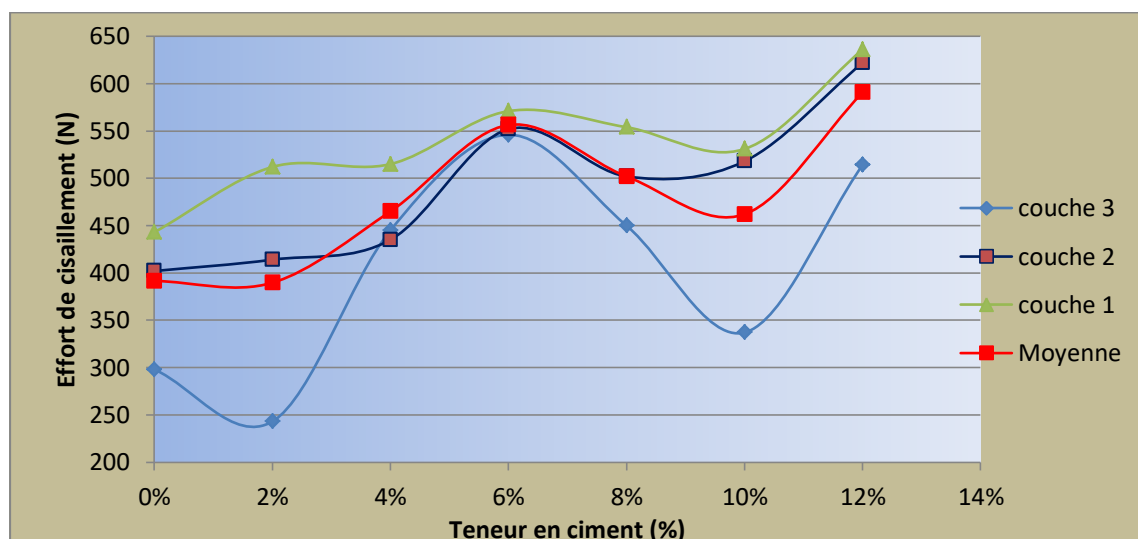


Figure II-41 : Effort de cisaillement en fonction des teneurs en ciment.

II-3-2-2-3 : Traitement au mélange Chaux/ciment :

Le tableau II-41 présente les résultats de l'effort de cisaillement max de chaque teneur en chaux-ciment des différentes couches.

Tableau II-41: Résultats des efforts de cisaillement maximaux pour différentes teneurs en chaux-ciment.

	Teneur en chaux-ciment	2/2	4/2	10/2	2/4	4/4	4/8	6/6	8/4	2/10
Effort de cisaillement max (N)	couche 1	586	596	507	536	615	449	663	454	337
	couche 2	560	623	563	599	651	418	526	769	654
	3 couche	646	630	429	738	654	803	862	985	710
	Moyenne	597,33	616,33	499,67	624,33	640,00	556,67	683,67	736,00	567,00

La figure II-42 présente la variation de l'effort de cisaillement moyen pour différentes teneurs en chaux-ciment.

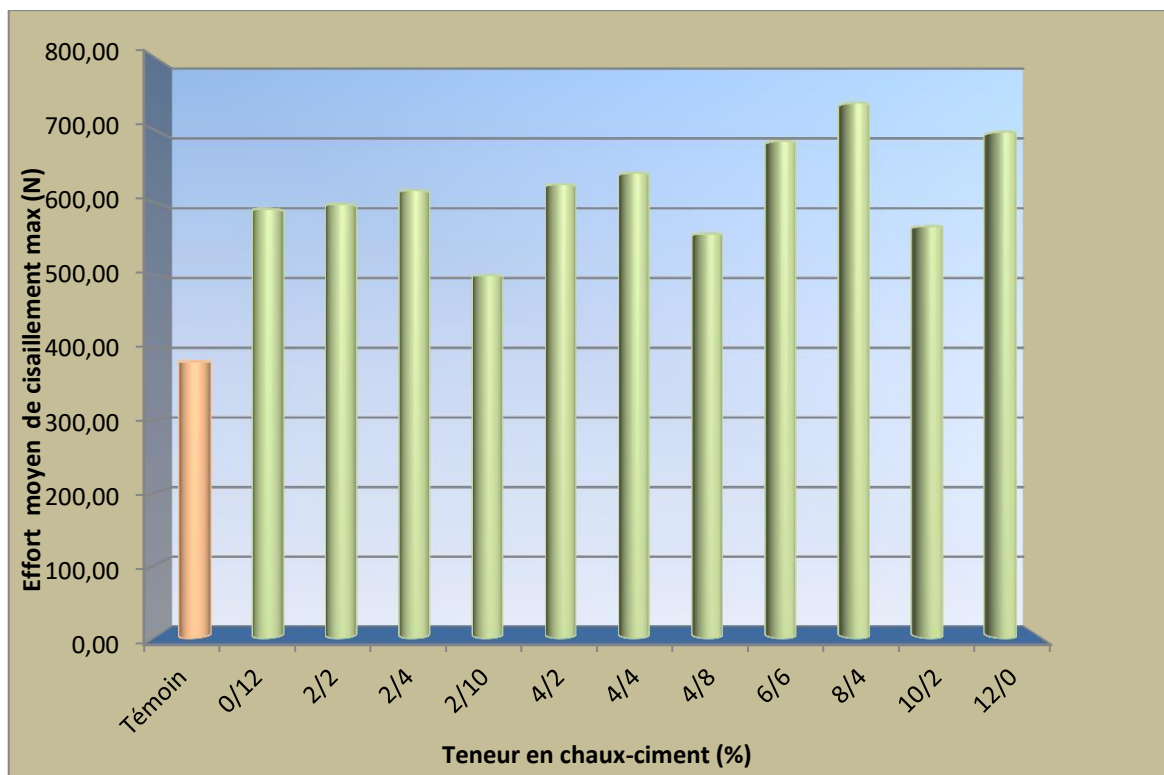


Figure II-42: Effort de cisaillement moyen pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Chapitre III

Comparaison des résultats de stabilisation

Chapitre III

Comparaison des résultats de stabilisation

III-1-Introduction :

Le présent chapitre vise à comparer les résultats de stabilisation chimique d'une argile expansive de la région de Sidi Hadjres Wilaya de M'sila, par l'incorporation de différents teneurs en : ciment, chaux et combinaison mixte chaux/ciment. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de chaque agent de stabilisation dans la réduction de l'expansion des sols argileux et l'amélioration des caractéristiques mécaniques

III-2 : Interprétation et comparaison des résultats des essais d'identification

Selon les graphiques des limites d'Atterberg ainsi que ceux du VB et du SST, on observe que les valeurs de la limite de liquidité W_L diminuent de moitié environ pour tous les pourcentages de l'ajout utilisé dans le traitement (ciment, chaux et combinaison mixte chaux/ciment). Cette diminution est régulière et constante. La baisse de la limite de liquidité s'explique par la diminution de la surface spécifique totale, ce qui réduit significativement l'activité des particules argileuses. Cela entraîne une diminution de la quantité d'eau primaire nécessaire (avant traitement) pour séparer les particules d'argile entre elles.

Nous remarquons également une diminution de l'indice des plastiques (I_p) lorsque le pourcentage de l'ajout utilisé dans le traitement varie. Cette évolution suit la même tendance que la limite de liquidité (W_L). Cela indique que les mélanges ont tendance à présenter un comportement similaire lorsque le pourcentage de l'ajout utilisé varie, indépendamment de la proportion spécifique de chaque agent chimique utilisé dans les combinaisons.

La valeur de bleu et la surface spécifique totale diminuent également avec la variation du pourcentage de l'ajout utilisé dans le traitement. Comme observé, cette diminution réduit la capacité d'adsorption du mélange, ce qui entraîne un potentiel de gonflement plus faible.

Les figures III-1 à III-4 Présentent les histogrammes de variation des valeurs du VBS, surfaces spécifiques totale, limites de liquidité et l'indices de plasticité et des en fonction de type de traitement utilisé

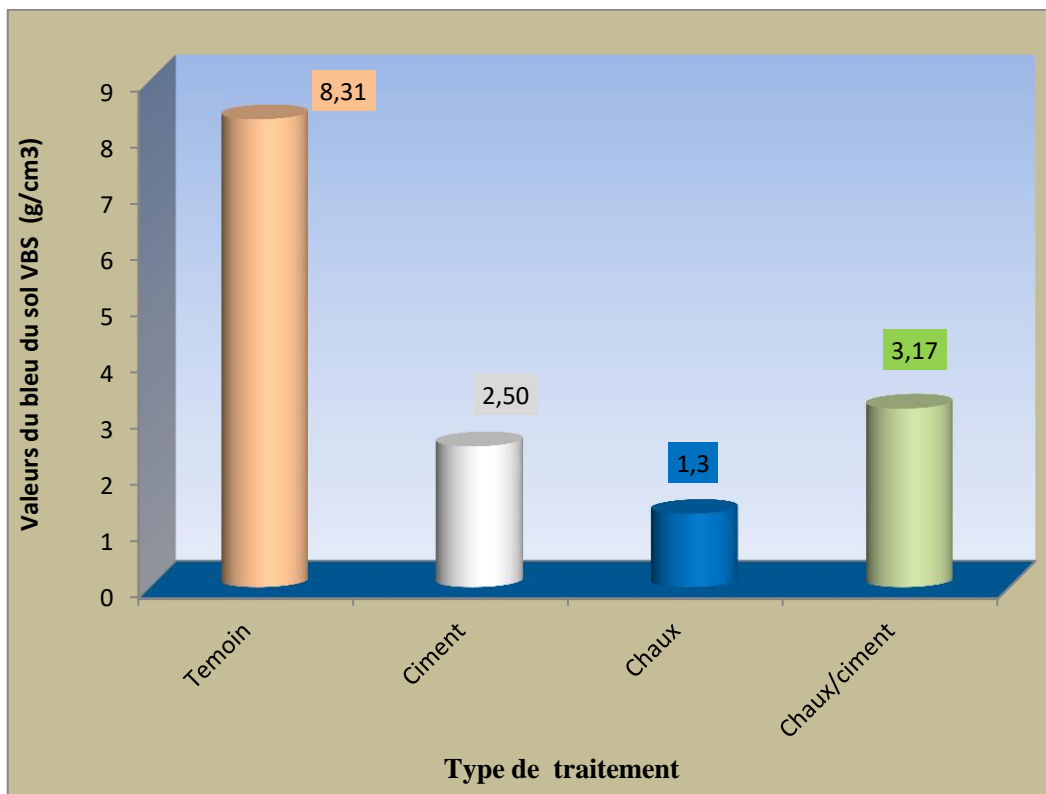


Figure III-1 : Variation des valeurs du VBS en fonction de type de traitement utilisé

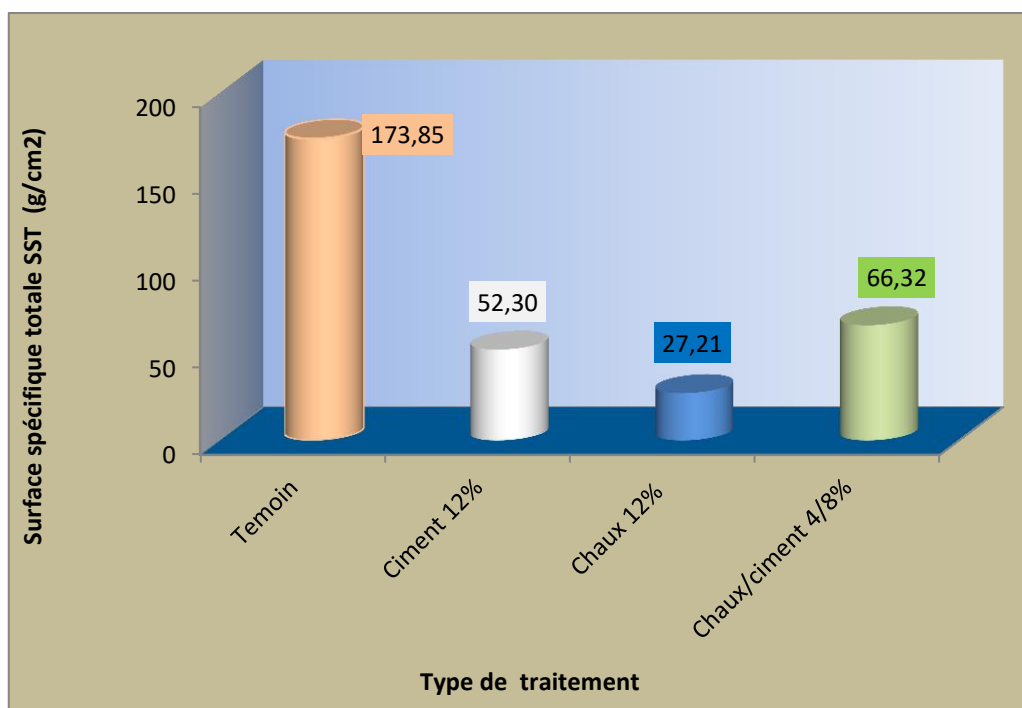


Figure III-2 : Variation SST en fonction de type de traitement utilisé

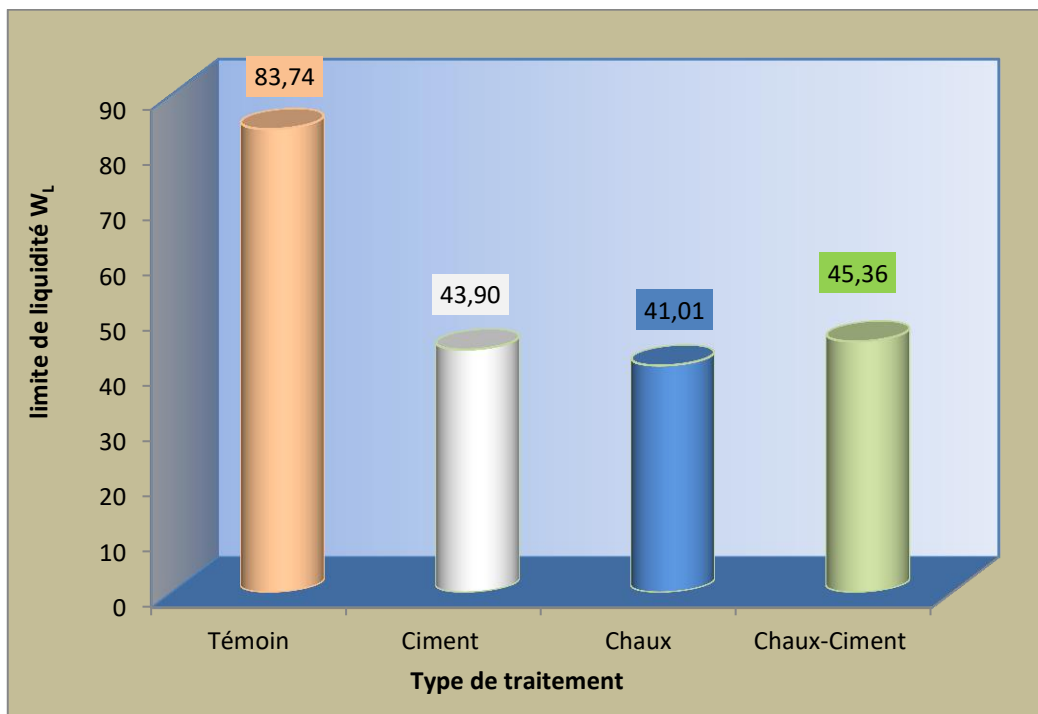


Figure III-3 : Variation des limites de liquidité en fonction de type de traitement utilisé

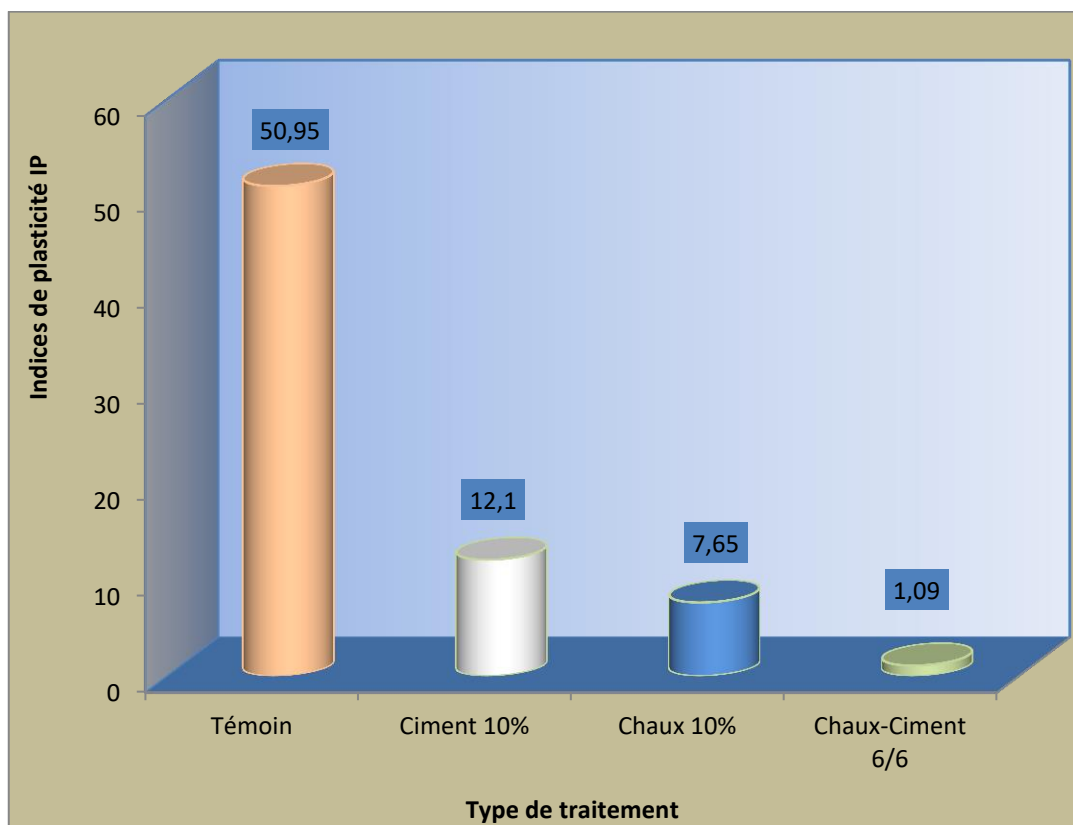


Figure III-4 : Variation des indices de plasticité en fonction de type de traitement utilisé

La figure II-5 présente le classement du sol avant et après traitement dans l'abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants (Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988))

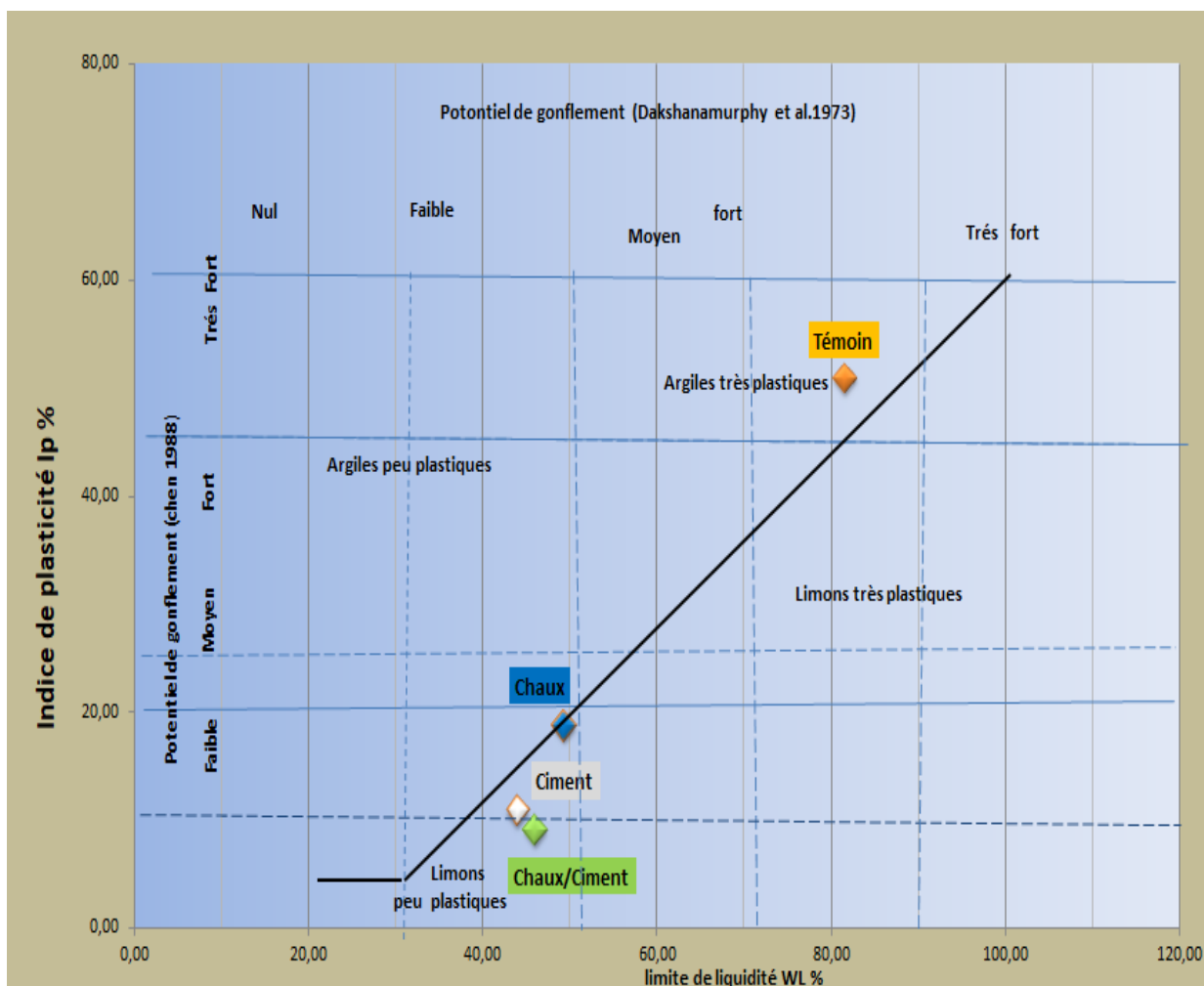


Figure III-5 : Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

Après traitement, le sol bascule de la famille des argiles très plastiques possédant un fort potentiel de gonflement à la famille des limons peu plastiques à faible potentiel de gonflement due probablement à un changement de la composition minéralogique du sol .

III-3 : Interprétation et comparaison des résultats des essais mécaniques

III-3-1 : Proctor normal :

La figure III-6 représente l'histogramme de comparaison de la densité sèche du sol témoin et après traitement avec différents pourcentages de l'ajout utilisé

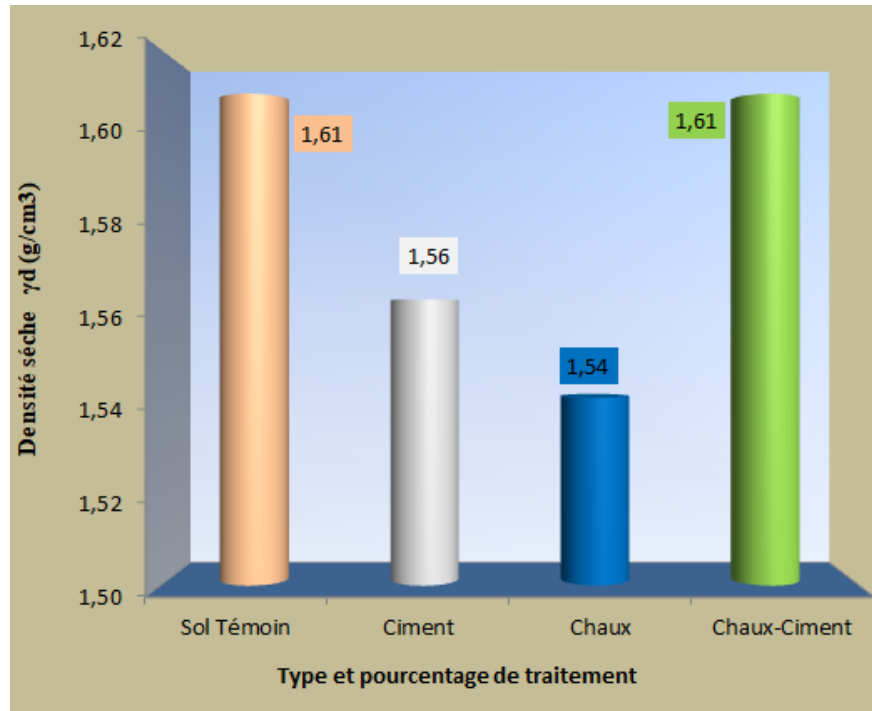


Figure III-6 : Histogramme de comparaison de la densité sèche

Les valeurs de la densité sèche maximale du sol traité à la chaux diminuent considérablement par rapport à celles du sol témoin.

III-3-2 : CBR immédiat :

La figure III-7 représente l'histogramme de comparaison de l'indice de CBR immédiat du sol témoin et après traitement avec différents pourcentages de l'ajout utilisé.

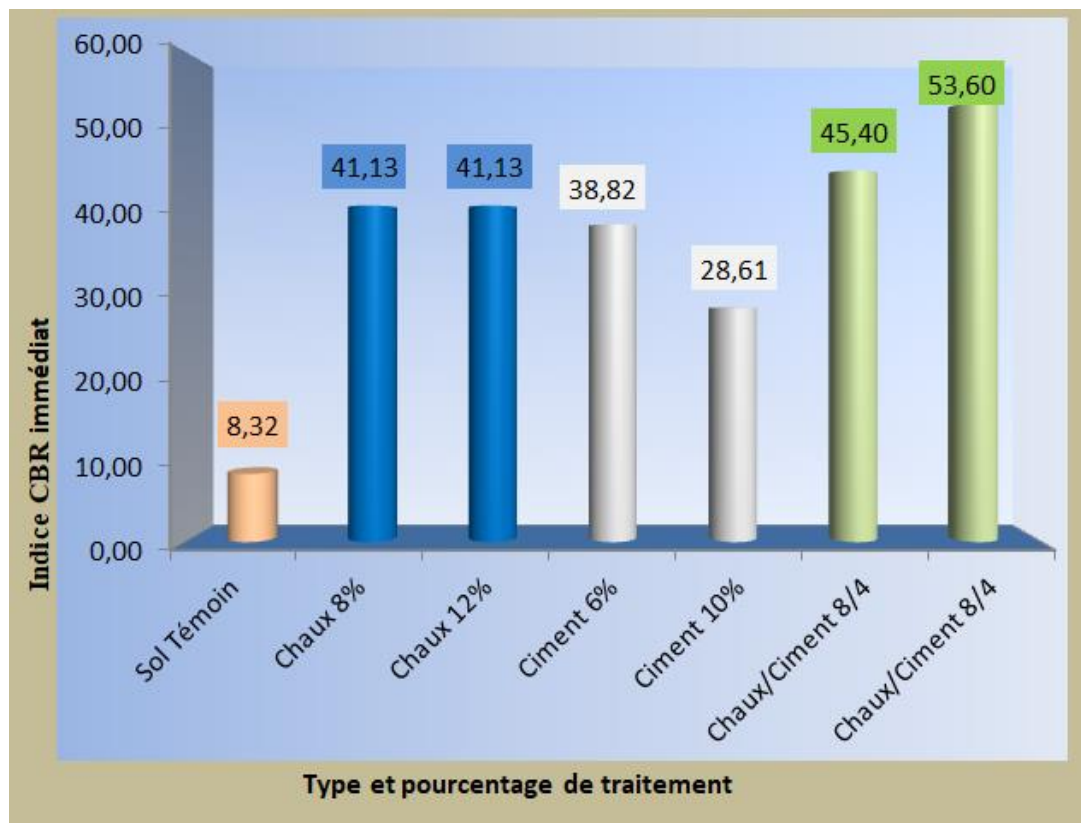


Figure III-7: Histogramme de comparaison de l'indice de CBR immédiat

Les courbes représentant les forces de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en ajout utilisé (chaux, ciment et mélange chaux-ciment), permettent de visualiser comment ces forces de pénétration évoluent en fonction de l'enfoncement du sol traité avec différentes teneurs en ajout utilisé (chaux, ciment et mélange chaux-ciment), par rapport au sol non traité. On peut clairement observer une amélioration significative de la portance du sol avec tous les traitements, notamment pour les pourcentages de 8% et 12 % de chaux, et les pourcentages de 6% et 10% de ciment ainsi que pour les combinaisons 8/4 et 10/2 pour le traitement avec le mélange chaux/ciment qui montrent un traitement particulièrement efficace

L'efficacité du traitement est clairement visible quel que soit le type de traitement suite aux courbes des indices C.B.R. (California Bearing Ratio) immédiats en fonction des teneurs en ajout utilisé, car on passe d'un indice de portance immédiate de 8,68 pour le sol non traité à un indice de portance immédiat max de 41,13 pour un pourcentage de 8% et 12% de chaux et à un indice de portance immédiat max de 38.82 pour un pourcentage de 10% de ciment ainsi que à 53,60 pour les teneurs de 10/2 % et 8/4 % de combinaison Chaux/Ciment.

On remarque également que les deux combinaisons respectivement 10/2 et 8/4 de mélange chaux/ciment, jouent un rôle prépondérant parmi toutes les autres pourcentages de traitement utilisés en termes d'augmentation de l'indice CBR immédiat.

III-3-3 CBR après imbibition :

La figure III-8 représente l'histogramme de comparaison de l'indice de CBR après imbibition du sol témoin et après traitement avec différents pourcentages de l'ajout utilisé

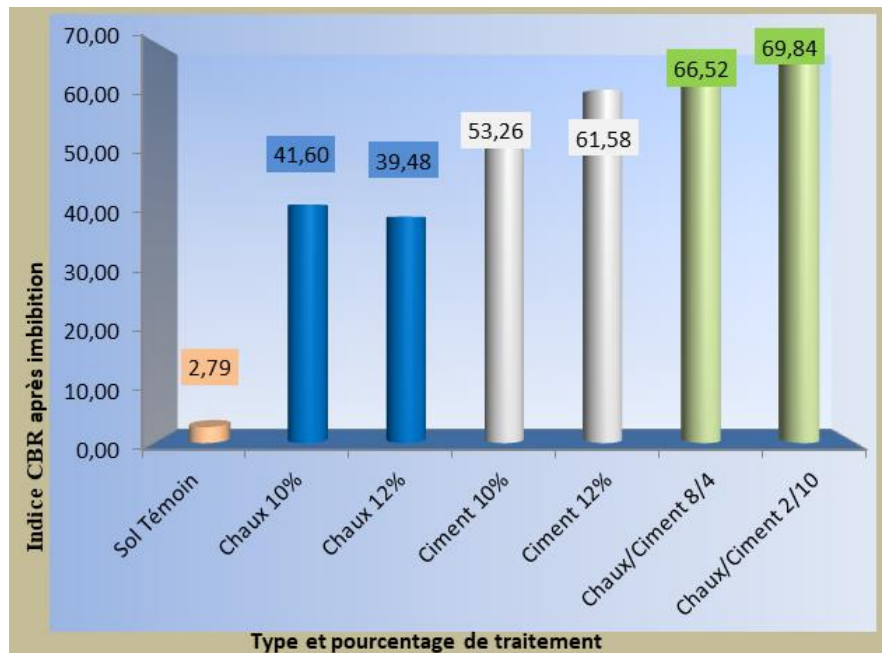


Figure III-8 : Histogramme de comparaison de l'indice de CBR après imbibition

La figure III-9 représente l'histogramme de comparaison du gonflement linéaire du sol témoin et après traitement avec différents pourcentages de l'ajout utilisé

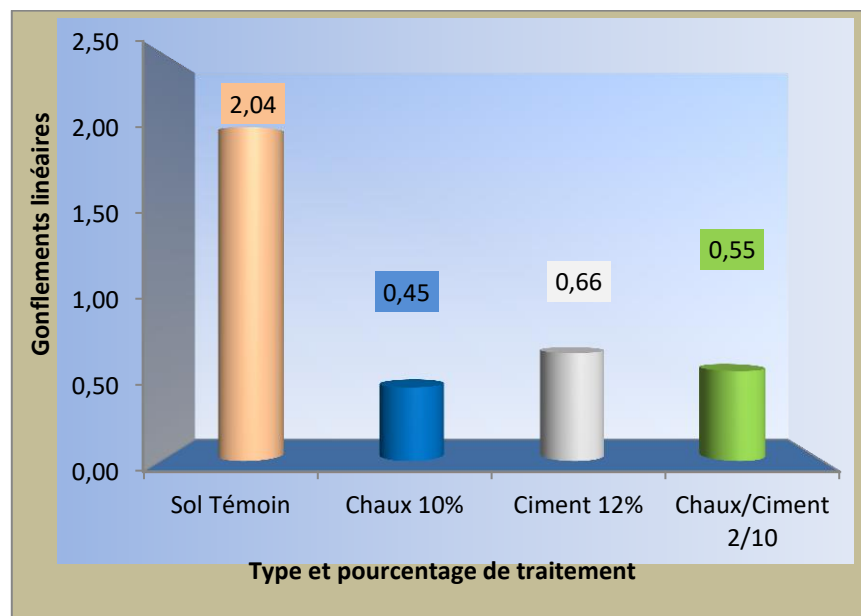


Figure III-9 : Histogramme de comparaison du gonflement linéaire

On constate que la force d'enfoncement augmente avec l'augmentation de l'enfoncement pour différentes teneurs en ajout utilisé (chaux, ciment et mélange chaux-ciment), ce qui confirme l'efficacité du traitement. Pour un enfoncement donné, on remarque que les combinaisons les plus efficaces sont 10 et 12% pour la chaux idem pour le ciment et de 8/4 et 2/10% pour le mélange Chaux/Ciment

On observe une augmentation significative de l'indice de portance après imbibition due au traitement du sol, qui varie de 2,18 pour le sol non traité à 41.60 pour le sol traité avec 10% de chaux, à 61.58 pour qu'est traité avec 12% de ciment et à 69,84 pour le sol traité avec la combinaison 2/10% du mélange Chaux/Ciment. Cette augmentation peut être attribuée à l'interaction eau-liant sur le sol étudié

On remarque que le gonflement diminue de manière significative pour différentes teneurs en ajout utilisé. Passant de 2,04% pour le sol non traité à 0,45% pour une teneur de 10% de chaux, à 0.66 pour une teneur de 12% de ciment et enfin à 0.55 pour la combinaison 2/10% du mélange Chaux/Ciment, ce qui confirme l'efficacité du traitement quel que soit le type de liant utilisé.

III-3-4: Essai de gonflement libre :

Les figures III-10 présentes l'histogramme de l'évolution de l'amplitude de gonflement libre en fonction de type de traitement utilisé, et la figure III-11 celle de la pression de gonflement.

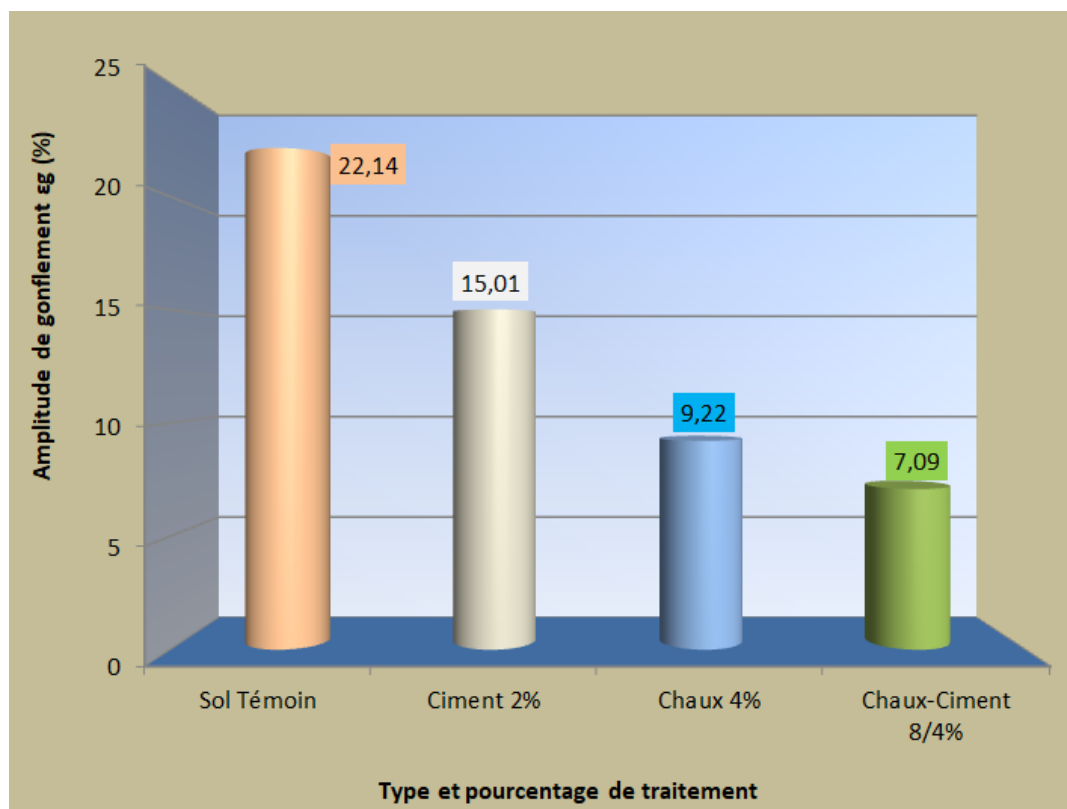


Figure III-10 : Histogramme de de l'amplitude de gonflement libre

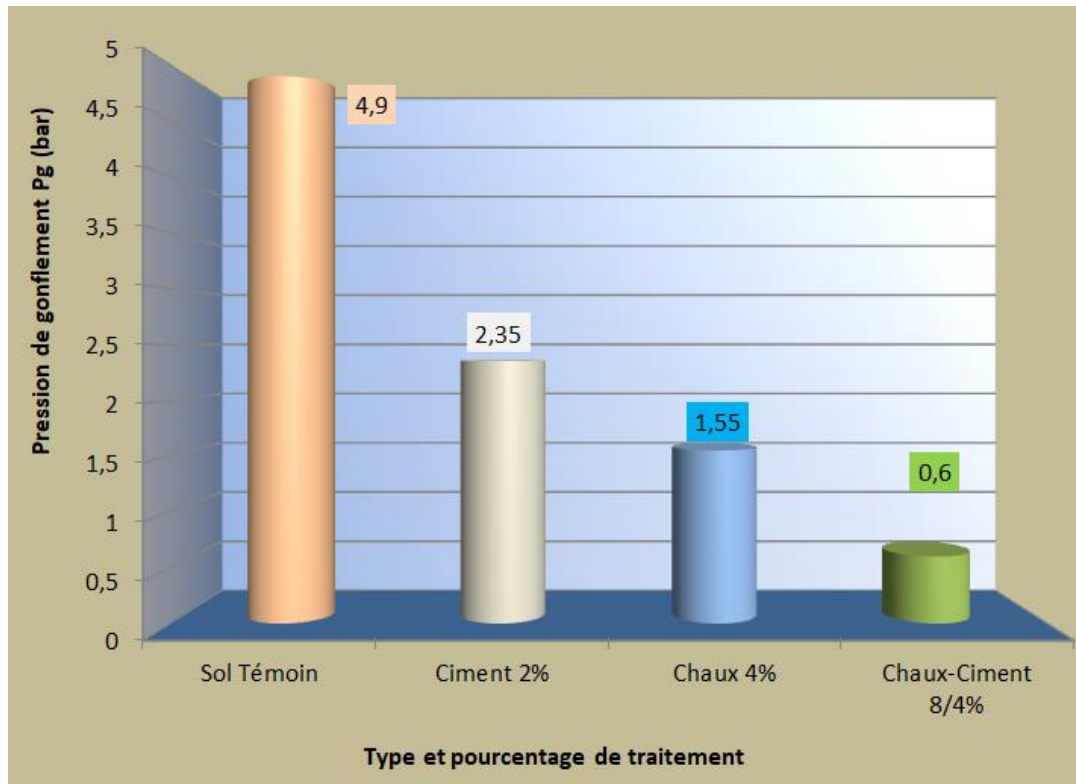


Figure III-11 : Histogramme de la pression de gonflement libre.

On remarque que de l'amplitude de gonflement libre diminue sensiblement avec les différents teneurs en ajout utilisés. Passant de 22.14% pour le sol non traité à 9.22% pour une teneur de 2% de chaux, à 15.01% pour une teneur de 4% de ciment et enfin à 7.9 pour la combinaison 8/4 % du mélange Chaux/Ciment, ce qui confirme l'efficacité du traitement quel que soit le type de liant utilisé.

On observe aussi, que la pression de gonflement diminue sensiblement avec tous les traitements. Elle commence de 4.90 bar pour le sol non traité et arrive à 2.35bar pour le ciment, à 1.55 pour la chaux et à 0.6bar pour une teneur de 8% de ciment et 4%.chaux.

III-3-5: Essai de cisaillement direct:

La figure III-10 représente l'histogramme de comparaison des efforts de cisaillement du sol témoin et après traitement avec différents pourcentages de l'ajouts utilisé

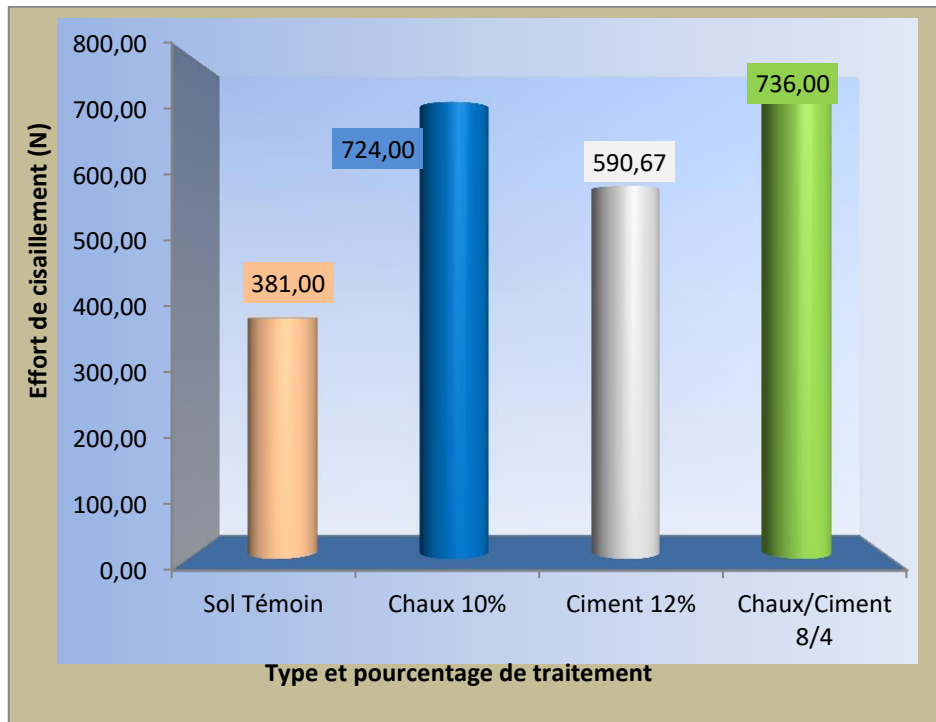


Figure III-12 : Histogramme de comparaison des efforts de cisaillement

On remarque que la résistance au cisaillement non drainée de l'argile traitée puis compactée aux conditions de l'optimum Proctor augmente avec le dosage en stabilisant, tant pour le traitement simple que pour le traitement mixte. Cette augmentation se traduit, dans les deux cas, par une nette amélioration de la capacité portante de l'argile. Pour le traitement simple, on peut cependant remarquer que cette augmentation est davantage obtenue avec la chaux qu'avec le ciment. Pour le traitement mixte, le meilleur résultat est obtenu pour un traitement mixte correspondant à un dosage de 8% de chaux et 4% de ciment.

Chapitre IV

Conclusion et recommandations

Chapitre IV

Conclusion et recommandations

IV-1 Conclusion

L'étude comparative de la stabilisation chimique d'une argile expansive par la chaux, le ciment et le mélange chaux/ciment a permis d'évaluer l'efficacité de ces agents de stabilisation sur les caractéristiques mécaniques et géotechniques du sol. Les résultats ont montré que tous les agents de stabilisation ont eu un impact positif sur les propriétés du sol, mais avec des variations significatives.

L'ajout de chaux avec une teneur de 10% a réduit le gonflement linéaire de l'argile expansive à 0.55% au lieu de 2.04% pour le sol non traité, et a augmenté la résistance au cisaillement 724N au lieu de 381N. Cependant, l'utilisation exclusive de la chaux peut entraîner une diminution de la densité sèche du sol traité.

De même, l'ajout de 12 % de ciment a conduit à une augmentation significative de l'indice de portance après imbibition du sol traité. Le ciment a également réduit la teneur en eau, ce qui a amélioré la stabilité et la portance du sol.

En ce qui concerne le mélange chaux/ciment, il a été constaté que l'ajout de 8/4% et 2/10% du mélange chaux/ciment avait des effets synergiques sur les propriétés du sol. Le mélange chaux/ciment a permis d'améliorer de manière significative l'indice de portance immédiat à 53.60% au lieu de 8.32% et l'indice de portance après imbibition à 69.84% au lieu de 2.79%, la résistance au cisaillement à 736N au lieu de 381N du sol non traité, et la réduction du gonflement linéaire de l'argile expansive. De plus, le mélange chaux/ciment a maintenu une densité sèche satisfaisante, offrant ainsi une meilleure stabilité au sol traité.

En conclusion, l'étude comparative a montré que la stabilisation chimique de l'argile expansive peut être réalisée avec succès en utilisant la chaux, le ciment ou le mélange chaux/ciment. Cependant, les performances acquises par cette argile expansive traitée aux liants hydrauliques lui procurent stabilité, durabilité et meilleure résistance. Cependant, les meilleures performances sont obtenues pour un traitement mixte correspondant à un dosage de 8% de ciment et 4% de chaux. Il est recommandé d'approfondir les recherches sur les dosages optimaux et les conditions de traitement pour maximiser les avantages de la stabilisation chimique dans le cas spécifique de l'argile expansive.

IV-2 : Recommandations et perspectives

Les recommandations et les perspectives qui peuvent être formulées à la suite de cette étude comparative sur la stabilisation chimique d'une argile expansive par la chaux, le ciment et le mélange chaux/ciment :

- ✓ Poursuivre les recherches sur l'effet du temps de maturation du sol traité avant d'effectuer les essais de portance immédiate. Il est important de comprendre l'influence du temps sur les propriétés mécaniques et de déterminer la durée optimale de maturation pour obtenir les meilleures performances.
- ✓ Explorer davantage la méthode de gonflement empêché. Cette approche pourrait fournir des informations précieuses sur la capacité de chaque agent de stabilisation à minimiser le gonflement de l'argile expansive, en simulant des conditions plus proches de celles rencontrées sur le terrain.
- ✓ Étudier l'utilisation d'autres types de ciments. Il est possible que différents types de ciments puissent présenter des performances différentes en termes de stabilisation de l'argile expansive. Une comparaison entre différents types de ciments permettrait d'identifier les options les plus efficaces pour chaque situation.
- ✓ Revoir l'essai de cisaillement en utilisant l'essai consolidé non drainé (CU) pour évaluer l'effet de la chaux sur l'angle de frottement et la cohésion. Cette analyse plus approfondie permettrait de mieux comprendre les mécanismes de renforcement du sol traité et d'optimiser les dosages des agents de stabilisation.
- ✓ Étudier les performances à long terme des sols stabilisés. Il est important de comprendre comment les propriétés mécaniques évoluent avec le temps et d'évaluer la durabilité des sols stabilisés sur le long terme. Cela peut être réalisé par des essais de vieillissement accéléré ou des études de terrain à plus long terme.
- ✓ Évaluer l'impact économique et environnemental de chaque méthode de stabilisation. Il est essentiel de prendre en compte les coûts associés à chaque agent de stabilisation, ainsi que les implications environnementales de leur utilisation, afin de choisir la meilleure approche en fonction des contraintes spécifiques du projet.

En résumé, ces recommandations et perspectives visent à approfondir les connaissances sur la stabilisation chimique des sols expansifs et à optimiser les méthodes utilisées. Des recherches supplémentaires permettront de développer des recommandations plus précises et adaptées aux conditions spécifiques de chaque projet de construction ou d'aménagement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **MEKKI Lakhdar (2008)** méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de m'sila).Mémoire de magister, université de M'sila.
- [2] **Azzouz.Z, (2006)** «Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen». Thèse de magister Université de Tlemcen
- [3] **Wakim J, (2005)** «Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses» T h è s e doctorat de l'école nationale supérieure des mines de paris.France.
- [4] **livre : Mécanique des sols théorie et pratique** << *Vincent ROBITAILLE – Denis TREMBLAY*>> édition MODULO.
- [5] **Zemenu Geremew YIGZAW(2009)** <<Analyse des processus de retrait-gonflement des sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques. Rôle de la microstructure>> Géosciences et Ressources Naturelles, Paris
- [6] **Mohamad MRAD (2005)** : <<modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés>> Institut national polytechnique de lorraine
- [7] **Nicolas C. (2005)** .Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse docteur Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne
- [8] **Bengraa .H, (2004)**; « Contribution a l'Etude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable ». Thèse de magister Université de Mohamed Boudiaf U.S.T.O, Oran.
- [9] **Bultel Frédéric, (2001)**; «Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels». Thèse doctorat l'école nationale des ponts et chaussées
- [10] **Légér .G, (2001)**; «Etude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestière». Mémoires maîtrise en génie de la construction université Montréal(Québec).
- [11] **Redha.B, (2008)**; «Stabilisation des sols argileux par la chaux (cas su Kaolin du gisement de Djebel DEBAGH-GUELMA) ». Thèse de magister Université de Mohamed Boudiaf M'sila

- [13] **MAHAMEDI Abdelhalim et MAKRI, Abdelkadir.** Caractérisation et traitement à la chaux des sols du Chott El Hodna (wilaya de M'sila). 2020. Mémoire de Master. Univ M'sila.
- [14] **KHEMISSA Mohamed et MAHAMEDI Abdelkrim.** Amélioration de la portance d'une argile expansive par un traitement mixte au ciment et à la chaux.
- [15] **KHEMISSA Mohamed et MAHAMEDI Abdelkrim.** Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. Applied Clay Science, 2014, vol. 95, p. 104-110.
- [16] **MAHAMEDI A,** (2014) : Caractérisation et traitement des sols gonflants compactés en vue de leur utilisation en construction routière (application aux argiles expansives de M'sila). Thèse de DOCTORAT Université de Mohamed Boudiaf de M'sila
- [17] **MAHAMEDI A. et KHEMISSA M.** Cement and Lime Stabilization Effect on the Evolutivity of an Expansive Overconsolidated Clay.
- [18] **MAHAMEDI A. et KHEMISSA M.** Etude de la résistance au cisaillement d'une argile sur consolidée expansive traitée aux liants hydrauliques.
- [19] **BEN RHAJEM H., TESSIER D. & PONS CH.C. (1986)** "comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation
- [20] **BOULON M, FLAVIGNY E, MALCOT Y ET D'AUTRES 2004** : « pratique éclairée des éléments finis en géotechnique », document1, laboratoire 3s et terrasol,
- [21] **GRUNBERGER D., (1995),** étude expérimentale de l'évolution des microstructures et des propriétés physiques et mécaniques des argiles au cours de la compaction, thèse université de montpellier ii, sciences et techniques du languedoc, 20 décembre 1995.
- [22] **Nicolas CABANE** Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation
- [23] **Hossein N.** (2008) Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels. Thèse docteur Institut national polytechnique Lorraine
- [24] Normes Françaises :
- AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-050 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-051 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d’Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-053 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.
- AFNOR (1996) Norme Française : NF P 94-056 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage après lavage.
- AFNOR (1992) Norme Française : NF P 94-057 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie
- AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-068 Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol par l’essai à la tache.
- AFNOR (1997) Norme Française : NF P 94-078 Sols : Indice CBR immédiat— Indice CBR après immersion — Indice Portant Immédiat
- AFNOR (1999) Norme Française : NF P 94-093 Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.

Annexes

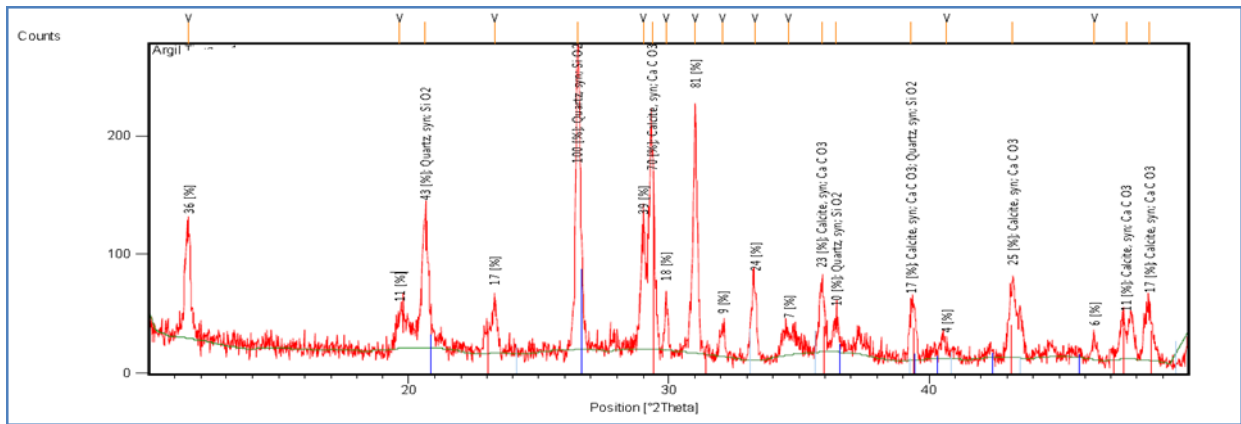


Figure II-1 : Analyse diffractométrique aux rayons X de l'argile étudiée.

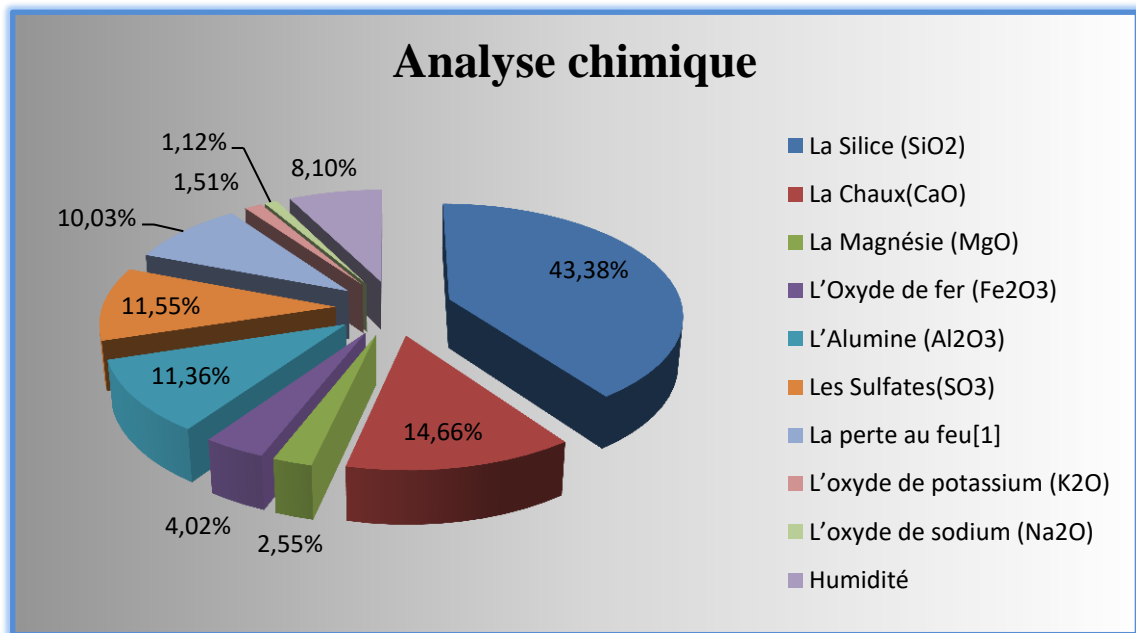


Figure II-2 : Analyse chimique de l'argile étudiée.

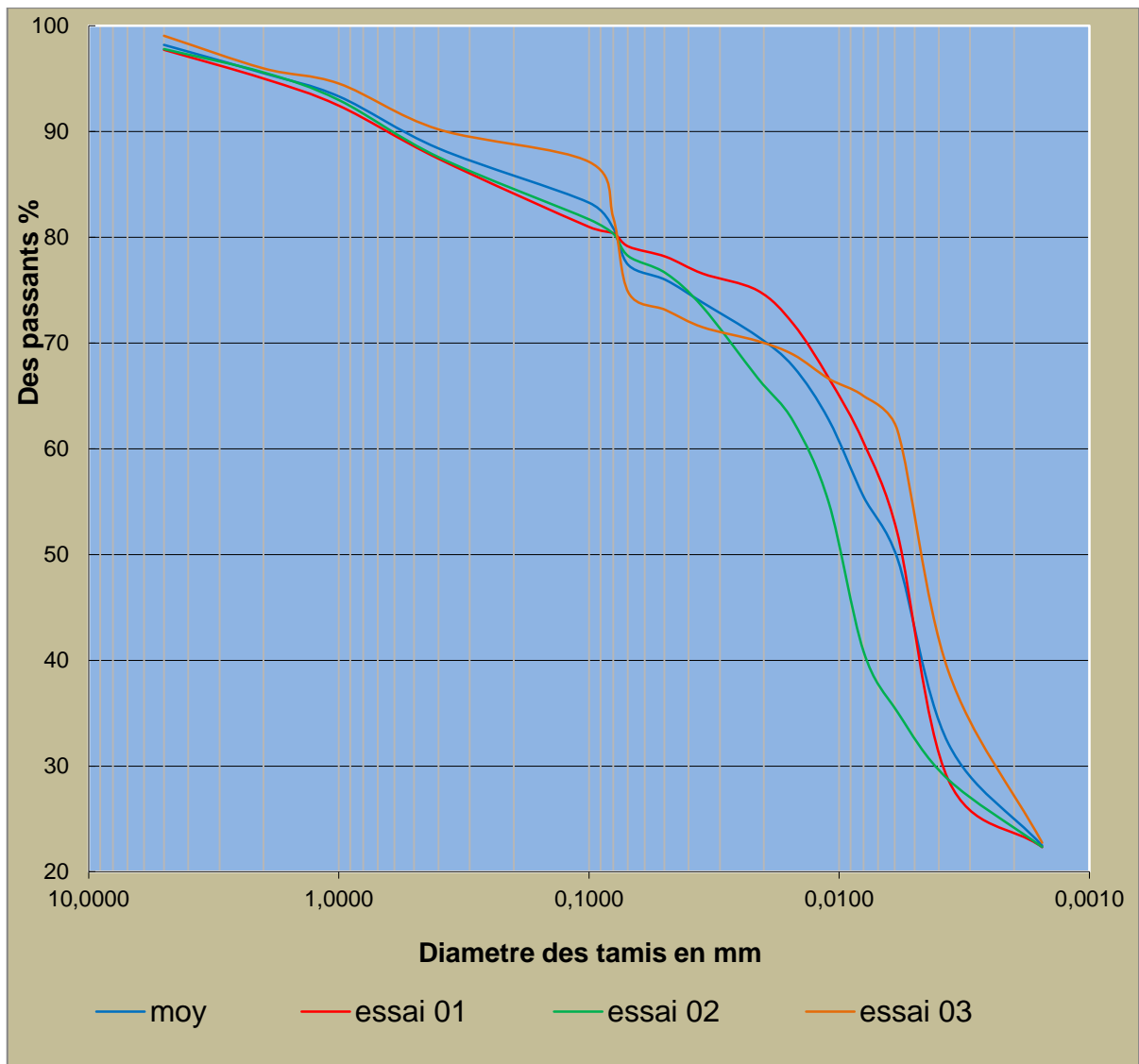


Figure II.3 : Courbes d'Analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).

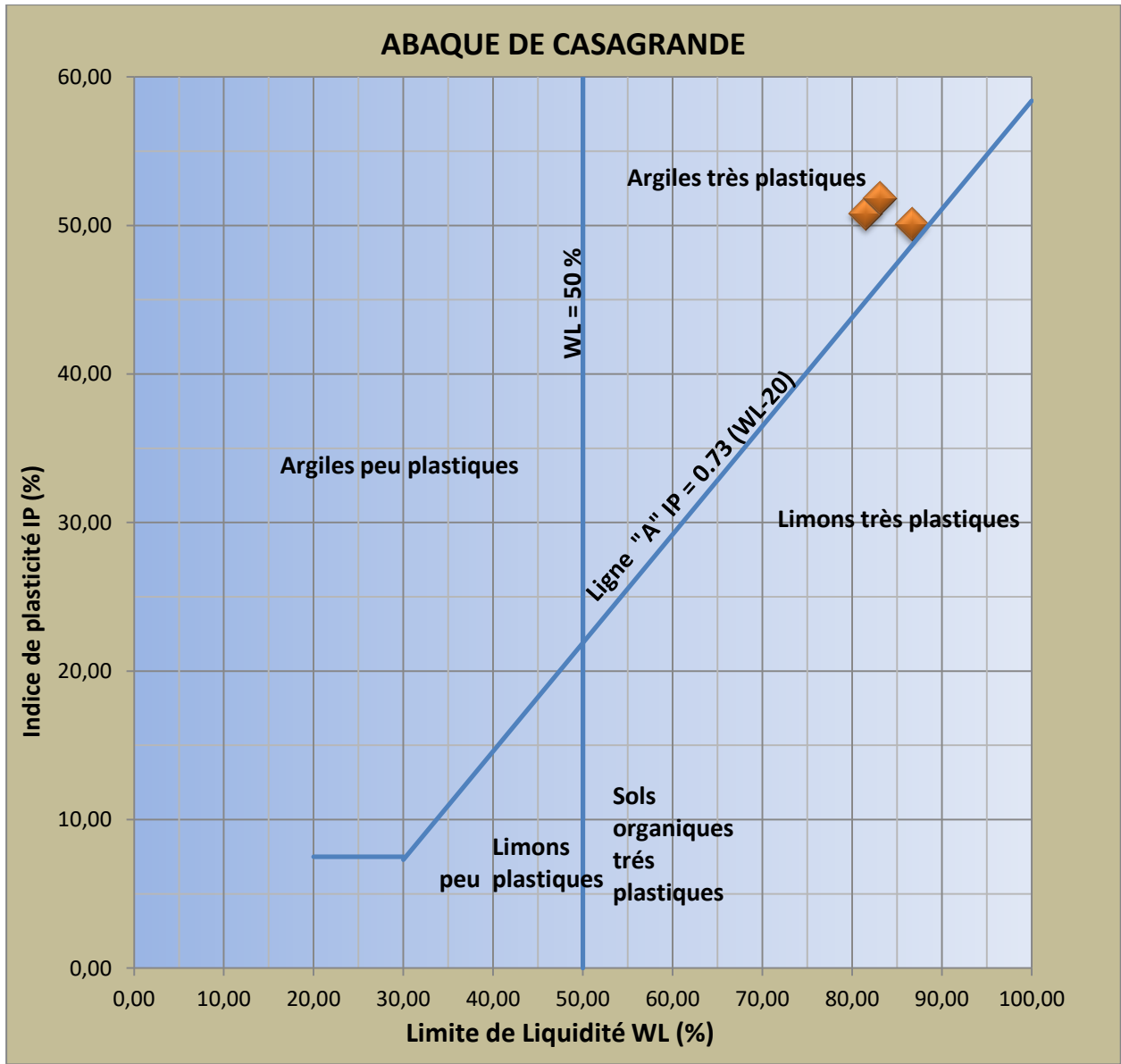


Figure II.4 : Classement du sol dans l'Abaque de Casagrande

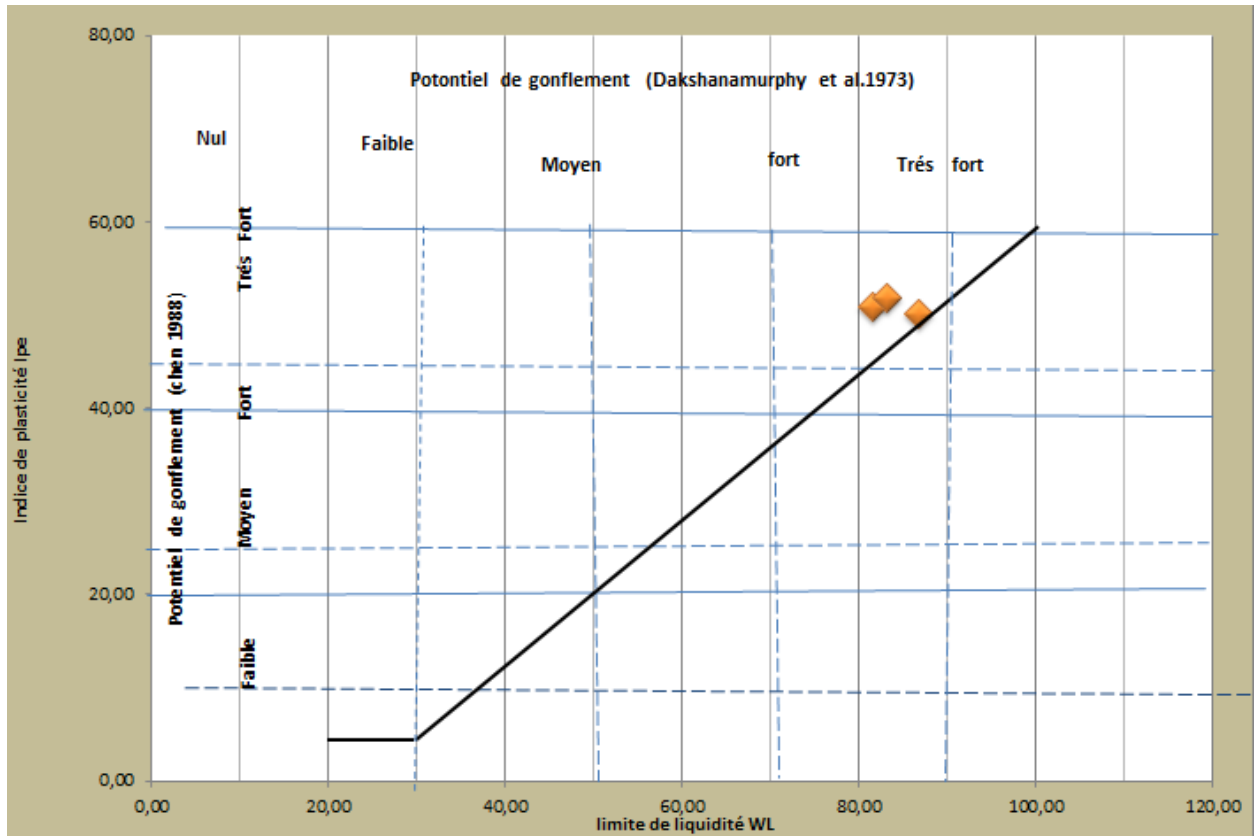


Figure II.5 : Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

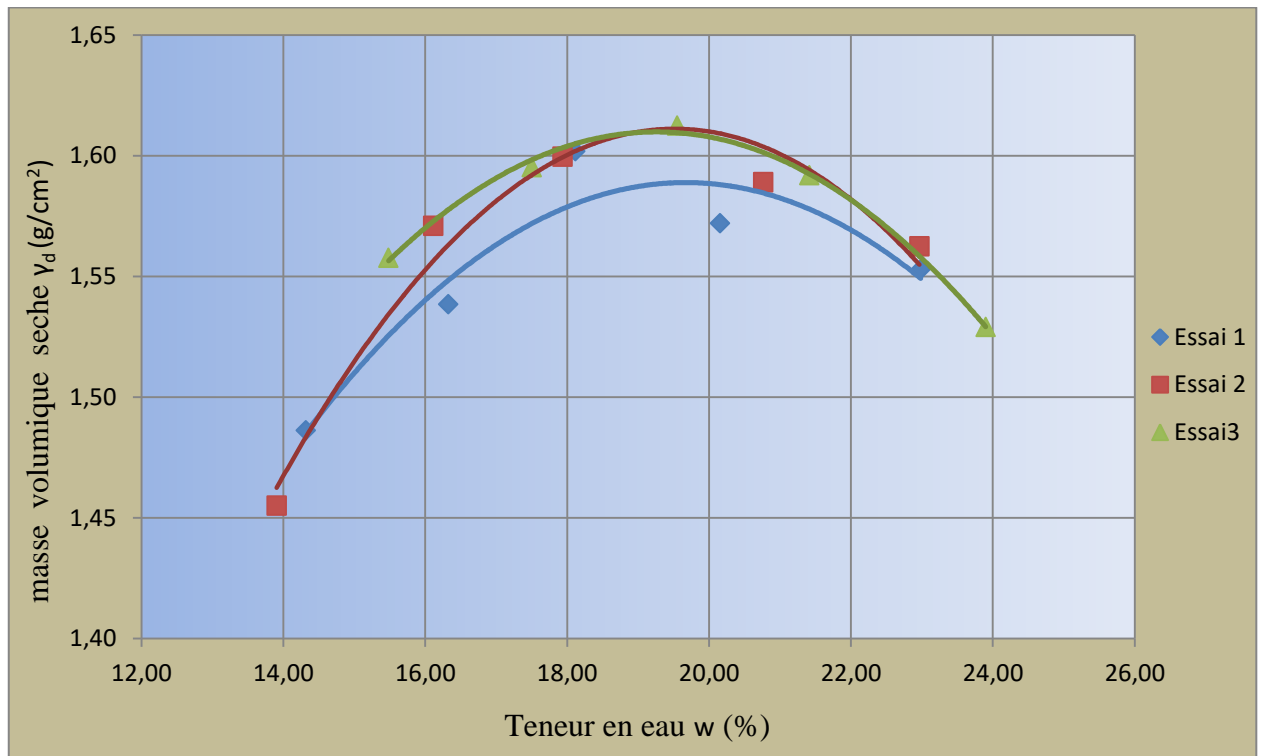
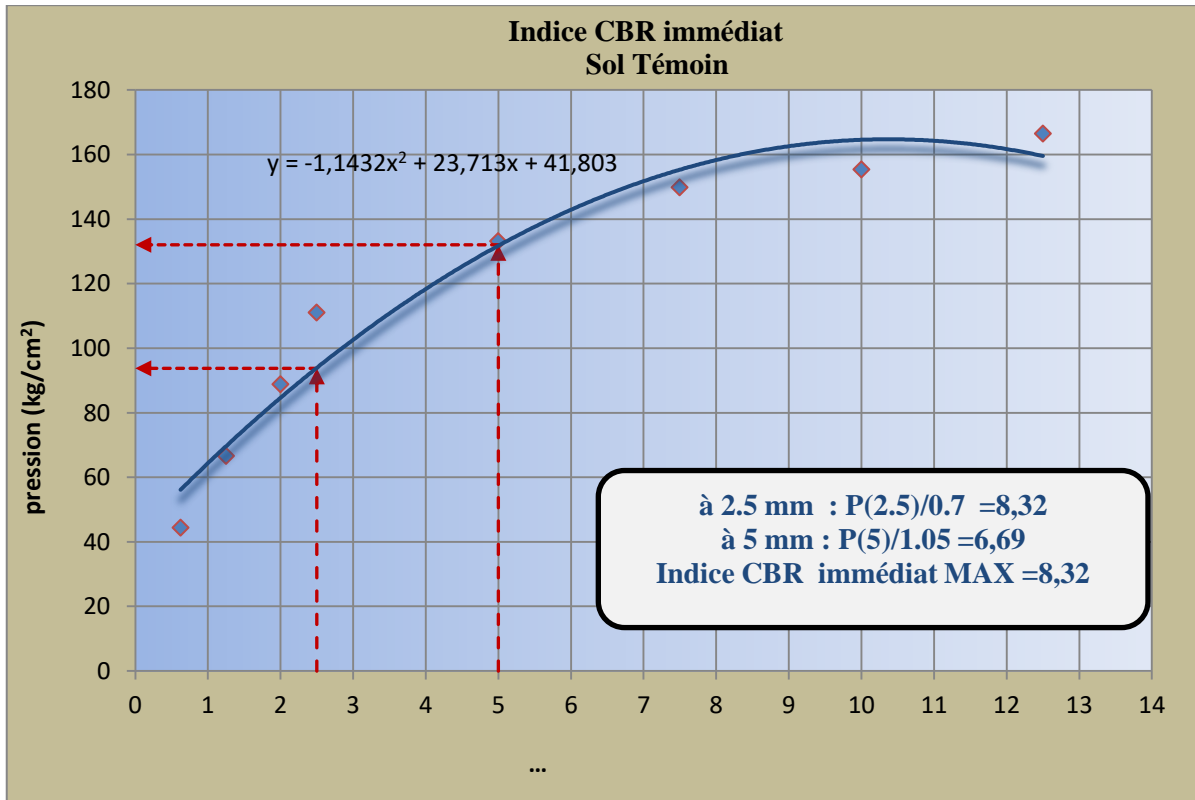
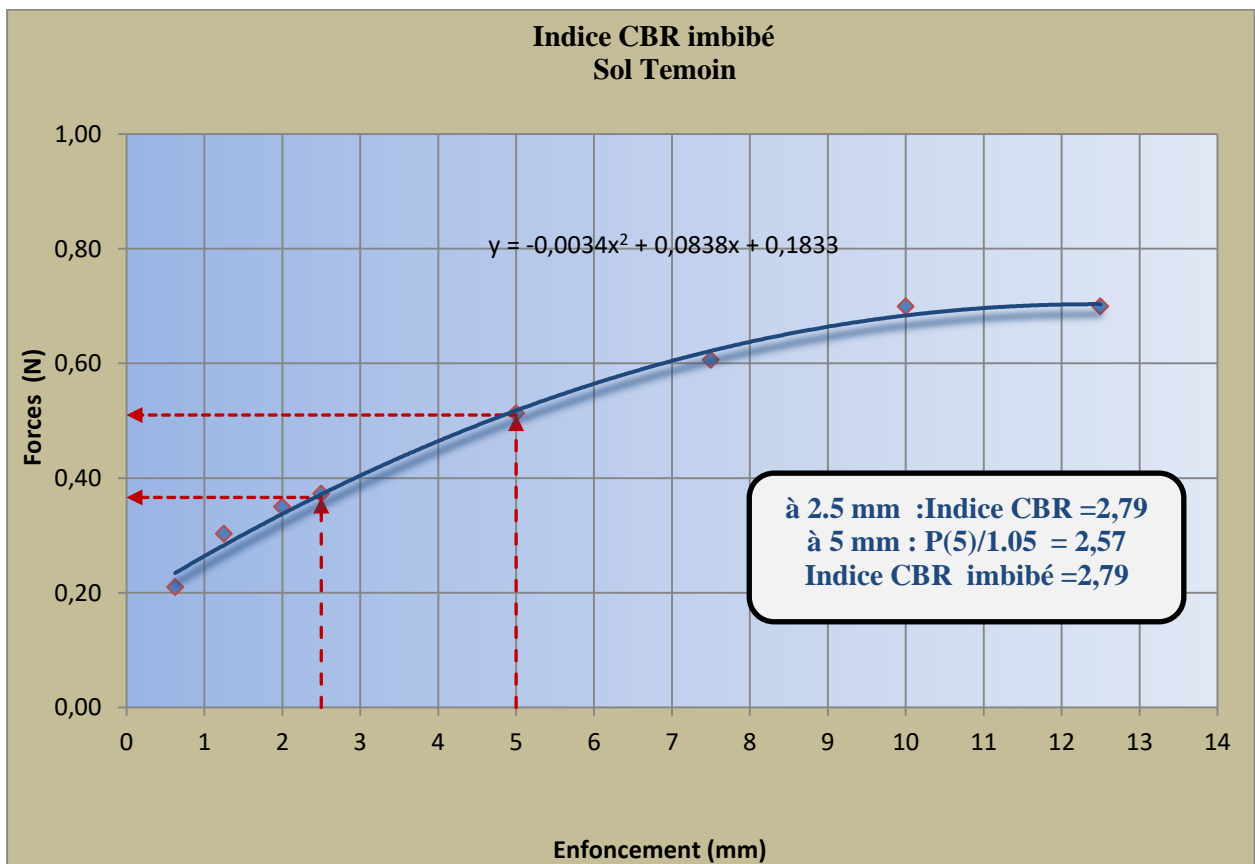


Figure II-5 bis : Résultats de Trois (03) essais de Proctor normal.



**Figure II-5 bis1 : Résultats des forces de poinçonnement moyen en fonction des enfoncements
indice C.B.R. immédiat MAX**



**Figure II-6 : Résultats des forces de poinçonnement en fonction des enfoncements
indice C.B.R. immédiat MAX**

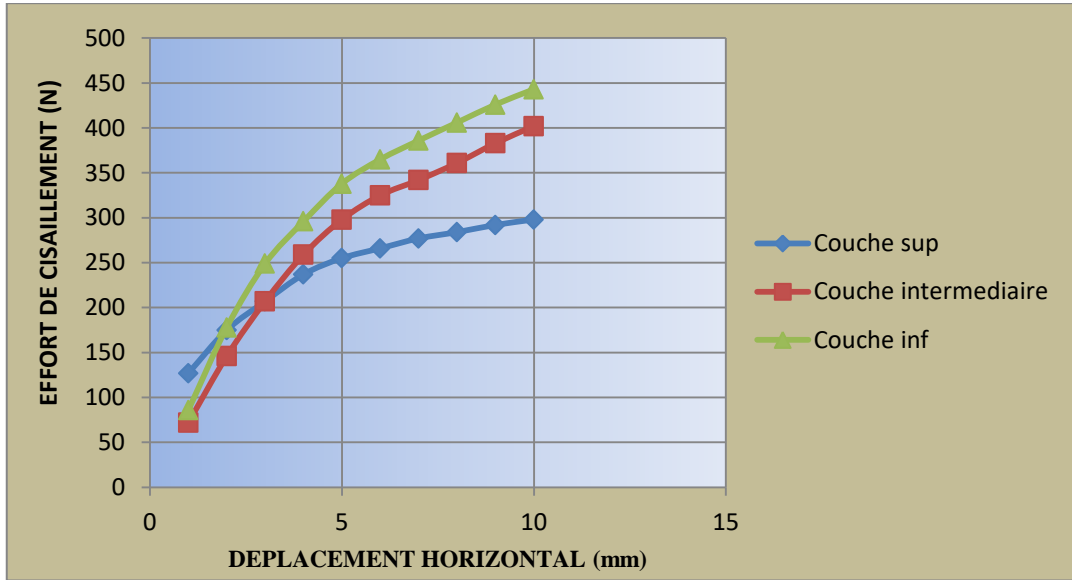


Figure II-7: Courbes d'effort de cisaillement en fonction du déplacement horizontal des différentes couches.

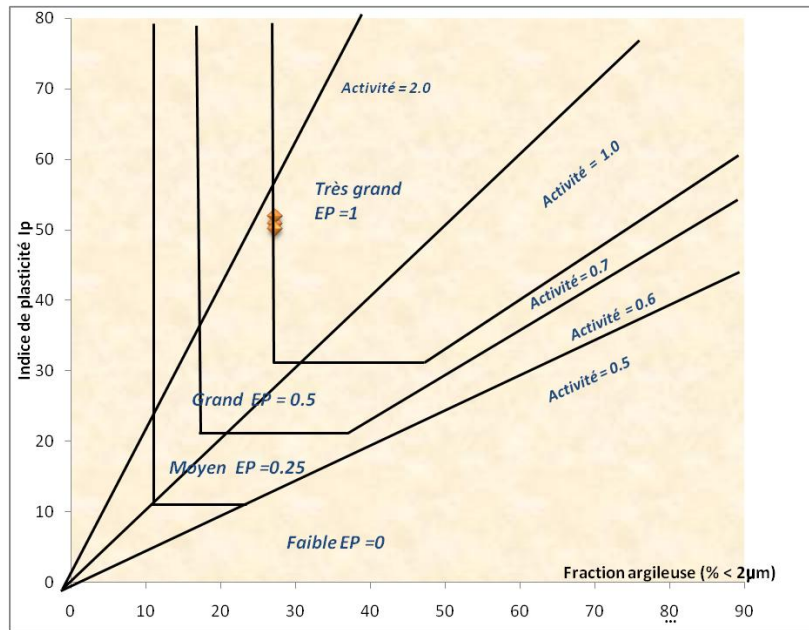


Figure II-8 : Williams et Donaldson (1980).

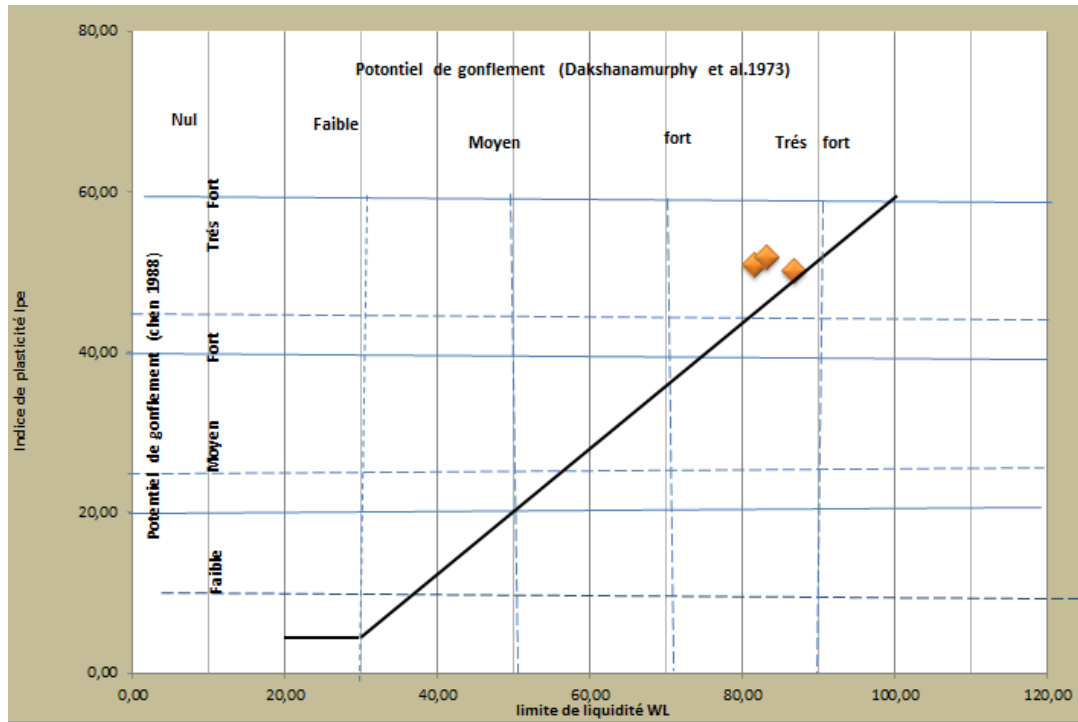


Figure II-9 : Classement sur l'Abaque de Casagrande adaptée aux solx gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)

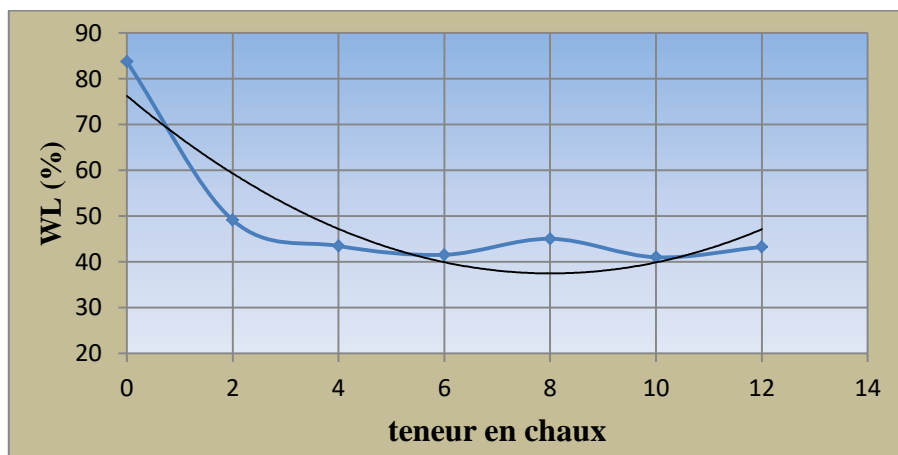


Figure II-10 Limite de liquidité en fonction de la teneur en chaux

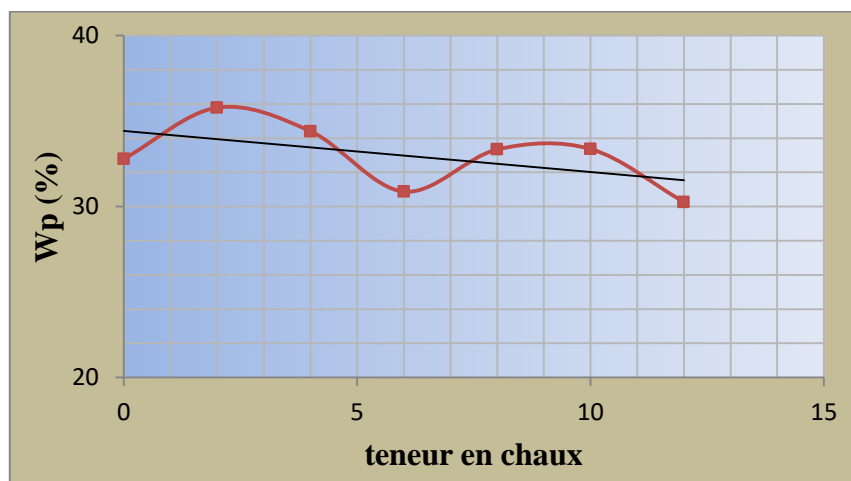


Figure II-11: Limite de plasticité en fonction de la teneur en chaux

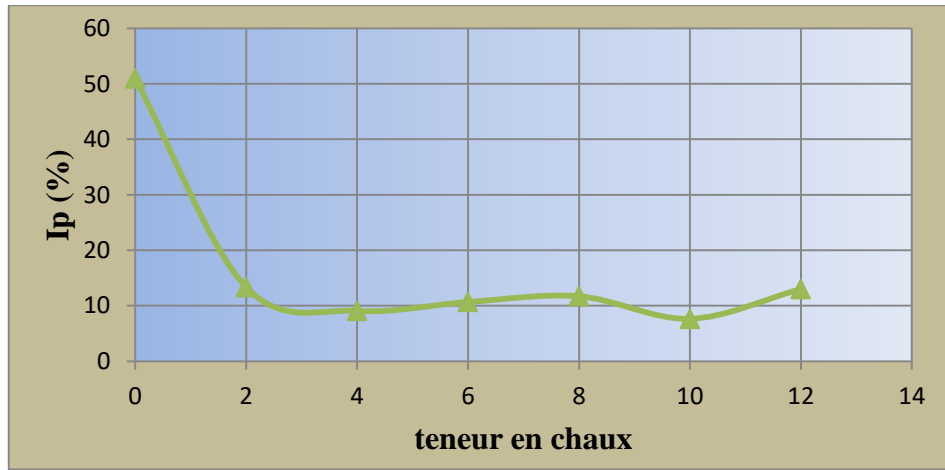


Figure II-12 : La courbe de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en chaux

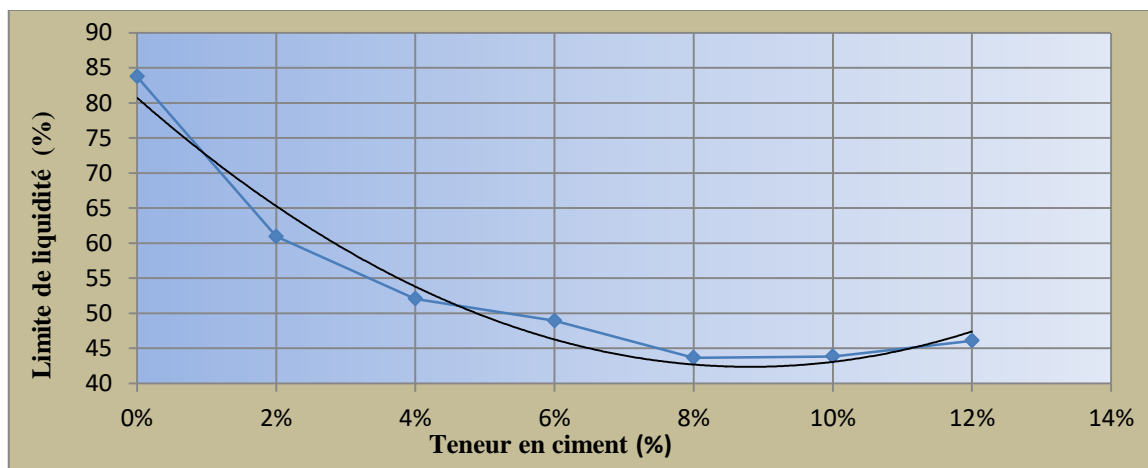


Figure II-13 : Limite de liquidité en fonction du teneur en ciment.

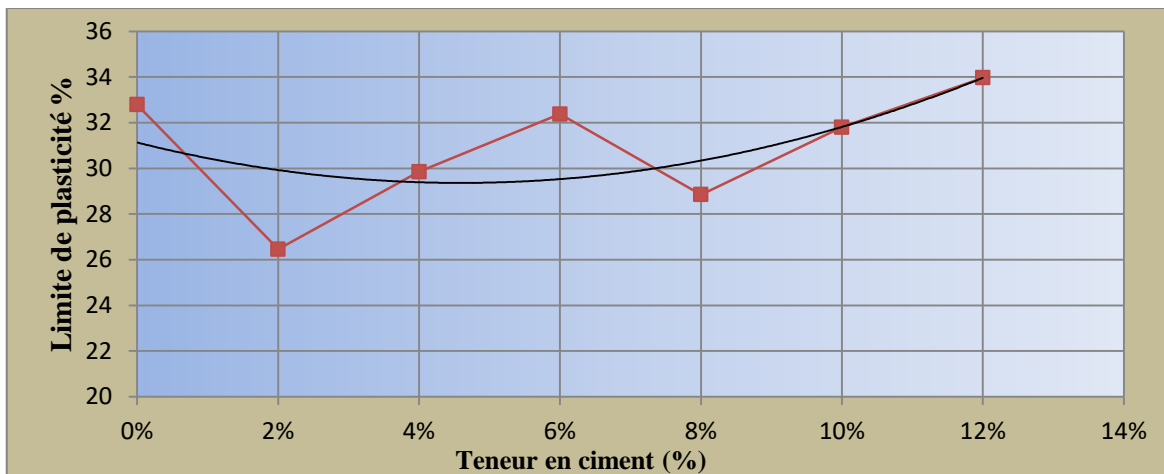


Figure II-14 : Limite de plasticité en fonction du teneur en ciment.

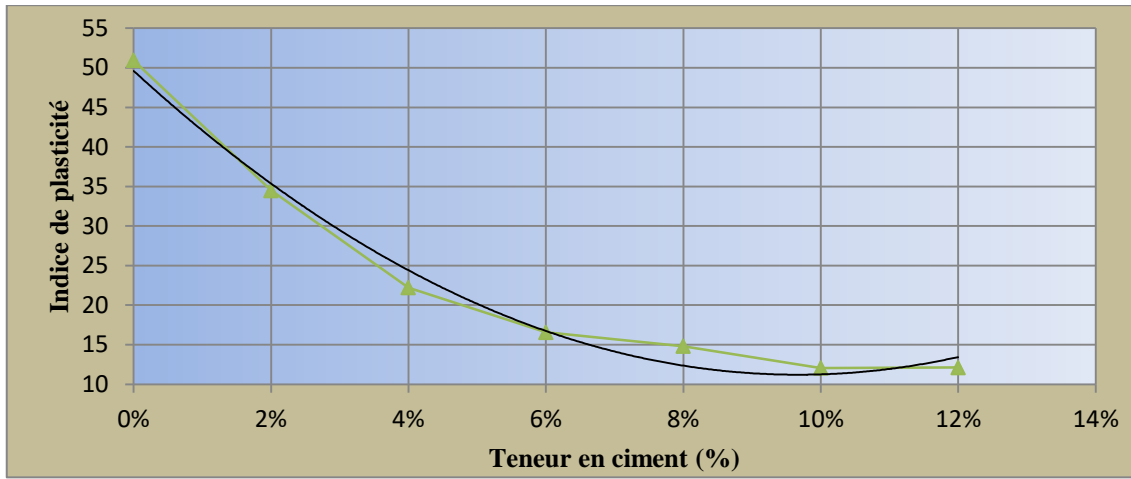


Figure II-15 : Indice de plasticité en fonction du teneur en ciment.

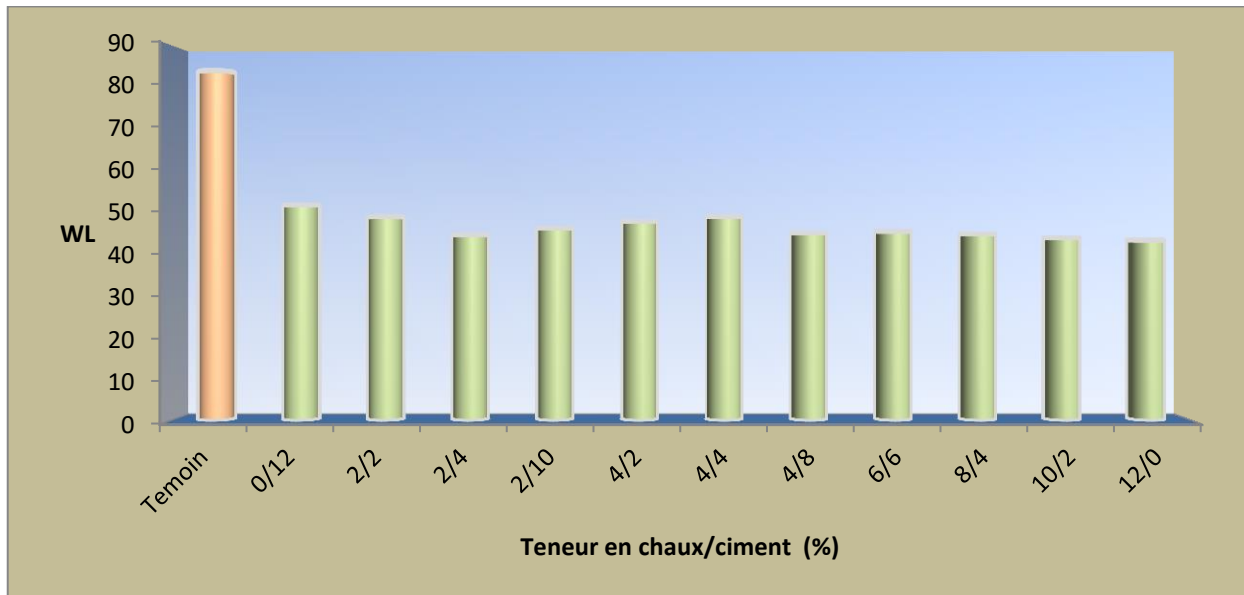


Figure II-16: Histogramme des limites de liquidité en fonction de la teneur en chaux/ciment

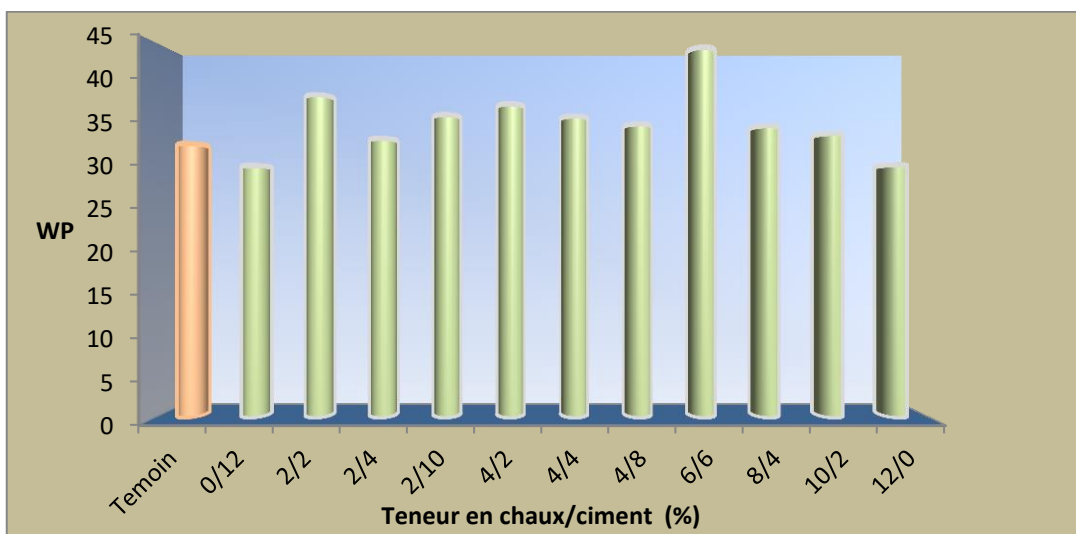


Figure II-17 : Histogramme des limites de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment.

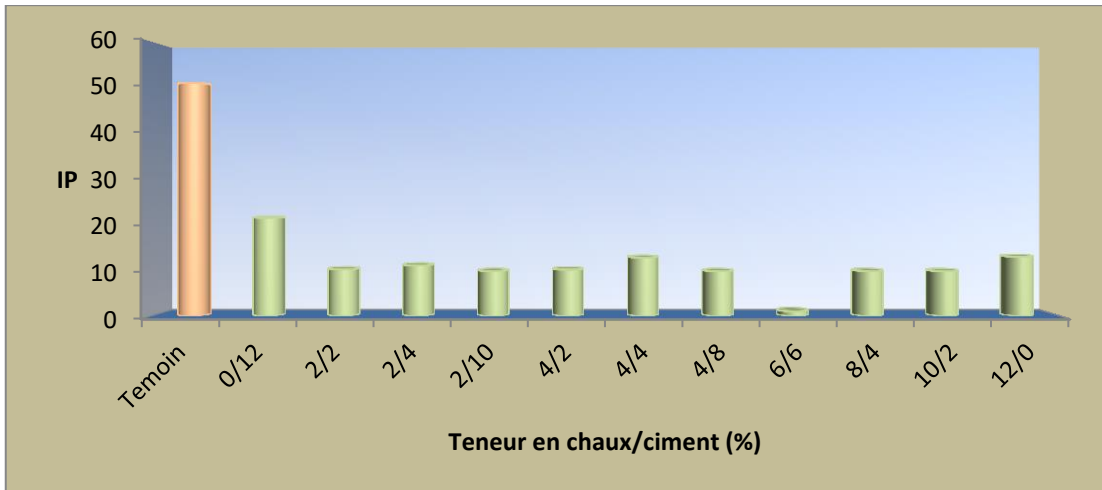


Figure II-18 : Histogramme des indices de plasticité en fonction de la teneur en chaux/ciment.

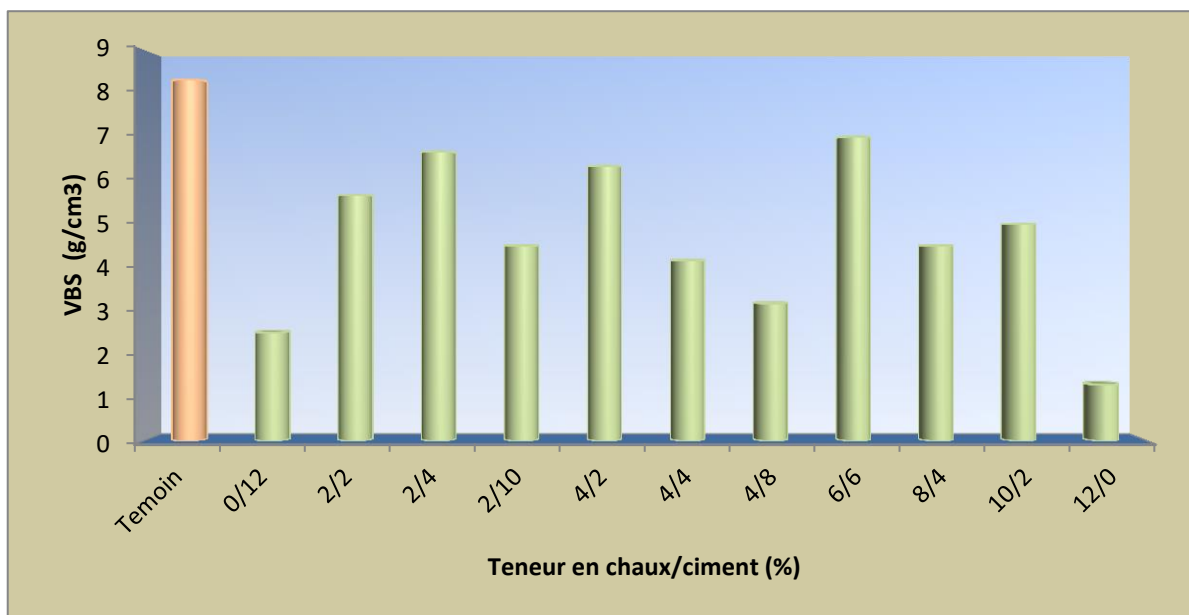


Figure II-19 : Histogrammes des valeurs du bleu de méthylène en fonction des teneurs en chaux-ciment du sol traité.

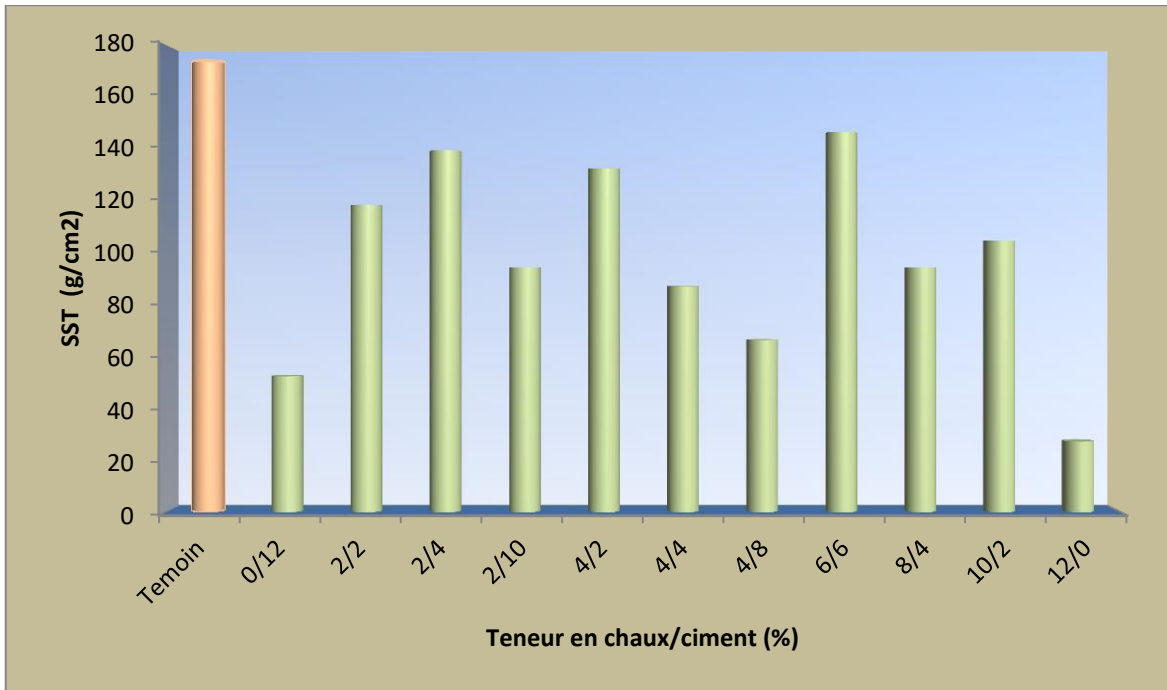


Figure II-20: Histogramme des surfaces spécifiques en fonction des teneurs en chaux-ciment du sol traité.

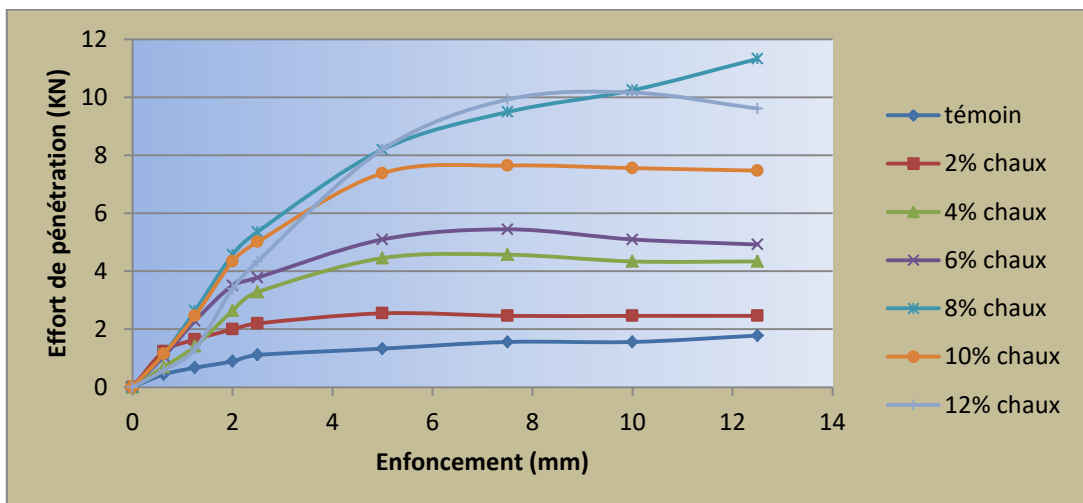


Figure II-21 : Efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

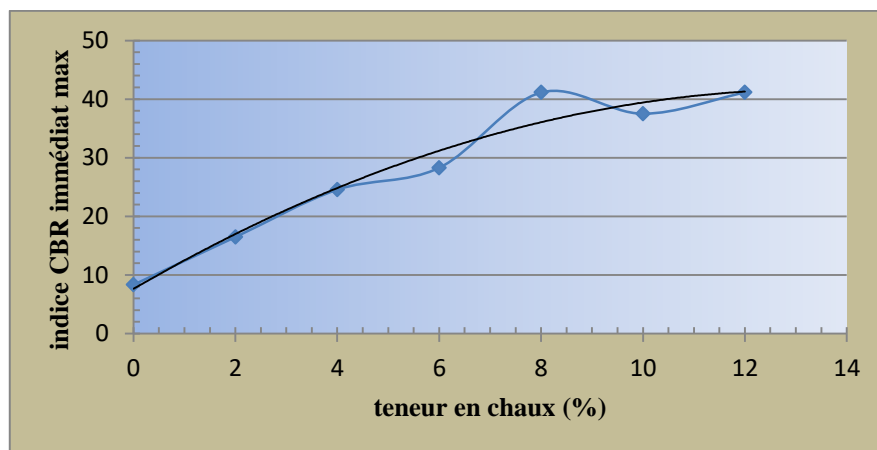


Figure II-22 : Indices C.B.R immédiats en fonction des teneurs en chaux.

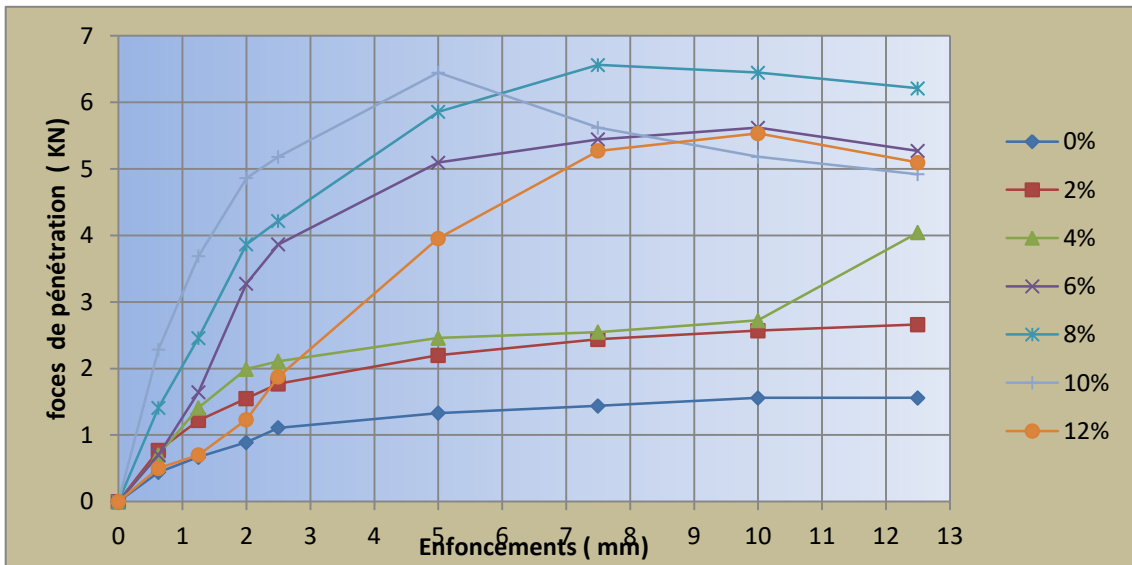


Figure II-23 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfonçements pour différents teneurs en ciment (C.B.R. immédiat).

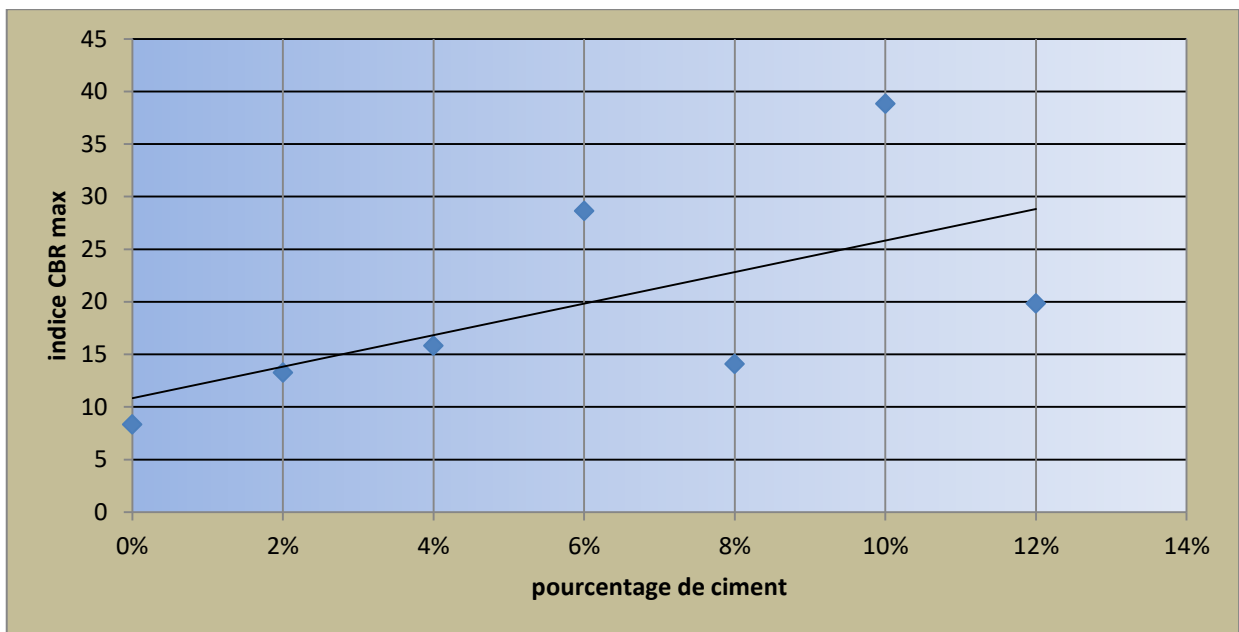


Figure II-24 : Indices C.B.R. immédiats en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

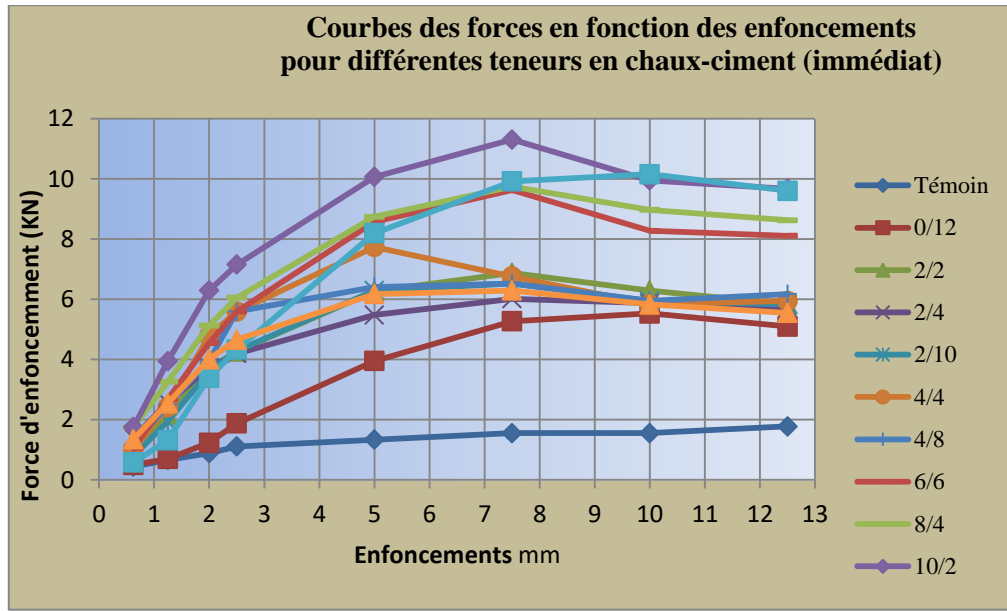


Figure II-25: Courbes des forces d'enfoncement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment (C.B.R. immédiat).

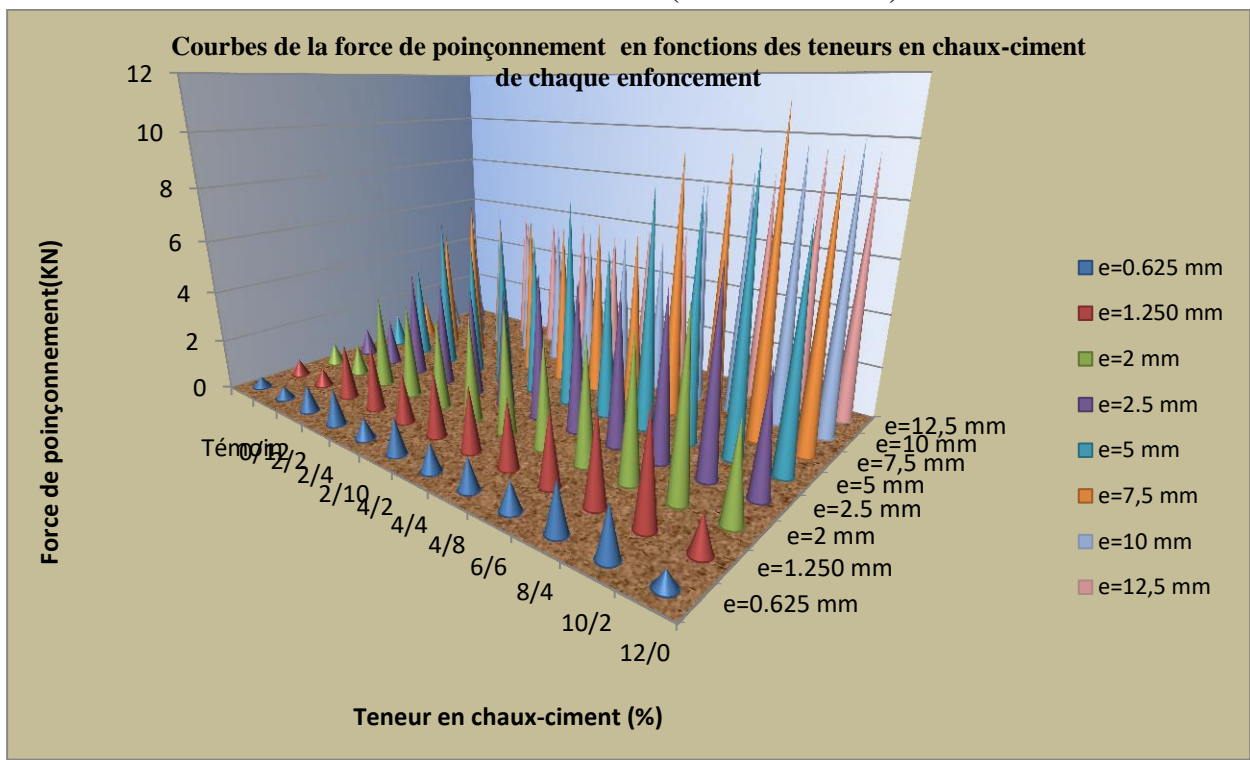


Figure II-26: Courbes des forces de poinçonnement en fonction des teneurs en chaux-ciment de chaque enfoncement.

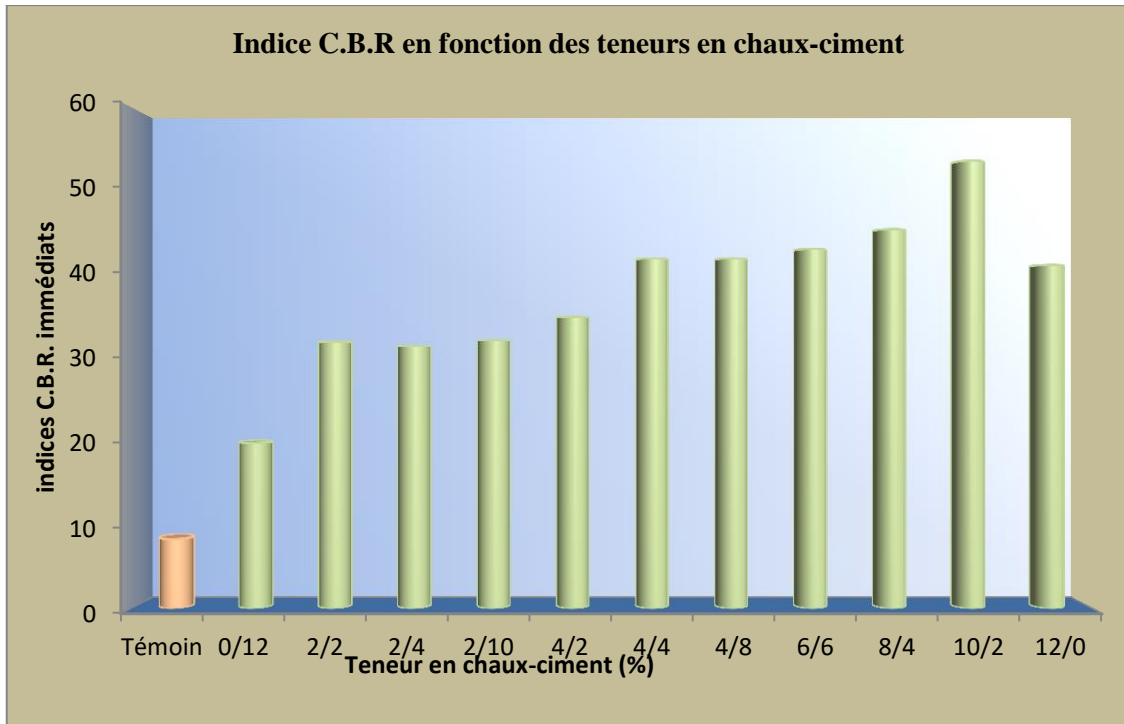


Figure II-27: Histogramme des indices CBR immédiat en fonction des teneurs en chaux-ciment

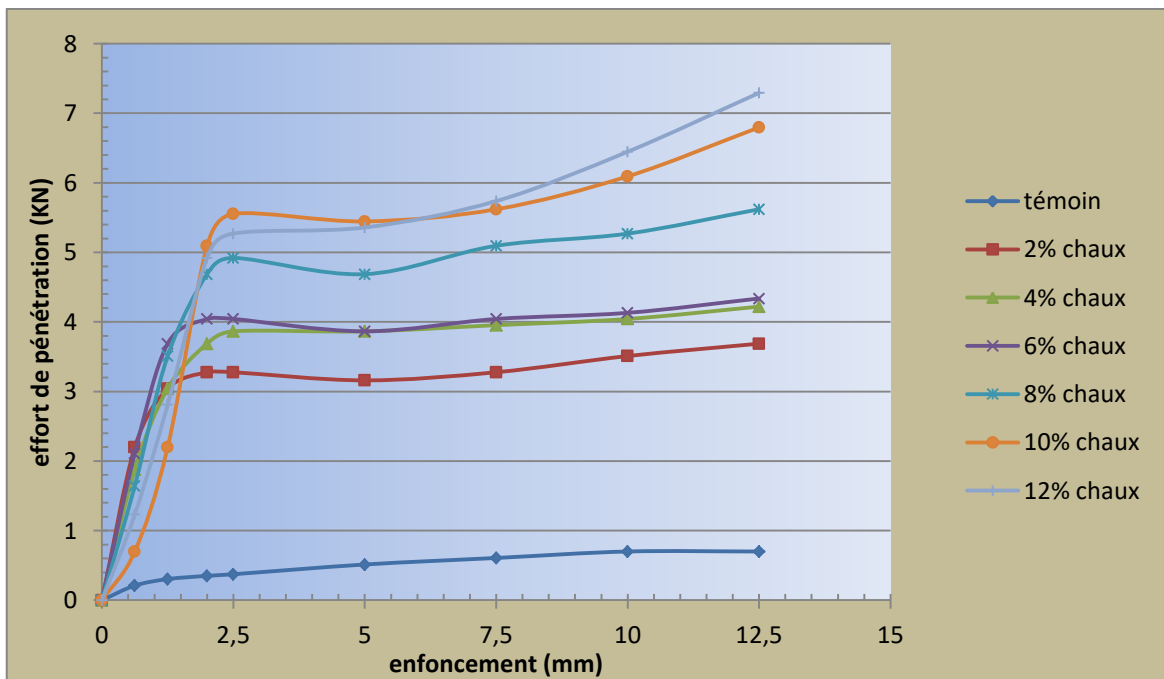


Figure II-28 : Efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

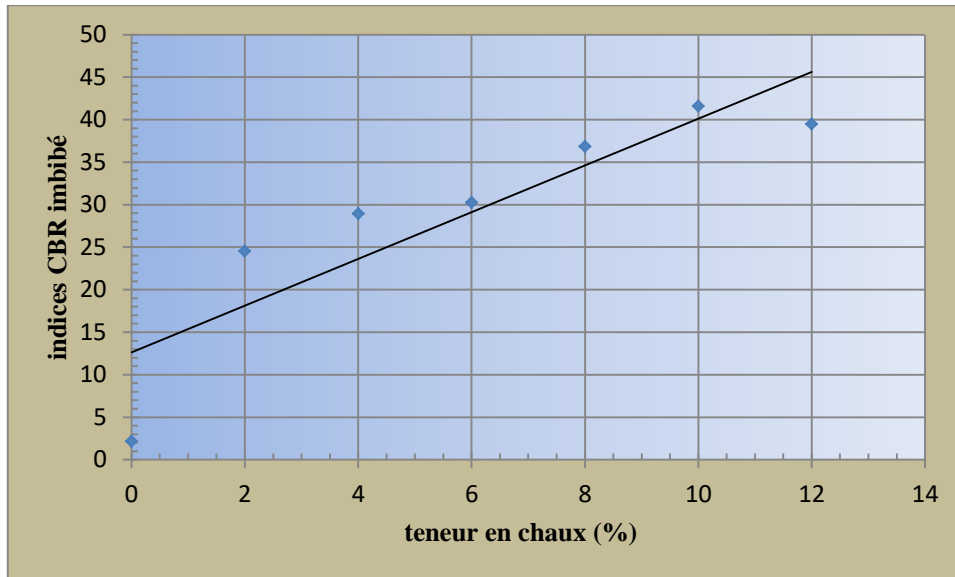


Figure II-29 : Indices CBR imbibé en fonction des teneurs en chaux et leur droite moyenne.

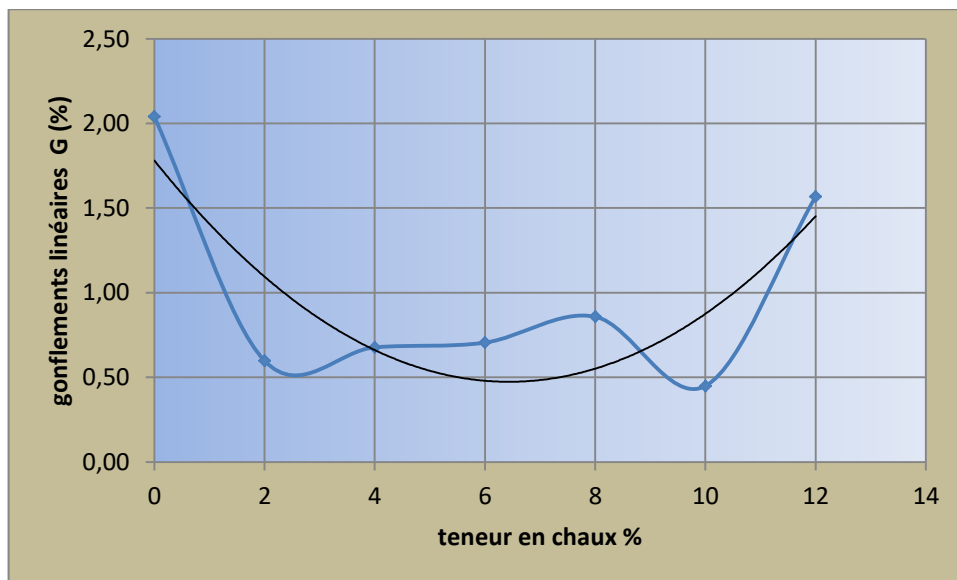


Figure II-30 : Gonflement linéaire en fonction de la teneur en chaux.

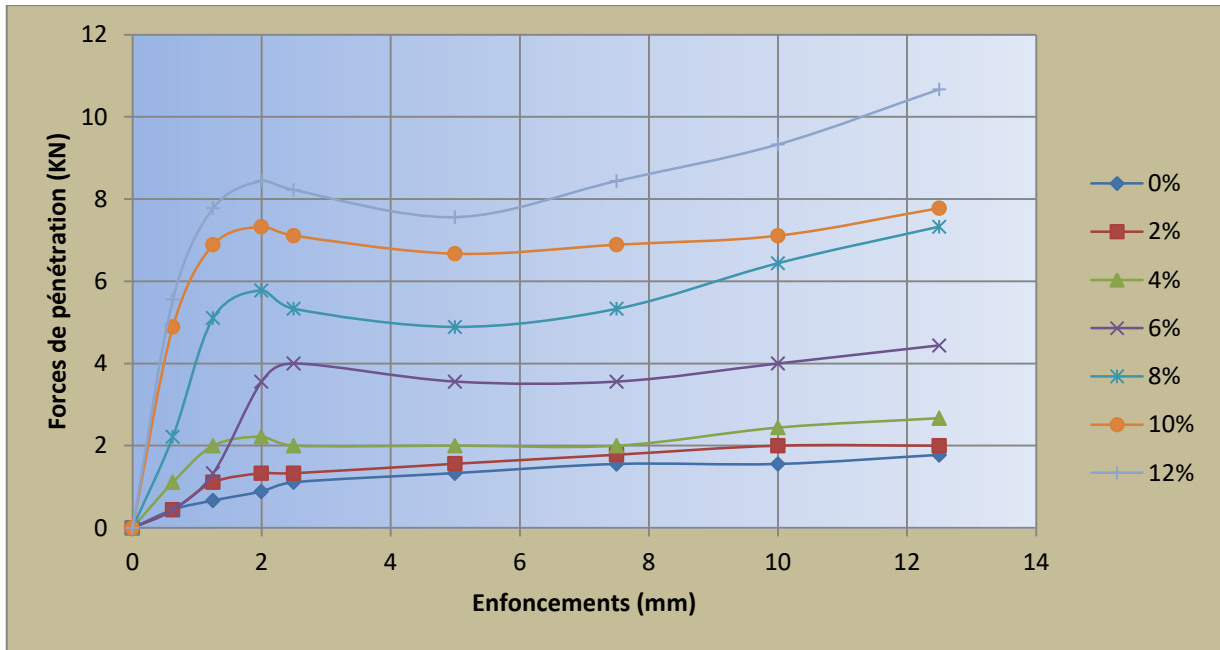


Figure II-31 : Courbes des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment (après imbibition).

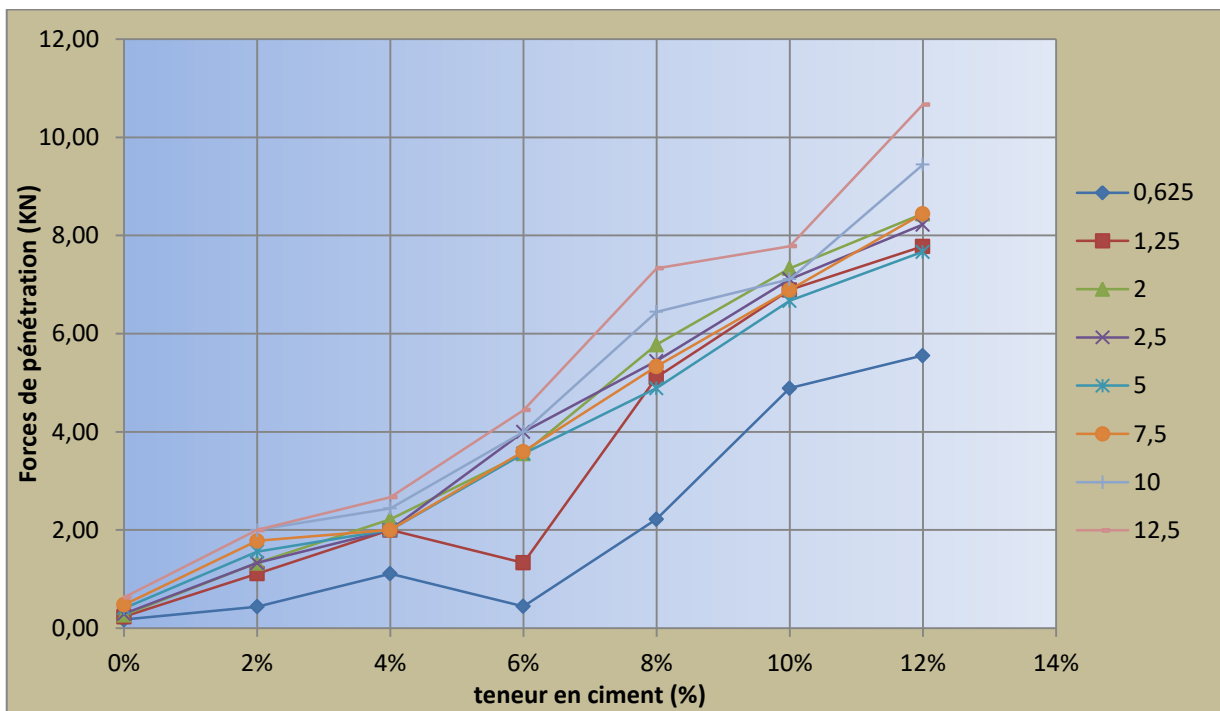


Figure II-32 : courbes des forces en fonction des teneurs en ciment de chaque enfoncement (après imbibition).

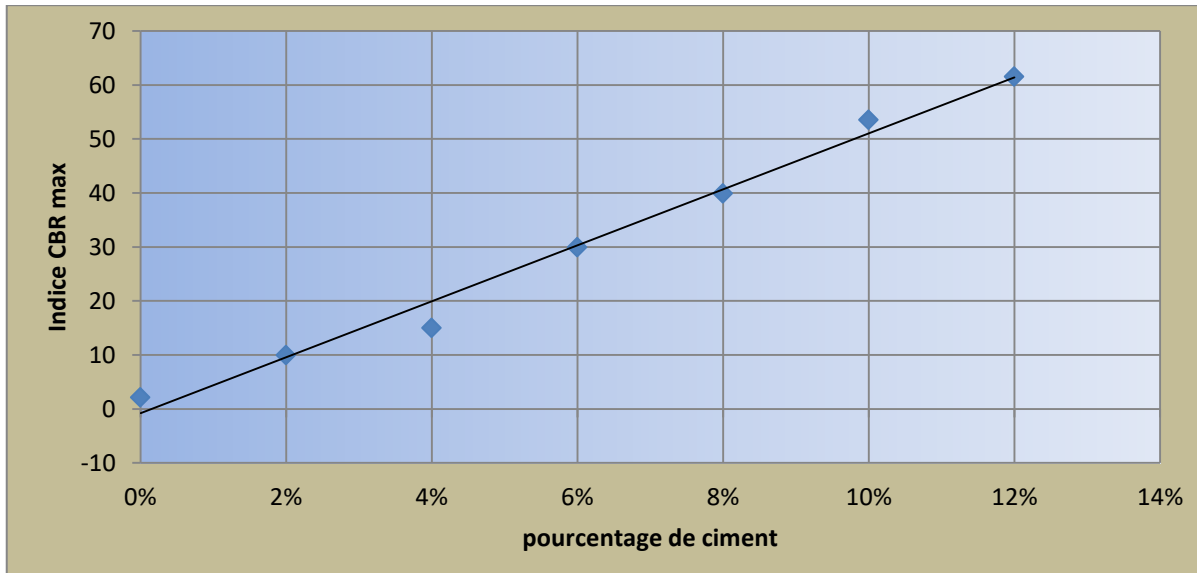


Figure II-33: Indices C.B.R. après imbibition en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

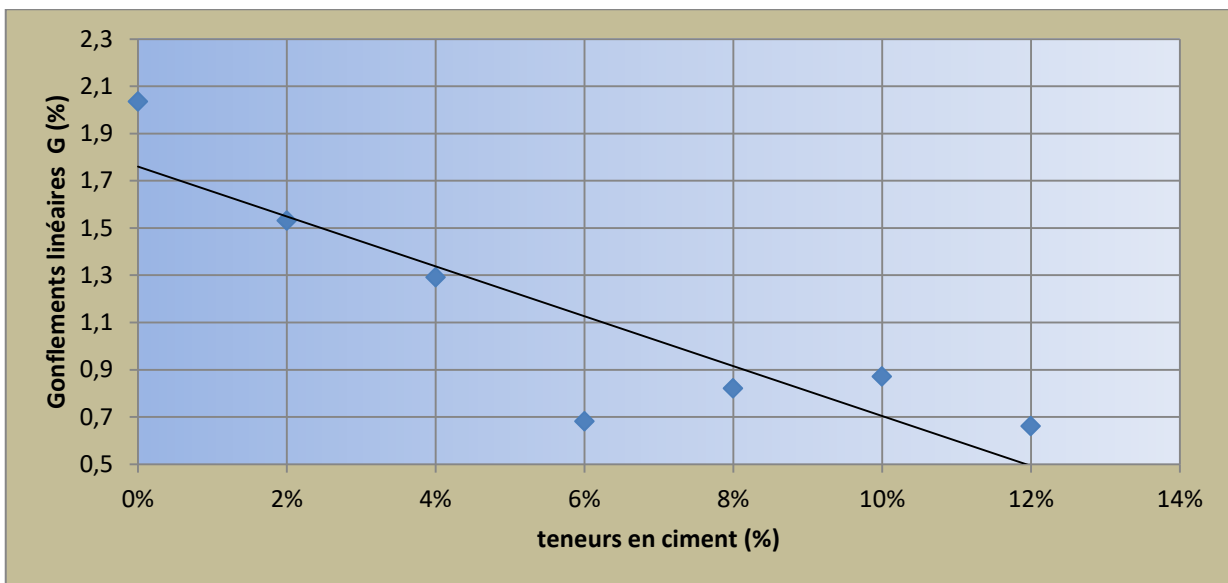


Figure II-34 : Gonflement linéaires en fonction des teneurs en ciment et leur droite moyenne.

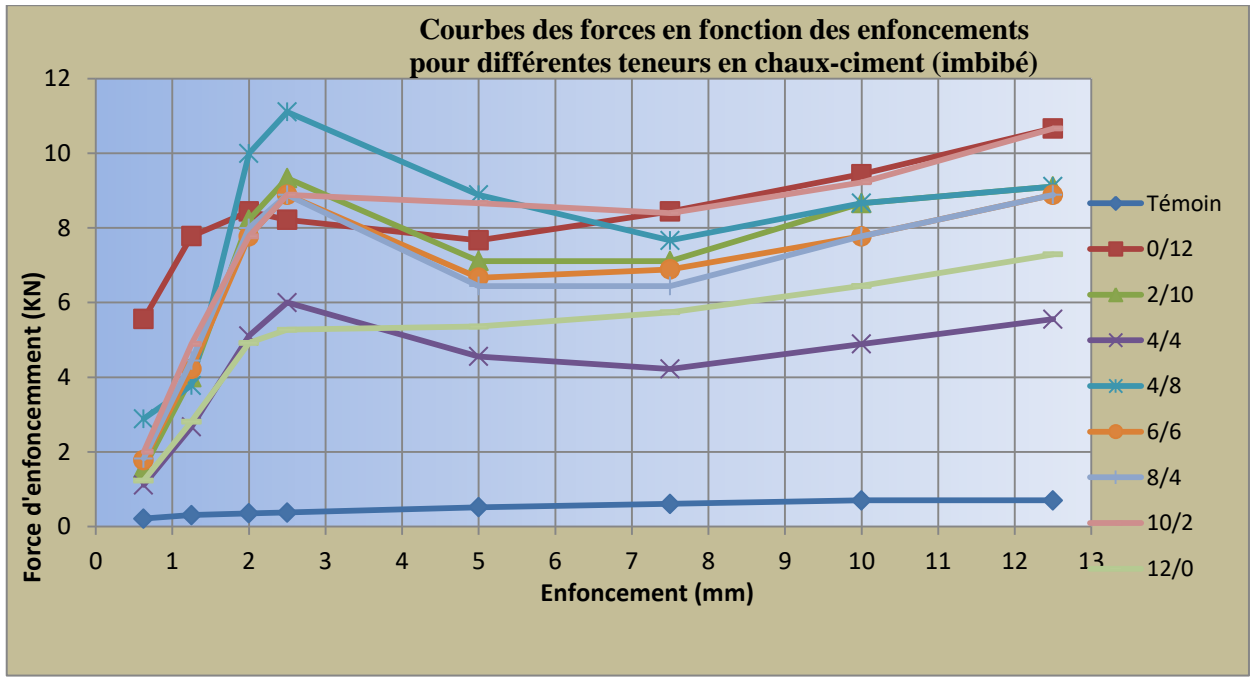


Figure II-35: Courbes des forces en fonction des enfoncements pour différents teneurs en chaux-ciment (après imbibition).

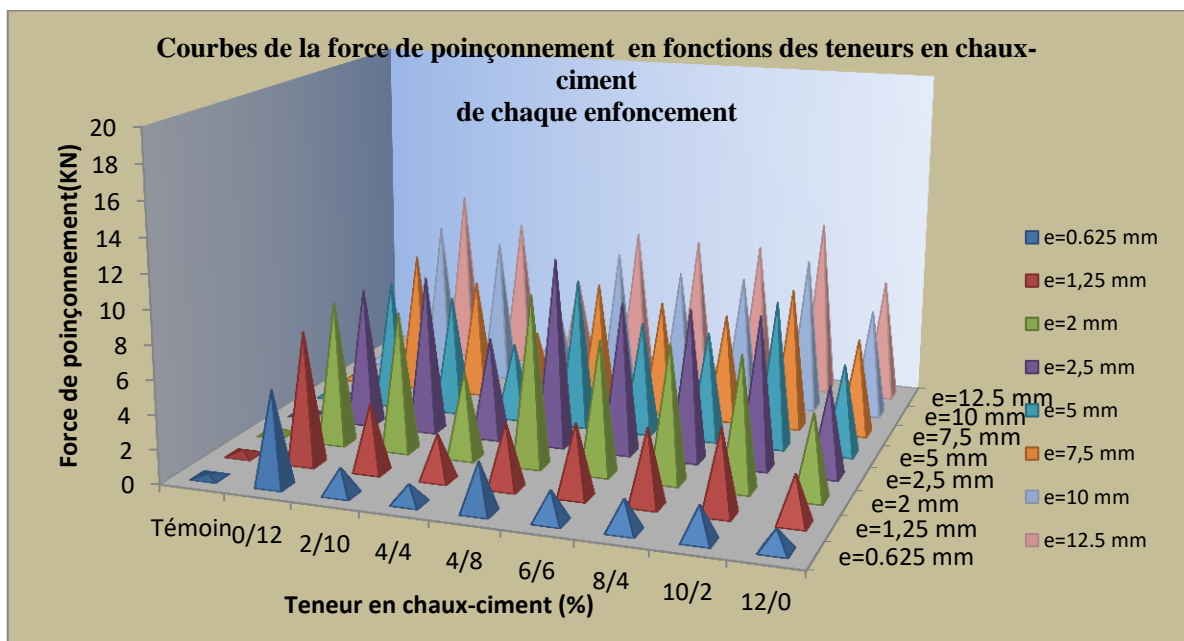


Figure II-36: Histogrammes des forces en fonction des teneurs en chaux-ciment de chaque enfoncement.

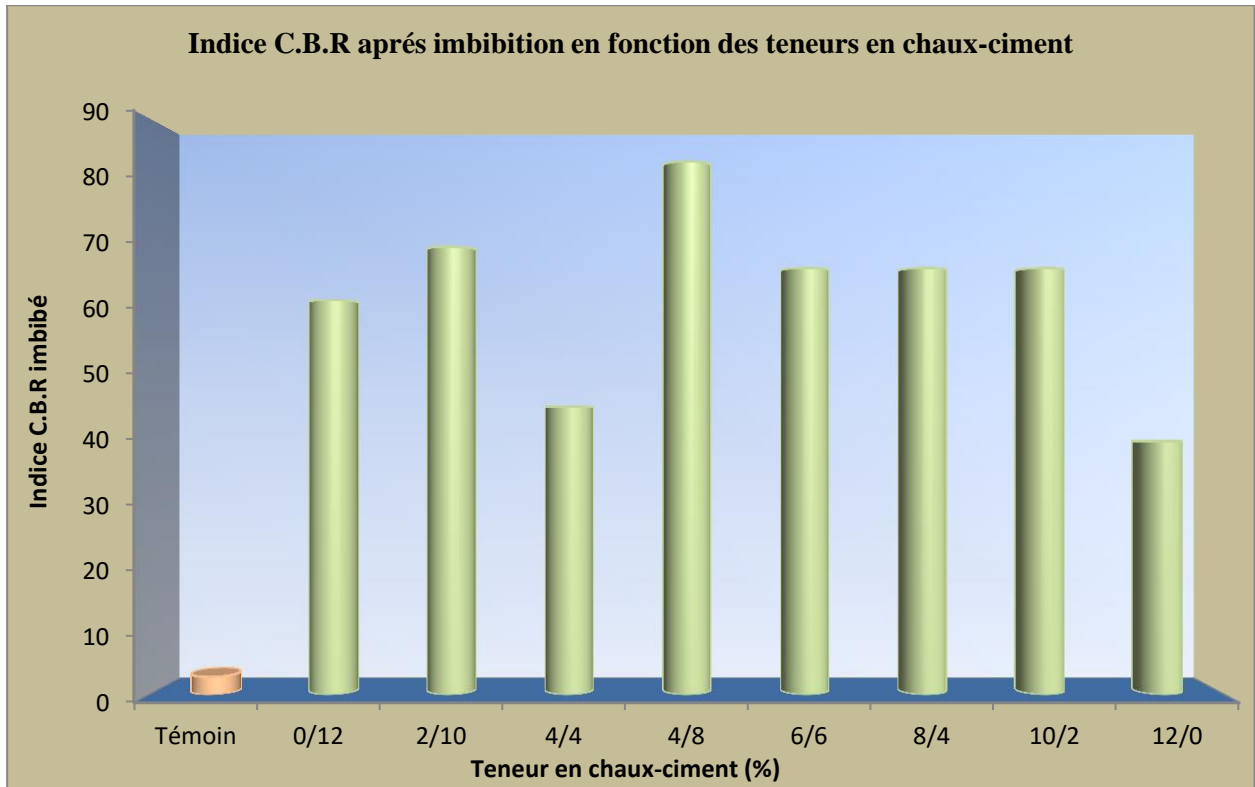


Figure II-37 : Histogrammes des indices CBR après immersion en fonction des teneurs en chaux-ciment

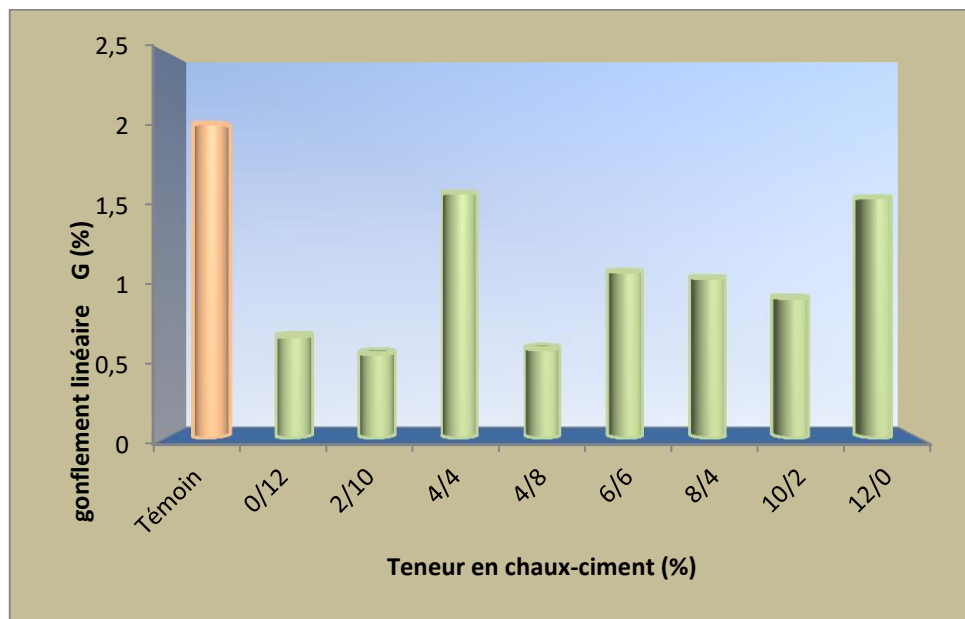


Figure II-38: Histogramme de gonflement linéaire en fonction des teneurs en chaux-ciment.

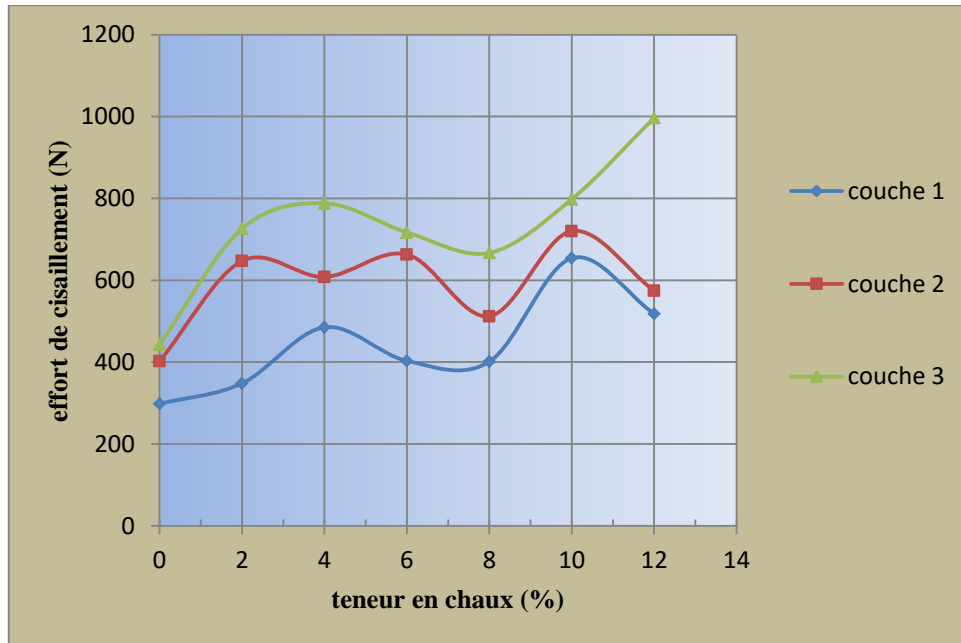


Figure II-39 : Effort de cisaillement maximal de différentes couches pour différentes teneurs en chaux.

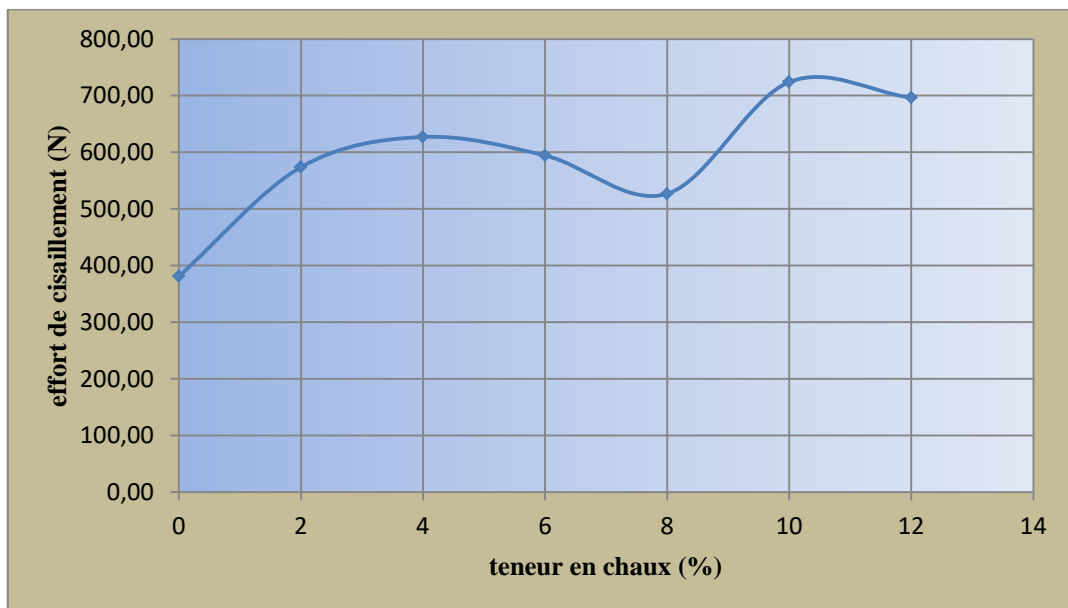


Figure II-40 : Effort de cisaillement moyen pour différentes teneurs en chaux

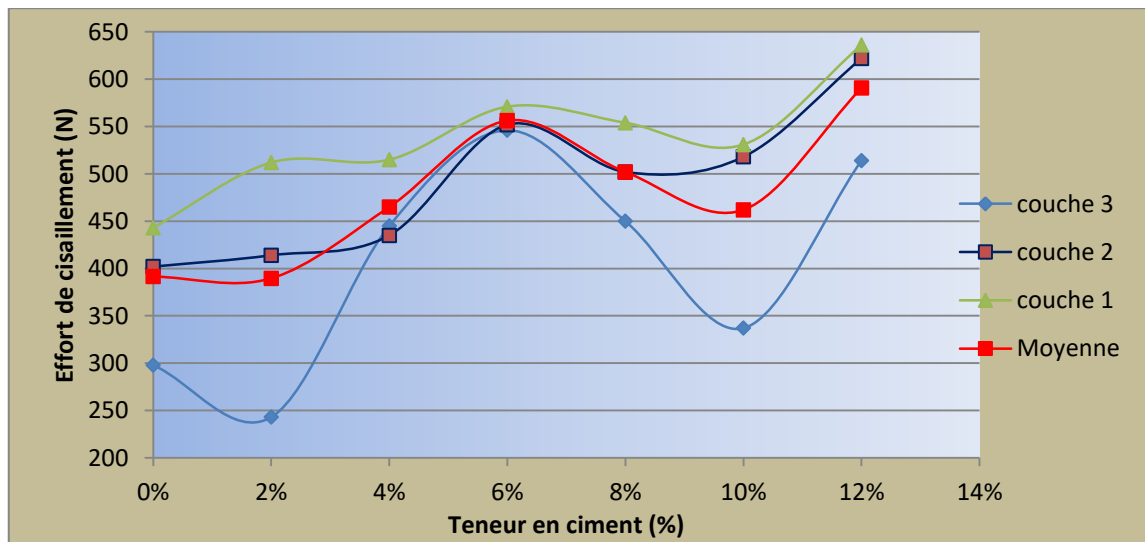


Figure II-41 : Effort de cisaillement en fonction des teneurs en ciment.

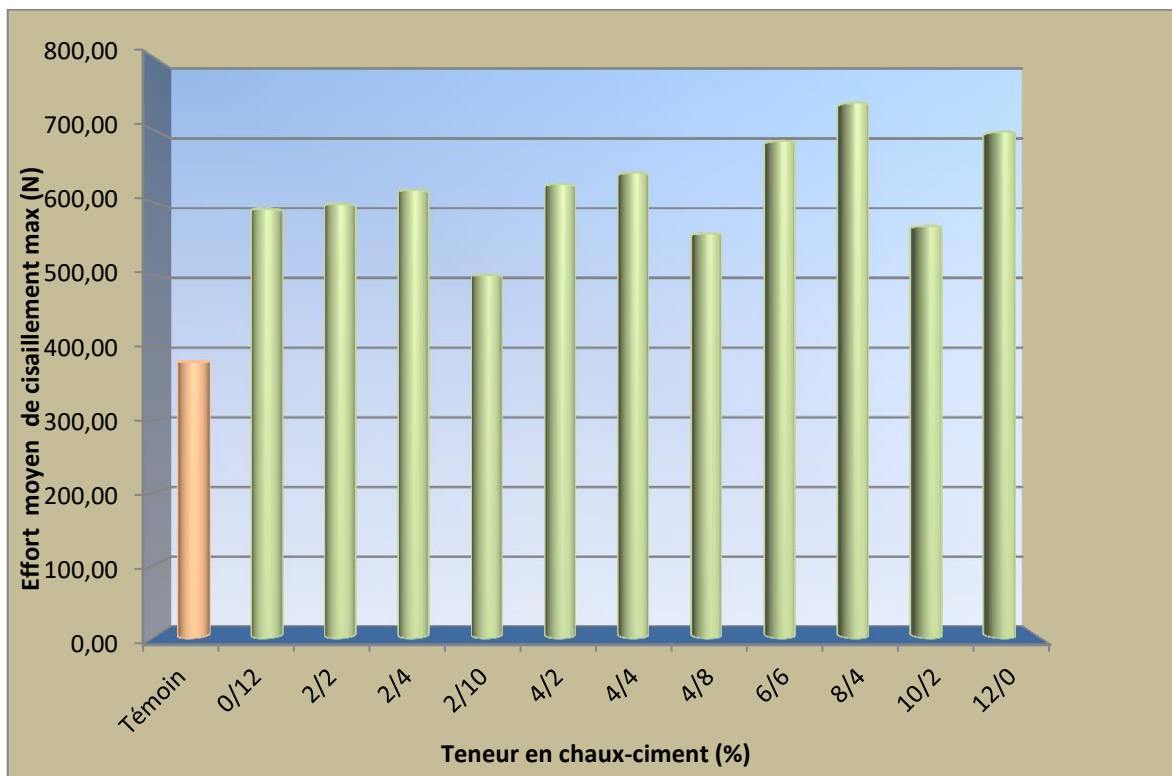


Figure II-42: Effort de cisaillement moyen pour différentes teneurs en chaux-ciment.

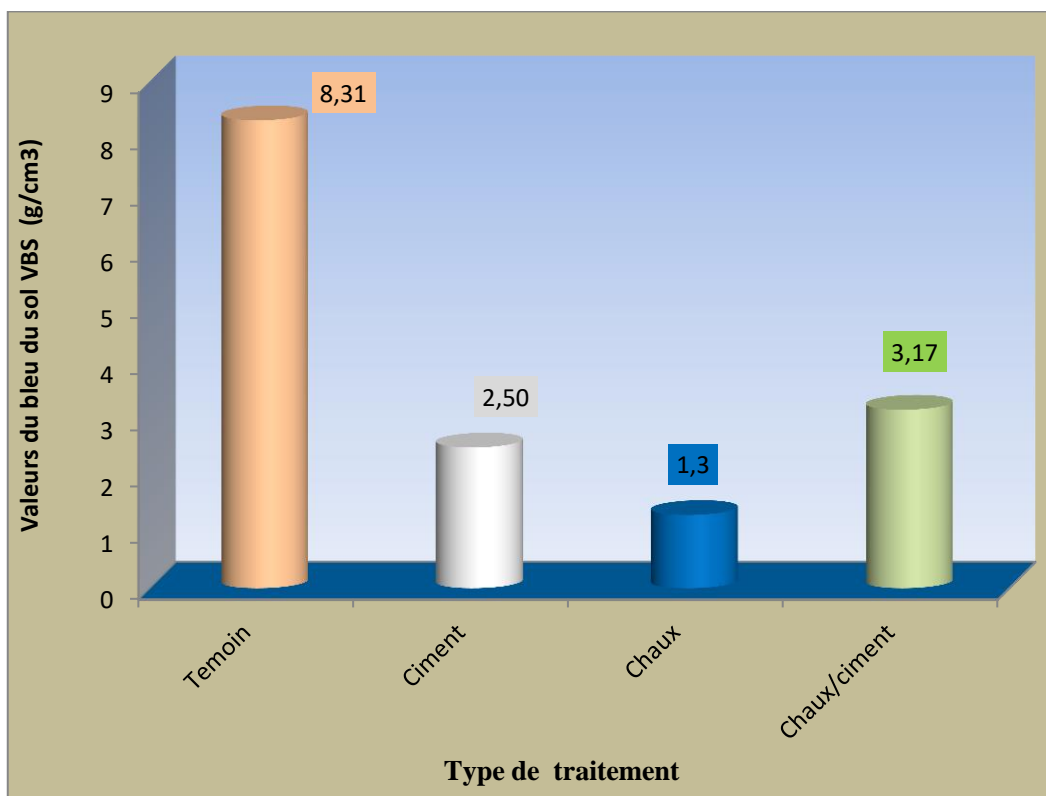


Figure III-1 : Variation des valeurs du VBS en fonction de type de traitement utilisé

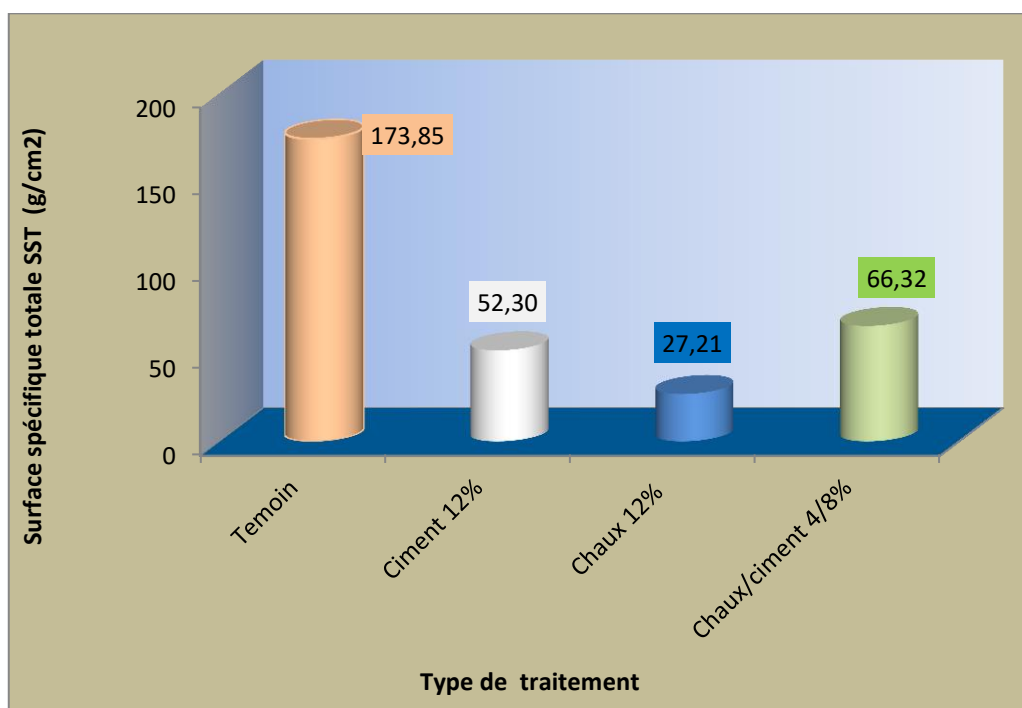


Figure III-2 : Variation SST en fonction de type de traitement utilisé

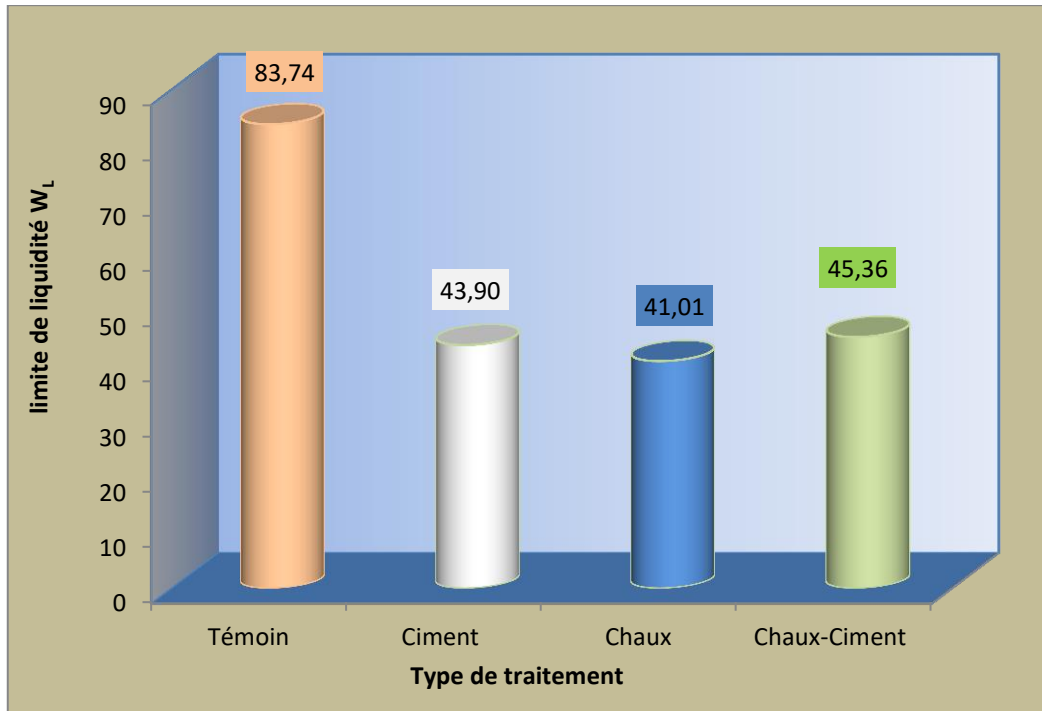


Figure III-3 : Variation des limites de liquidité en fonction de type de traitement utilisé

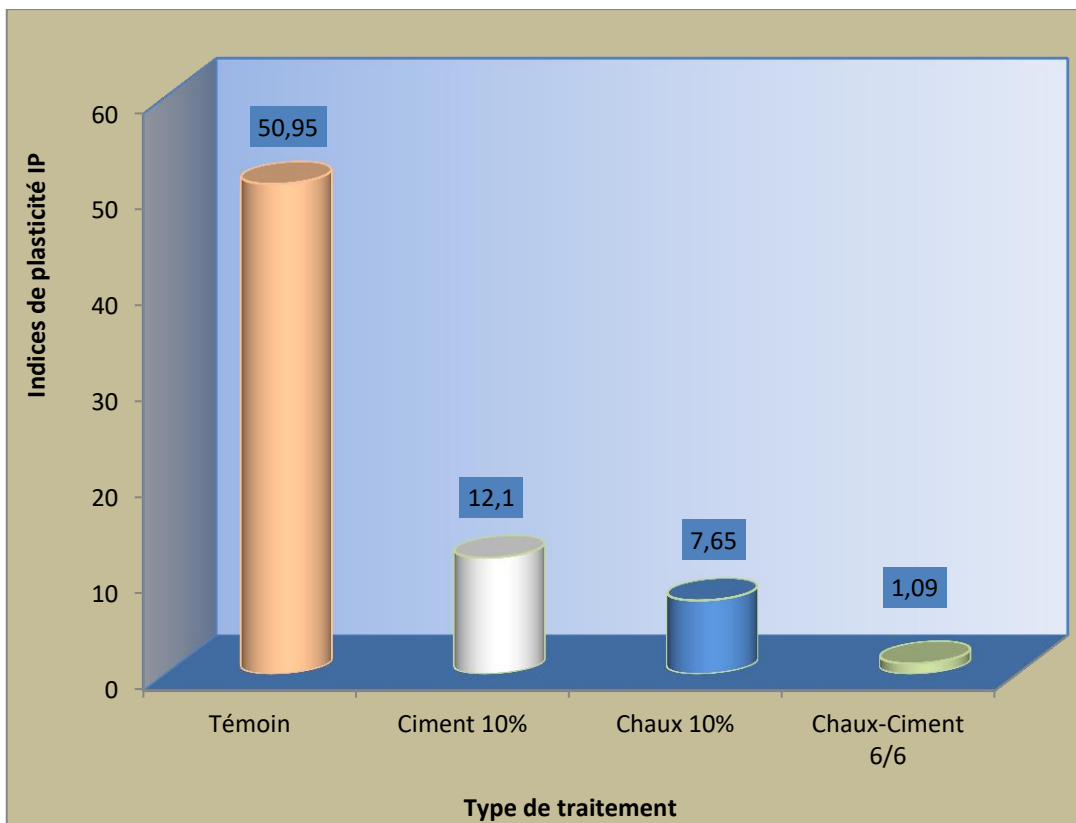


Figure III-4 : Variation des indices de plasticité en fonction de type de traitement utilisé

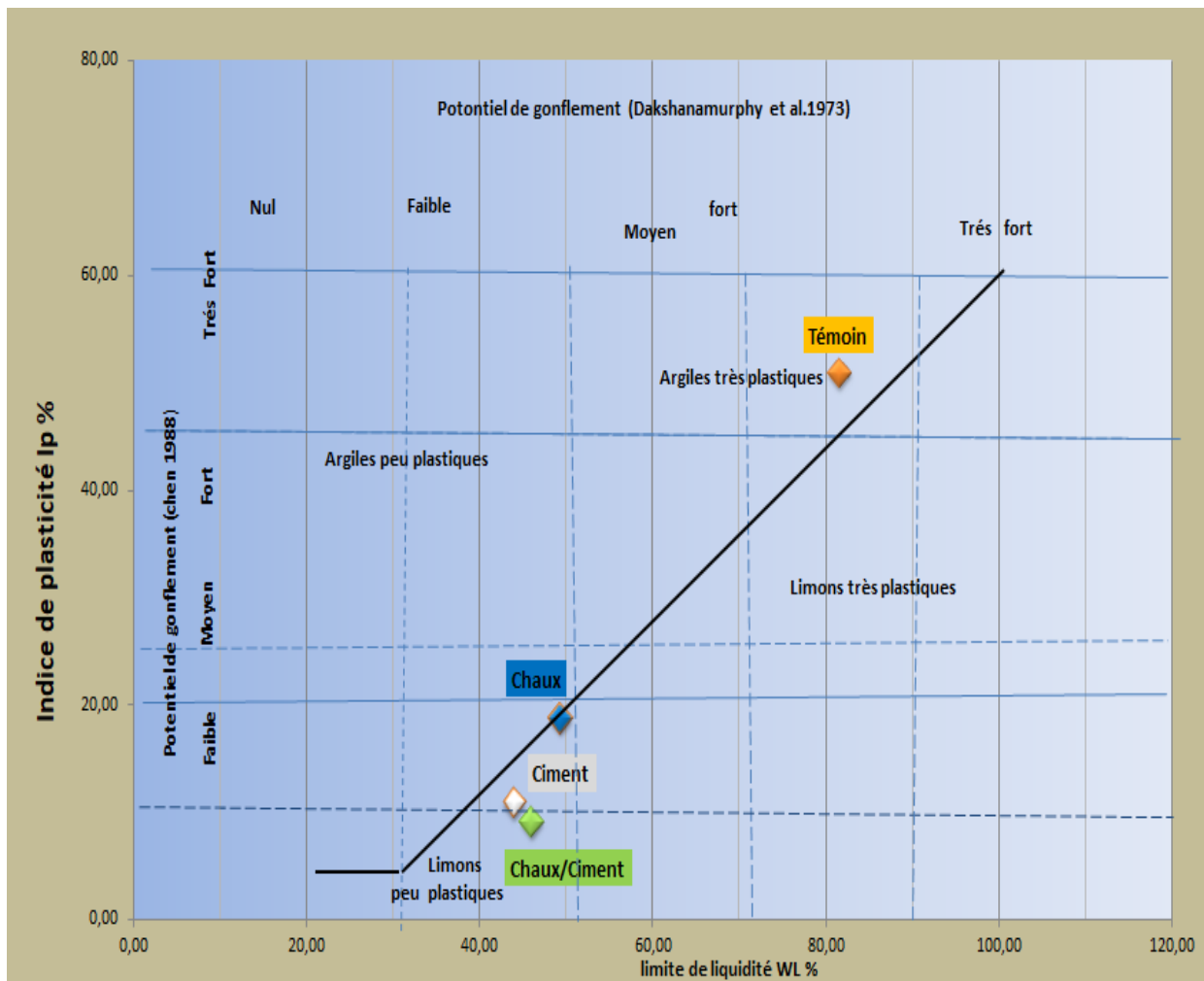
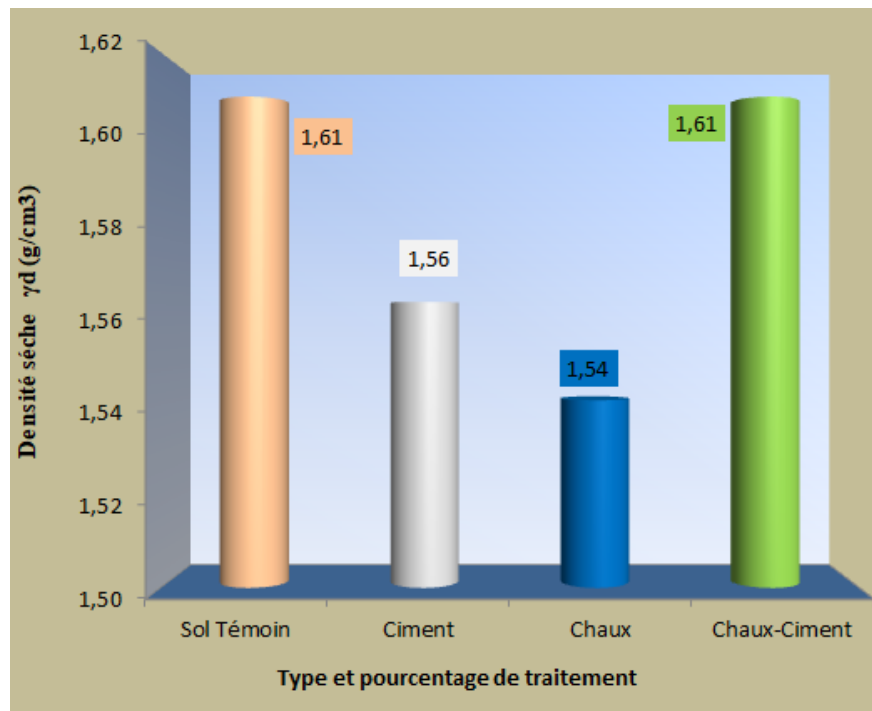


Figure III-5 : Abaque de Casagrande adaptée aux sols gonflants Dakshanamurphy et al. (1973) et Chen (1988)



La Figure III-6 : Histogramme de comparaison de la densité sèche

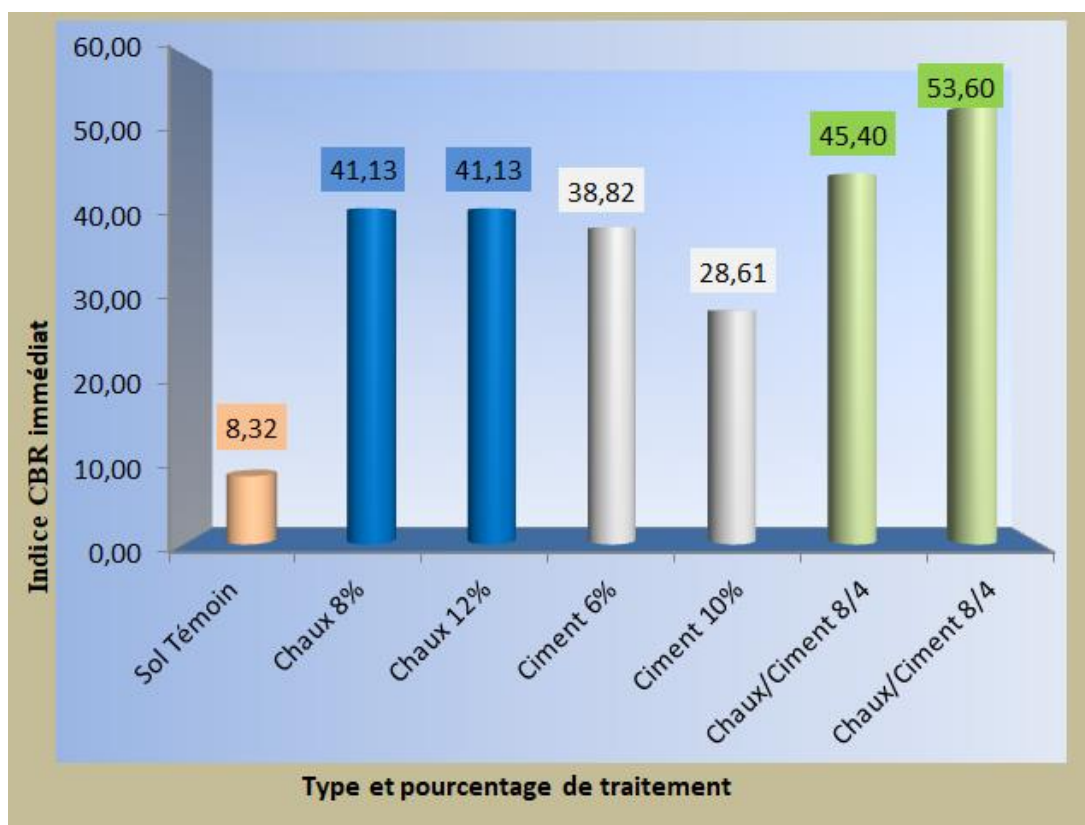


Figure III-7: Histogramme de comparaison de l'indice de CBR immédiat



Figure III-8 : Histogramme de comparaison de l'indice de CBR après imbibition

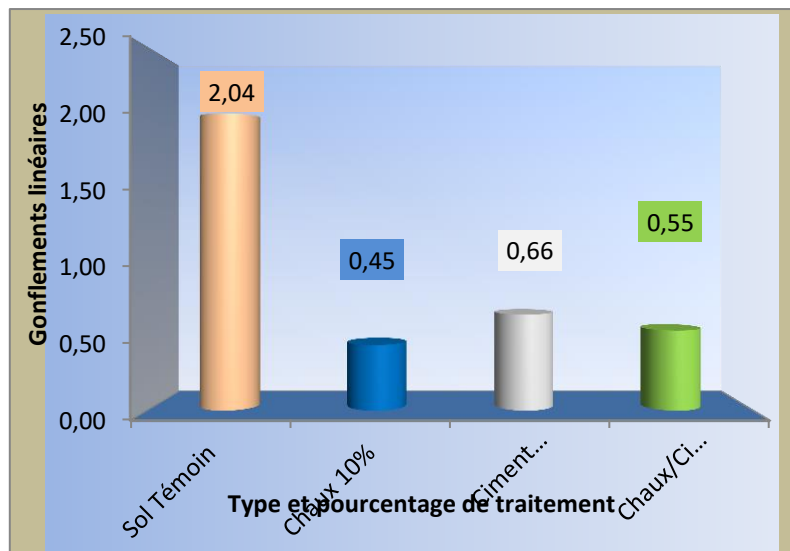


Figure III-9 : Histogramme de comparaison du gonflement linéaire

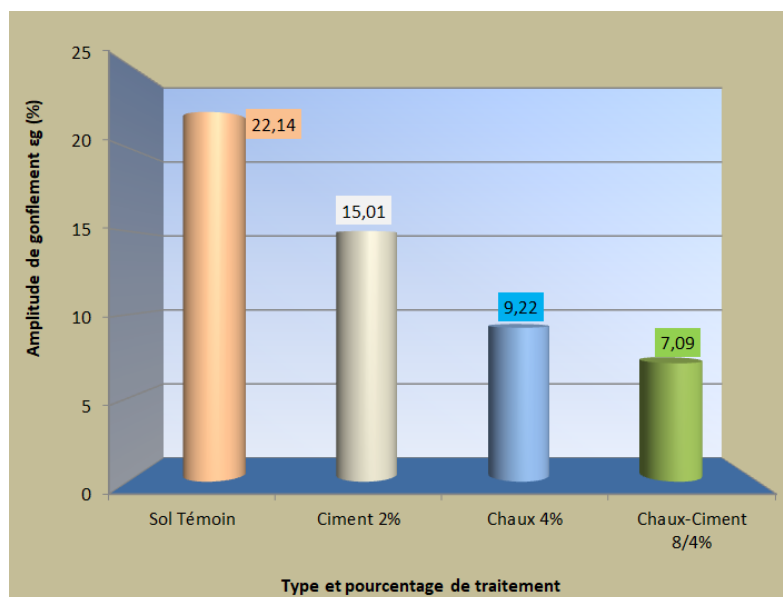


Figure III-10 : Histogramme de de l'amplitude de gonflement libre

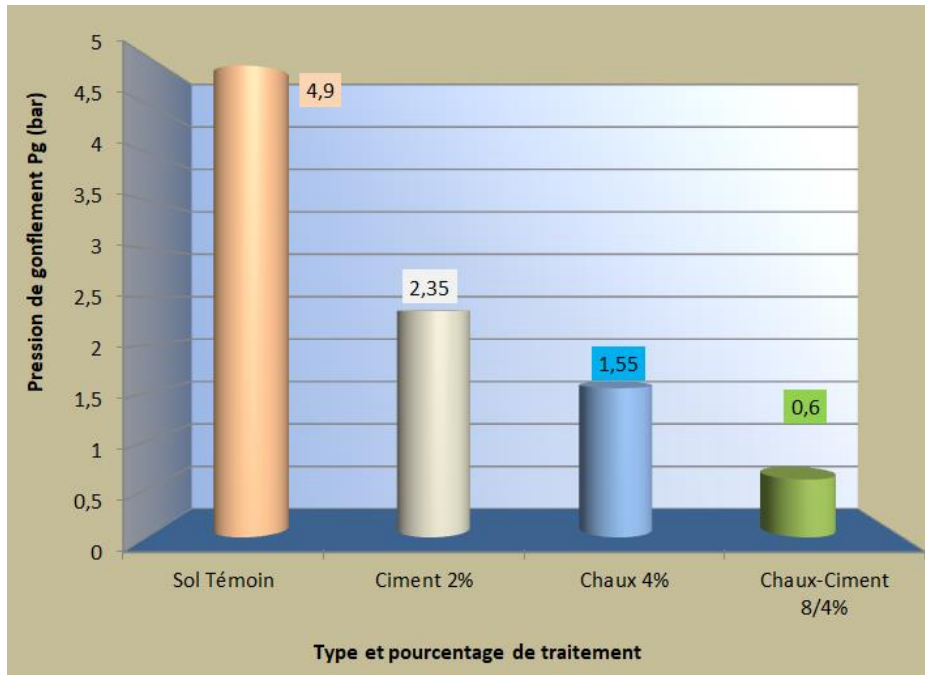


Figure III-11 : Histogramme de la pression de gonflement libre.

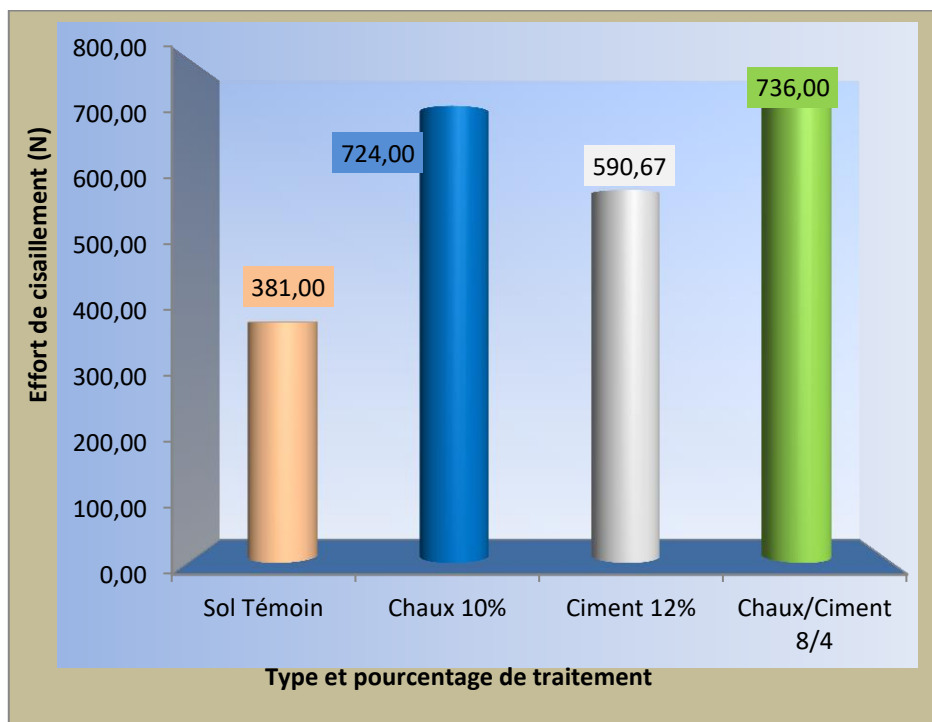


Figure III-12: Histogramme de comparaison des efforts de cisaillement

Tableau II-1 : Détermination de la teneur en eau et de la masse volumique sèche et humide.

Désignation	Moule 1	Moule 2
Masse du moule (g) : m_1	265,66	661,64
Masse humide totale (g) : m_2	469,46	1 145,61
Masse sèche totale (g) : m_3	445,28	1 089,14
Volume du moule (cm ³) : V	100,00	200,00
Masse de l'eau (g) : $m_w = m_2 - m_3$	24,18	56,47
Masse du sol humide (g): $m_h = m_2 - m_1$	203,80	483,97
Masse du sol sec (g): $m_d = m_3 - m_1$	179,62	427,50
Teneur en eau (%) : $W_n = (m_w/m_d) \times 100$	13,46	13,21
La moyenne (%) : W_{nat}	13,34	
Masse volumique humide (g/cm ³) : $\gamma_h = m_h/V$	2,04	2,42
La moyenne: γ_h (g/cm ³)	2,23	
Masse volumique sèche (g/cm ³): $\gamma_d = m_d/V$	1,80	2,14
La moyenne: γ_d (g/cm ³)	1,97	

Tableau II.2 : Résultats des essais analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Tamisas (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy
5	97,74	97,81	99,06	98,2
2	95,01	95,59	95,98	95,53
1	92,45	92,98	94,54	93,33
0,4	87,44	87,59	90,21	88,41
0,1	80,99	81,7	87,14	83,28
0,08	80,39	64,6	81,85	75,61
0,066	79,12	63,57	74,75	72,48
0,047	78,16	62,8	73,12	71,36
0,034	76,57	61,52	71,5	69,86
0,02	74,97	60,24	70,2	68,47
0,015	71,78	57,68	68,9	66,12
0,011	66,68	53,58	66,62	62,29
0,008	60,62	48,71	65	58,11
0,006	52	41,78	61,75	51,85
0,003	28,71	23,07	39	30,26
0,001	22,33	17,94	22,75	21,01

Tableau II-3: La moyenne des tamisats à 0.080mm et à 0.002 mm des trois essais de sédimentométrie.

Tamis (mm)	Tamisat (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
0,080	80,35	80,39	81,85	80,86
0,002	25,52	25,53	30,87	27,31

Tableau II-4: Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg.

Essai N°	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	$I_c = (W_L - W_{nat}) / I_p$	$A_c = I_p / C_2$	$A_{cor} = I_p / (C_2 - 10)$
1	81,46	30,61	50,85	1,34	1,86	2,94
2	83,07	31,19	51,88	1,34	1,90	3,00
3	86,68	36,57	50,11	1,46	1,83	2,89
La Moyenne	83,74	32,79	50,95	1,38	1,87	2,94

Tableau II-5: Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche.

	Masse du sol (g)	Volumé de la solution (cm ³)	VBS (g/cm ³)	SST (m2/g)
Essai 1	30	230	7,67	160,46
Essai 2	30	225	7,50	156,98
Essai 3	30	222	7,40	154,88
Essai 4	30	280	9,33	195,35
Essai 5	30	293	9,77	204,42
Essai 6	30	245	8,17	170,93
La moyenne	30	249,17	8,31	173,84

Tableau II-6 : Caractéristiques d'identification du sol témoin étudié.

Profondeur	1,4-1,60	1,5
Paramètres	Plages de variation	Moyenne
Teneur en eau naturel W_{nat} (%)	13,462 – 13,209	13,34
Poids volumique humide γ_h (g/cm ³)	2,038 – 2,420	2,23
Poids volumique sec γ_d (g/cm ³)	1,796 – 2,138	1,97
Limite de liquidité W_L (%)	81,46 – 86,68	83,73
Limite de plasticité W_P (%)	30,61 – 36,57	32,79
Indice de plasticité I_p (%)	50,11 – 51,88	50,95
Valeur de bleu de méthylène VBS (%)	7,40 – 9,77	8,31
Surface spécifique totale (m ² /g)	154.88-204.42	173.84
Passants à 2 mm (%)	95,01 – 95,98	95,52
Passants à 80 μ m (%)	80,35 – 81,85	80,86
Passants à 2 μ m (%)	25,52 – 30,87	27,31
Indice de consistance I_c (%)	1,34 – 1,46	1,38
Activité de la fraction argileuse (A_c)	1,83-1,90	1,87

Tableau II-7: Résumé des résultats des essais Proctor normal.

	W_{opn} (%)	γ_d (g/cm ³)
Essai 01	19,2	1,61
Essai 02	19,5	1,61
Essai 03	19,6	1,59
Moyenne	19,43	1,60

Tableau II-8 : Résultats des essais du C.B.R immediate

Enfoncements (mm)	Pressions (kg/cm ²)		Coefficient de l'anneau K=0.0222			
	Essai 1	Essai 2	Pressions moyenne (kg/cm ²)	Indice C.B.R immédiat à 2,5 mm	Indice C.B.R immédiat à 5 mm	Indice C.B.R immédiat max
0,625	44,40	44,40	44,40	8,32	6,69	8,32
1,250	66,60	66,60	66,60			
2,000	88,80	88,80	88,80			
2,500	111,00	111,00	111,00			
5,000	133,20	133,20	133,20			
7,500	144,30	155,40	149,85			
10,000	155,40	155,40	155,40			
12,500	155,40	177,60	166,50			

Tableau II-9 : Résultats des essais du C.B.R après imbibition

		Coefficient de l'anneau K	0,02331			
Temps	Enfoncements (mm)	Lecture (μm)	Force de poinçonnement (KN)	Indice C.B.R imbibé à 2,5 mm	Indice C.B.R imbibé à 5 mm	Indice C.B.R max
30"	0,625	9,000	0,21	2,79	2,57	2,79
1'	1,250	13,000	0,30			
1'40"	2,000	15,000	0,35			
2'	2,500	16,000	0,37			
4'	5,000	22,000	0,51			
6'	7,500	26,000	0,61			
8'	10,000	30,000	0,70			
10'	12,500	30,000	0,70			

Tableau II-10: Moyennes de l'indice C.B.R. immédiat, imbibé et gonflement linéaire du sol témoin

	Indice C.B.R immédiat	Indice C.B.R imbibé	Gonflement g (%)
Eprouvette 01	8,32	2,79	2,06
Eprouvette 02	8,32	2,79	2,01
Moyenne	8,32	2,79	2,04

Tableau II-11: Résultats des essais de gonflement libre de deux échantillons remaniés.

	Profondeur	γ_h (g/cm ³)	W (%)	γ_d (g/cm ³)	e_0	e_f	ε_g (%) = $(e_f - e_0)/e_0$	Pg (bar)
Echantillon 1	1,50	1,62	29,12	1,25	1,16	1,43	22,84	6,00
Echantillon 2		1,58	24,04	1,27	1,07	1,30	21,44	3,80
Moyenne		1,60	26,58	1,26	1,12	1,36	22,14	4,90

Tableau II-12: Résultats de l'essai de cisaillement.

Couche Supérieure		Couche intermédiaire		Couche inférieure	
Déplacement horizontal (mm)	Effort de cisaillement (N)	Déplacement horizontal (mm)	Effort de cisaillement (N)	Déplacement horizontal (mm)	Effort de cisaillement (N)
0.432	127	0.405	72	0.405	86
0.863	175	0.860	146	0.886	178
1.339	207	1.293	207	1.315	249
1.860	237	1.782	259	1.797	296
2.353	255	2.291	298	2.318	338
2.828	266	2.782	325	2.809	365
3.319	277	3.264	342	3.293	386
3.854	284	3.755	361	3.784	406
4.362	292	4.279	383	4.311	426
4.847	298	4.772	402	4.805	443

Tableau II-13 : Récapitulatif des résultats moyennes de cisaillement par couche.

	Couche supérieure	Couche intermédiaire	Couche inférieure	La Moyenne
Déplacement horizontal max (mm)	4.85	4.77	4.81	4,80
Force de cisaillement max (N)	298	402	443	381

Tableau II-14 : Comparaison des potentiels de gonflement déterminés par différentes méthodes.

Classification	Potentiel de gonflement	Potentiel de retrait
Seed et al (1962)	Elevé à très élevé	
Snerthen	Très élevé	
BRE (1980)		Très élevé
Chen(1988)	Elevé à très élevé	
Bigot et Zerhouni (2000)	Fort	
Williams et Donaldson (1980)	Fort	
Dakshanamurphy et al (1973)	Fort	

Tableau II-15 : Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en chaux

<i>Teneur en chaux (%)</i>	<i>W_L (%)</i>	<i>W_p (%)</i>	<i>I_p (%)</i>
Témoin	83,74	32,79	50,95
2%	49.12	35.78	13.34
4%	43.47	34.87	9.07
6%	41.55	30.87	10.67
8%	45.04	33.34	11.70
10%	41.01	33.36	7.64
12%	43.26	30.26	13.00
La Moyenne	43.90	33.08	10.90

Tableau II-16: Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en en ciment.

<i>Teneur en ciment(%)</i>	<i>W_L (%)</i>	<i>W_p (%)</i>	<i>I_p (%)</i>
Témoin	83,74	32,79	50,95
2%	60.94	26.46	34,49
4%	52,06	29,85	22,20
6%	48,94	32,38	16,56
8%	43,66	28,85	14,81
10%	43,85	31,80	12,05
12%	46,08	33,97	12,11
La Moyenne	49.25	30.55	18.70

Tableaux II-17 : Récapitulatif des paramètres de consistances des différents teneurs en chaux-ciment.

Teneur en ciment (%)	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)
Témoin	83,74	32,79	50,95
2/2	48,84	38,60	10,24
2/4	44,52	33,40	11,11
2/10	46,11	36,23	9,88
4/2	47,70	37,52	10,18
4/4	48,90	36,06	12,84
4/8	44,99	35,13	9,86
6/6	45,36	44,27	1,09
8/4	44,80	34,92	9,88
10/2	43,84	33,99	9,84
La Moyenne	45,95	36,87	9,08

Tableau II-18: Résultats de VBS et SST en fonction de teneur en chaux.

<i>Teneur en chaux</i>	<i>2%</i>	<i>4%</i>	<i>6%</i>	<i>8%</i>	<i>10%</i>	<i>12%</i>
<i>Valeur du bleu (VBS) cm³/g</i>	4.67	4.00	3.33	2.80	2.16	<i>1.30</i>
<i>Surface spécifique totale (SST) m²/g</i>	97.67	83.72	69.70	58.60	45.21	<i>27.21</i>

Tableau II-19: Résultats de VBS et SST en fonction de teneur en ciment

<i>Teneur en chaux</i>	<i>Témoin</i>	<i>2%</i>	<i>4%</i>	<i>6%</i>	<i>8%</i>	<i>10%</i>	<i>12%</i>
<i>Valeur du bleu (VBS) cm³/g</i>	8,31	5,07	4,57	4	3,77	3,47	<i>2,5</i>
<i>Surface spécifique totale (SST) m²/g</i>	173,9	106	95,6	83,7	78,8	72,6	<i>52,3</i>

Tableau II-20: Résultats de VBS en fonction de teneur en ciment à différentes teneurs en chaux-ciment

<i>Chaux/ciment</i>	<i>VBS (g/cm³)</i>	<i>Surface spécifique totale STT (g/cm²)</i>
<i>Témoin</i>	8,31	173,85
<i>0/12</i>	2,50	52,30
<i>2/0</i>	4,67	97,70
<i>2/2</i>	5,66	118,41
<i>2/4</i>	6,66	139,33
<i>2/10</i>	4,50	94,14
<i>4/0</i>	4,00	83,68
<i>4/2</i>	6,33	132,42
<i>4/4</i>	4,16	87,03
<i>4/8</i>	<i>3,17</i>	<i>66,32</i>
<i>6/0</i>	3,33	69,66
<i>6/6</i>	7,00	146,44
<i>8/0</i>	2,80	58,58
<i>8/4</i>	4,50	94,14
<i>10/0</i>	2,16	45,19
<i>10/2</i>	5,00	104,60
<i>12/0</i>	1,30	27,20

Tableau II-21 : Récapitulation des essais Proctor normal à différentes teneur en chaux

Teneur en chaux	Densité sèche (g/cm ²)					
	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Essai 01	1,533	1,527	1,497	1,491	1,485	1,51
Essai 2	1,555	1,528	1,514	1,518	1,519	1,507
Essai3	1,538	1,538	1,516	1,529	1,503	1,5
La moyenne	1,542	1,531	1,509	1,513	1,503	1,506

Tableau II-22 : Récapitulation des essais Proctor normal à différents teneurs en ciment.

Teneur en ciment (%)	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Essai 1	1,49	1,54	1,6	1,57	1,55	1,49
Essai 2	1,45	1,57	1,6	1,59	1,56	1,45
Essai 3	1,56	1,6	1,61	1,59	1,53	1,56
moyenne	1,50	1,57	1,60	1,58	1,55	1,50

Tableau II-23 : Résumé des résultats de la densité sèche pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Teneur en chaux/ciment (%)	Densité sèche (g/Cm ²)										
	Témoin	0/12	2/10	4/8	6/6	8/4	10/2	2/2	2/4	4/2	12/0
Essai 1	-	-	1,59	1,60	1,60	1,59	1,60	-	-	-	-
Essai 2	-	-	1,55	1,60	1,59	1,60	1,60	-	-	-	-
Essai 3	-	-	1,60	1,60	1,61	1,60	1,58	-	-	-	-
Essai 4	-	-	-	-	-	-	-	1,60	1,60	1,52	-
Moyenne	1,60	1,55	1,58	1,60	1,60	1,59	1,59	1,60	1,60	1,52	1,51

Tableau II-24: Résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux

Teneur en chaux		Effort de pénétration (KN)					
enfoncement (mm)	Temps	2%	4%	6%	8%	10%	12%
0,625	30"	1,233	0,700	1,055	1,144	1,144	0.583
1,25	1'	1,643	1,410	2,285	2,635	2,458	1.321
2	1'40"	1,993	2,635	3,510	4,570	4,337	3.393
2,5	2'	2,198	3,277	3,776	5,358	5,008	4.337
5	4'	2,548	4,453	5,095	8,197	7,380	8.197
7,5	6'	2,460	4,570	5,445	9,490	7,643	9.920
10	8'	2,460	4,337	5,095	10,240	7,555	10.160
12,5	10'	2,460	4,337	4,920	11,323	7,468	9.607

Tableau II-25 : Résultats des indices C.B.R immédiats pour différents teneurs en chaux.

<i>Teneur en chaux</i>	2%	4%	6%	8%	10%	12%
<i>Indice C.B.R immédiat à 2,5mm</i>	16.46	24.55	28.28	40.13	37.51	32.49
<i>Indice C.B.R immédiat à 5mm</i>	12.78	22.34	25.56	41.13	37.03	41.13
<i>Indice C.B.R immédiatmax</i>	16.46	24.55	28.28	41.13	37.51	41.13

Tableau II-26: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes.

<i>Teneur en ciment</i>		0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
<i>Temps</i>	<i>Enfoncements (mm)</i>	<i>Forces de pénétration</i>						
30"	0,625	0,44	0,77	0,70	0,70	1,41	2,28	0,50
1'	1,25	0,67	1,22	1,41	1,64	2,46	3,68	0,70
1'40"	2	0,89	1,55	1,99	3,27	3,86	4,80	1,23
2'	2,5	1,11	1,77	2,11	3,86	4,22	5,18	1,87
4'	5	1,33	2,2	2,46	5,09	5,85	6,44	3,95
6'	7,5	1,44	2,44	2,54	5,44	6,56	5,62	5,27
8'	10	1,56	2,57	2,54	5,62	6,44	5,18	5,53
10'	12,5	1,56	2,66	4,04	5,27	6,21	4,92	5,09

Tableau II-27: Résultats des indices C.B.R immédiats pour différents teneurs en ciment.

<i>Teneur en ciment</i>	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
<i>Indice C.B.R immédiat à 2,5mm</i>	8,32	13,25	15,8	28,91	21,04	21,87	21,04
<i>Indice C.B.R immédiat à 5mm</i>	6,69	11,03	12,34	25,53	18,46	18,91	18,46
<i>Indice C.B.R. max</i>	8,32	13,26	15,81	28,61	14,06	38,82	19,84

Tableau II-28 : Résultats des forces de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Temps	Enfoncements (mm)	Forces de poinçonnement (KN)								
		Teneur en Chaux/Ciment	0/12	2/10	4/4	4/8	6/6	8/4	10/2	12/0
30"	0,625		5,56	1,56	1,11	2,89	1,78	1,82	2,00	1,233
1'	1,250		7,78	4,00	2,67	3,78	4,22	4,44	4,89	2,81
1'40"	2,000		8,44	8,22	5,11	10,00	7,78	8,00	7,78	4,92
2'	2,500		8,22	9,33	6,00	11,11	8,89	8,89	8,89	5,27
4'	5,000		7,67	7,11	4,56	8,89	6,67	6,44	8,67	5,358
6'	7,500		8,44	7,11	4,22	7,67	6,89	6,44	8,40	5,738
8'	10,000		9,44	8,67	4,89	8,67	7,78	7,78	9,22	6,447
10'	12,500		10,67	9,11	5,56	9,11	8,89	8,89	10,67	7,293

Tableau II-29 : Résultats des indices C.B.R. immédiats pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Indice C.B.R à 2,5 mm	31,95	31,43	32,13	34,92	41,91	41,91	41,91	45,40	53,60
Indice C.B.R à 5 mm	31,46	27,49	31,58	30,99	38,83	32,16	43,04	43,86	50,53
Indice C.B.R max immédiat	31,95	31,43	32,13	34,92	41,91	41,91	43,04	45,40	53,60

Tableau II-30 : Résultats des efforts de pénétration en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux.

		Effort de pénétration (KN)					
Teneur en chaux		2%	4%	6%	8%	10%	12%
enfoncement (mm)	temps						
0,625	30 »	2,198	1,877	2,110	1,643	0,700	1,233
1,25	1'	3,043	3,043	3,688	3,510	2,198	2,810
2	1'40 »	3,277	3,688	4,043	4,687	5,095	4,920
2,5	2'	3,277	3,865	4,043	4,920	5,553	5,270
5	4'	3,160	3,865	3,865	4,687	5,445	5,358
7,5	6'	3,277	3,954	4,043	5,095	5,620	5,738
10	8'	3,510	4,043	4,131	5,270	6,093	6,447
12,5	10'	3,688	4,220	4,337	5,620	6,797	7,293

Tableau II-31 : Résultats des gonflements linéaires pour différents teneurs en chaux.

Teneur en chaux	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Valeur de gonflement G %	0.60	0.68	0.70	0.86	0.45	1.57

Tableau II-32 : Résultats des indices CBR imbibés pour différents teneurs en chaux.

Teneur en chaux	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R imbibé à 2,5mm	24,55	28,95	30.28	36.85	41.60	39.48
Indice C.B.R imbibé à 5mm	15,86	19.39	19.39	23.52	27.32	26.88
Indice C.B.R imbibé max	24.55	28.95	30.28	36.85	41.60	39.48

Tableau II-33: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment.

Pourcentage de ciment		0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Temps	Enfoncements (mm)	Forces de pénétration(KN)						
30"	0,625	0,18	0,44	1,11	0,44	2,22	4,89	5,56
1'	1,25	0,23	1,11	2	1,33	5,11	6,89	7,78
1'40"	2	0,27	1,33	2,22	3,56	5,78	7,33	8,44
2'	2,5	0,29	1,33	2	4,00	5,44	7,11	8,22
4'	5	0,41	1,56	2	3,56	4,89	6,67	7,67
6'	7,5	0,48	1,78	2	3,60	5,33	6,89	8,44
8'	10	0,56	2	2,44	4,00	6,44	7,11	9,44
10'	12,5	0,63	2	2,67	4,44	7,33	7,78	10,67

Tableau II-34 : Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différents teneurs en ciment.

Teneur en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Indice C.B.R. imbibé à 2,5mm	2,19	9,99	15,81	29,96	40,78	53,26	61,58
Indice C.B.R. imbibé à 5mm	2,04	7,80	10,03	17,84	24,53	33,45	38,46
Indice C.B.R. max	2,19	9,99	15,81	29,96	40,78	53,26	61,58

Tableau II.35: Résultats des gonflements linéaires après imbibition pour différentes teneurs en ciment.

Teneur en ciment	2%	4%	6%	8%	10%	12%
le gonflement	1,53	1,29	0,68	0,83	0,87	0,66

Tableau II-36 : Résultats des efforts de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Temps	Enfoncements (mm)	Forces de poinçonnement (KN)								
		Teneur en Chaux/Ciment	0/12	2/10	4/4	4/8	6/6	8/4	10/2	12/0
30"	0,625		5,56	1,554	1,11	2,886	1,776	1,82	1,998	1,233
1'	1,250		7,78	3,996	2,664	3,774	4,218	4,44	4,884	2,81
1'40"	2,000		8,44	8,214	5,106	9,99	7,77	7,992	7,77	4,92
2'	2,500		8,22	9,324	5,994	11,1	8,88	8,88	8,88	5,27
4'	5,000		7,67	7,104	4,551	8,88	6,66	6,438	8,658	5,358
6'	7,500		8,44	7,104	4,218	7,659	6,882	6,438	8,392	5,738
8'	10,000		9,44	8,658	4,884	8,658	7,77	7,77	9,213	6,447
10'	12,500		10,67	9,102	5,55	9,102	8,88	8,88	10,66	7,293

Tableau II-37: Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Teneur en Chaux/Ciment	0/12	2/10	4/4	4/8	6/6	8/4	10/2	12/0
Indice C.B.R à 2,5 mm	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48
Indice C.B.R à 5 mm	38,45	35,61	22,81	44,51	33,38	32,27	43,40	26,86
Indice C.B.R max immédiat	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48

Tableau II-38: Résultats des teneurs en eau après imbibition et les gonflements linéaires pour différentes teneurs en chaux-ciment.

Indice C.B.R à 2,5 mm	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48
Indice C.B.R à 5 mm	38,45	35,61	22,81	44,51	33,38	32,27	43,40	26,86
Indice C.B.R après imbibition	61,57	69,84	44,90	83,15	66,52	66,52	66,52	39,48
Gonflement linéaires G(%)	0,66	0,55	1,59	0,58	1,08	1,04	0,91	1,56

Tableau II-39 : Efforts de cisaillement maximaux pour différents teneurs en chaux.

Teneur en chaux (%)		2	4	6	8	10	12
Effort de cisaillement max(N)	couche 1	348	485	403	401	654	518
	couche 2	647	608,0	663	512	720	574
	couche 3	726	788	717	667	798	997
	moyen	573,67	627,00	594,33	526,67	724,00	696,33

Tableau II-40 : Efforts de cisaillement maximaux pour différents teneurs en ciment.

Teneur en Ciment (%)		2	4	6	8	10	12
Effort de cisaillement max(N)	couche 1	512	515	571	554	531	636
	couche 2	414	435	552	502	518	622
	couche 3	243	445	546	450	337	514
	moyen	389,67	465	556,33	502	462	590,67

Tableau II-41: Résultats des efforts de cisaillement maximaux pour différents teneurs en chaux-ciment.

Teneur en chaux-ciment		2/2	4/2	10/2	2/4	4/4	4/8	6/6	8/4	2/10
Effort de cisaillement max (N)	couche 1	586	596	507	536	615	449	663	454	337
	couche 2	560	623	563	599	651	418	526	769	654
	couche 3	646	630	429	738	654	803	862	985	710
	Moyenne	597,33	616,33	499,67	624,33	640,00	556,67	683,67	736,00	567,00