

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de l'environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

Le Diplôme de Master

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Gestion des changements environnementaux en méditerranée

Par

Khennouf Melissa Rania
Khennouf Rayane

Intitulé

**Amélioration des caractéristiques mécaniques
d'un sol évolutif par l'ajout d'un déchet
industriel (chaux résiduaire)**

Soutenu le : 24/06/2024

Devant le jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Établissement
Mr. Benammar Abdelhafid	MCA	Président	Univ-BBA
Mr. Achour Yacine	Professeur	Encadrant	Univ-BBA
Mr. Ayache Riad	Professeur	Co-encadrant	Univ-BBA
Mr. Belkadi Abderraouf	MCA	Examineur 1	Univ-BBA
Mme. Djebri Nassima	MCB	Examineur 2	Univ-BBA

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous somme reconnaissant envers dieu (الله) le tout-puissant de nous avoir accordé la volonté, la santé et le courage nécessaires pour mener à bien cette tâche.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de notre encadrant **Mr. ACHOUR Yacine** Professeur à l'université de Bordj Bou Arreridj, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire*

*Nous souhaiterons également remercier **Mr. AYACHE Riad** pour son aide précieuse ce qui nous a permis de donnée la chance d'enrichir nos connaissances et sa disponibilité dans ce projet tout au long de cette période.*

*Nous devons aussi remercier spécialement tous les ingénieurs du laboratoire de génie civile surtout monsieur **Zoubir** et mademoiselle **Samra** à leur profonde aide qui nous a permis à la réalisation de nos expériences et sans oublié **3ami Rabeh** d'avoir facilité la réalisation des essais au laboratoire.*

Nous exprimerons également notre gratitude envers nos enseignants de la faculté pour toutes les connaissances qu'ils nous ont transmises.

Comme on souhaite aussi manifester notre reconnaissance a toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont encouragés et aidées à achever ce travail.

Dédicace

A la mémoire de mon père

*A mon très cher père **Radhouane Khennouf**, qui nous a quitté très tôt, chaque succès est teinté de tristesse car tu n'es pas là pour le partager, depuis toujours, tu as été un exemple pour moi d'un père respectueux, honnête et méticuleux. Je souhaite honorer l'homme que tu es.*

Avec toi, mon père, j'ai acquis une compréhension du travail et de la responsabilité. Je souhaite exprimer ma gratitude pour ton affection, ta générosité et ta compréhension... Ton soutien m'a apporté une lueur dans toute ma trajectoire. L'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours ressentis pour toi ne peuvent être exprimés par aucune dédicace. Je me sens très triste parce que tu ne seras pas avec moi ce jour-là et tu ne pourras pas me voir obtenir mon diplôme, mais je suis sûr que tu es fier de ta fille, comme tu l'as toujours été.

Repose en paix mon très cher papa

A ma très chère mère

Peu importe ce que je fais ou que je dis, je ne pourrai pas exprimer ma gratitude à ton égard. Ton amour me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma force pour surmonter les divers défis.

*A mes très chers frères **Rabeh et Ziad***

Pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, qui en plus de m'avoir encouragé tout le long de mes études, m'ont consacré beaucoup de temps et disponibilité, et qui par leur soutien, leurs conseils et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'à ici car ils ont toujours cru en moi, Merci d'avoir toujours soutenu et merci pour tout les bons moments passé ensemble

*A mon âme sœur et ma binôme **Rayane** pour son soutien moral sa patience et sa compréhension*

*A tous les membres de ma famille **Khennouf et Akhrouf***

A mes chères amies

Z.Sofia, B.Fatima, D.Rayane et tous mes camarades de la promo 2019

Melissa Rania

Dédicace

Grâce à la guidance de Dieu Tout-Puissant, qui guide les pas de ma vie, j'ai pu achever cet humble projet que je dédie aux êtres les plus chers de ma vie, ma mère ILHEM et mon père REDA. Leur exemple de courage et de détermination m'a offert tout ce dont j'avais besoin pour concrétiser mes aspirations.

En ces mots simples, je tiens à leur exprimer tout mon amour et mon respect pour le soutien, les encouragements et l'aide qu'ils m'ont offerts. Je leur souhaite une excellente santé et que Dieu les protège. À mes chers frères Adem, Moncef et Mahdi. À ma sœur Maria.

Ainsi qu'à mes précieuses amies (Fatima et Rayane), et en particulier à ma fidèle binôme RANIA, dont la présence et le soutien ont illuminé chaque étape de ce parcours.

Tes encouragements incessants et ta détermination sans faille ont été une source constante d'inspiration. Cette réussite est aussi la tienne. Merci pour ta collaboration et ton amitié indéfectible. .

Rayane

Résumé

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre des projets de traitement des sols en vue d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques à court et à long terme. Ce mémoire a pour principal objectif la double valorisation de deux matériaux distincts : un sol (Marne) et un sous-produit de l'industrie (Chaux Résiduaire, CR).

Une caractérisation des matériaux utilisés était effectuée à la base de l'étude bibliographique ; il s'agit des essais géotechniques physiques et mécaniques standards, en plus des essais chimiques. Cette étude a été réalisée sur un sol provenant d'un site situé à proximité de la ville d'El Hammadia, Bordj Bou Arreridj. La CR est un sous-produit rejeté par l'usine de fabrication d'acétylène (Entreprise Linde Gas) localisé à El Hadjar, wilaya d'Annaba.

Les caractéristiques géotechniques de la marne étudiée, et notamment leur dégradabilité et fragmentabilité, ne permettent pas d'envisager leur emploi en construction routière. D'autre part, la forte teneur en fines de ces matériaux et la présence fréquente de fines argileuses les rend sensibles à l'eau. Pour ces raisons, on a pensé d'améliorer les caractéristiques mécaniques de ces matériaux par traitement à la CR. Cette dernière a été mélangée, dans différentes proportions, avec les sols étudiés pour développer une technique de stabilisation innovante et écologique.

Les résultats montrent que le traitement à la CR donne des résultats significatifs quant à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des marnes étudiés. L'effet de l'eau sur la durabilité de ces matériaux (avant et après traitement) a également été mis en évidence. Nous avons trouvé que les marnes traités à la CR présentent une vulnérabilité moindre à ce facteur. Cette singularité vient confirmer les résultats des essais mécaniques.

Cette étude démontre ainsi le potentiel d'utilisation d'un nouveau matériau (marne-CR) dans le domaine de la construction routière, ouvrant ainsi la voie à des applications innovantes, écologiques et durables dans le secteur des travaux publics.

Mots-Clés : marnes, liants, chaux résiduaire, caractéristiques mécaniques, valorisation.

Abstract

This memo's work is a component of soil treatment initiatives meant to enhance the soil's long- and short-term mechanical properties. This memorandum's primary goal is the twofold recovery of two different materials: a soil (Marl) and an industrial byproduct (Carbide Lime, CL).

The normal physical and mechanical geotechnical tests, as well as the chemical tests, were the basis for the bibliographic study that was utilized to characterize the materials used. The soil used for this investigation comes from a location close to El Hammadia village, Bordj Bou Arreridj. Bordj Bou Arreridj. The Linde Gas Company, an acetylene producing facility situated in El Hadjar, Annaba's wilaya, discards CL as a byproduct.

It is not possible to contemplate using the researched marl for road building due to its geotechnical features, specifically its fragmentability and degradability. However, these materials are water-sensitive due to their high fine content and frequent inclusion of fine clay. For these reasons, treating with CL has been proposed as a way to improve these materials' mechanical properties. CL combined with the soils under study in various ratios to provide a novel and eco-friendly stabilizing method.

The outcomes demonstrate that the application of CL treatment significantly enhances the mechanical properties of the marl under investigation. It has also been noted how water affects these materials' durability both before and after treatment. We found that marls given CL treatment are less susceptible to this element. The results of the mechanical tests are validated by this singularity.

Thus, this study shows the possibility for using a novel material (marl-CL) in road building, opening the door for innovative, sustainable, and eco-friendly uses in the public works sector.

Keywords : marls, binders, carbide lime, mechanical characteristics, recovery.

ملخص

يشكل العمل المعروض في هذه المذكرة عنصراً من عناصر مبادرات معالجة التربة الرامية إلى تعزيز خصائصها الميكانيكية الطويلة والقصيرة المدى. ويتمثل الهدف الأساسي لهذه المذكرة في التقييم و الاستعادة المزدوجة لمادتين مختلفتين: التربة (الغضار) والمنتج الصناعي الثانوي (نفايات جيرية).

التجارب الجيوتقنية، الفيزيائية والميكانيكية العادية، وكذلك التجارب الكيميائية التي استخدمت لتقييم المواد المستخدمة تمت على أساس الدراسة البليوغرافية. التربة المستخدمة في هذه الدراسة تم جلبها من موقع قريب من مدينة الحمادية، برج بوعريريج. أما المنتج الصناعي الثانوي فلقد تم جلبه من شركة ليند غاز، وهي مرفق لإنتاج الأستيلين تقع في مدينة الحجار، ولاية عنابة.

ليس من الممكن التفكير في استخدام هذا النوع من التربة في بناء الطرق بسبب خصائصه الجيو تقنية الضعيفة، ولا سيما قابليته للتجزئة والتحلل. إضافة الى ذلك، فإن هذه المواد تعتبر حساسة للمياه بسبب احتوائها على العناصر الرفيعة جداً وتواجد العناصر الطينية فيها. لهذه الأسباب، اقترحنا تحسين الخصائص الميكانيكية للتربة قيد الدراسة، وذلك بمعالجتها بإضافة نسب مختلفة من الجير لتوفير طريقة جديدة وملائمة للبيئة .

بينت النتائج المحصل عليها أن تطبيق المعالجة بالجير يعزز إلى حد كبير الخصائص الميكانيكية للتربة المدروسة. كما تم ملاحظة كيفية تأثير الماء على قابلية هذه المواد للدوام سواء قبل المعالجة أو بعدها. حيث وجدنا أن الغضار المعالج بالجير أقل عرضة لهذا العنصر. وعليه تم التحقق من نتائج الاختبارات الميكانيكية بهذه الخاصية. وهكذا، استطاعت هذه الدراسة ان تبين إمكانية استخدام مادة جديدة في بناء الطرق، مما يفتح الباب أمام استخدامات مبتكرة ومستدامة ومراعية للبيئة في قطاع الأشغال العمومية .

الكلمات المفتاحية: غضار، روابط، نفايات جيرية، الخصائص الميكانيكية، تقييم

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

1

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur les chaux et leurs utilisations

1. Introduction	3
2. Propriétés des chaux	4
2.1. Chaux vive	4
2.1.1. Définition de la chaux vive.....	4
2.1.2. Propriétés et caractéristiques de la chaux vive.....	4
2.1.3. Processus de fabrication de la chaux vive	5
2.1.4. Précautions à prendre lors de la manipulation de la chaux vive	6
2.2. Chaux éteinte	6
2.2.1. Définition de la chaux éteinte.....	6
2.2.2. Propriétés de la Chaux éteinte.....	6
2.2.3. Préparation de la Chaux éteinte	7
2.3. Chaux hydraulique	7
2.3.1. Définition de la chaux hydraulique	7

2.3.2. Propriétés et caractéristiques de la chaux hydraulique	8
2.3.3. Préparation de la Chaux hydraulique.....	8
2.3.4. Procédé de Fabrication de la Chaux Hydraulique.....	8
2.3.5. Différence entre chaux hydraulique et chaux aérienne.....	9
2.4. Chaux résiduaire.....	9
2.4.1. Définition de la chaux résiduaire.....	9
2.4.2. Composition et propriétés de la chaux résiduaire.....	10
2.4.3. Procédé de production des chaux résiduaires.....	10
2.4.4. Effets de la chaux résiduaire sur l'environnement.....	11
2.4.5. Perspectives d'Avenir pour la chaux résiduaire	12
3. Utilisations des chaux.....	12
3.1. Utilisations de la chaux dans la construction.....	12
3.2. Chaux pour l'agriculture et l'horticulture.....	12
3.3. Chaux dans les produits de nettoyage et de désinfection	13
3.4. Chaux dans l'industrie du papier et du sucre.....	13
3.5. Traitement des eaux potables et usées	13
3.6. Traitement des déchets ménagers et industriels.....	14
3.7. Traitement des fumées.....	15
3.7.1. Désulfurations.....	15
3.7.2. Captation des acides halogénés.....	15
3.8. Traitement des eaux usées	16
3.9. Traitement des boues	17
3.10. Stabilisation des sols.....	18
3.11. Peintures.....	19
3.12. Mortiers et Enduits.....	19
4. Méthodes de production des chaux.....	19
4.1. La calcination du carbure.....	20
4.2. Le Processus de carbonation.....	21

5. Avantages et inconvénients	21
5.1. Avantages.....	21
5.2. Inconvénients.....	22
6. Normes et réglementations.....	22
7. Conclusion	23

Chapitre 02 : Procédé de production d'acétylène

1. Production d'acétylène	24
1.1. Préparation du carbure de calcium	24
2. Description du procédé de production.....	25
2.1. Générateur.....	27
2.2. Traitement de l'acétylène.....	27
2.2.1. Laveur du générateur	27
2.2.2. Gazomètre.....	27
2.2.3. Colonne d'absorption de l'ammoniac	28
2.2.4. Refroidissement.....	28
2.2.5. Colonne de lavage à l'acide.....	28
2.2.6. Colonne de lavage à la soude.....	28
2.2.7. Compression	28
2.2.8. Déshuileur-sécheur.....	29
2.2.9. Remplissage.....	29
2.3. Récupération de l'eau du lait de chaux.....	29
3. Conclusion.....	30

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

Introduction.....	31
1. Matériaux.....	31
1.1. La chaux résiduaire	31
1.2. La marne	32

1.2.1. Propriétés des sols marneux	32
1.2.2. Formation et composition des sols marneux	32
1.2.3. Localisation des sols d'étude.....	33
2. Méthodes.....	33
2.1. Programme expérimental.....	33
2.1. Caractérisation géotechnique des sols.....	34
2.2.1. Teneur en eau (NF P 94-050).....	34
2.2.2. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056).....	35
2.2.3. Limites D'Atterberg (NF P 94-051).....	37
2.2.4. Essai Proctor (NF P 94-093).....	40
2.2.5. Essai bleu de méthylène (NBN EN 933-9 (1998)).....	43
2.3. Caractérisation mécanique.....	45
2.3.1. Essai de la résistance à la compression simple (NF p 98-232-1).....	46
2.3.2. Essai de résistance à la traction indirecte (Essai Brésilien) (NF P 98-232-3).....	48
2.4. Caractérisation Chimique.....	49
2.4.1 Détermination de la teneur en carbonates méthode du calcimètre (NF P 94-048)	49
2.4.2 Détermination de la teneur en sulfates.....	52

Chapitre 04 : Résultats et discussions des essais avant et après traitement à la chaux résiduaire

Introduction.....	55
Partie 01 : Caractérisation physico-chimique et géotechnique des marnes étudiés avant traitement	55
1. Essais géotechniques.....	55
1.1. Teneur en eau (NF P 94-050).....	55
1.2. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056).....	56
1.3. Résultats des Limites d'Atterberg (NF P 94-05120).....	58
1.4. Résultats d'essai Proctor (NF P 94-093).....	60

1.5. Valeur de bleu de méthylène (VBS) (NF P 94-068)	61
1.6. Essais de portance	61
1.7. Essai de fragmentabilité et essai de dégradabilité	63
1.8. Classification géotechnique des sols étudiée.....	64
2. Essais chimiques.....	65
2.1. Analyse granulométrique du lait de chaux.....	65
2.2. Caractérisation chimique du lait de chaux	66
Partie 02 : Comportement mécanique des marnes traités à la chaux résiduaire.....	67
1. Les caractéristiques de résistance de compression simple et de traction indirecte.....	67
1.1 Résultats de l'essai de résistance à la compression simple.....	68
1.2. Résultats de l'essai de résistance à la traction indirecte.....	69
1.3. Influence de l'eau sur le comportement des marnes avant et après traitement	70
2. Possibilité d'utilisation des marnes traitées en CDF.....	73
1.1. Résultats de l'essai de résistance à la compression simple.....	73
1.2. Résultats de l'essai de résistance à la traction indirecte.....	73
Conclusion	73
Conclusion générale	74
Liste des références	

Liste des Figures

Figure1 : Présentation de la poudre de chaux et la roche calcaire.....	4
Figure2 : Processus de fabrication de la Chaux vive	5
Figure3 : Préparation de la Chaux éteinte.....	7
Figure4 : Dépôt de la chaux résiduaire de l'usine d'El Hadjar (Annaba).....	10
Figure5 : Schéma-type de la préparation de l'eau à usage domestique ou industriel.....	14
Figure6 : Schéma-type du traitement des eaux usées urbaines et industrielles.....	17
Figure 7 : Schéma-type du traitement des boues.....	17
Figure 8 : Schéma-type de stabilisation des sols.....	19
Figure 9 : Processus de carbonation.....	21
Figure 10 : Schéma du procédé de fabrication de l'acétylène.....	26
Figure 11 : Schéma de principe de récupération de l'eau de chaux (Linde Gas).....	29
Figure 12 : L'eau de chaux déchargée dans l'environnement.....	31
Figure 13 : Marne.....	32
Figure14 : Formation et composition des sols marneux.....	32
Figure 15 : Site de prélèvement.....	33
Figure 16 : Organigramme montrant le programme expérimental au laboratoire avant traitement à la chaux.....	34
Figure17 : Balance.....	35
Figur 18 : Etuve.....	35
Figur 19 : Les tamis.....	35
Figur 20 : Représentation des limites d'Atterberg.....	37

Figure21 : Appareil de Casagrande et Outil à rainurer.....	38
Figure22 : Exécution de la limite de liquidité WL.....	39
Figure23 : Préparation du rouleau pour la détermination de WP.....	40
Figure 24 : Sol sec concassé.....	42
Figure 25 : Remplissage.....	42
Figure26 : Remplissage par 3 couches.....	42
Figure27 : Préparation des échantillons pour la teneur en eau.....	42
Figure28 : Phases de déroulement de l'essai bleu de méthylène.....	44
Figure 29 : Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène.....	44
Figure30 : Papiers filtres montrant l'auréole Bleu clair pour la marne.....	45
Figure31 : Moule.....	46
Figure 32 : Dispositif de compression.....	46
Figure33 : Dispositif d'écrasement.....	46
Figure34 : Compactage.....	47
Figure 35 : Écrasement de l'éprouvette.....	47
Figure 36 : Conservation.....	47
Figure37 : Écrasement de l'éprouvette.....	47
Figure38 : Procédure d'application de la charge durant l'essai brésilien.....	48
Figure39 : Schéma d'un calcimètre.....	50
Figure40 : Calcimètre Dietrich-Fruhlingutilisé.....	50
Figure41 : Déroulement de l'essai.....	52
Figure42 : Déroulement de l'essai.....	53

Figure43 : Courbe granulométrique de la marne étudiée.....	56
Figure44 : Courbe Proctor normal de la marne étudiée.....	60
Figure 45 : Papiers filtres montrant l'auréole Bleu clair pour la marne étudiée.....	61
Figure46 : Résultats des essais CBR après immersion.....	62
Figure47 : Courbes CBR portant immédiat des deux marnes.....	62
Figure48 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage de l'échantillon.....	63
Figure49 : Courbes des différents cycles imbibition-séchage de la marne	63
Figure50 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant (GTR).....	64
Figure51 : Répartition granulométrique de la chaux résiduaire.....	66
Figure52 : Évolution de R_c en fonction du temps pour la marne traitée à la chaux résiduaire.....	68
Figure53 : Histogramme de la résistance à la compression simple de la marne traité à la chaux en fonction du dosage.....	68
Figure54 : Évolution de R_{tb} en fonction du temps pour la marne traitée à la chaux résiduaire.	69
Figure55 : Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la marne traité à la chaux en fonction du dosage.	70

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différence entre chaux hydraulique et chaux aérienne	9
Tableau 2 :Composition et caractéristiques du carbure de calcium (Linde Gas).....	25
Tableau 3 :Conditions de chaque essai selon le moule retenu.....	41
Tableau 4 :Teneur en eau naturel de la marne étudié.....	55
Tableau 5 : Valeurs des coefficients Cu et Cc.....	58
Tableau 6 :Limites d'Atterberg de la marne étudiée.....	58
Tableau 7 :Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (GTR, 2000).....	59
Tableau 8 :Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980).....	60
Tableau 9 :Caractéristiques de l'optimum Proctor normale de la marne étudiée.....	61
Tableau 10 : Récapitulatif des valeurs des différents essais géotechniques effectués sur les marnes non traitées.....	64
Tableau 11 :Caractéristiques granulométriques de la chaux résiduaire de Linde Gas.....	65
Tableau 12 : Composition de la chaux résiduaire de LindeGas.....	66
Tableau 13 : Eprouvettes séchées pendant 2 jours.....	71
Tableau 14 : Eprouvettes séchées pendant 7 jours.....	71
Tableau 15 : Eprouvettes séchées pendant 14 jours.....	71
Tableau 16 : Eprouvettes séchées pendant 28 jours.....	72

Liste des abréviations

CR	Chaux Résiduaire
CDF	Couche de Forme
PH	Potentiel hydrogène
PVC	Polychlorure du vinyle
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
CBR	Californian Bearing Ratio
WL	Limite de liquidité
WP	Limite de plasticité
IP	Indice de plasticité
γ_d	Densité sèche
γ_{dopm}	Densité sèche de l'Optimum Proctor Normal
R_c	Résistance à la compression simple
R_{tb}	Résistance à la traction indirecte
C_u	Coefficients d'uniformité.
GTR	Guide des Terrassement Routier
W_{opm}	Teneur en eau optimale
VBS	Valeur de Bleu du Sol
CBR imm	California Bearing Ratio après immersion dans l'eau
FR	Coefficient de Fragmentabilité
DG	Coefficient de Dégradabilité
D_E	Diamètre effectif

Introduction

Générale

Introduction générale

En Algérie, chaque année, une grande quantité de déchets industriels est produite, et une partie significative de ces déchets est encore détruite dans les décharges. Selon leurs caractéristiques particulières, ces déchets peuvent représenter un important réservoir de matières premières, offrant ainsi une possibilité de remplacer les ressources naturelles.

En raison de l'évolution rapide des réglementations environnementales, l'industrie fait face à un défi. Afin d'optimiser la qualité de gestion des déchets, il est nécessaire que les responsables adoptent des approches de plus en plus performantes pour gérer, surveiller et éliminer les polluants.

En réagissant avec l'eau, le carbure de calcium est transformé en acétylène par la société Linde Gas (El Hadjar, wilaya d'Annaba). Ce procédé permet également de produire de la chaux sous forme de lait de chaux. Une partie de l'eau du lait de chaux est réutilisée afin de réduire les déchets, tandis que le reste du lait de chaux est rejeté en toute sécurité dans l'environnement (Ramasamy et al., 2002 ; Cardoso et al., 2009 ; MSDS, 1999 ; Hologado et al., 1992). Ce rejet, très alcalin, peut provoquer des catastrophes qui vont affecter le sol, l'eau, la faune et la flore. (Ramasamy et al. (2002), Cardoso et al. (2009), Al-Khaja et al. (1992) et MSDS (2001).

Après avoir réalisé l'ampleur des difficultés engendrées par ce rejet, nous avons choisi de mener cette étude pour en trouver des solutions. Ainsi, ces problèmes ont dû être résolus en envisageant l'utilisation de cette chaux résiduaire dans le traitement des sols dont les caractéristiques géotechniques sont très faibles.

Dans la littérature, peu de recherches scientifiques ont été menées sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques des marnes. Les caractéristiques mécaniques de ces matériaux sont très faibles, ce qui les rend inexploitable dans le domaine de la construction routière. Au cours de cette étude, une analyse exhaustive (physique, chimique et mécanique) a été effectuée sur un sol marneux. Ainsi, nous avons également envisagé d'examiner l'utilisation potentielle de ces marnes pour la construction de la couche de forme (CDF), en les traitants à la chaux résiduaire.

L'objectif principal de notre projet de fin d'étude est de faire face à ces défis en menant une étude expérimentale sur le matériau « marne-chaux résiduaire ». Nous nous concentrons donc sur la caractérisation mécanique (essais de compression simple et de traction indirecte) en laboratoire sur des mélanges idéaux du matériau « marne-chaux résiduaire » produit par voie

sèche, en tenant compte du type de sol, de sa granulométrie, du dosage en chaux, de la quantité d'eau d'introduction et de la durée de conservation des éprouvettes.

Plan du mémoire

Le présent travail comporte, après une introduction, six chapitres.

- **Le premier chapitre** présente une synthèse bibliographique sur les chaux (chaux éteinte, vive, hydraulique et résiduaire) avec leurs propriétés et utilisations. Les méthodes de production, avantages et inconvénient ainsi que les normes et réglementations sont présentées et discutées aussi.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à la production d'acétylène.
- **Le troisième chapitre** donne dans un premier lieu, une description des matériaux utilisés (chaux résiduaire et marne), en outre la localisation géographique du site de prélèvement. Ensuite, il expose le programme expérimental et les méthodes utilisés pour la caractérisation physique, chimique et mécanique des sols.
Les essais géotechniques effectués dans cette étude ont été réalisés au laboratoire de département de génie civil, université de Bordj Bou Arreridj.
- Les résultats des différents essais réalisés sur les marnes avant et après traitement à la chaux résiduaire ainsi que leur interprétation sont présentés en détail dans **le quatrième chapitre**.

En conclusion et sous la lumière des résultats exposés le long du manuscrit, le traitement à la chaux résiduaire donne des résultats prometteurs.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique sur les chaux
et leurs utilisations

1. Introduction :

L'objectif de cette synthèse est de présenter une analyse exhaustive et précise de ce matériau indispensable dans divers secteurs. En acquérant une meilleure compréhension des divers aspects de la chaux, il sera envisageable de prendre des décisions éclairées concernant leur utilisation et de réduire au minimum les conséquences potentielles sur l'environnement.

L'utilisation des chaux dans l'industrie de la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis lors, elles ont été largement utilisées pour leurs propriétés de liant et de stabilisation des matériaux de construction. Grâce à leur capacité à durcir et à résister aux intempéries, les chaux ont été utilisées dans la construction de structures telles que les maisons, les monuments historiques.

Cependant, avec l'avènement de nouvelles technologies, l'utilisation des chaux a connu des évolutions significatives. De nouvelles techniques de fabrication ont été développées, permettant la production de chaux de haute qualité avec des propriétés améliorées. Ces avancées ont ouvert de nouvelles possibilités d'utilisation des chaux dans des applications modernes telles que la construction de routes, la fabrication de céramiques et le traitement des sols contaminés...etc.

Même si les chaux ont beaucoup d'avantages, elles ne sont pas sans d'inconvénients. À titre d'exemple, la production de ces produits peut engendrer des émissions de CO₂, ce qui peut contribuer au changement climatique. En outre, il est possible que certaines chaux renferment des substances toxiques comme l'arsenic ou le plomb, ce qui peut entraîner des répercussions néfastes sur la santé humaine et l'écosystème. Il est donc primordial de considérer ces éléments lors de l'emploi de la chaux et de prendre les mesures nécessaires pour réduire les dangers.

Les méthodes d'application des chaux varient en fonction de leur utilisation spécifique. Elles peuvent être appliquées sous forme de poudre, de pâte ou de solution, en fonction des besoins.

2. Propriétés des chaux :

2.1. Chaux vive :

La chaux vive, également connue sous le nom d'oxyde de calcium, est un matériau largement utilisé dans divers domaines en raison de ses propriétés chimiques et physiques uniques. Cette substance blanche, insoluble dans l'eau, est obtenue en chauffant la pierre calcaire pendant une période prolongée.



Fig.1 : Présentation de la poudre de chaux et la roche calcaire (GUEZOU et al., 2020).

2.1.1. Définition de la chaux vive :

La chaux vive est un composé chimique obtenu par la calcination de la roche calcaire à des températures très élevées. Ce processus, appelé "cuisson de la chaux", transforme le carbonate de calcium en oxyde de calcium pur. Le résultat de cette transformation est une poudre blanche qui possède des propriétés uniques (Delfaut, A. (1990).

2.1.2. Propriétés et caractéristiques de la Chaux Vive :

La chaux vive se distingue par sa grande réactivité chimique. Lorsqu'elle entre en contact avec l'eau, elle libère une importante quantité de chaleur, donnant naissance à la chaux éteinte. Cette propriété en fait un agent de neutralisation et de désinfection très puissant. De plus, la chaux vive est un liant hydraulique, ce qui lui permet de durcir et de se solidifier au contact de l'eau

(Dupraz, J., & Zohry, M. (2007). Sur le plan physique, la chaux vive se présente sous forme d'une poudre blanche, dense et caustique. Elle possède une structure cristalline qui lui confère une grande résistance mécanique.

Le CaO est considéré comme chaux vive car il réagit de manière importante avec l'eau, ce qui génère de la chaleur, selon la réaction suivante :



2.1.3. Processus de fabrication de la Chaux Vive :

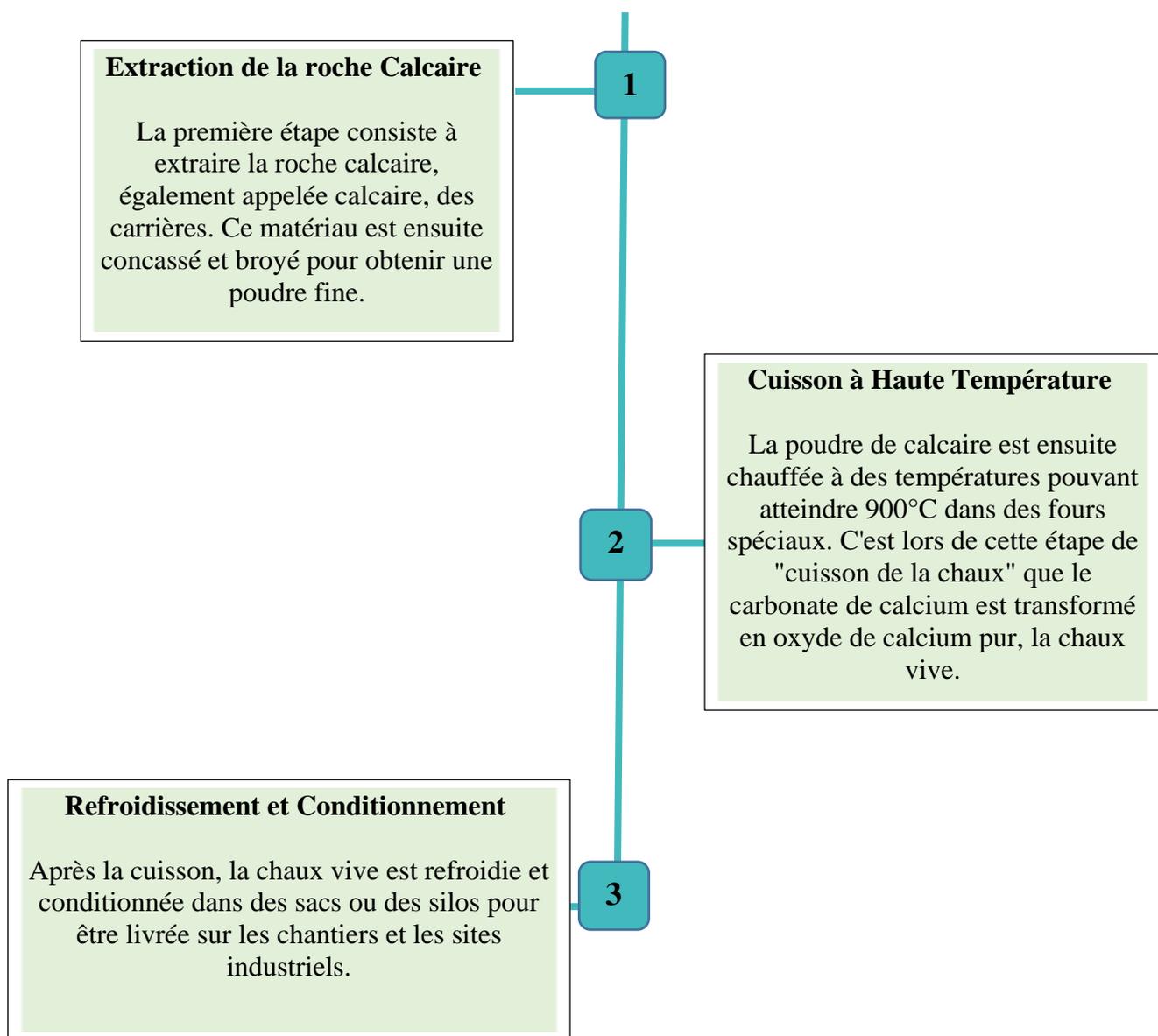


Fig.2 : Processus de fabrication de la Chaux vive.

2.1.4. Précautions à prendre lors de la manipulation de la Chaux Vive :

Même si la chaux vive est une substance extrêmement bénéfique, il est important de la manipuler avec prudence car elle comporte des dangers pour la santé et la sécurité. Effectivement, la chaux vive possède une grande capacité caustique et peut provoquer de graves brûlures en cas de contact avec la peau. Le port d'un équipement de protection individuelle approprié (gants, lunettes, masque) est donc nécessaire lors de sa manipulation. En outre, la chaux vive produit une grande quantité de chaleur lors de sa réaction avec l'eau, ce qui peut provoquer des explosions en milieu fermé. La chaux vive ne doit donc pas être en contact direct avec l'eau lors du stockage et du transport (Lecompte, 2020).

2.2. Chaux éteinte :

La chaux éteinte, également connue sous le nom d'oxyde de calcium, est un matériau largement utilisé dans divers domaines. Il s'agit d'une substance produite en éteignant de la chaux vive, qui est obtenue par calcination du calcaire. La chaux éteinte est connue pour ses propriétés chimiques uniques, son impact environnemental limité et sa durabilité (Arabi et Molez, 2015).

2.2.1. Définition de la chaux éteinte :

La chaux éteinte se présente sous forme de poudre blanche, sans odeur distincte. La réaction d'extinction de la chaux vive produit de la chaleur et de la vapeur d'eau. La chaux éteinte est largement utilisée dans divers secteurs tels que la construction, l'agriculture et l'industrie, en raison de ses propriétés chimiques, de sa facilité d'utilisation et de sa polyvalence. Elle est souvent mélangée avec de l'eau pour former une pâte qui peut être utilisée dans de nombreuses applications. La chaux éteinte est un matériau non toxique et écologique, ce qui en fait un choix attrayant pour de nombreux projets.

2.2.2. Propriétés de la Chaux Éteinte :

La chaux éteinte est un composé chimique blanc et pulvérulent, composé principalement d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ses principales propriétés sont :

- pH élevé, autour de 12-13, la rendant alcaline ;
- Faible conductivité thermique, en fait un bon isolant ;
- Résistance élevée à la compression une fois durcie ;
- Haute plasticité et facilité d'application.

2.2.3. Préparation de la Chaux Éteinte :

La chaux éteinte est obtenue à partir de la chaux vive (oxyde de calcium) en l'hydratant avec de l'eau. Ci-dessous les principales étapes :

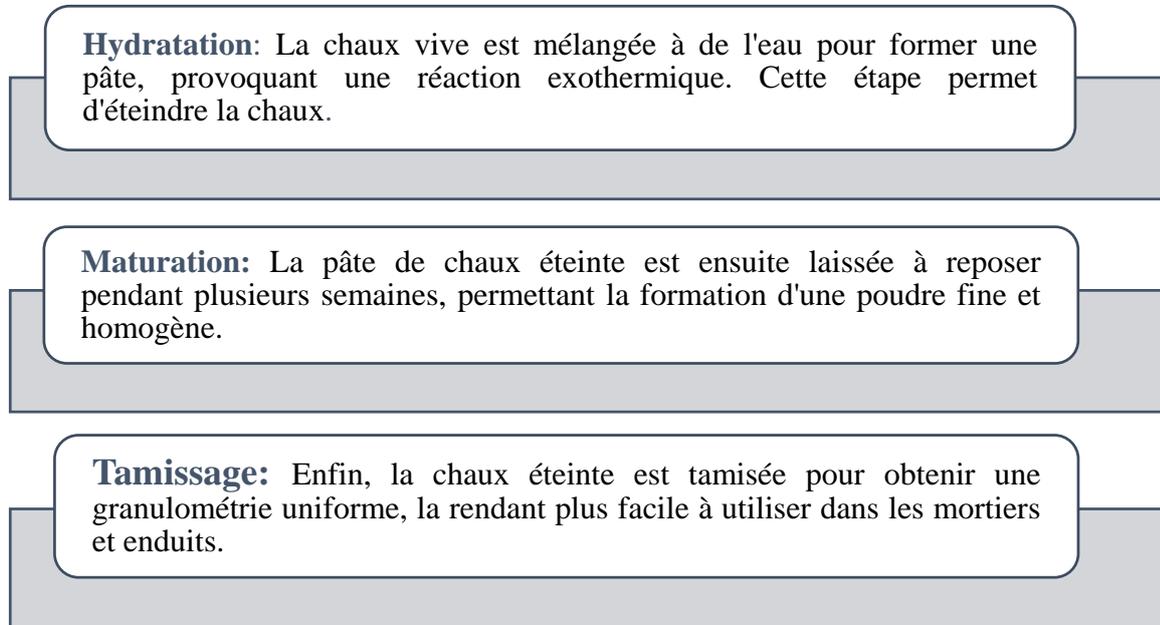


Fig.3 : Préparation de la Chaux éteinte.

2.3. Chaux hydraulique :

La chaux hydraulique est un matériau très utilisé dans de nombreux domaines de la construction, de la rénovation et de la restauration.

2.3.1. Définition de la chaux hydraulique :

La chaux hydraulique est un type de chaux qui a la capacité de durcir sous l'eau. Contrairement à la chaux aérienne, qui a besoin de dioxyde de carbone pour se solidifier, la chaux hydraulique peut se durcir en présence d'eau. Cette propriété particulière en fait un matériau de choix pour de nombreuses applications dans le bâtiment, notamment la construction de fondations, de murs, de mortiers et d'enduits. La chaux hydraulique est obtenue par la cuisson de pierres calcaires contenant de l'argile et d'autres minéraux. Ce mélange particulier lui confère ses propriétés uniques de résistance et de durabilité, même dans des conditions humides.

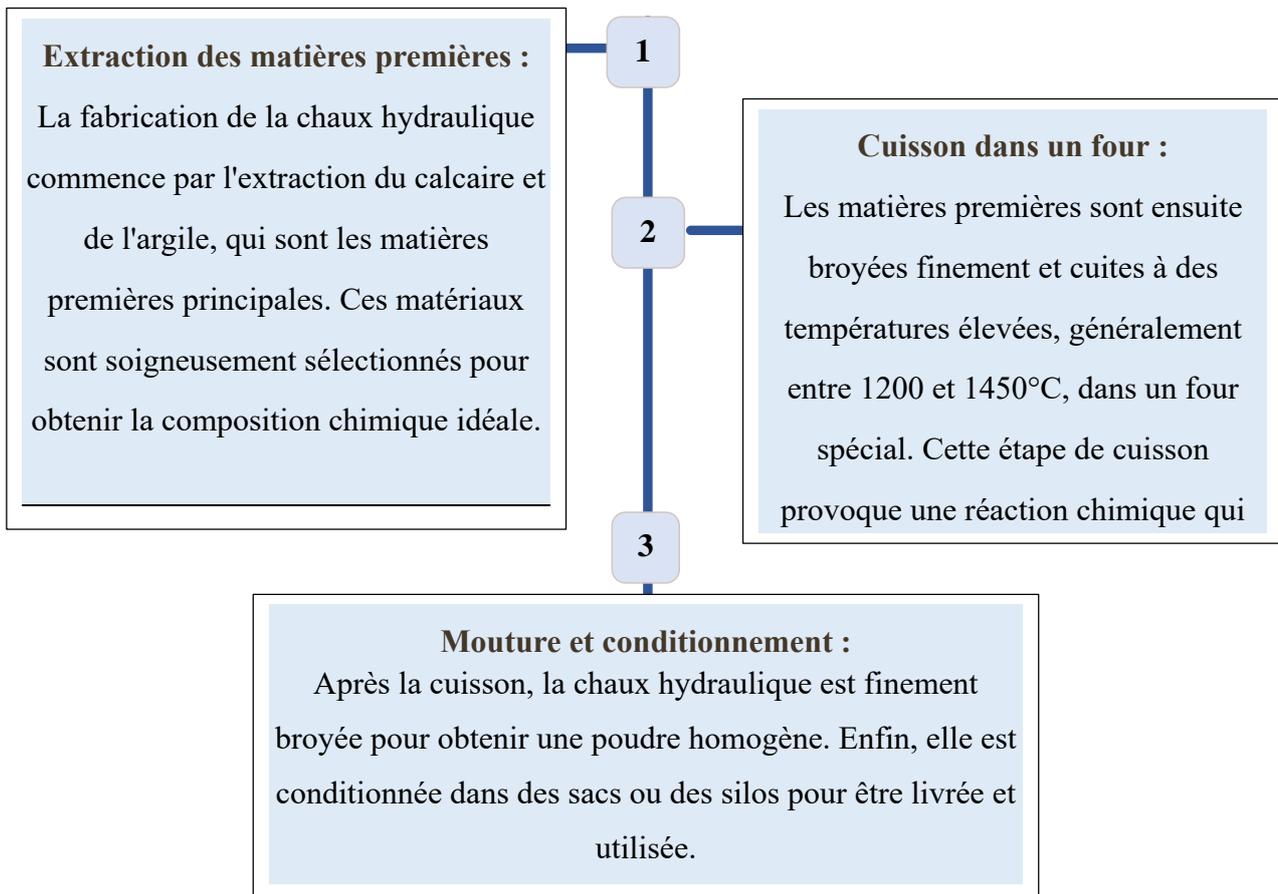
2.3.2. Propriétés et caractéristiques de la chaux hydraulique :

- **Résistance à l'eau :** Grâce à sa capacité à durcir en présence d'eau, la chaux hydraulique est particulièrement adaptée aux travaux dans des environnements humides, tels que les fondations, les bassins ou les ouvrages hydrauliques.
- **Durabilité :** La chaux hydraulique présente une excellente résistance dans le temps, ce qui en fait un matériau de choix pour des projets de construction à long terme.
- **Perméabilité :** Contrairement aux ciments, la chaux hydraulique permet une meilleure respiration des murs et une régulation naturelle de l'humidité dans les bâtiments.

2.3.3. Préparation de la Chaux Hydraulique :

La préparation de la chaux hydraulique nécessite des étapes bien précises. Tout d'abord, les matières premières (calcaire, argile, sable) sont soigneusement dosées et broyées finement. Elles sont ensuite cuites à haute température dans un four spécial, provoquant une réaction chimique qui produit la chaux hydraulique sous forme de poudre. Cette poudre est ensuite mélangée à de l'eau pour former un liant prêt à l'emploi. La quantité d'eau ajoutée et le temps de malaxage sont essentiels pour obtenir les propriétés souhaitées (Cabane, N. 2004).

2.3.4. Procédé de Fabrication de la Chaux Hydraulique :



2.3.6. Différence entre chaux hydraulique et chaux aérienne :

Tableau 01 : Différence entre chaux hydraulique et chaux aérienne.

<i>Chaux hydraulique</i>	<i>Chaux aérienne</i>
La chaux hydraulique est capable de se fixer et de se solidifier sous l'eau. Sa composition est constituée de calcaire et d'argile, et elle est cuite à haute température afin de créer un liant hydraulique.	De son côté, la chaux aérienne nécessite l'apport d'air pour se fixer et se solidifier. Elle est fabriquée à partir de calcaire pur et ne renferme aucune argile. La carbonatation avec le dioxyde de carbone dans l'air entraîne son durcissement.

2.4. Chaux résiduaire :

La chaux de récupération est un résidu de la production d'acétylène. La production est assurée par Linde Gas située à Annaba. La chaux résiduaire peut être utilisée dans le domaine du traitement des eaux.

Elle présente des caractéristiques physico-chimiques similaires à celles des chaux commercialisées. Son efficacité dans l'épuration des eaux usées a été remarquable, en éliminant les matières en suspension et les matières organiques, pour une quantité optimale de chaux résiduaire de 850 mg/L1. De plus, elle est extrêmement performante dans la précipitation des métaux lourds. Toutefois, il convient de souligner que la mise en valeur de la chaux résiduaire est un domaine de recherche en constante évolution et que les applications potentielles peuvent différer en fonction des caractéristiques particulières de la chaux résiduaire et des exigences spécifiques de l'application.

2.4.1. Définition de la chaux résiduaire :

La chaux résiduaire est un sous-produit issu de la production de la chaux vive. Bien que souvent considérée comme un déchet, cette chaux peut être valorisée et utilisée dans de nombreuses applications.

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique sur les chaux et leurs utilisations

La chaux résiduaire est le produit restant après la calcination du calcaire pour produire de la chaux vive, elle contient principalement de l'hydroxyde de calcium, du carbonate de calcium et d'autres minéraux. La chaux résiduaire présente des propriétés uniques comme une forte alcalinité et une capacité de neutralisation.



Fig.4 : Dépôt de la chaux résiduaire de l'usine d'El Hadjar (Annaba) (Ayache, 2013).

2.4.2. Composition et propriétés de la Chaux Résiduaire :

La chaux résiduaire se compose principalement d'hydroxyde de calcium (60-80%), de carbonate de calcium (10-30%) et d'impuretés telles que des silicates, des alumines et des oxydes de métaux (10-20%). Cette combinaison lui confère des propriétés uniques, notamment une alcalinité élevée, une capacité de neutralisation des acides, ainsi qu'une bonne réactivité et une stabilité dans le temps. De plus, la chaux résiduaire présente une granulométrie fine, ce qui facilite son incorporation dans divers produits et matériaux (Thiene ,2018).

2.4.3. Procédé de production des chaux résiduaires :

- *Traitement des effluents* : Les effluents industriels contenant du calcium sont collectés et clarifiés.
- *Précipitation de la chaux* : Le calcium en solution précipite sous forme d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).
- *Séchage et broyage* : Le précipité est séché puis broyé pour obtenir une poudre fine de chaux résiduaire.

2.4.4. Effets de la chaux résiduaire sur l'environnement :

- *Effets de la chaux résiduaire sur les sols :*
 - Augmentation du pH : La chaux résiduaire peut augmenter le pH des sols, modifiant leur composition et affectant la flore et la faune ;
 - Contamination des métaux lourds : La chaux résiduaire peut contenir des métaux lourds qui s'accumulent dans les sols et nuisent à leur fertilité ;
 - Perturbation de l'équilibre des nutriments : L'apport excessif de chaux peut déséquilibrer les nutriments essentiels dans les sols.

- *Effets de la chaux résiduaire sur les eaux :*
 - Augmentation du pH : La chaux résiduelle peut entraîner une élévation du pH des eaux, perturbant l'équilibre des écosystèmes aquatiques ;
 - Contamination des métaux lourds : Les métaux lourds présents dans la chaux peuvent se dissoudre dans les eaux et s'accumuler dans la chaîne alimentaire ;
 - Eutrophisation : Un apport excessif de chaux peut favoriser la prolifération d'algues et menacer la biodiversité aquatique.

- *Effets de la chaux résiduaire sur la végétation :*
 - Toxicité : La chaux résiduelle peut être toxique pour certaines espèces végétales, entraînant leur dépérissement ou leur disparition ;
 - Déséquilibre nutritif : L'excès de chaux peut perturber l'assimilation des nutriments essentiels par les plantes ;
 - Modification de la composition floristique : La chaux résiduelle favorise certaines espèces au détriment d'autres, modifiant la biodiversité végétale.

- *Effets de la chaux résiduaire sur la faune :*
 - Toxicité : La chaux résiduelle peut être toxique pour la faune, entraînant des mortalités directes ;
 - Bioaccumulation : Les métaux lourds présents dans la chaux peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire, affectant la faune ;
 - Destruction d'habitats : La pollution par la chaux peut dégrader les milieux naturels et détruire les habitats de la faune.

2.4.5. Perspectives d'Avenir pour la Chaux Résiduaire :

Malgré les défis à relever, la chaux résiduaire présente un avenir prometteur. Avec une sensibilisation accrue aux enjeux environnementaux et une recherche continue pour optimiser son procédé de production, cette solution alternative devrait gagner en visibilité et en acceptation sur le marché. L'intégration de la chaux résiduaire dans une économie circulaire plus large, associée à des réglementations favorables, pourrait permettre de valoriser davantage ce sous-produit et d'en maximiser les bénéfices environnementaux à long terme (Ondrousek, 1974).

3. Utilisations des chaux :

La chaux joue un rôle crucial dans divers domaines (génie civil, environnement, agronomie...etc.).

3.1. Utilisations de la chaux dans la construction :

Dans le domaine de la construction, le ciment est fait à partir de chaux vive, tandis que la chaux éteinte est employée dans la fabrication des mortiers, des enduits et des plâtres. Elle augmente la solidité, la longévité et la facilité d'utilisation de ces matériaux de construction. On utilise également de la chaux pour stabiliser les sols et fabriquer du béton (Brochu, P. A. 1981).

Ciment : La chaux vive est un ingrédient clé dans la fabrication du ciment, conférant à ce dernier ses propriétés liantes et de durcissement.

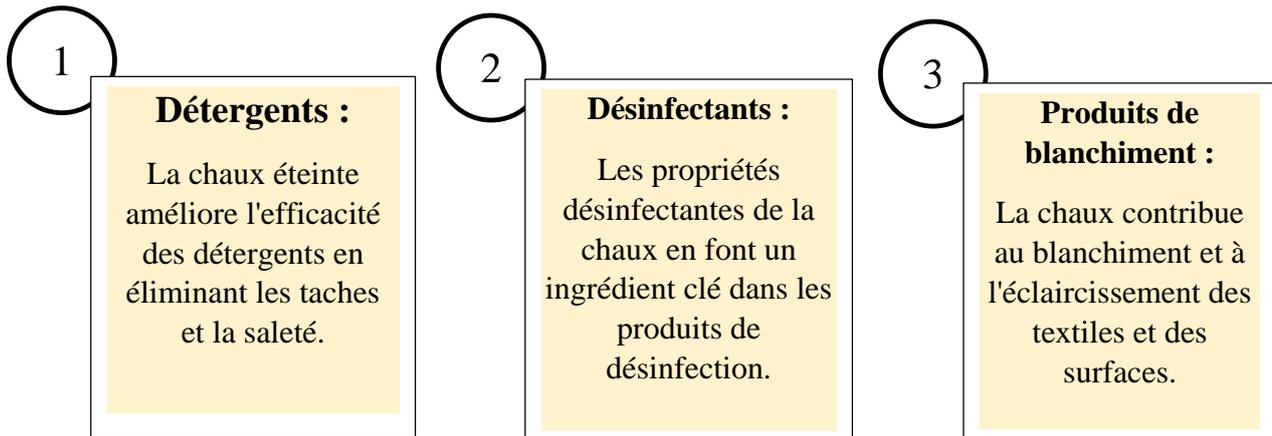
- *Mortiers et enduits* : La chaux éteinte est mélangée à du sable et de l'eau pour créer des mortiers et des enduits utilisés pour la maçonnerie, le rejointoiement et l'enduisage.
- *Béton* : La chaux améliore la résistance et la durabilité du béton, tout en facilitant sa mise en œuvre.

3.2. Chaux pour l'agriculture et l'horticulture :

La chaux joue un rôle essentiel dans l'amélioration des sols agricoles et horticoles. La chaux éteinte est épanchée sur les terres pour neutraliser l'acidité du sol, ce qui favorise la croissance des cultures et des plantes. Elle améliore également la structure du sol, facilitant la pénétration des racines et l'absorption des nutriments. En horticulture, la chaux est utilisée pour ajuster le pH des substrats de culture, optimisant ainsi les conditions de croissance des plantes ornementales et maraîchères (Fairhurst, T. 2015).

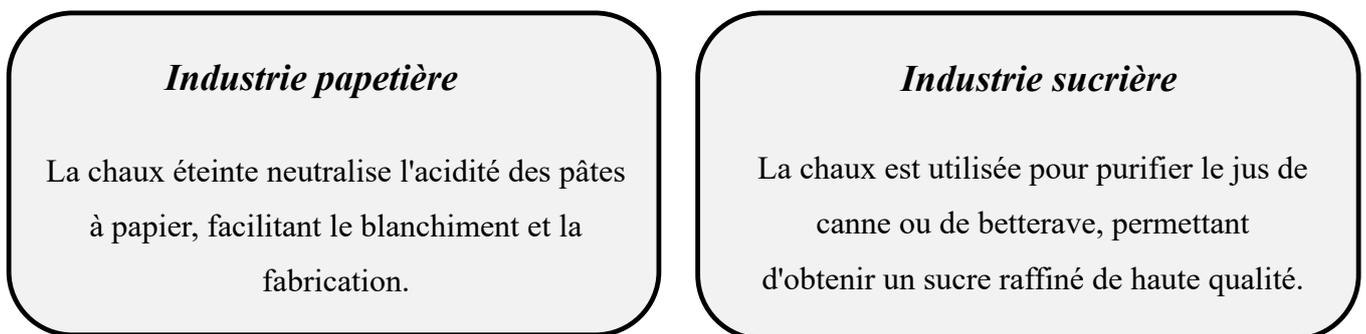
3.3. Chaux dans les produits de nettoyage et de désinfection :

La chaux éteinte possède des propriétés désinfectantes et déodorantes, la rendant très utile dans les produits de nettoyage et de désinfection. Elle est notamment employée dans la fabrication de détergents, de désinfectants, de désodorisants et de produits de blanchiment. Grâce à son action alcaline, la chaux permet d'éliminer efficacement les taches, les odeurs et les bactéries, contribuant ainsi à l'hygiène et à la propreté dans de nombreux environnements (Kahrs, R. F. 1995).



3.4. Chaux dans l'industrie du papier et du sucre :

La chaux est également utilisée dans des industries spécialisées comme celle du papier et du sucre. Dans l'industrie papetière, la chaux éteinte est employée pour neutraliser l'acidité des pâtes à papier, facilitant ainsi le processus de blanchiment et de fabrication. Dans la production de sucre, la chaux intervient dans l'étape de purification du jus de canne ou de betterave, permettant d'éliminer les impuretés et d'obtenir un sucre raffiné de haute qualité.



3.5. Traitement des eaux potables et usées :

La chaux joue un rôle essentiel dans le traitement des eaux potables et usées. Ses principales applications incluent (Thomazeau, 1981 ; Hue, 2001 ; Carmeuse, 2000) :

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique sur les chaux et leurs utilisations

- *Correction du pH* : La chaux est utilisée pour ajuster le pH des eaux trop acides, favorisant ainsi la précipitation des métaux dissous sous forme d'hydroxydes métalliques insolubles.
- *Précipitation des contaminants* : Elle permet la précipitation des phosphates, sulfates et fluorures sous forme de sels calciques insolubles, facilitant ainsi leur élimination de l'eau.
- *Reminéralisation* : Dans le cas d'eaux trop douces qui peuvent être corrosives pour les conduites, la chaux est utilisée pour ajouter des minéraux à l'eau, renforçant ainsi sa qualité et sa *stabilité*.
- *Décarbonatation* : En présence d'eaux trop dures, riches en carbonates de calcium et de magnésium responsables du tartre, la chaux est employée pour éliminer ces carbonates et ainsi réduire l'entartrage des installations.

En somme, la chaux offre une solution polyvalente et efficace pour divers aspects du traitement des eaux, contribuant ainsi à garantir leur qualité et leur sécurité pour les usages domestiques et industriels.

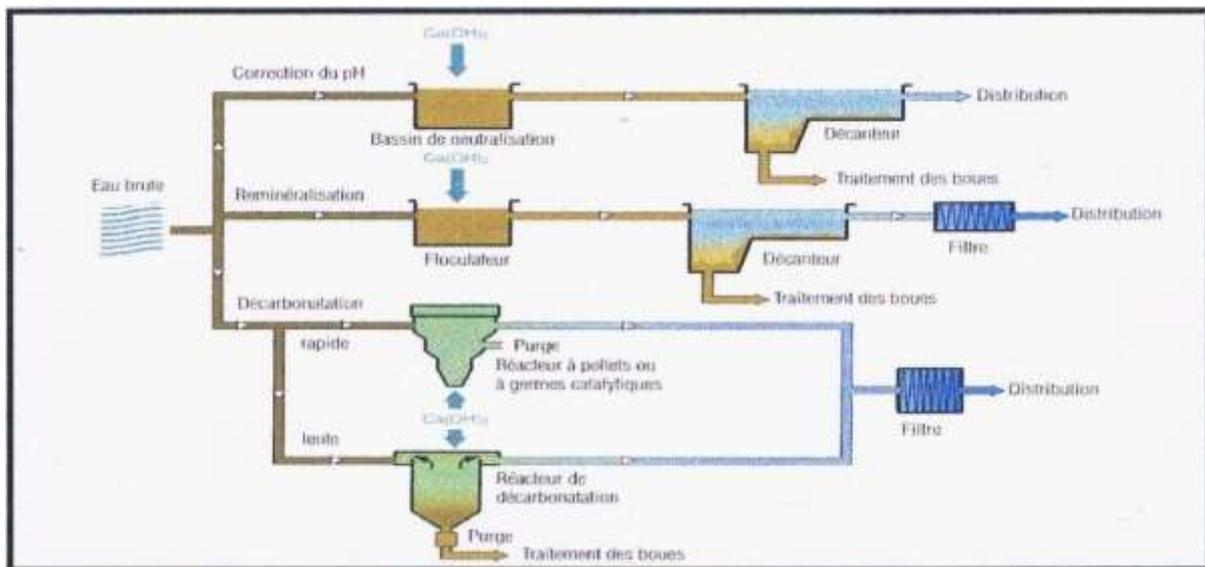


Fig.5 : Schéma-type de la préparation de l'eau à usage domestique ou industriel (Ayache, 2013).

3.6. Traitement des déchets ménagers et industriels :

Le rôle de la chaux est crucial (déshydratation, stabilisation et fixation des métaux lourds) dans les diverses opérations de traitement des déchets domestiques et industriels. Il s'agit de la méthode la plus efficace pour traiter les décharges d'immondes, pour éviter la formation d'odeurs

désagréables, la contamination des eaux de lixiviation et la présence d'animaux comme les rats ou les oiseaux.

3.7. Traitement des fumées :

La chaux neutralise les acides sulfhydriques, chlorhydriques, fluorhydriques et adsorbe la plupart des métaux lourds présents dans les fumées dans les centrales électriques au charbon, ainsi que dans de nombreuses productions industrielles (verrerie, briqueteries, etc.) (Lhoist 1).

3.7.1. Désulfurations :

Les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) sont principalement issues de l'exploitation de combustibles fossiles (pétroliers, lignites et charbons). D'autres méthodes comme l'incinération des déchets ménagers ou industriels produisent également du SO₂ qui, s'il n'est pas capturé, entraîne l'acidification de l'atmosphère et la formation de pluies acides (Lhoist 1).

La méthode employée pour capturer le SO₂ est généralement la neutralisation à l'aide d'un composé alcalin qui réduit la quantité de composés soufrés présentes dans les fumées jusqu'au niveau de rejet autorisé. La capture du SO₂ va entraîner la formation de sulfite de calcium qui est généralement converti en sulfate de calcium. L'ensemble de la réaction de captation du SO₂ est la suivante :

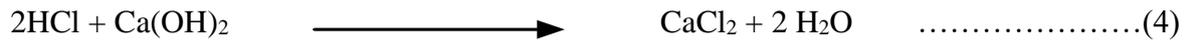


3.7.2. Captation des acides halogénés :

On retrouve souvent les deux gaz acides halogénés, HCl et HF, en même temps. La collecte de ces polluants se fait donc fréquemment dans des infrastructures communes (Lhoist 1).

- *La déchloruration :*

Les acides chlorhydriques (HCl) sont principalement émis par l'incinération des déchets ménagers et des déchets industriels chlorés. L'incinération produit principalement du chlore provenant des plastiques (PVC) et des papiers carton. La neutralisation des fumées est réalisée en neutralisant la chaux hydratée en utilisant la réaction (4) :



- *Défluoruration* :

Les briqueteries et tuileries, les usines de céramiques et les verreries sont les principales sources d'émission de fluor. On procède à la défluoruration en suivant la réaction (5) :



3.8. Traitement des eaux usées :

L'utilisation de la chaux joue un rôle crucial à diverses étapes du traitement des eaux usées industrielles et domestiques. Selon la Figure 6, la chaux peut être employée dans les étapes suivantes :

- *La fusion et la floculation* :

La chaux joue un rôle essentiel en neutralisant les charges électriques des particules colloïdales, qui sont généralement négatives. La décantation favorise l'agglomération des particules afin de faciliter les séparations. l'agent de floculation est constitué de chaux à laquelle on peut ajouter un sel métallique et/ou un polymère (Aktas et al., 2001 ; Lhost 2).

- *Précipitation Les métaux lourds et les phosphates* :

La chaux provoque la formation d'hydroxydes de la plupart des métaux lourds.

Si des phosphates sont présents dans les eaux usées, la chaux les précipite en même temps que les métaux lourds (Ricou, 1998 ; Barnes et al., 1986).

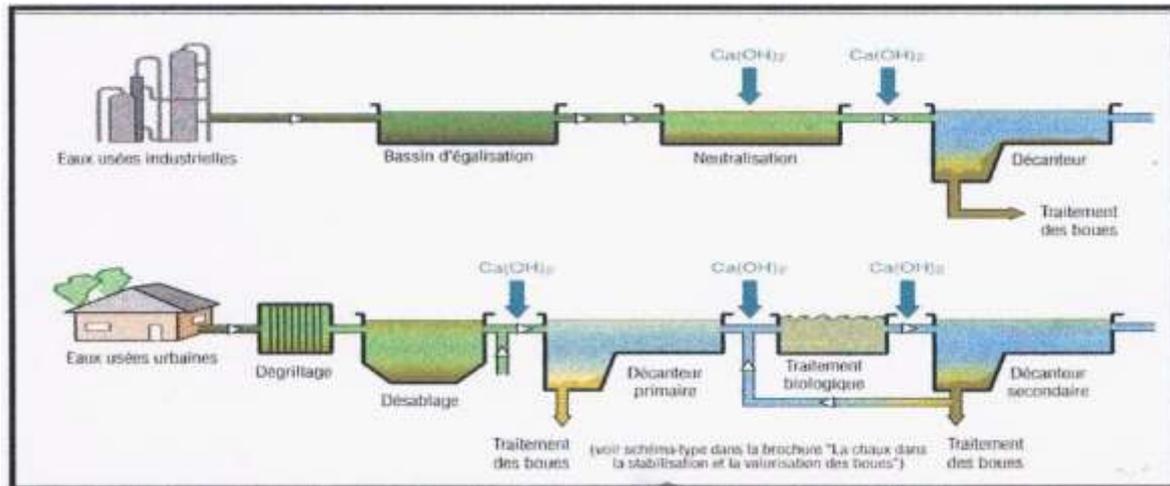


Fig.6 : Schéma-type du traitement des eaux usées urbaines et industrielles (Lhoist 2).

3.9. Traitement des boues :

Le traitement en station d'épuration vise principalement à réduire le volume des boues afin de limiter les quantités à stocker (voire à épandre), et à les stabiliser en utilisant généralement la chaux pour améliorer leurs caractéristiques physiques (amélioration de leur tenue en tas) et stopper la biodégradation (Figure 7). Effectivement, la présence d'une grande quantité d'eau et des populations bactériennes abondantes en font un environnement de culture propice à la dégradation de la matière organique fraîche et très fermentescible qu'elles renferment, ce qui entraîne la production de mauvaises odeurs (Weiss et al., 1999 ; Carmeuse 2 ; Lhoist 3).

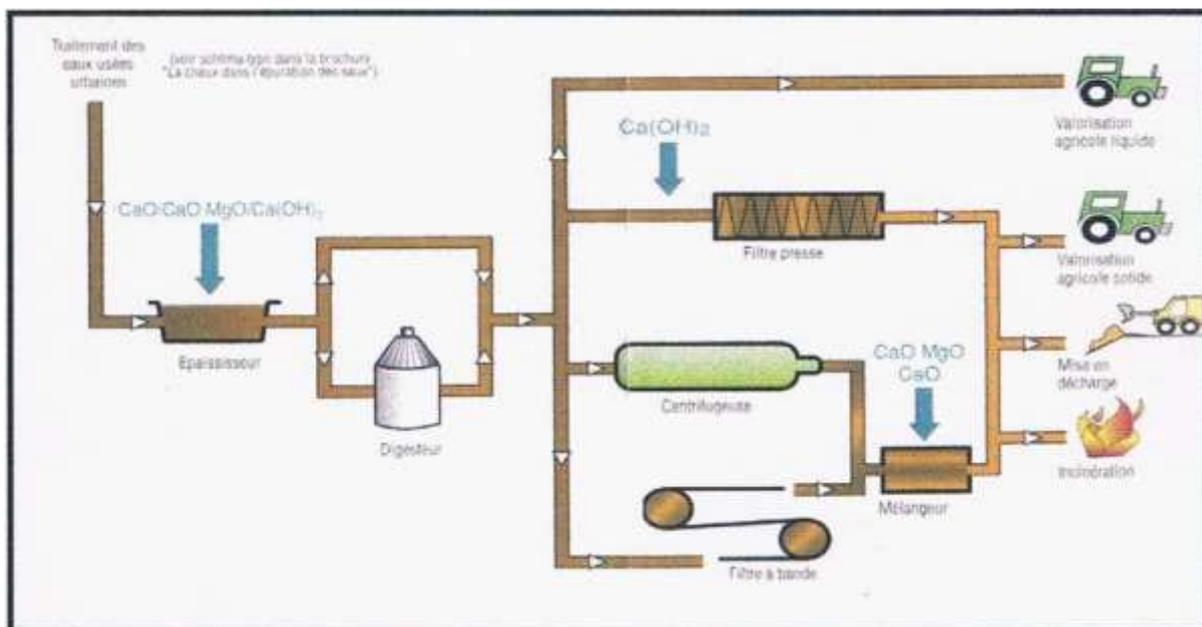


Fig.7 : Schéma-type du traitement des boues (Lhoist 3).

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique sur les chaux et leurs utilisations

L'exploitant d'une station d'épuration est confronté à la difficulté d'éliminer ces boues dans des conditions économiques acceptables, tout en répondant aux exigences de protection de l'environnement (Lhoist 3).

○ *Avant filtration :*

La coagulation des particules colloïdales, la taille des floccs et la quantité de matière sèche sont augmentées en conditionnant la boue liquide à la chaux. Ce procédé permet d'améliorer la capacité de filtrage de la boue et d'améliorer les performances des dispositifs de déshydratation.

Cette méthode est principalement utilisée avec des filtres-presses. L'incorporation de chaux permet aussi de supprimer les germes pathogènes en augmentant le pH et en bloquant les fermentations, ce qui restreint les odeurs.

○ *Après filtration :*

Grâce à la stabilisation à la chaux, il est possible d'améliorer la texture des boues résiduaire urbaines en augmentant la température et en établissant une liaison chimique. En outre, l'incorporation de la chaux, sous forme insoluble, assure la fixation des ions métalliques (métaux lourds), élimine les germes pathogènes en augmentant le pH et en empêchant les fermentations, ce qui restreint les odeurs (Fransolet et Genot, 1999).

Grâce au traitement à la chaux, les boues acquièrent une stabilité élevée dans le temps et une résistance aux influences extérieures. Ce point est essentiel pour le stockage de ces boues dans les décharges (Carmeuse 1, 2000).

3.10. Stabilisation des sols :

Est un mélange aux sols argileux, elle permet de les stabiliser et d'améliorer leur portance. La stabilisation des sols à la chaux est une technique très utilisée dans la construction de routes, de pistes d'atterrissage et d'infrastructures diverses. Elle permet d'améliorer la portance, la résistance à l'eau et la durabilité des sols, tout en facilitant leur mise en œuvre.

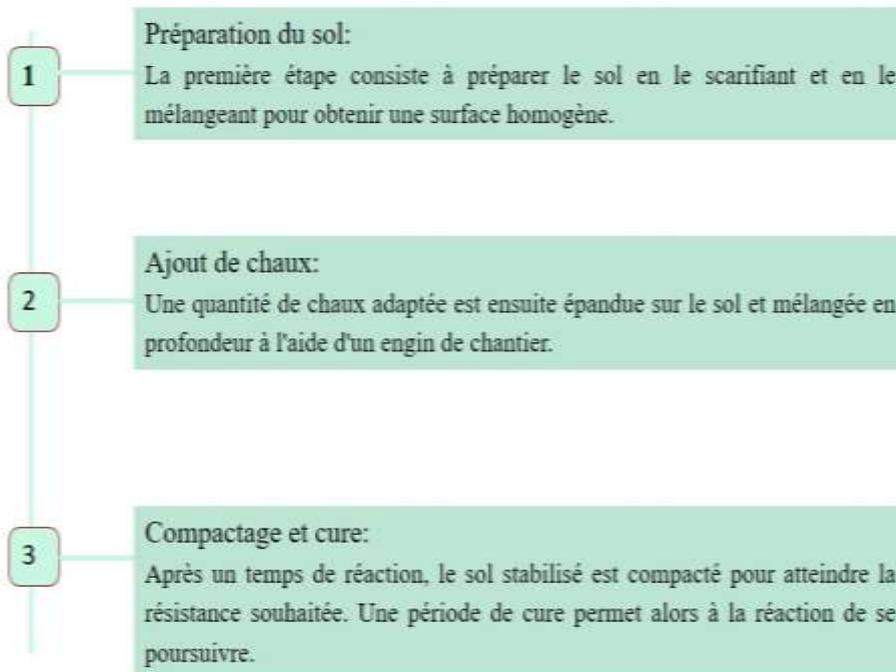


Fig.8 : Schéma-type de stabilisation des sols.

3.11. Peintures :

Ajoutée aux peintures et badigeons, elle apporte blancheur, opacité et résistance à l'humidité.

3.12. Mortiers et Enduits :

Utilisée comme liant dans les mortiers et enduits, elle confère douceur, plasticité et résistance.

4. Méthodes de production des chaux :

- ***Production traditionnelle :*** historiquement, la chaux était produite à partir de la cuisson de pierres calcaires dans des fours à haute température. Ce procédé ancestral, encore utilisé dans certaines régions, permet d'obtenir une chaux de grande qualité, mais nécessite une main-d'œuvre importante et une consommation élevée d'énergie.
- ***Production moderne :*** de nos jours, la production de chaux a été largement mécanisée et automatisée. Les fours à calcination sont remplacés par des installations industrielles hautement efficaces, utilisant des technologies avancées pour contrôler la température, la

durée de cuisson et les émissions. Cette évolution a permis d'accroître la productivité tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental.

- **Avancées technologiques** : les progrès technologiques dans la production de chaux ont également conduit à l'émergence de nouveaux types de chaux, telles que les chaux hydratées et les chaux hydrauliques, offrant des propriétés spécifiques adaptées à diverses applications de construction.

4.1. La calcination du carbure :

- *Transformation du carbure :*

La calcination du carbure de calcium (CaC_2) est un procédé industriel important qui permet d'obtenir de l'acétylène (C_2H_2), un gaz très utilisé dans de nombreuses applications. Ce processus consiste à chauffer le carbure de calcium à très haute température, généralement comprise entre $1800\text{ }^\circ\text{C}$ et $2200\text{ }^\circ\text{C}$, dans un four spécifiquement conçu à cet effet.

- *Réaction chimique :*

Lors de la calcination, le carbure de calcium se décompose pour former de l'acétylène gazeux et de la chaux vive (oxyde de calcium, CaO). La réaction chimique s'écrit ainsi :



Cette transformation libère de l'énergie sous forme de chaleur, qui est ensuite récupérée et valorisée pour d'autres usages industriels.

- *Purification et stockage :*

Une fois produit, l'acétylène doit être purifié pour éliminer les impuretés résiduelles, comme le phosphore ou le sulfure de calcium. Il est ensuite comprimé et stocké sous forme liquéfiée dans des bouteilles ou des réservoirs spéciaux, afin de faciliter son transport et sa distribution. Cette étape finale permet d'assurer la qualité et la sécurité du produit avant son utilisation dans différents secteurs industriels.

4.2. Le Processus de carbonation :

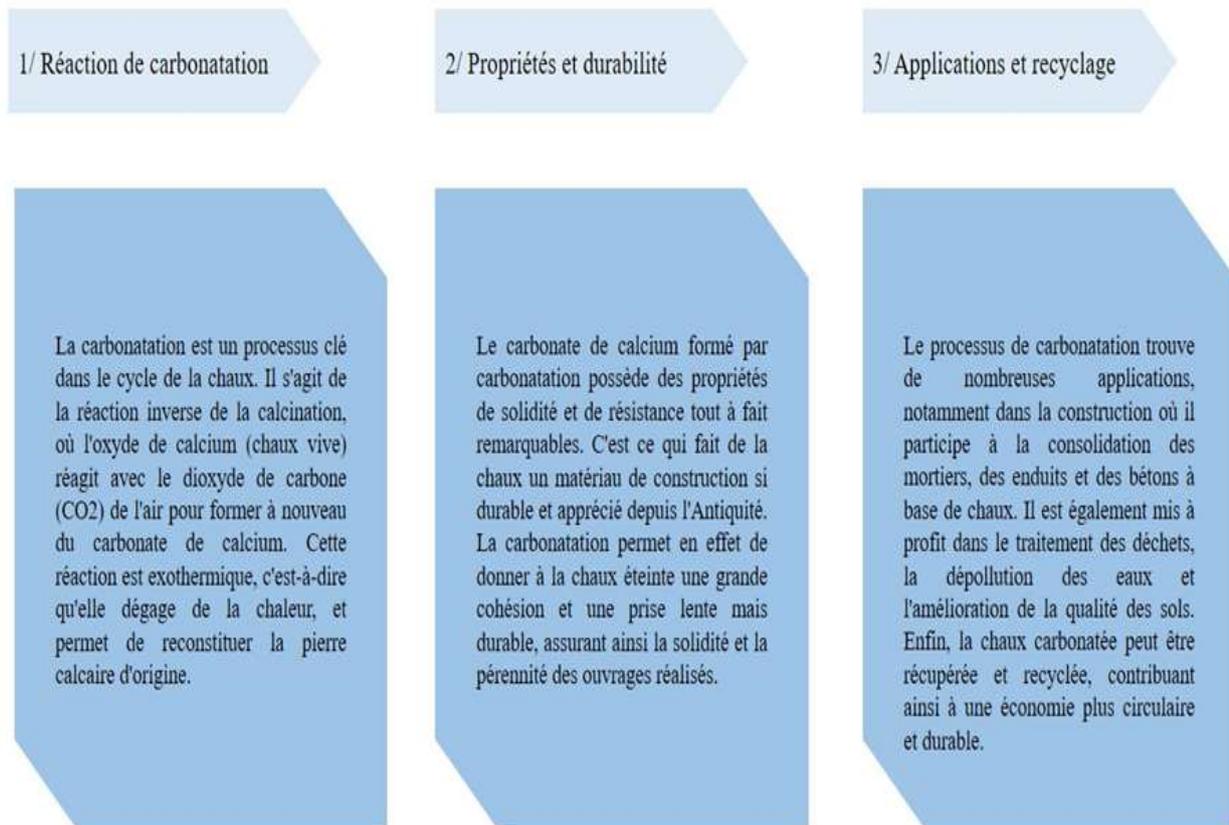


Fig.9 : Processus de carbonation.

5. Avantages et inconvénients :

5.1. Avantages :

La chaux présente de nombreux avantages qui expliquent son utilisation répandue dans de nombreux secteurs. Tout d'abord, c'est un matériau naturel, issu de la transformation de la pierre calcaire, qui offre une alternative écologique et durable aux liants synthétiques. De plus, la chaux possède de remarquables propriétés de résistance, de durabilité et d'adaptabilité, ce qui en fait un matériau de choix dans la construction de bâtiments solides et pérennes. Elle permet également de réguler l'humidité et la respiration des murs, contribuant ainsi au confort et à la santé des occupants. Enfin, la chaux a des vertus assainissantes et neutralisantes, la rendant précieuse pour le traitement des eaux usées ou la désinfection des sols.

5.2. Inconvénients :

Malgré ses nombreux avantages, la chaux présente également quelques inconvénients qui doivent être pris en compte. Tout d'abord, le processus de production de la chaux, à travers la cuisson de la pierre calcaire, est énergivore et émet des quantités non négligeables de CO₂, ce qui en fait un matériau peu écologique dans certains cas. De plus, la chaux est un produit légèrement basique, ce qui peut poser des problèmes de compatibilité avec certains matériaux acides. Son temps de prise et de durcissement peut également être plus long que celui des liants synthétiques, ce qui implique une mise en œuvre plus délicate. Enfin, l'utilisation de la chaux nécessite des précautions particulières en raison de sa nature caustique, qui peut s'avérer dangereuse pour la santé en cas de manipulation inadéquate.

6. Normes et réglementations :

La production et l'utilisation de la chaux sont encadrées par un ensemble de normes et de réglementations visant à garantir la qualité, la sécurité et le respect de l'environnement. Au niveau européen, la norme EN 459 définit les exigences techniques pour les différents types de chaux, telles que la composition chimique, les propriétés physiques, les conditions de stockage et de mise en œuvre. Cette norme harmonisée permet d'assurer une homogénéité des produits chauleux sur le marché continental.

Au niveau national, chaque pays dispose de réglementations spécifiques concernant la production, le transport, la manipulation et l'utilisation de la chaux. En France, par exemple, la chaux est classée comme une substance dangereuse et son utilisation est encadrée par le Code du travail et le Code de l'environnement. Des procédures strictes doivent être respectées pour la fabrication, l'étiquetage, le stockage et l'application de la chaux, afin de garantir la sécurité des travailleurs et la protection de l'environnement.

De plus, l'utilisation de la chaux dans certains secteurs, comme la construction, l'agriculture ou le traitement des eaux, est soumise à des réglementations spécifiques. Par exemple, les chaux utilisées dans la fabrication de mortiers et de bétons doivent respecter les normes en vigueur pour garantir la qualité et la durabilité des ouvrages. Dans le domaine agricole, les chaux épandues sur les sols doivent être conformes aux exigences de la réglementation sur les amendements calciques.

Afin de garantir la conformité des produits chauleux, des organismes de certification et de contrôle, comme le CSTB en France, effectuent des analyses et délivrent des agréments. Ces démarches de certification permettent de s'assurer que les chaux mises sur le marché répondent bien aux normes et réglementations en vigueur, offrant ainsi aux utilisateurs la garantie de produits de qualité.

7. Conclusion :

Les chaux sont des matériaux incontournables dans de nombreux secteurs, bénéficiant de propriétés uniques qui en font des solutions de choix pour des applications diverses. Leur utilisation, encadrée par une réglementation et des normes, fait l'objet de progrès constants afin d'optimiser leurs performances et leur mise en œuvre, tout en réduisant leur impact environnemental. Grâce à leur polyvalence, leur durabilité et leur coût relativement faible, les chaux continueront à jouer un rôle essentiel dans le développement de nombreuses activités industrielles et de construction, tout en s'adaptant aux enjeux de transition écologique.

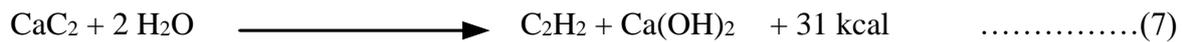
Chapitre 2

Procédé de production d'acétylène

1. Production d'acétylène :

L'acétylène, un gaz incolore, est un hydrocarbure non saturé de formule chimique C₂ H₂, qui est utilisé dans le domaine du soudage et de la coupe. Il est donc essentiel dans de nombreux secteurs industriels.

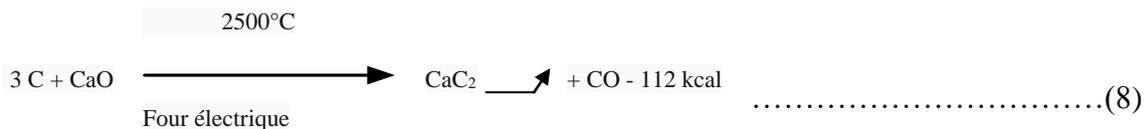
L'acétylène joue un rôle crucial dans de multiples processus de synthèse industrielle et est également utilisé comme combustible dans les chalumeaux oxyacétyléniques. On obtient ce gaz en utilisant des matières minérales courantes. Elle est généralement fabriquée à partir de carbure de calcium. Selon l'équation (7), il interagit avec l'eau ou la vapeur d'eau, ce qui produit une grande quantité de chaleur. La production d'acétylène brut est d'environ 300 litres par kilogramme de carbure de calcium. Il est recueilli dans des générateurs spécialement élaborés, avec une quantité excessive d'eau (au moins 10 litres par kilogramme) (Meinck et al., 1977 ; Ramasamy et al., 2002 ; Cardoso et al., 2009).



1.1. Préparation du carbure de calcium :

Le carbure de calcium est un produit obtenu par fusion de la chaux vive et du coke sous l'arc électrique.

D'après la réaction (8), la chaleur réduite par le coke génère du carbure de calcium et du monoxyde de carbone.



On obtient de la chaux vive en décomposant le calcaire dans des fours à chaux. Il est nécessaire que le calcaire utilisé soit à faible teneur en sulfure et en phosphore de calcium. Dans le carbure de calcium, ces impuretés sont ensuite présentes (Couturier, 1986 ; Desportes, 1972 ; Prévost, 1968). La production de carbure de calcium nécessite un taux de cendres minimal (inférieur à 7 %) dans le coke métallurgique afin de réduire au minimum la formation d'impuretés (Whittington, 1996).

Chapitre 02 : Procédé de production d'acétylène

Tableau 2 : Composition et caractéristiques du carbure de calcium (Linde Gas).

Formule chimique	CaC ₂
Poids moléculaire	64,10
Composition CaC ₂	78 / 82 %
Composition CaO	14 / 20 %
Densité réelle	2,2
Densité apparente	1,1 / 1,2
Teneur en hydrogène phosphoré	0,06 % en volume
Teneur en ferro-silicium	1 % en masse
Granulométrie	25 / 50 mm
Dégagement minimum d'acétylène	300 L/kg (à 700 mmHg et 15°C)

2. Description du procédé de production :

La production d'acétylène, avec un débit nominal de 100 m³/h, est composée de trois parties distinctes : le générateur, le processus de traitement de l'acétylène et le recyclage de l'eau en provenance du processus (Figure 10). (Gout, 1993 ; Perrotey, 1968 ; Guérin, 1968 ; Couturier, 1986 ; ENGI).

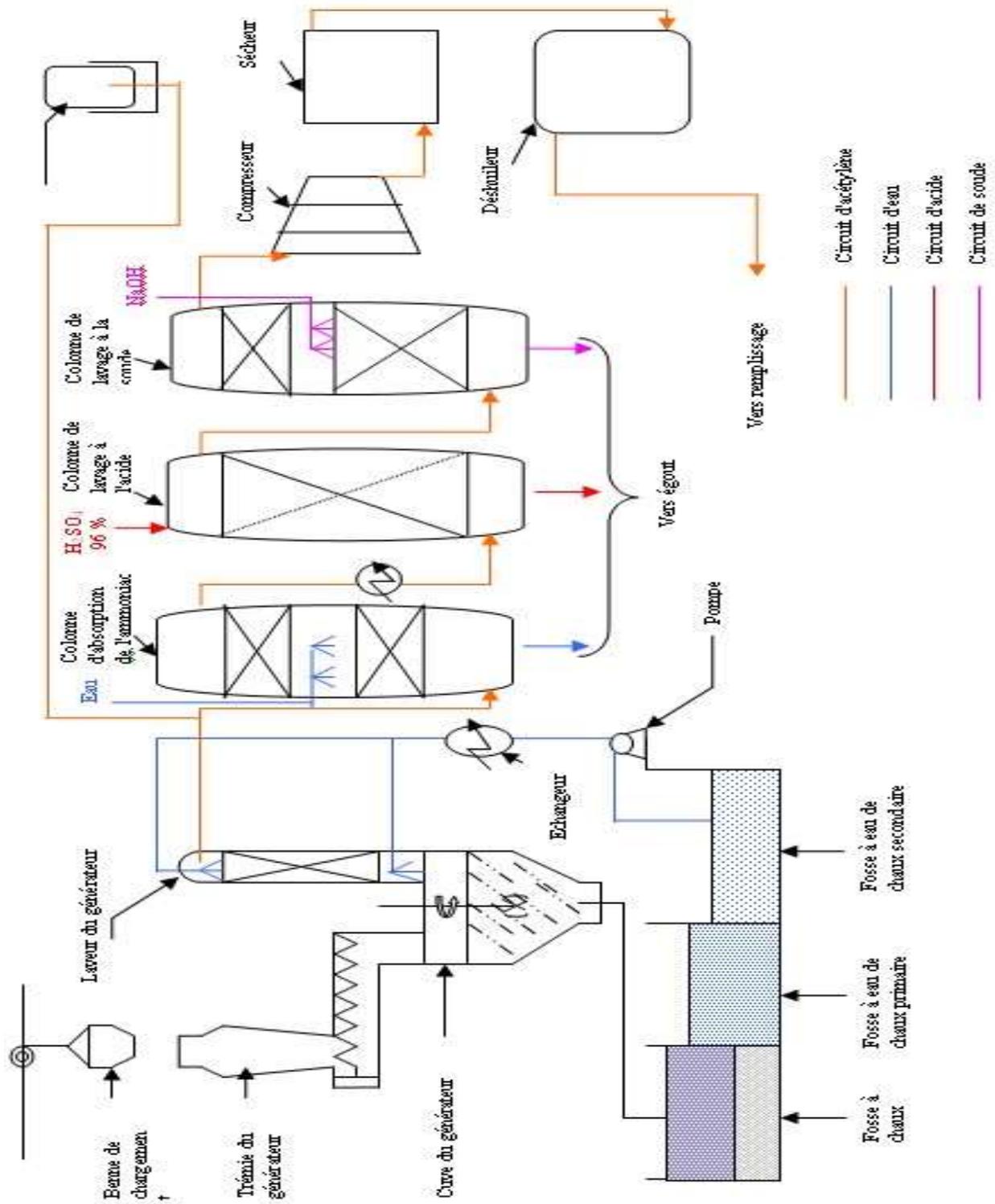


Fig.10 : Schéma du procédé de fabrication de l'acétylène (Ayache ,2013).

2.1. Générateur :

Le générateur intègre le carbure de calcium commercial de granulométrie 25/50 mm à l'aide d'une vis sans fin commandée par une transmission mécanique débrayable, elle-même commandée par un moteur électrique antidéflagrant.

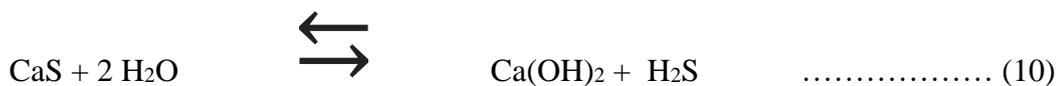
Les particules de carbure de calcium se déversent dans un panier rotatif plongeant dans l'eau de la cuve. Un agitateur est inclus dans l'entraînement mécanique du panier, qui brasse constamment l'eau de décomposition du carbure de calcium.

Le carbure de calcium se décompose en acétylène et en hydroxyde de calcium lorsqu'il est en contact avec l'eau. La partie de traitement reçoit l'acétylène qui se dégage à une température comprise entre 55 et 70°.

2.2. Traitement de l'acétylène :

2.2.1. Laveur du générateur :

Le laveur du générateur est utilisé pour éliminer les traces de chaux de l'acétylène et pour absorber l'ammoniac et l'hydrogène sulfuré produits par la cyanamide calcique et le soufre calcique présents dans le carbure de calcium, selon les réactions (9, 10), (Libidif, 1977) :



La décomposition du carbure de calcium produit de l'acétylène qui s'échappe par le laveur. Le contact entre l'acétylène et l'eau propre est amélioré grâce à l'utilisation d'anneaux Pall. Le débit de l'eau de lavage utilisée pour l'épuration primaire de l'acétylène est assuré par des gicleurs.

2.2.2. Gazomètre :

Après avoir quitté le laveur du générateur, l'acétylène est dirigé vers le gazomètre grâce à un intercepteur hydraulique qui a pour fonction de prévenir le retour de l'acétylène stocké dans le gazomètre, une sorte de clapet anti-retour.

Chapitre 02 : Procédé de production d'acétylène

2.2.3. Colonne d'absorption de l'ammoniac :

L'objectif de cette colonne est d'éliminer les résidus d'ammoniac qui pourraient rester après le lavage.

La colonne de lavage à l'eau est traversée de bas en haut par l'acétylène, au-delà du point de déviation du gazomètre, à travers un lit d'anneaux Pall (polyéthylène). Un gicleur, placé au-dessus du premier lit, émet l'eau. En haut de la colonne, un deuxième lit de garnissage est placé afin de retenir les gouttes d'eau entraînées par le gaz.

2.2.4. Refroidissement :

On refroidit l'acétylène à contre-courant en utilisant un débit d'eau froide. Cet échangeur thermique vise à obtenir l'acétylène à une température assez basse pour éviter la polymérisation lors du traitement à l'acide.

2.2.5. Colonne de lavage à l'acide :

L'acétylène, refroidi, est dirigé vers la colonne de lavage à l'acide, qu'il traverse de bas en haut à travers un lit garni de scelle de Berl.

Contrairement à une concentration d'acide sulfurique de 96-97%, l'objectif de ce lavage à l'acide est de supprimer l'hydrogène phosphoré (PH₃) présent dans l'acétylène, qui est causé par la présence de phosphore de calcium dans le carbure de calcium (réaction 11).



2.2.6. Colonne de lavage à la soude :

Cette colonne a pour objectif de neutraliser les composés acides (SO₂ et H₂S) produits lors du lavage à l'acide. Au sommet de la colonne de lavage à l'acide, on déplace l'acétylène vers la colonne de lavage à la soude. Il entre à l'intérieur du garnissage de la colonne où il est nettoyé avec une lessive de soude à 10 %. Un lit de garnissage est placé au sommet de la colonne afin de retenir les entraînements de lessive de soude dans l'acétylène.

2.2.7. Compression :

On comprime l'acétylène dans un compresseur à trois niveaux. L'objectif de cette compression est d'augmenter la pression de l'acétylène à 25 bars afin de faciliter son conditionnement en bouteilles.

Chapitre 02 : Procédé de production d'acétylène

2.2.8. Déshuileur-sécheur :

Une fois comprimé, l'acétylène se retrouve avec des traces d'huile de lubrification du compresseur et est saturé de vapeur d'eau à la pression et à la température requises.

Le filtre déshuileur est utilisé pour retenir les particules d'huile de lubrification, puis l'acétylène est déshumidifié par un sécheur à chlorure de calcium.

2.2.9. Remplissage :

Lorsque l'acétylène sort du sécheur, il est prêt à être rempli dans des bouteilles. Ensuite, il est dirigé vers les orifices de chargement pour être conditionné. L'emballage est effectué à une pression de 25 bars et à une température de 15°C. La capacité de production de l'installation est de 750 m³/jour.

2.3. Récupération de l'eau du lait de chaux :

L'hydroxyde de calcium qui provient du générateur, appelé lait de chaux, est purgé en permanence et stocké dans une fosse de décantation (Figure.11). L'eau de chaux issue d'un débordement de la fosse de décantation est stockée dans des fosses à eau de chaux (Walter et Ullmann, 1953 ; Scott et Wood, 2002 ; Ramasamy et al., 2002 ; Cardoso et al., 2009). Cette eau est réutilisée dans le procédé pour la production et le lavage de l'acétylène à un débit de 3,1 m³/h et une température de 30°C (Al-Khaja et al., 1992 ; ENGI).

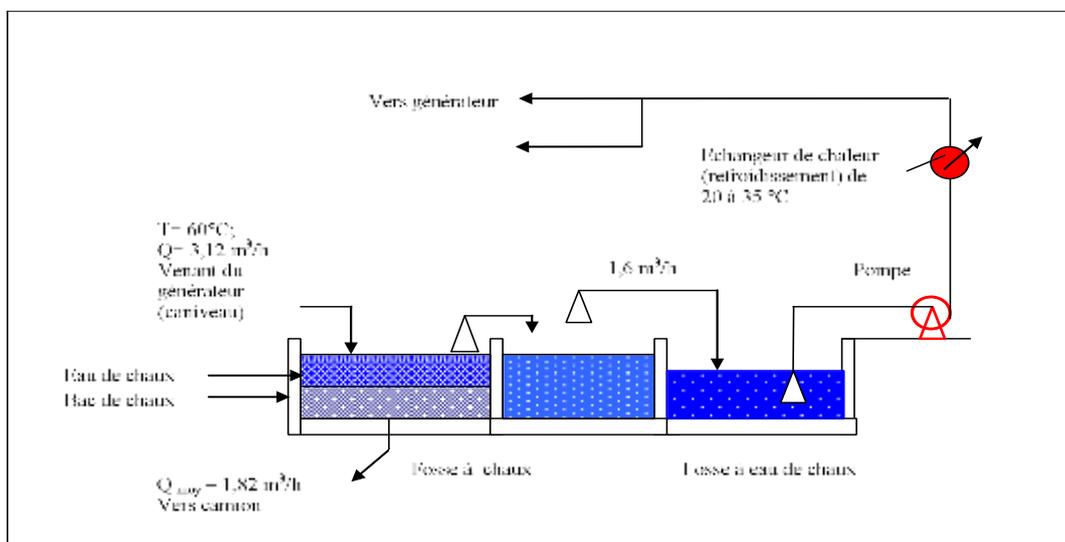


Fig.11 : Schéma de principe de récupération de l'eau de chaux (Linde Gas) (Ayache, 2013).

3. Conclusion :

La production d'acétylène reste un enjeu stratégique pour de nombreuse industrie. Les efforts d'innovation et de durabilité permettront de relever futurs et de consolider la place de l'acétylène dans le paysage industriel.

Chapitre 3

Matériaux et méthodes

Introduction :

Quelles que soient les finalités d'une étude géotechnique, il est généralement nécessaire d'identifier d'abord les sols concernés. Ils existent plusieurs types de sols (argileux, sableux, limoneux). Cette identification permet de guider les analyses géotechniques futures et surtout de réaliser une classification des matériaux qu'on rencontre. Il s'agit de déterminer les paramètres physicochimiques et mécaniques qui sont requis pour cette classification.

Dans ce chapitre, nous exposons l'origine et la localisation des échantillons prélevés, ainsi que les essais géotechniques réalisés sur les matériaux étudiés (marne et chaux).

1. Matériaux :

1.1. La chaux résiduaire :

Très préoccupé par la problématique de mettre en valeur la chaux résiduaire rejetée par l'usine de production d'acétylène (entreprise Linde Gas, située à El Hadjar, dans la wilaya d'Annaba), la valorisation de ce résidu chimique reste une tâche laborieuse et complexe. Ce résidu peut constituer un véritable problème en raison de sa valeur, de la quantité de déchets déversés dans la nature et de son impact néfaste sur l'environnement.



Fig.12 : L'eau de chaux déchargée dans l'environnement (Ayache ,2013).

La gestion responsable de la chaux résiduaire est primordiale pour préserver l'environnement. En appliquant des mesures de collecte, de traitement et de valorisation, il est possible de réduire significativement les impacts néfastes sur les sols, les eaux, la végétation et la faune.

1.2. La marne :

Les marnes sont des roches sédimentaires composées d'un mélange d'argile et de calcaire. Elles se caractérisent par une texture compacte, une couleur grisâtre et une **faible résistance mécanique**.



Fig.13 : Marne

1.2.1. Propriétés des sols marneux :

- **Teneur élevée en calcaire :** Les sols marneux contiennent une forte proportion de carbonate de calcium, ce qui leur confère des propriétés alcalines ;
- **Texture argileuse :** La présence d'argile leur donne une texture lourde et une capacité de rétention d'eau élevée ;
- **Drainage difficile :** Leur faible perméabilité peut entraîner des problèmes de drainage ;
- **Valorisation Limitée :** Leur utilisation reste encore limitée.

1.2.2. Formation et composition des sols marneux :

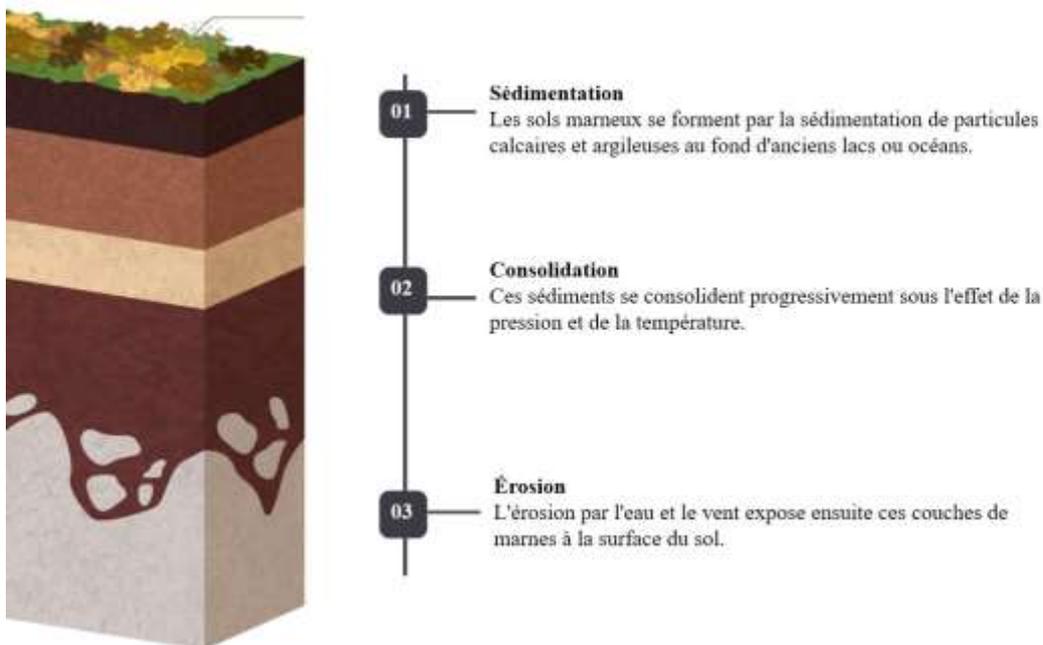


Fig.14 : Formation et composition des sols marneux.

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

1.2.3. Localisation des sols d'étude :

Le site de prélèvement à est situé à 10 km au sud du chef-lieu de la ville de Bordj Bou Arreridj, avec les coordonnées géographiques suivantes :

□ Latitude : 3984111.00 m N ; □ Longitude : 655439.00 m E.



Fig.15 : Site de prélèvement.

➤ *Mode de prélèvement :*

On a prélevé les échantillons à tester sur des déblais préalablement terrassés. Les blocs trouvés en amont, sont le résultat de fragmentation de la roche mère. Le matériau granuleux situé au pied de talus est le résultat de l'altération de ces blocs.

Il est nécessaire que la quantité de sol prélevée soit adéquate pour effectuer tous les essais de la phase expérimentale : l'estimation des besoins pour effectuer toutes les analyses prévues entraîne un prélèvement moyen de 200 kg. Ainsi, il a été transporté dans des sacs en plastique et préparé afin de réaliser les essais géotechniques d'identification et de caractérisation au laboratoire.

2. Méthodes :

2.1. Programme expérimental :

Nous avons suivi une procédure expérimentale pour l'identification des sols étudiés, qui repose principalement sur trois étapes principales montrés dans l'organigramme ci-dessous.

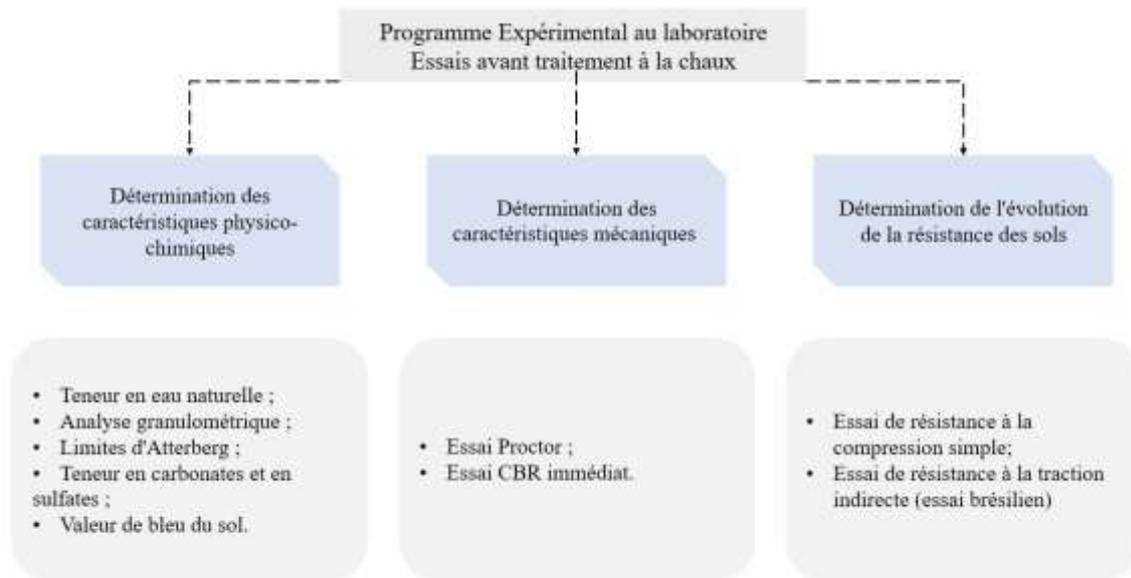


Fig.16 : Organigramme montrant le programme expérimental au laboratoire avant traitement à la chaux.

2.2. Caractérisation géotechnique des sols :

Dans cette étude, divers essais ont été réalisés. Le principe, le but et le mode opératoire de chaque essai est développé dans ce qui suit :

2.2.1. Teneur en eau (NF P 94-050) :

➤ Principe

L'étuvage entraîne la perte d'eau d'un échantillon de matériau. On mesure les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée en les pesants.

➤ Méthode de calcul

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$W (\%) = [(Ph-Ps)/Ps] \times 100$$

avec :

- W : teneur en eau naturelle en (%) ;
- Ph : poids du sol humide en (g) ;
- Ps : poids du sol sec en (g).

2.2.2. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :

➤ **Principe**

Consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant le granulat. Les résultats se présentent sous forme graphique appelée courbe granulométrique. C'est l'essai de base d'identification des matériaux granulaires ou sols permettant de définir l'utilisation future des matériaux.

➤ **But de l'essai**

- Établir des groupes de particules du matériau (l'échantillon) en fonction de leurs dimensions (présentées par masse) ;
- Créer une courbe granulométrique qui représente la masse totale du tamisât (en %) en fonction des diamètres des particules (en mm) ;
- Analyse précise et classification du sol.

➤ **Appareillages**



Fig.17 : Balance.



Fig.18 : Etuve.



Fig.19 : Les tamis.

- Une série de tamis dont les diamètres en (mm) sont : 31.5 - 20 - 16 - 12.5 - 10 - 6.3 - 5 - 3,15 - 2 - 1,6 - 1 - 0,80 et un fond ;
- Une Etuve ;
- Une balance.

Mode opératoire

➤ **Préparation de l'échantillon :**

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

Placer le matériau à tester à l'étuve à une température maximale de 105°C, pendant 24 heures. Après refroidissement, peser la prise d'essai. Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

➤ **Tamisage**

- Déposer le matériau sec dans le tamis. L'emboîtement des tamis forme cette colonne en les classant de haut en bas dans l'ordre des mailles décroissantes ;
- Agiter cette colonne manuellement ou mécaniquement, puis reprendre les tamis individuellement, en commençant par celui qui présente la plus grande ouverture en ajustant le fond et le couvercle. On agite chaque tamis en effectuant des coups réguliers sur la monture. En général, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne change pas de plus de 1 % en une minute de tamisage ;

➤ **Peser les refus**

- Évaluer la masse du tamis1, appelé « R1 », qui est la plus grande maille ;
- Toutes les tamis de la colonne sont utilisées de la même manière afin d'obtenir les masses des différents refus cumulés...

➤ **Expression des résultats**

Calcul :

Les masses des différents refus cumulés « Ri », sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec « Ms » et les pourcentages des tamisats correspondants sont égaux à :

$$100 - \sum (R_i/M) * 100$$

Résultats :

Les pourcentages des tamisats cumulés ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableaux (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe.

➤ **Tracé de la courbe granulométrique**

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats sur la feuille de papier semi-logarithmique.

- En abscisse : les dimensions des mailles, sur une échelle logarithmique ;
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

2.2.3. Limites D'Atterberg (NF P 94-051) :

➤ **Principe**

La réalisation de l'essai se déroule en deux étapes sur la fraction 0/400 µm du sol.

- Analyse de la quantité d'eau nécessaire pour que la rainure effectuée dans un sol placé dans une coupelle avec des caractéristiques spécifiques se referme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés (Limite de liquidité WL) ;
- Recherche de la quantité d'eau nécessaire pour causer la fissure d'un rouleau de sol, fabriqué manuellement avec des dimensions fixées (Limite de plasticité WP).

➤ **But de l'essai**

Les limites d'Atterberg sont des critères géotechniques utilisés pour déterminer l'état d'un sol en utilisant son indice de plasticité et de consistance.

L'épaisseur d'un sol fin dépend fortement de la quantité d'eau. Il est solide lorsqu'il est desséché, liquide lorsqu'il est détremé. Il y a un état intermédiaire appelé plastique entre ces deux états (Fig.20).

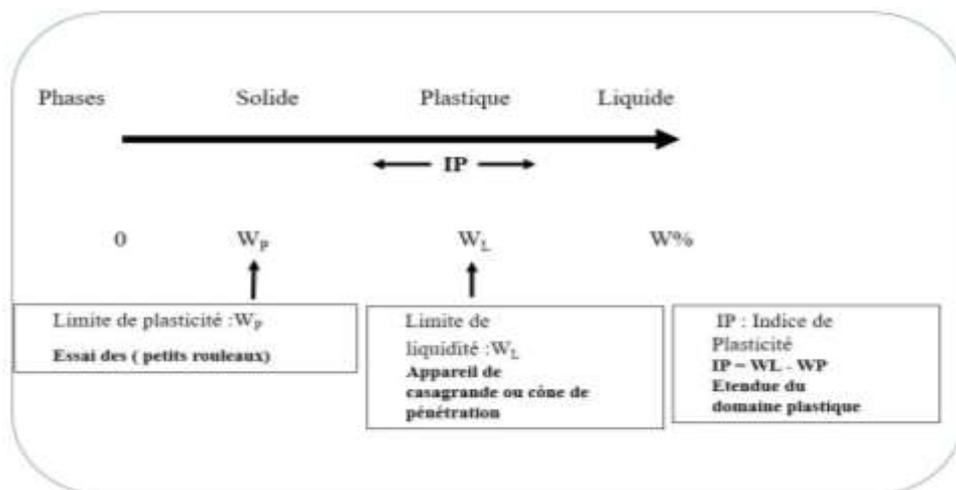


Fig.20 : Représentation des limites d'Atterberg

Indice de plasticité IP : Cet indice définit l'étendue du domaine plastique :

$$IP = W_L - W_p$$

○ **Appareillage et exécution de l'essai**

Pour la détermination de W_L :

✓ Préparation de l'échantillon :

- Tamis à mailles carrées de 0.4 mm d'ouverture ;
- Bac de manutention (30*20*8cm) ;
- Récipient ;
- Coupelle Casagrande ;
- Spatule ;
- Four (étuve) ;
- Balance de précision.

L'appareil de Casagrande (NF P 94-051) (Fig.21) est composé d'une coupelle standard (coupelle lisse pour la plupart des essais et coupelle rugueuse pour les échantillons sableux qui ont tendance à glisser sur la surface de la coupelle lors de chaque choc), fixée sur un support métallique avec une manivelle, le tout fixé sur un socle en bois dur. La coupelle peut être jetée d'une hauteur de 10 mm sur le socle grâce à l'ensemble, chaque choc provoquant la fermeture progressive de la rainure effectuée dans l'échantillon de sol jusqu'à sa fermeture pour une distance de 1 cm.



Fig.21 : Appareil de Casagrande et Outil à rainurer utilisés

✓ **Expression des résultats :**

La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique et la teneur en eau W , mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant. La limite

liquidité est la teneur en eau lue sur le graphique pour $N= 25$ coups. Elle s'exprime en pourcentage d'arrondi au nombre entier le plus proche.



Fig.22 : Exécution de la limite de liquidité WL.

- Détermination de la limite de plasticité W_p :

La limite de plasticité (W_p) d'un sol est la teneur en eau minimale à laquelle le sol conserve encore un comportement plastique. Ci-dessous le mode opératoire général pour sa détermination :

Procédure :

Prélèvement et pesée :

- À partir de la pâte préparée, former une boulette comme une noisette (environ 12 mm de diamètre) et en faire un cylindre en la roulant sur la plaque de marbre propre ; lisse et sèche. Ceci se fait à la main, ou en utilisant une plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde ;
- Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm. Cette teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test selon la procédure décrite lors de la détermination de WL. Le cylindre terminé doit avoir 10 de longueur ;

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

- Peser soigneusement l'échantillon humide (W_h).



Fig.23 : Préparation du rouleau pour la détermination de W_p

➤ **Séchage et pesée finale :**

- Placer l'échantillon dans un four à une température appropriée (souvent 105°C) jusqu'à dessiccation complète (poids constant) ;
- Une fois sec, laissé refroidir l'échantillon dans un dessiccateur et le peser à nouveau (W_s).

L'indice de plasticité IP :

Rappelons que :

$$I_p = W_L - W_p$$

Un sol qui présente un indice I_p élevé est extrêmement vulnérable aux conditions atmosphériques, car plus l'indice I_p est élevé, plus le gonflement de la terre par humidification et son retrait par dessiccation seront élevés.

2.2.4. Essai Proctor (NF P 94-093) :

L'essai Proctor est un test réalisé en laboratoire pour déterminer la relation entre la teneur en eau et la densité sèche d'un matériau granulaire, généralement un sol. Il existe deux types courants d'essai Proctor :

- Essai Proctor Normal ;
- Essai Proctor Modifié.

➤ **Le but :**

- Appliquer la procédure expérimentale pour réaliser les deux types d'essais ;

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

- Déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale du matériau testé ;
- Analyser les résultats et comprendre leur importance pour les applications de génie civil.

Tableau 3 : Conditions de chaque essai selon le moule retenu (NF P 94-093).

	Masse de la dame (kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage KJ/m³
Essai Proctor	Normal 2.490	30.50	25 (moule Proctor)	3	587
			55 (moule CBR)	3	533
	Modifié 4.540	45.70	25 (moule Proctor)	5	2680
			55 (moule CBR)	5	2435

➤ **Matériel :**

- Moule Proctor (taille normal ou modifiée selon l'essai) ;
- Dame Proctor (poids et diamètre adaptés au moule) ;
- Balance ;
- Échantillon de sol tamisé et séché (avec granulométrie adaptée au moule) ;
- Récipient à eau ;
- Bacs de pesée ;
- Règle métallique.

➤ **Protocole expérimental :**

Le protocole expérimental pour les essais Proctor normal et modifié est similaire, mais diffère par le nombre de coups de dame appliqués par couche de sol compactée.

➤ **Préparation de l'échantillon :**

- Sécher une quantité suffisante de sol à l'étuve à une température donnée (par exemple, 105°C) et le tamiser à la granulométrie requise pour le moule utilisé.

➤ **Détermination de la masse du moule vide :**

Peser soigneusement le moule vide et noter la valeur (M0).

➤ **Préparation du premier échantillon :**

- Humidifier une portion de l'échantillon sec pour obtenir une teneur en eau initiale ;
- Mélanger soigneusement pour obtenir une distribution homogène de l'humidité.

➤ **Moulage et compactage :**

- Introduire l'échantillon humide dans le moule et le répartir uniformément ;
- Compacter l'échantillon à l'aide de la dame Proctor en appliquant le nombre de coups spécifié par couche selon le type d'essai (normal ou modifié) ;
- Après le compactage, lisser la surface du sol à l'aide de la règle métallique ;
- Peser le moule avec l'échantillon compacté et noter la valeur (Mh) ;
- Prélever un petit échantillon du sol compacté pour déterminer sa teneur en eau ;
- Peser l'échantillon humide (Wh) ;
- Répéter les étapes 4 à 6 pour plusieurs teneurs en eau croissantes jusqu'à observer une diminution de la densité sèche.

➤ **Séchage des échantillons pour teneur en eau :**

Sécher les échantillons prélevés (Wh) dans une étuve à la température spécifiée jusqu'à poids constant (Ws).



Fig.24: Sol sec concassé.



Fig.25: Remplissage.



Fig.26: Remplissage par 3 couches.



Fig.27: préparation des échantillon pour la teneur en eau.

➤ **Expression des résultats :**

- Calculer la teneur en eau (w) pour chaque échantillon prélevé à l'aide de la formule :

$$W(\%) = [(Wh - Ws) / Ws] * 100$$

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

- Calculer la densité sèche (γ_d) du matériau compacté pour chaque teneur en eau en utilisant la formule :

$$\gamma_d = \gamma_h / (1 + w/100)$$

- V représente le volume du moule.
- Tracer un graphique avec la teneur en eau (w) en abscisse et la densité sèche (γ_d) en ordonnée.

2.2.5 Essai bleu de méthylène (NBN EN 933-9 (1998)) :

➤ **But de l'expérience :**

L'utilisation de l'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer de manière générale l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la quantité de bleu de méthylène qui peut s'adsorber sur la prise d'essai.

➤ **État de l'essai :**

En utilisant l'essai au bleu de méthylène, il est possible de mesurer la qualité d'un sol et de déterminer le type de sol qu'il renferme (sensibles à l'eau = gonflement).

La mesure de l'absorption des particules par des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène est effectuée lors de l'essai. L'absorption du bleu est contrôlée après chaque ajout en effectuant une tâche sur un papier filtre.

➤ **Procédure :**

- Prélever 100 g de sol sec en passant par un tamis de 5 mm ;
- Placer la prise d'essai dans un récipient contenant 200 ml d'eau déminéralisée ;
- Étendre la suspension en utilisant un agitateur (700 tr/min) pendant une durée de 5 minutes ;
- Incorporer 5 cm³ de bleu en utilisant le dispositif de mesure. Après une minute, effectuer le test de la tâche ;
- Refaire les mêmes étapes pour les autres exemplaires.

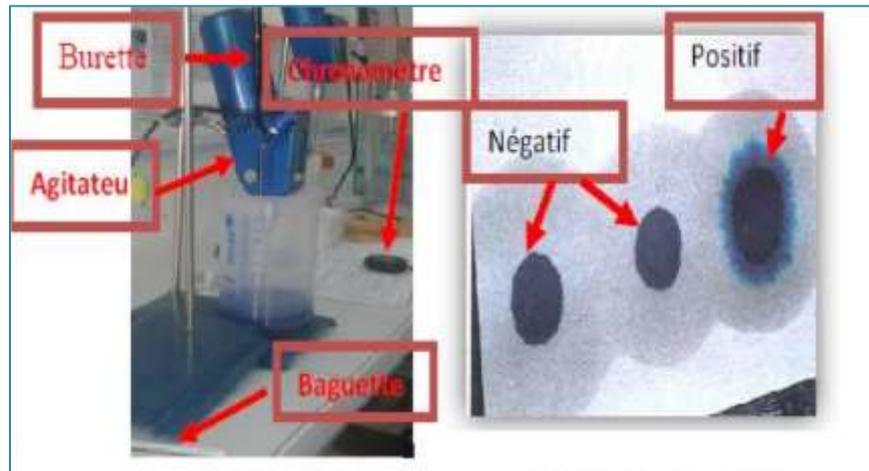


Fig.28 : Phases de déroulement de l'essai bleu de méthylène.

➤ **Le test à la tâche :**

Consiste à prélever une goutte de suspension à l'aide d'une baguette de verre et à la déposer sur le papier filtre.

Si la tache sur le papier filtre n'a pas d'auréole, le test est considéré comme négatif. Dans cette situation, incorporez 5 cm³ de bleu, laissez-le agiter pendant une minute et réessayez la tâche.

Il sera nécessaire de répéter cette opération autant de fois que nécessaire, tant que le test de la tâche sera négatif.

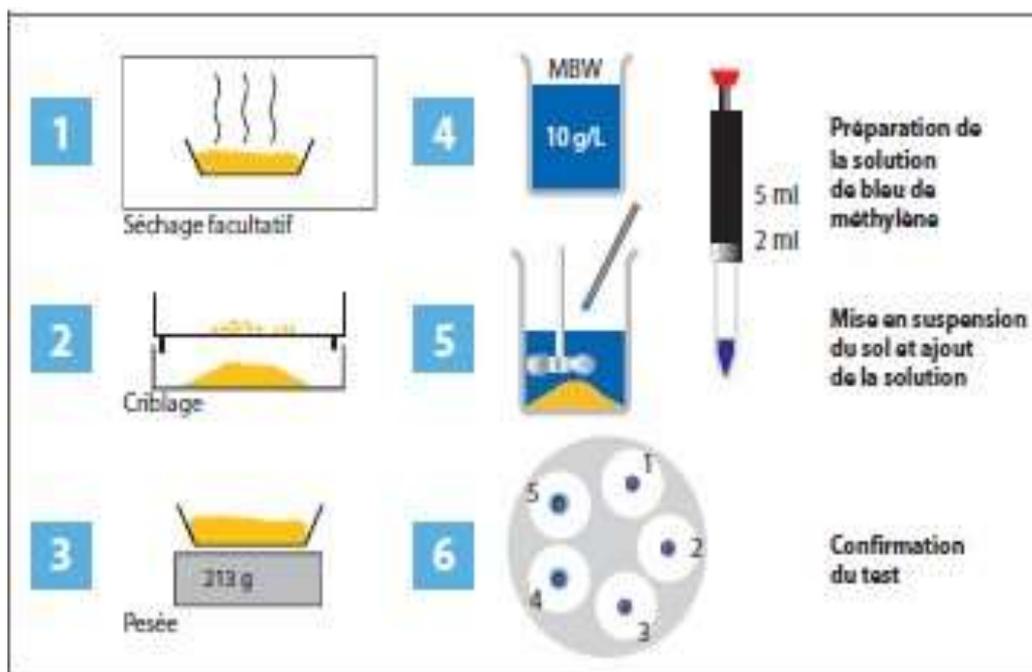


Fig.29 : Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène.

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

- Si la tache déposée sur le papier filtre forme une auréole bleu clair, le test est positif. Dans ce cas, procéder à 5 tests successifs de la tâche à raison d'un test par minute sans ajouter de bleu. Si les 5 tests s'avèrent positifs, l'essai est terminé ;
- Si le 2^{ème}, 3^{ème} ou 4^{ème} test de la tache devient négatif, ajouter 5 cm³ et reprendre les tests de la tâche de départ jusqu'à ce que les 5 tests de la tache soient positifs.



Fig.30 : Papiers filtres montrant l'auréole Bleu clair pour la marne.

2.3. Caractérisation mécanique :

2.3.1. Essai de la résistance à la compression simple (NF P 98-232-1) :

➤ Principe :

Les échantillons sont placés jusqu'à leur épuisement dans une machine destinée à l'essai de compression. On enregistre la charge maximale atteinte et on calcule la résistance à la compression.

➤ Préparation du matériau :

Le matériau séché à l'étuve à 105°C à une fraction de 6.3 mm, Il est imbibé à une teneur en eau égale à la teneur en eau de l'optimum Proctor Normal exécuté sur la fraction 6,3 mm.

La masse d'échantillon pour une éprouvette est en fonction du volume de moule et la densité sèche à l'optimum.

$$M = \gamma_{dopm} \times V$$

➤ Matériels :

- ✓ Moule (diamètre = 5cm / hauteur = 10cm / volume = 196.34 cm³) ;
- ✓ Dispositif de compression / Extracteur ;
- ✓ Dispositif d'écrasement (Presse CBR).



Fig.31 : Moule.



Fig.32 : Dispositif de compression



Fig.33 : Dispositif d'écrasement

➤ **Compactage de l'éprouvette :**

Une fois que le moule est rempli, il est nécessaire de positionner l'embase supérieure et de retirer les deux parties d'espacement du moule. Ensuite, il est nécessaire de placer l'ensemble embase inférieure-moule-rehausse-embase supérieure dans le dispositif de compression.

➤ **Extraction de l'éprouvette :**

- Après avoir enlevé les deux embases et la rehausse, on introduit un piston dans le moule et on place l'ensemble piston – moule dans l'extracteur.
- A l'aide d'un bras en poussant le piston placé à l'intérieur du moule, l'éprouvette est extraite facilement.
- Après extraction on vérifie les dimensions de l'éprouvette ; diamètre et hauteur.

➤ **Conservation des échantillons :**

Les échantillons confectionnés sont stockés pendant les périodes de conservation suivantes : 3h, 2, 7,14, 28 jours.



Fig.34 : Compactage.



Fig.35 : Ecrasement de l'éprouvette.



Fig.36 : Conservation.

➤ **Ecrasement de L'éprouvette :**

On place l'éprouvette entre les deux plateaux de la presse CBR, puis on la presse jusqu'à ce qu'elle se brise.



Fig.37 : Écrasement de l'éprouvette.

➤ **Expression des résultats :**

La résistance correspond à la limite du rapport entre une force et la surface sur laquelle elle exerce son action. Par conséquent, on obtient les valeurs de résistance en répartissant les forces (charges) exercées par le piston de la presse CBR sur la surface de l'éprouvette à écraser.

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{RC = F/S}$$

Avec :

- **RC** : Résistance à la compression simple, exprimée en (bar) ;
- **F** : Force maximale à la rupture, exprimée en (kgf) ;
- **S** : Surface de l'éprouvette, exprimée en (cm²).

2.3.2. Essai de résistance à la traction indirecte (Essai Brésilien) (NF P 98-232-3) :

➤ Principe :

Une éprouvette en forme de cylindre est soumise à un effort de compression sur toute sa génératrice, appliqué sur une zone étroite. En raison des contraintes de traction orthogonales qui en découlent, l'éprouvette se brise par traction indirecte.

○ Matériels :

Presse CBR ; Bandes métalliques : Un matériau solide dont la longueur dépasse celle de la ligne de contact avec l'éprouvette.

- En préparant et en positionnant l'éprouvette, il est nécessaire de la placer horizontalement sur la machine d'essais de manière centrée, afin que la surface de l'éprouvette soit en contact avec une bande métallique.

Il est important de veiller à ce que le plateau supérieur soit parallèle au plateau inférieur pendant l'application de la force.



Fig.38 : Procédure d'application de la charge durant l'essai brésilien.

➤ **Expression des résultats :**

La résistance à la traction indirecte est calculée par la formule suivante :

$$R_{tb} = \frac{2f}{\pi h d}$$

avec :

- **R_{tb}** : Résistance à la traction indirecte, exprimée en (MPa) ;
- **F** : Force maximale à la rupture, exprimée en (kN) ;
- **H** : La longueur de l'éprouvette, exprimée en (m) ;
- **D** : Le diamètre de l'éprouvette, exprimé en (m).

2.4. Caractérisation Chimique :

2.4.1 Détermination de la teneur en carbonates (méthode du calcimètre) (NF P 94-048) :

L'objectif de cet essai est d'évaluer la quantité de carbonate de calcium en utilisant la méthode volumétrique.

➤ **Principe :**

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO₂) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.

➤ **Appareillage et exécution de l'essai :**

Le Calcimètre :

Les composants d'un Calcimètre sont répertoriés comme suit :

- Un flacon avec ampoule de niveau ;
- Burette graduée ;
- Robinet ;
- Flacon à réaction ;
- Tube à essai ;
- Matériau soumis à essai ;
- Gaz dégagé par la réaction ;
- Tubulure souple reliant 1 et 2 ;
- Liquide (avec colorant éventuel).

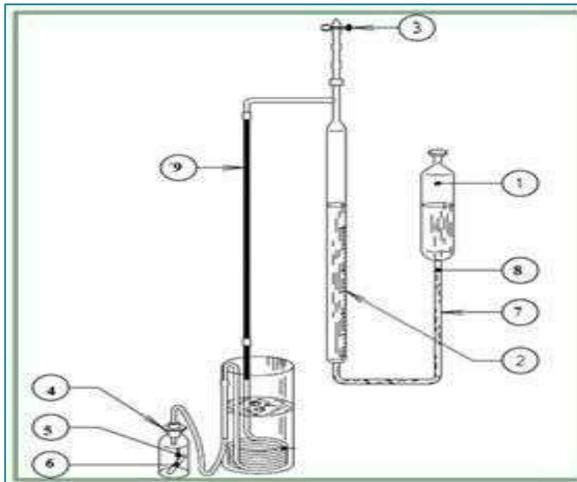


Fig.39 : Schéma d'un Calcimètre.



Fig.40 : Calcimètre Dietrich-Fruhlingutilisé.

➤ **Matériel et Produits :**

- Une balance dont les portées minimale et maximale sont compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1 000 de la valeur m mesurée ;
- Un thermomètre avec lequel le mesurage est effectué avec une exactitude de 1°C, La plage d'utilisation du thermomètre est de 10 °c à 35 °c ;
- Une pipette pour l'acide chlorhydrique ;
- Matériel courant de laboratoire ;

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

- Une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 105° de classe d'exactitude c ;
- Eau distillée, à la température du local d'essai ;
- Acide chlorhydrique concentré de densité 1,19 (qualité analytique reconnue) ;
- Poudre de carbonate de calcium pur pour analyse (si nécessaire).

➤ **Méthode :**

L'expérience est réalisée sur deux prises d'essai.

Conditionnement de l'échantillon :

Une fois le matériau séché, il est broyé dans le mortier pour obtenir une poudre qui passe entièrement à un tamis d'ouverture de maille inférieure ou égale à 200 μm . Le matériau est continué à sécher à 105 °C jusqu'à ce que sa masse ne dépasse pas 2/1 000 entre deux pesées successives, à intervalles d'une heure.

En l'absence de données sur la concentration supposée de carbonate, sélectionner des échantillons d'essai d'une masse d'environ 0,5 g.

➤ **Déroulement de l'essai :**

- Après avoir pesé (de masse m) dans le flacon (4) propre et sec, il est nécessaire d'introduire la prise d'essai ;
- Ajouter de l'eau distillée ou déminéralisée dans le flacon (1) et la burette (2) ;
- Faire correspondre le niveau inférieur du flacon (1) au zéro situé en haut de la burette (2) ;
- Placer un tube à essai (5) dans le flacon (4) (ou, en fonction du matériel utilisé, dans la tubulure latérale du flacon (7) avec une pipette à bout recourbé) ;
- Déverrouiller le robinet (3). Décrocher le bouchon du flacon à réaction (4). Il est relié par (9) à la partie supérieure de la burette (2) par une tubulure qui le traverse ;
- Clôturer le robinet (3). Placer l'acide chlorhydrique dans le réservoir du flacon en contact (4). Le tube d'essai contient le matériau. En déplaçant le flacon (1), le niveau dans le flacon (1) augmente à mesure que le dégagement gazeux exerce une pression sur l'eau de la burette (2). Prendre le flacon (4) en agitant jusqu'à ce que le niveau d'eau ne change plus ;
- Après avoir atteint l'équilibre de la température (environ 5 minutes), placer les niveaux (1) et (2) dans le même plan horizontal et lire le volume V_b correspondant sur la burette (2). Effectuer une observation de la température de la salle d'essai et, si nécessaire, de la pression atmosphérique ;

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

○ Veiller à ce que le gaz collecté dans la burette ne renferme pas d'hydrogène sulfuré (H₂S) avec une odeur très distinctive. Cela suggérerait que la prise d'essai était remplie de sulfures.

Dans le cas contraire, il serait nécessaire de refaire un essai en ajoutant quelques centimètres cubes d'acétate de calcium à 5 % à l'acide chlorhydrique pour neutraliser les gaz parasites qui s'ajoutaient à ceux du dioxyde de carbone.



Fig.41 : Déroulement de l'essai (Nour El Houda, L., & Imene, S. 2017).

➤ **Détermination de la teneur en carbonate :**

Calcul le volume de CO₂ dégagé :

On fait basculer le tube contenant l'acide et on mesure le volume de CO₂ dégagé.

Avec :



$$\text{Teneur en carbonate (\%)} = \left(\frac{V_e(\text{CO}_2)}{V_c(\text{CO}_2)} \right) 100$$

V_e (CO₂) : volume de CO₂ dégagé par l'échantillon ;

V_c (CO₂) : volume de CO₂ dégagé par le carbonate de calcium pur.

2.4.2. Détermination de la teneur en sulfates :

Détermination du pourcentage de la fraction sulfaté dans les sols et matériaux.

➤ **Principe :**

Chapitre 03 : Matériaux et méthodes

Détermination du pourcentage de la fraction sulfaté dans les sols et matériaux.

➤ **Mode opératoire :**

L'essai se déroule comme suit :

- Après avoir pesé et tamisé 1g d'échantillon, on le place dans un bécher et on ajoute 100ml d'HCL pur. Une fois la solution ajoutée, on la place sur la plaque chauffante pour une ébullition douce pendant 10 minutes ;
- La solution doit être filtrée dans une fiole de 250 ml jaugée au-dessus d'un entonnoir contenant un filtre de 125 mm (pour une filtration moyenne). Lavage à l'eau distillée tiède jusqu'à ce que l'acide et l'échantillon soient éliminés ;
- Sécher les filtres à l'étuve à une température de 60°C jusqu'à ce qu'ils soient à poids constant, puis les peser individuellement ;
- Le filtrat collecté dans la fiole jaugée est ajouté précisément à 250 ml d'eau distillée, puis on le mélange en agitant plusieurs fois ;
- Il est nécessaire de prélever 100 ml du filtrat précédent et de le porter à ébullition douce. Ensuite, il faut ajouter 35 cc à 40 cc de chlorure de baryum à 10 %, également porté à ébullition, dans les 100 ml du filtrat précédent. Laisser bouillir pendant 20 minutes et laisser reposer une nuit à température ambiante.



Fig.42 : Déroulement de l'essai.

Calcul :

On a utilisé les formules suivantes :

$$\% \text{ Gypse} = \{(P_2 - P_1) + (f_{t1} - f_{t2})\} \cdot 100$$

avec,

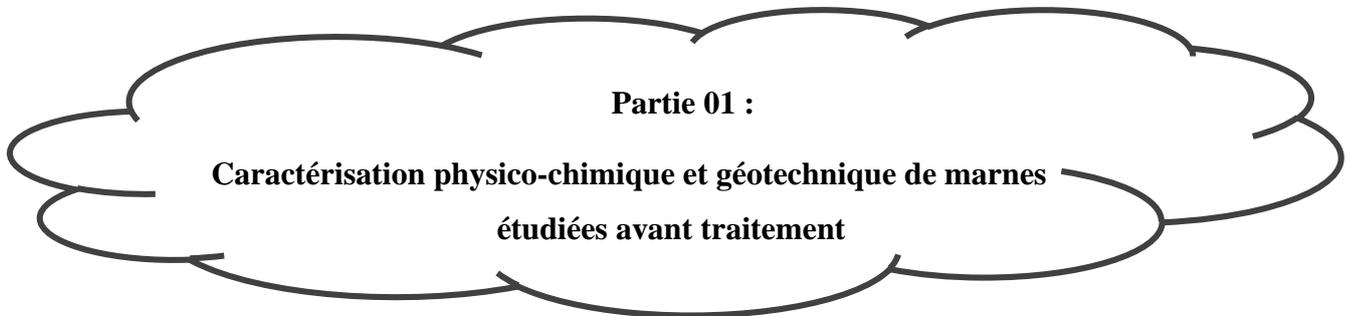
- p_1 : pois du papier filtre vide ;
- p_2 : pois du filtre + échantillon sec ;
- F_{t1} : filtre témoin ;
- F_{t2} : filtre témoin après séchage.

Chapitre 4

Résultats et discussions des essais avant
et après traitement à la chaux résiduaire

Introduction :

Ce chapitre présente les résultats de l'ensemble des essais effectués, sur les marnes non traitée et traitée à la chaux résiduaire, au laboratoire de département de génie civil –université de Bordj Bou Arreridj.



1. Essais géotechniques :

Les essais d'identification du sol permettent de classer le sol et de calculer les différents paramètres, ce qui nécessite le prélèvement d'échantillons représentatifs pour le reconnaître.

L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols :

- ✓ Teneur en eau naturelle.
- ✓ Granulométrie.
- ✓ Limites d'Atterberg.
- ✓ Compactage (Proctor normal).
- ✓ Valeur de bleu méthylène.

1.1. Teneur en eau (NF P 94-050) :

Les résultats de cet essai sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Teneur en eau naturel de la marne étudié.

Provenance	La marne	
Echantillon	Ech : 1	Ech : 2
Poids totale humide	515	504
Poids totale sec	501	482
Poids de la tare	220	180
Poids du sol sec	281	302
Poids de l'eau	14	22
Teneur en eau (%)	4.98	4.56
Moyenne W (%)	≈ 5	

Interprétation des résultats :

D'après les informations fournies, la teneur en eau de 5% pour la marne non traitée est extrêmement faible.

Considération importante :

- Teneur en eau critique : La marne devient généralement friable et cassante en dessous d'une certaine teneur en eau critique, souvent autour de 10%. Les échantillons prélevés sur terrain ont été trouvés dans une situation friable à cause de leurs teneurs en eau inférieures à 10% (voisines de 5)

1.2. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :

Nous avons réalisé une analyse granulométrique par voie sèche, l'analyse est effectuée par tamisage selon la norme NF P 94-056.

La courbe de la figure 43 représente la répartition dimensionnelle des grains entre 80 µm et 31.5mm.

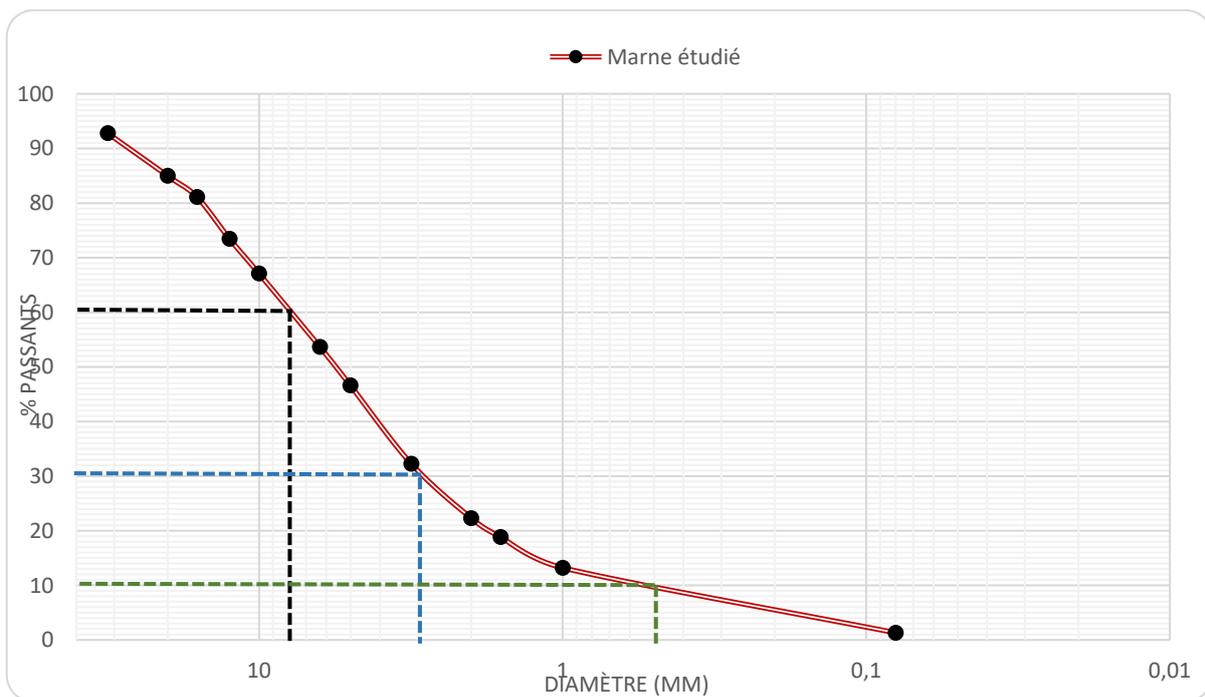


Fig.43 : Courbe granulométrique de la marne étudiée

Chapitre 04 : Résultats et discussions

- O Détermination graphique des diamètres D10, D30, et D60 :

D10, D30 et D60 indiquent les diamètres des éléments correspondant respectivement à 10%, 30% et 60% de tamisât. Les diamètres des mailles des tamis indiquent respectivement le passage de 10%, 30% et 60% du matériau de départ.

- O Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité) :

L'utilisation du coefficient de HAZEN permet de déterminer si la granulométrie est étalée ou serrée. La relation suivante définit ce coefficient :

$$C_U = D_{60} / D_{10}$$

On a : **D60 = 8mm ;** **D10 = 0.5mm** **Donc :** **Cu = 16**

C_U : Le coefficient de HAZEN, d'après Caquot et Kerisel, 1956.

- $C_U < 3$: La granulométrie est serrée (uniforme) ;
- $C_U > 3$: La granulométrie est étalée.

- O Coefficient de courbure :

Le coefficient de courbure vient en complément de coefficient de HAZEN. Il est donné par l'équation suivante :

$$C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \cdot D_{60}$$

On a : **D60 = 8mm;** **D30 = 3mm;** **D10 = 0.5mm**

Donc : **Cc = 2,25**

C_c : le coefficient de courbure :

- $1 < C_c < 3$: La granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie) ;
- $C_c < 1$ et $C_c > 3$: La granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

Les résultats des coefficients d'uniformité et de courbure sont présentés dans le tableau 5.

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Tableau 5 : Valeurs des coefficients C_u et C_c .

Le coefficient	Valeur
C_u : coefficient de HAZEN	16
C_c : coefficient de courbure	2.25

Interprétations des résultats :

- Le coefficient d'uniformité (Hazen) : ($C_u > 3$) montre clairement que la courbe est étalée ;
- Le coefficient de courbure est dans les limites de spécification ($1 < C_c < 3$). Matériau bien gradué (la continuité est bien répartie).

Ainsi, il est possible d'en déduire que le matériau présente une courbe étalée et homogène. Ainsi, selon l'aspect de la courbe de la figure 43, on peut clairement observer que la courbe granulométrique de la marne est étalée.

1.3. Résultats des Limites d'Atterberg (NF P 94-05120) :

L'essai a pour objet de déterminer les états de consistance d'un sol, cet essai effectué selon la norme (NF P 94-05120), les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Limites d'Atterberg de la marne étudiée.

Limites	Valeur
Limite de liquidité : WL	40.7
Limite de plasticité : WP	24,42
Indice de plasticité : Ip (%)	13.3

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Les limites sont des valeurs conventionnelles qui indiquent :

- La limite de liquidité (W_L) correspond à la transformation d'un sol de l'état plastique à l'état liquide. L'évaluation est réalisée en utilisant la méthode de Casagrande (NFP 94 051).
- La détermination de la limite de plasticité (W_P) : La détermination du passage d'un sol de l'état solide à l'état plastique est effectuée en utilisant la méthode du rouleau (NF P 94 051). Les valeurs de ces limites sont des niveaux d'eau, exprimés en pourcentage du poids du matériau.

La différence **entre W_L et W_P** définit l'étendue du domaine plastique : c'est l'indice de plasticité (I_p).

La classification des sols en fonction de l'indice de plasticité est présentée dans le tableau ci-dessous, conformément au guide des terrassements routiers (GTR).

Tableau 7 : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (GTR, 2000).

Indice de plasticité	Nature de sol
$IP \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < IP \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < IP \leq 40$	Argileux
$IP > 40$	Très argileux

Interprétations des résultats :

D'après les résultats obtenus (tableau 6), l'indice de plasticité est de 13.3. Il semble que le matériau est moyennement argileux soit classé selon l'indice de plasticité entre les valeurs : **$12 < IP \leq 25$** .

Le matériau fait partie de la catégorie des matériaux argileux à faible plasticité.

Estimation du gonflement des sols :

Ainsi et comme le montre le tableau 8, de cette manière, Snethen (1980) (cité par Derriche et al., 1998) propose une classification qui évalue le potentiel de gonflement en fonction de l'indice de plasticité IP . D'après cette valeur de ce dernier, il est possible d'évaluer la possibilité de gonflement des sols. En général, les sols gonflants présentent un indice de plasticité extrêmement élevé. Notre matériau présente un indice de plasticité $I_p=13.3$, ce qui permis de le classer dans la classe des sols peu gonflants (tableau 8).

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Tableau 8 : Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980).

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

1.3. Résultats d'essai Proctor (NF P 94-093) :

L'objectif de l'essai Proctor (NF P 94-093) est d'établir la quantité optimale d'eau (WOPN) et la densité sèche maximale (γ_{OPN}) afin d'obtenir un compactage optimal et une capacité portante maximale.

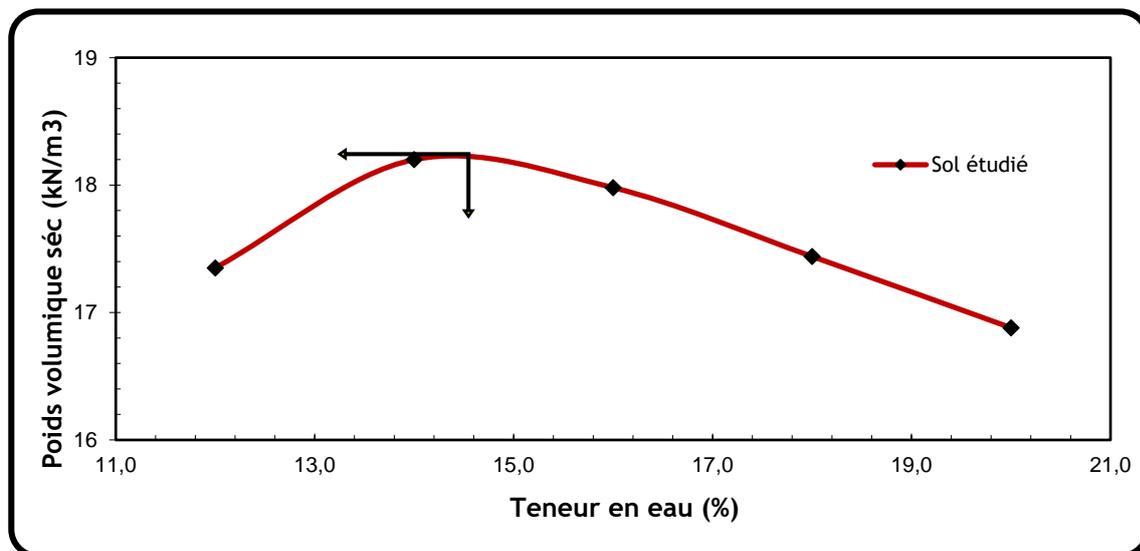


Fig. 44 : Courbe Proctor normal de la marne étudiée.

✓ Essai Proctor Normal :

Les caractéristiques de l'optimum ($\gamma_{d_{opm}}$ et W_{opm}) de l'essai Proctor normale sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Tableau 9 : Caractéristiques de l'optimum Proctor normale de la marne étudiée.

Caractéristiques de l'optimum	Valeur
Teneur en eau optimale $W_{optn}(\%)$	14.5
Densité sèche maximale $\gamma_{dopm} (kN/m^3)$	18.2

1.5. Valeur de bleu de méthylène (VBS) (NF P 94-068) :

Pour déterminer la valeur de bleu de méthylène à la tâche des fines, nous avons suivi la norme NF P 94-068. Cet essai est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à saturation. En d'autres termes, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par les surfaces des particules de sols.

Le résultat de VBS est 4.16. D'après ce résultat l'auréole bleu clair apparaisse le volume atteint 125 ml de bleu pour la marne (Fig.45).



Fig.45 : Papiers filtres montrant l'auréole bleu clair pour la marne étudiée

1.6. Essais de portance :

Deux essais de portance ont été réalisés : CBR après immersion et indice portant immédiat. Les résultats sont présentés ci-dessous :

- Indice CBR après immersion (NF P 94-078)

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Les essais CBR réalisés après immersion (CBR imm), permettent d'apprécier la portance des matériaux étudiés dans les plus mauvaises conditions hygrométriques. La figure 46, montre l'évolution des forces en fonction des enfoncements. Les résultats obtenus, montrent qu'il s'agit de matériau à bonne portance avec un indice CBR imm important.

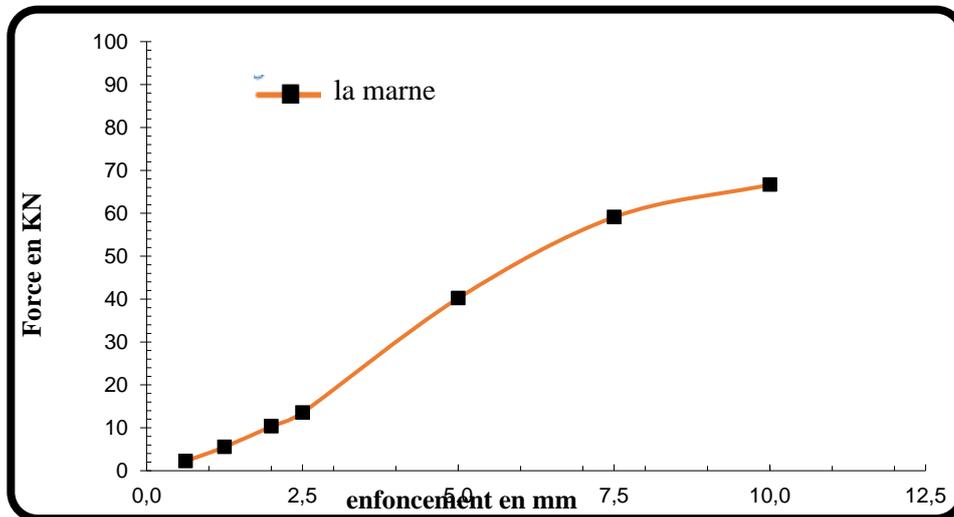


Fig.46 : Résultat de l'essai CBR après immersion.

- Indice portant immédiat (NF P 94-078) :

On peut évaluer la sensibilité à l'eau en observant la pente de la courbe W / CBR immédiat. À mesure que la pente de cette courbe augmente, le sol devient plus vulnérable à l'eau. D'après la figure 47, il semble que le sol étudié est plus ou moins sensible à l'eau vue la forte pente de la courbe présentée dans cette figure.

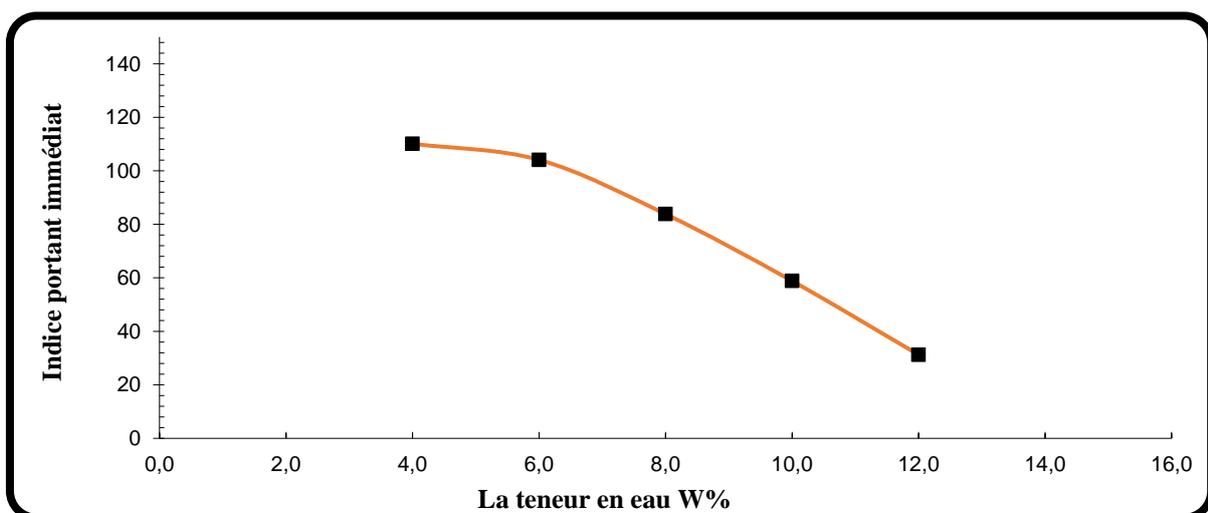


Fig.47 : Courbe de l'indice portant immédiat du sol étudié.

1.7. Essai de fragmentabilité et essai de dégradabilité :

- Essai de fragmentabilité (NF P 94-066) :

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité d/D donnée soumis à un pilonnage conventionnel. L'échantillon doit être représentatif de fraction 10/20mm. Les résultats sont indiqués dans la figure suivante :

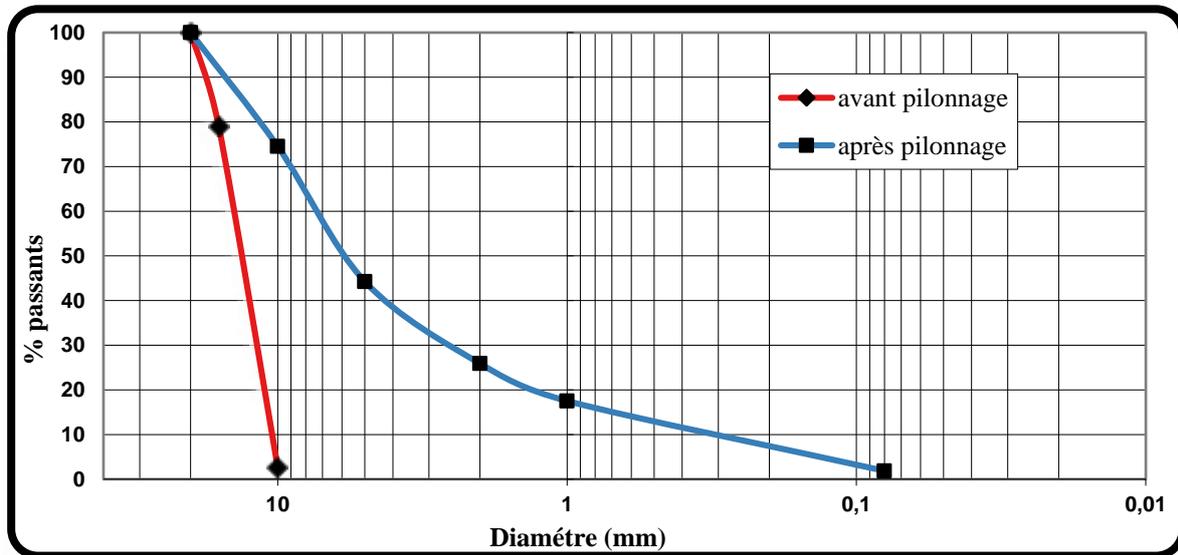


Fig.48 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage de l'échantillon.

Suivant les spécifications du GTR ($FR < 7$: roche peu fragmentable, $FR > 7$: roche fragmentable), les échantillons testés peuvent être considérés comme fragmentables ($FR = 36.66$)

- Essai de dégradabilité (NF P 94-067) :

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité d/D donnée soumis à quatre cycles imbibition-séchage conventionnels.

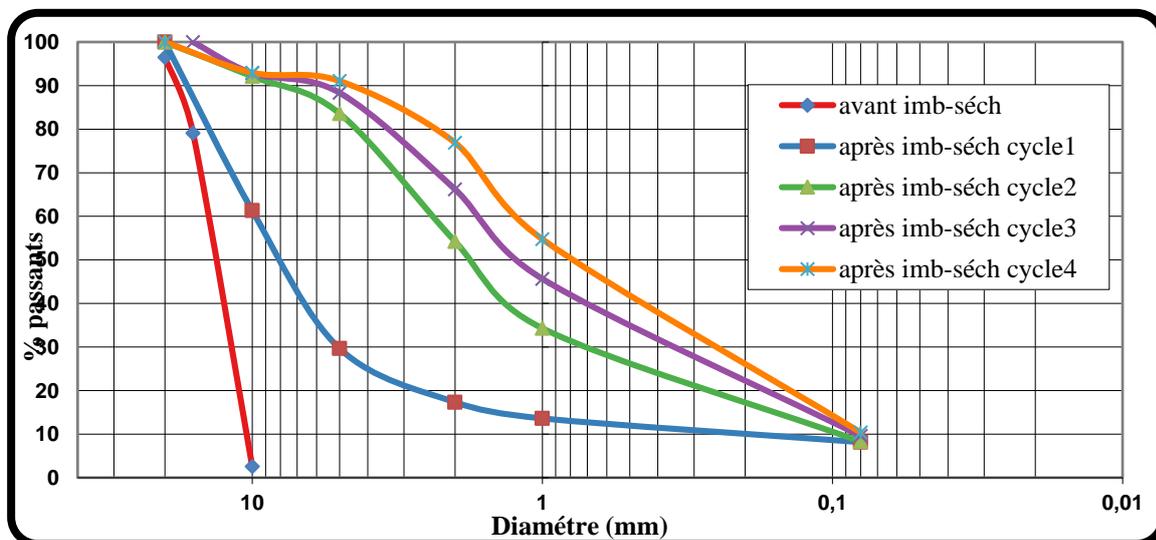


Fig.49 : Courbes des différents cycles imbibition-séchage de la marne étudiée.

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Suivant les spécifications du GTR (DG<5 : matériaux rocheux peu dégradables, 5 < DG < 20 : matériaux rocheux moyennement dégradables, DG>20 : matériaux rocheux très dégradables), l'échantillon testé a une valeur de 137.5. Donc on peut le considéré comme matériau très dégradable.

1.8. Classification géotechnique des sols étudiée :

La norme NF-P 11-300 (septembre 1992) et le GTR 2000 (Guide des Terrassements Routiers) offrent une classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

Ils offrent la possibilité de déterminer la catégorie du matériau en se basant sur les résultats de diverses analyses. La typologie initiale des matériaux, en fonction de leur granulométrie, de leur argilosité et de leur nature pétrographique.

Les propriétés physiques étudiées ont été sélectionnées en fonction du domaine de valorisation prévu. Les conclusions tirées sont résumées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Récapitulatif des valeurs des différents essais géotechniques effectués sur les marnes non traitées.

Caractéristiques géotechniques	Marne étudiée
D_{max} (mm)	31,5
Passant à 80µm (%)	1
Passant à 2mm (%)	31
V.B.S	4,16
IP	13.3
γ_d opn (kN/m ³) et Wopn (%)	1,86 et 12.8
W naturel %	7,47
IPI (opm)	83,80
Classe GTR	B4

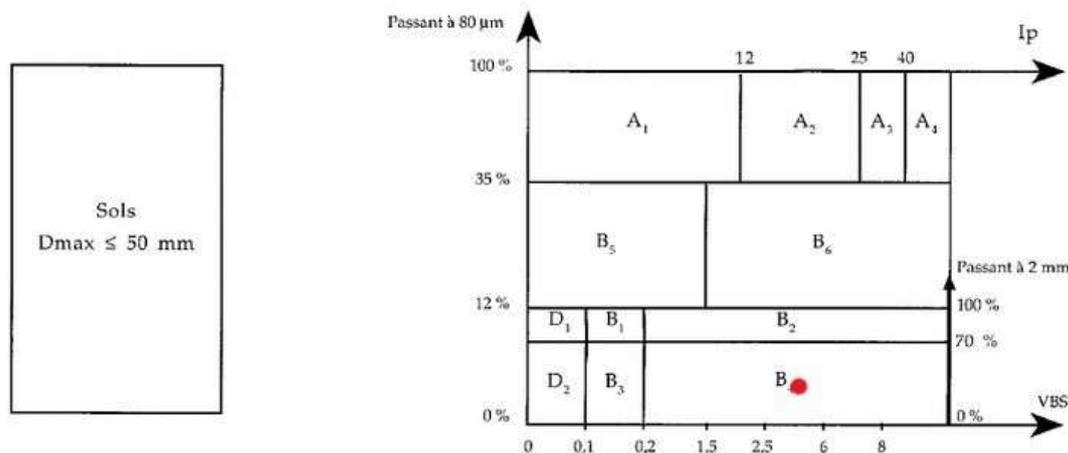


Fig.50 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant (GTR).

A la lumière des résultats trouvés et pour les éléments inférieurs à 50 mm, indice de plasticité = 13.3%, VBS = 4,16, passant à 0.08 mm = 1% et 2 mm = 31 %), la marne étudiée peut être classée dans la classe **B4** selon la classification du GTR.

2. Essais chimiques :

2.1. Analyse granulométrique du lait de chaux :

Les caractéristiques rhéologiques et la réactivité du lait de chaux sont influencées par la granulométrie des particules. En général, la granulométrie est exprimée par une taille moyenne des particules. En règle générale, le lait de chaux est composé de particules mesurant entre 50 et 100 μm (Ortegat, 1993 ; Bechoux, 1999). En ce qui concerne la viscosité, il est clair que plus les particules sont fines, plus le lait de chaux sera visqueux.

Deux propriétés granulométriques essentielles d'un matériau sont le diamètre effectif, DE, et le coefficient d'uniformité, CU. Le diamètre réel correspond à la taille des mailles du tamis qui permettent à 10% de la masse de l'échantillon de passer. Par conséquent, si l'on considère que 90% (en quantité) des grains de l'échantillon ont un diamètre supérieur à DE. Le rapport entre le diamètre qui permet à 60% des particules de passer et celui qui en permet à 10% est appelé coefficient d'uniformité.

Pour réaliser l'expérience, un tamisage a été effectué, au sien du laboratoire de département de Génie Civil, à l'aide d'un tamis mécanique vibrant comprenant 6 tamis de différentes ouvertures variant de 63 à 315 μm et cela pendant 20 minutes. La quantité requise pour le test et de 500 g (lait de chaux séché à 110°C pendant 48 heures et broyé à l'aide d'un mortier en porcelaine). Le tamisage s'opère sur des tamis normalisés. A la fin de l'opération, on pèse le solide recueilli sur chaque tamis. Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Caractéristiques granulométriques de la chaux résiduaire de Linde Gas. (Ayache, 2013)

Ouverture du tamis en μm	% non cumulés en masse des tamisât	% cumulé de bas vers le haut
<63	3,32	3,32
63-80	8,03	11,35
80-100	27,04	38,39
100-125	22,87	61,26
125-200	15,28	76,54
200-315	13,57	90,11
>315	9,89	100

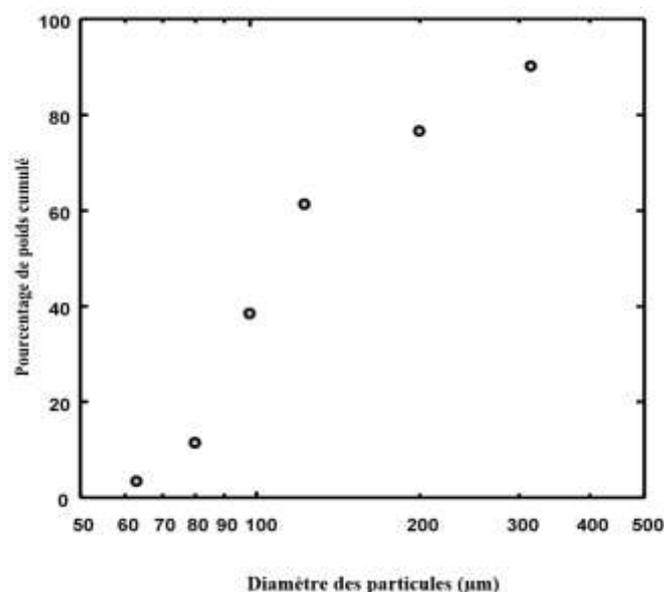


Fig. 51 : Répartition granulométrique de la chaux résiduaire. (Ayache, 2013)

On trace, en coordonnées semi-logarithmiques, la courbe présentée sur la Figure 52. À partir de cette figure, on peut calculer le diamètre effectif et le coefficient d'uniformité de la chaux ($D_E = 75 \mu\text{m}$ et $C_U = 2,1$).

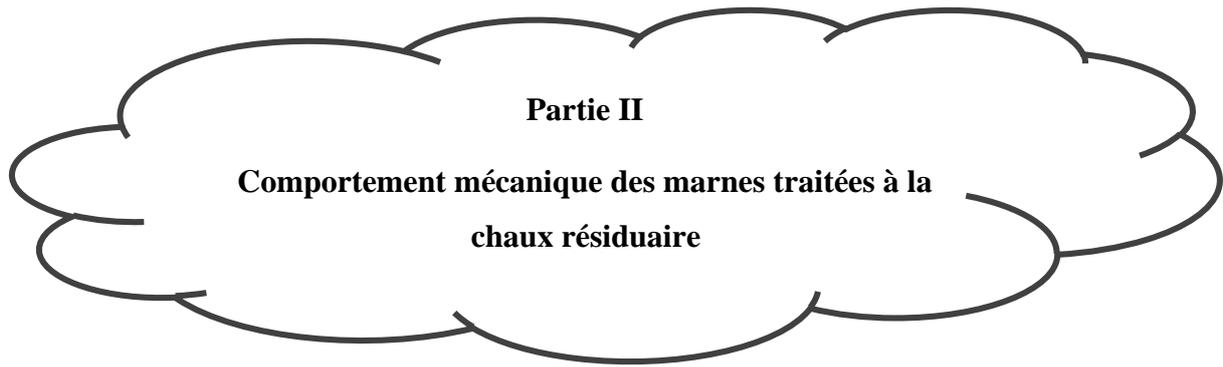
La tendance centrale de la distribution granulométrique peut être définie par le grain médian. Il correspond au diamètre lu en abscisse sur la courbe cumulative, en regard de l'ordonnée 50% des fréquences pondérales cumulées. C'est donc le grain tel que 50% en poids du matériau étudié est plus gros et 50 % plus petit. Dans notre cas, la valeur moyenne de la taille des particules est de $118\mu\text{m}$.

2.2. Caractérisation chimique du lait de chaux :

L'analyse de la poudre de chaux résiduaire de Linde Gas a été effectuée au laboratoire Central de SIDER. La composition de ce produit est présentée dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Composition de la chaux résiduaire de Linde Gas. (Ayache, 2013)

CaO %	SiO ₂ %	SO ₃ %	MgO %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CO ₂ résiduel %	C %	Perte au feu 1000°C %
67,03	2,06	1,12	1	2,14	2,40	1,28	0,65	24,32



Partie II
**Comportement mécanique des marnes traitées à la
chaux résiduaire**

1. Les caractéristiques de résistance de compression simple et de traction indirecte

La performance mécanique des matériaux étudiés est essentielle pour garantir un bon fonctionnement de la chaussée. Les tests d'écrasement des éprouvettes cylindriques sont effectués pour évaluer ces propriétés, que ce soit en compression simple ou en traction indirecte.

Les tests mécaniques sont réalisés sur des échantillons conservés pour les durées de conservation suivantes : 3h, 2j, 7j, 14j et 28 j

Dosage en liants

L'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisée pour les dosages en liants suivants : 4% - 6% - 8% et 10%. Ces dosages sont les plus couramment utilisés dans le traitement des mélanges sol-chaux (NF EN 14227-1 et NF P 98-116).

Références de compactage

La confection des éprouvettes pour les essais de résistance à la compression simple et résistance à la traction indirecte se fait en exploitant les valeurs (γ_{dOPN} , W_{OPN}) de l'essai Proctor normal.

Confection des éprouvettes

Les tests sont réalisés en utilisant les valeurs (γ_{dopn} , W_{opn}) de l'essai Proctor Normal réalisé sur la fraction 0/6.3 mm. Le volume de la prise d'essai et la densité sèche de l'optimum Proctor Normal (γ_{dopn}) déterminent la masse de la prise d'essai. Les essais mécaniques ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et de 10 cm de longueur. Le processus de fabrication de ces échantillons est expliqué dans le chapitre 3.

1.1 Résultats de l'essai de résistance à la compression simple

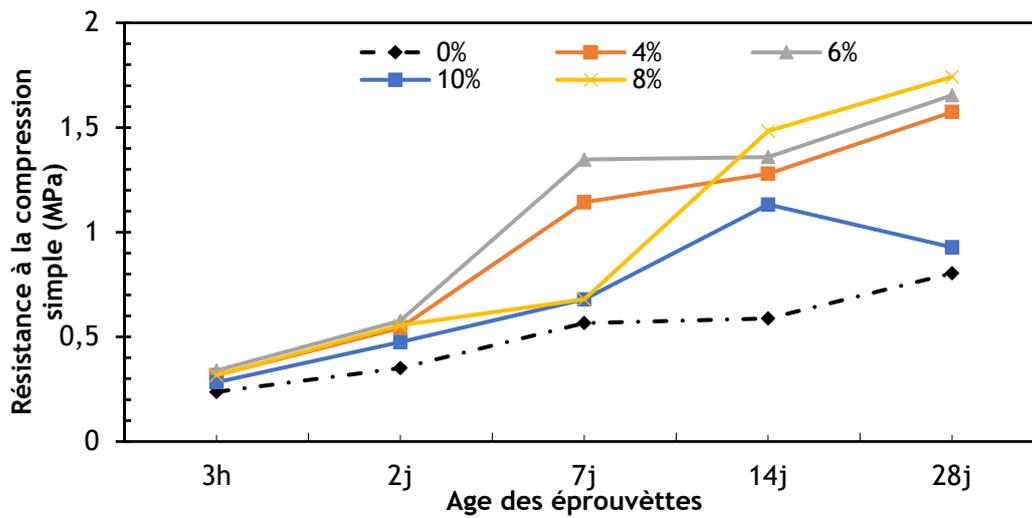


Fig.52 : Évolution de R_c en fonction du temps pour la marne traitée à la chaux résiduaire.

En général, la résistance de tous les mélanges de sol-chaux résiduaire augmente considérablement pendant les premiers jours (figure 52), puis atteint le pic entre 14 et 28 jours. La résistance à la compression simple de la marne pour un dosage en chaux résiduaire de 8 % est supérieure comparativement aux autres dosages. Pour un même dosage (exemple 8%), il y a une montée en résistance (R_c). Cette montée est importante de 3 heures à 14 jours, et peu importante de 14 jours à 28 jours, c-à-d que la grande partie du durcissement a été faite entre 3 heures et 14 jours. Cette Différenciation revient au pouvoir hydraulique de la chaux résiduaire qui est grand. Pour le cas des dosages de 4% 6% et 10% on a constaté la même remarque que celle du dosage de 8%.

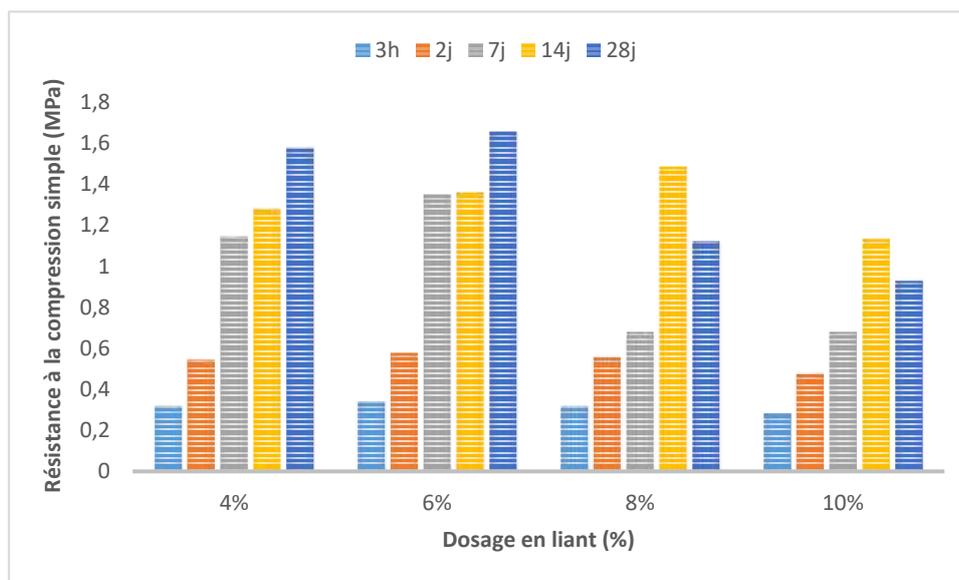


Fig.53 : Histogramme de la résistance à la compression simple de la marne traité à la chaux en fonction du dosage.

Chapitre 04 : Résultats et discussions

D'après l'histogramme de la figure 53 on peut constater qu'il y a une évolution de la résistance (R_c) en fonction de dosage pour le cas de la marne étudiée. On note aussi la chute de la résistance (R_c) pour le cas de dosage en chaux égale à 10%, ceci est presque pour toutes les durées de conservation. Cette constatation est peut être expliquée par le fait que la quantité en liant (10%) est excessive pour avoir des bons valeurs en R_c .

1.2 Résultats de l'essai de résistance à la traction indirecte

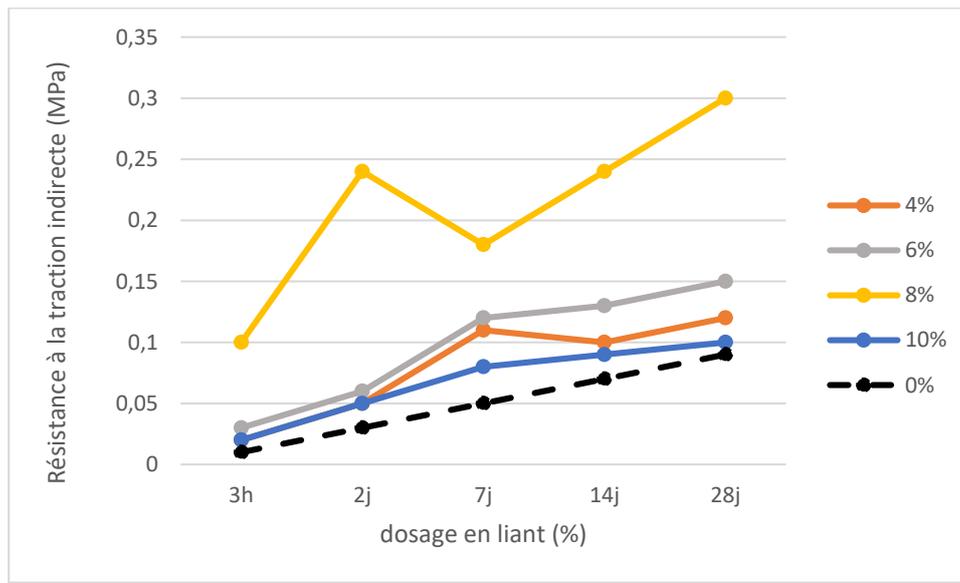


Fig.54 : Évolution de R_{th} en fonction du temps pour la marne traitée à la chaux résiduaire.

L'examen de l'évolution des résistances à la traction indirecte de la marne traité à 4%, 6%, 8% et 10% de chaux résiduaire (figure 54) permet de constater qu'il y a une grande analogie de cette évolution avec celle des résistances à la compression simple. La résistance à la traction indirecte de la marne traitée avec 8% de chaux résiduaire est distinguée comparativement aux autres dosages.

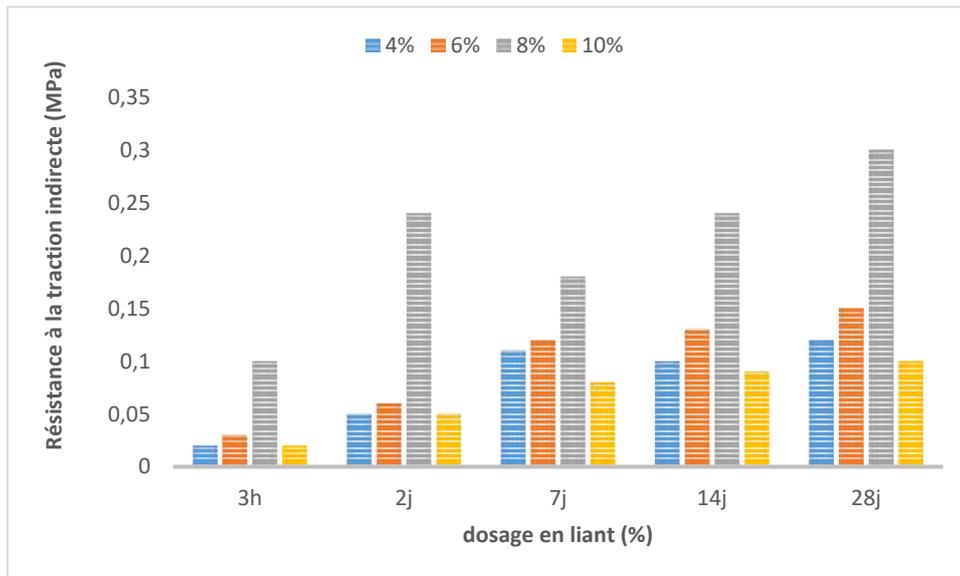


Fig.55 : Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la marne traitée à la chaux en fonction du dosage.

D'après l'histogramme de la figure 55 on peut faire les mêmes remarques que celles de variation de la résistance à la compression simple (R_c) en fonction de dosage.

1.3 Influence de l'eau sur le comportement des marnes avant et après traitement

Une série d'éprouvettes de dimensions ($H = 10$ cm, $\varnothing = 5$ cm) ont été confectionnées comme suit :

- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées sans traitement.
- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées avec un traitement à 4% de chaux résiduaire.
- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées avec un traitement à 6% de chaux résiduaire.
- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées avec un traitement à 8% de chaux résiduaire.
- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées avec un traitement à 10% de chaux résiduaire.

Ces éprouvettes ont été séchées pendant 2, 7, 14 et 28 jours. Elles ont été ensuite plongées dans de l'eau. Nous avons enregistré la taille (hauteur en cm) des éprouvettes (voir tableaux).

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Tableau 15 : Eprouvettes séchées pendant 2 jours

2j	0%	4%	6%	8%	10%
	0 cm	8.7 cm	9.9 cm	10 cm	10 cm



Tableau 16 : Eprouvettes séchées pendant 7 jours

7j	0%	4%	6%	8%	10%
	0 cm	8.6 cm	9.7 cm	10 cm	10 cm

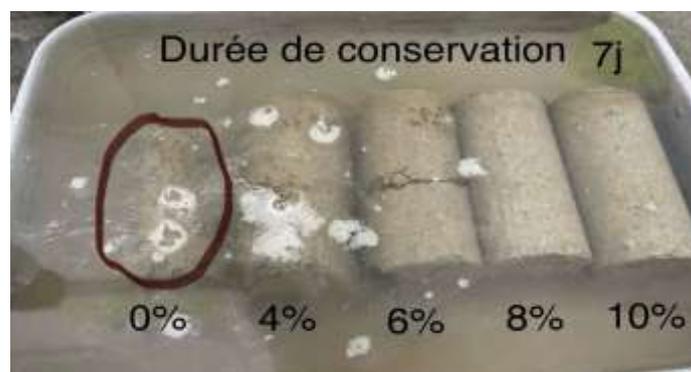


Tableau 17 : Eprouvettes séchées pendant 14 jours

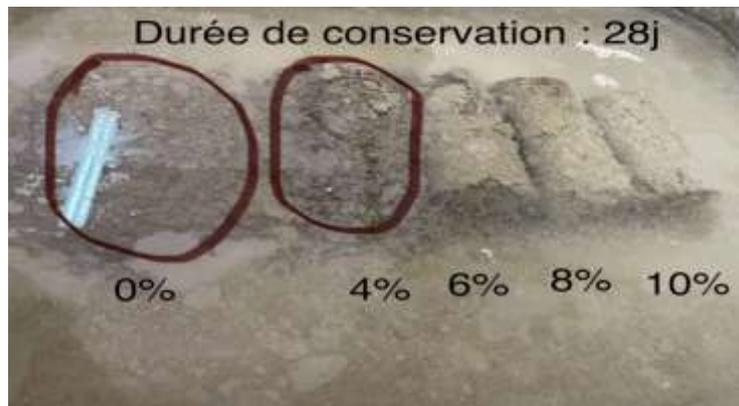
14j	0%	4%	6%	8%	10%
	0 cm	0 cm	8.6 cm	10 cm	10 cm

Chapitre 04 : Résultats et discussions



Tableau 18 : Epreuves séchées pendant 28 jours

28j	0%	4%	6%	8%	10%
	0 cm	0 cm	9.3 cm	10 cm	10 cm



D'après les résultats illustrés dans les tableaux on peut faire les remarques suivantes :

En général les deux échantillons de 8% et 10% ont gardé la forme de l'état initial avec une destruction partielle des parois des éprouvettes c-à-d que l'intérieur des éprouvette reste stable malgré l'immersion total dans l'eau. Pour le cas des dosages 4% et 6%, les parois au contact de l'eau se détruisent instantanément. L'intérieur des éprouvettes se détruit au fur et à mesure que l'eau y pénètre. Les marnes non traités (0%) se détruisent instantanément. On peut donc dire que les éprouvettes confectionnées avec 8% de chaux résiduaire sont les plus résistants par rapport aux autres ce qui vient confirmer les résultats des essais mécaniques.

2. Possibilité d'utilisation des marnes traitées en CDF

Définition: « La Couche De Forme (CDF) est une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée » (GTR, 2000).

Pour être employé en couche de forme, un matériau doit satisfaire aux critères suivants :

- Insensibilité à l'eau (dépendance des caractéristiques mécaniques à l'état hydrique) ;
- Insensibilité au gel (gélifraction) ;
- Dimension des plus gros éléments (nivellement, malaxage) ;
- Résistance sous circulation des engins de chantier (fragmentation, attrition).

2.1 Critères de jugement

Les critères de jugement sont les suivants :

- La CDF peut être circulée dès que $R_c \geq 1$ MPa
- La résistance lors de l'apparition du gel : $R_{tb} > 0,25$ MPa
- Les performances à long terme sont caractérisées par le couple R_t et E , qui permettent d'obtenir un classement mécanique des deux matériaux.

2.2 Résultats de comparaison

La comparaison des résultats obtenus après traitement des marnes étudiées avec les valeurs des critères listés ci-dessus permet de souligner les points suivants :

- Quel que soit le dosage, le critère de traficabilité est satisfait dès 14 jours ;
- Le critère de résistance au gel n'est satisfait qu'après 14 jours ;

Conclusion

D'après ces résultats on peut conclure qu'il est avantageux d'utiliser les marnes traitées avec 8% de Chaux résiduaire en CDF. Des mesures de module élastique doivent être réalisées pour mieux comprendre le comportement de ces sols à long terme.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

La pénurie en matériaux nobles de bonne qualité (granulats de roches massives) dans certaines régions de l'Algérie, et leurs coûts de revient nous a incités à penser à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols de propriétés médiocres tels que la marne. Il s'agit de traitement à la chaux résiduaire, pour rendre les marnes utilisables dans la construction de la couche de forme. La finalité de cette étude a été guidée par les préoccupations suivantes :

- Amélioration des caractéristiques mécaniques des marnes de la région d'étude pour les utiliser en couche de forme.
- Contribution au développement durable et à la protection de l'environnement grâce à la préservation des ressources naturelles.

Le mémoire est divisé en deux parties, l'une (**premier** et **deuxième** chapitre) portant sur l'état de l'art des chaux et leurs utilisations ainsi que sur la production de l'acétylène, tandis que l'autre partie (**troisième** et **quatrième** chapitre) est purement expérimentale.

Dans le **premier** et **deuxième** chapitre, on a présenté une synthèse bibliographique sur les chaux et leurs utilisations et la production d'acétylène.

Dans le **troisième** chapitre, nous avons exposé en détail les matériaux et les méthodes utilisées ainsi que les protocoles et procédures élaborés afin de réaliser les objectifs de notre projet.

Dans le **quatrième** chapitre, les résultats de tous les essais concernant la caractérisation des marnes étudiées (sans et avec traitement) ont été exposés. Ces marnes ont été caractérisées en se basant sur les normes AFNOR. Les tests d'identification géotechnique ont pour but de classer les matériaux en fonction des caractéristiques et des normes choisies pour leur utilisation en CDF. Des tests sur le lait de chaux ont également été effectués (Analyse granulométrique et caractérisation chimique).

D'après les résultats obtenus lors de cette étude, il a été démontré que le traitement à la chaux résiduaire produit des résultats importants. Inévitablement, l'analyse mécanique a démontré qu'une composition comprenant la marne étudiée et 8% de ce déchet présente des caractéristiques de portance et de résistance à la compression simple et à la traction indirecte similaires à celles obtenues lorsque les mêmes marnes sont traitées avec du ciment.

L'effet de l'eau sur la durabilité de ces matériaux a été également investigué. Nous avons trouvé que les marnes traitées à la chaux résiduaire gardent la forme de l'état initial ce qui vient confirmer les résultats des essais mécaniques.

À la suite de cette étude, on peut tirer la conclusion que les matériaux marneux traités issus de la région d'étude ont données des résultats très intéressants, dans les conditions requises par les spécifications. Il est donc possible de les proposer comme des granulats routiers, au moins pour les routes à faible à moyen trafic.

La recherche menée dans cette étude est d'une grande importance à la fois sur le plan économique et environnemental. Elle propose des matériaux aux propriétés très importantes (accessibilité, économie d'extraction, économie de transport,...) destinés à la construction routière. Ainsi, l'utilisation de la chaux résiduaire permet de diminuer les divers effets sur l'environnement (sols, eaux, végétation et faune).

Perspectives

Ceci n'est qu'une approche expérimentale de laboratoire, qui devra être confirmée par une expérimentation en vraie grandeur c-à-d construction d'une section de chaussée en marne traitée à la chaux résiduaire, et suivi de son comportement pour caler le comportement mécanique à long terme avec les résultats que nous avons obtenus.

Références

Bibliographiques

A

- Aktas, E.S., Imre, S., Ersoy, L. (2001). Characterization and lime treatment of olive mill wastewater, *Water Research*, Vol.35, N°9, pp.2336–2340.
- Al-Khaja, W.A., Madany, I.M., Al-Sayed, M.H., Darwish, A.A. (1992). Drying shrinkage properties of cement mortars containing carbide lime waste, *Resources, conservation and recycling*, Vol.6, N°3, pp.179–190.
- Arabi, N., & Molez, L. (2015, November). Les matériaux silico-calcaires : substitution de la chaux éteinte par le laitier granulé de haut fourneau. In *2e Conférence Internationale Francophone Nouveau Matériaux et Durabilité (NoMaD 2015)*.
- Ayache, R. (2013). Valorisation de la chaux résiduaire, sous-produit de la fabrication d'acétylène, dans le traitement des eaux.

B

- Bechoux, E. (1993). Technique de dosage en continu de la chaux applicables au traitement des eaux usées. *Tribune de l'eau*, Vol. 46, N°562/2. Mars- Avril. pp.29-38.
- Brochu, P. A. (1981). Utilisation de la chaux dans les projets routiers. *ROUTES TRANSP*, (27).

C

- Cabane, N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation (Doctoral dissertation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne).
- Carmeuse 1. (2000). *Chimie minérale, Belgique*. 1 Vol., 20p.
- Caquot, A. I., & Lehuerou Kerisel, J. (1956). *Traité de mécanique des sols*.
- Couturier, J.P. (1986). Comment fabrique-t-on le carbure de calcium ? *Revue trimestrielle des spéléologues du grand sud-ouest*, N°37, septembre, pp.17-20.

D

- Delfaut, A. (1990). Traitement à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du sparnacien et de la région parisienne-étude de laboratoire. *Bulletin de Liaison de Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (169).

- DERRICHE. Z, KEBAILI.M. (1998), Prévision du gonflement des argiles d'In-Am enas, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **218**, novembre décembre, pp. 15-23.
- Djelti, Abdelkader Zakaria ; Hattou, Mohammed, (2009). Etude de la réhabilitation du chemin de wilaya CW54.Mémoire d'ingénieur, Tlemcen, université.
- Dupraz, J., & Zohry, M. (2007). Apports de la technique de traitement de sols argileux et limoneux à la chaux. *AMPCR, Maroc*.

F

- Fairhurst, T. (2015). Manuel de gestion intégrée de la fertilité des sols.
- Fransolet, G., & Genot, J. (1999). L'utilisation de la chaux dans la déshydratation et la stabilisation des boues issues des stations de traitement d'eau potable. *Tribune de l'Eau (Belgium)*, 52(597).

G

- Gout, J.L., (1993). 1893 : Découverte du procédé de fabrication du carbure de calcium. - Propriétés chimiques de l'acétylène. -Propriétés physiques de l'acétylène. -Fabrication industrielle du carbure. La lampe Gossart et Chevalier. -La bavure cavernicole, N o19, 15 mars, pp.5-8.
- Guezoul, I., & BENDJAZIA, F. Z. K. (2020). Stabilisation des argiles par ajout de verre recycl e avec un pr etraitemment à la chaux (doctoral dissertation, faculté des sciences appliquées département génie civil).

K

- Kahrs, R. F. (1995). Principes généraux de la désinfection. Revue scientifique technique de l'OIE, 14(1), 123-142.

L

- Lecompte, T. (2020). Le chanvre dans les bâtiments de demain : atouts, freins et enjeux. In *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest* (Vol. 127, pp. 193-207). Cairn.
- Lhoist 1. La chaux dans le traitement des gaz de fumées Belgique.
- Lhoist 2. La chaux dans l'épuration des eaux. Belgique.
- Lhoist 3. La chaux dans la stabilisation et la valorisation des boues, Belgique.
- Lididif, N.N. (1977). Chimie et technologie de la synthèse organique de base et pétrochimique, Tome 1, MIR, Mousco (Livre en Arabe), pp. 126-137.

M

Meinck, F., Stooff, H., Kohlschutter, H. (1977). Les eaux résiduaires industrielles, Masson, 2^e éditions, pp.332-334.

O

Ondrousek, L. (1974). État actuel et perspective d'avenir sur la production de chaux convenant à la fabrication des bétons cellulaires.

Ortegat, B. (1993). Le lait de chaux prêt à l'emploi, *Tribune de l'eau*, Vol.46, N° 562/2. pp.13-15.

R

Ricou, P. (1998). Procédés d'élimination d'ions métalliques sur cendres volantes de charbon et sur mélanges cendres/chaux, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 301p.

T

Thiene, O. (2018). Rhéologie des boues résiduaires : rôle de la thixotropie et de la composition sur les propriétés liquides et solides (Doctoral dissertation, Université Clermont Auvergne [2017-2020]).

Thomazeau, R. (1981). Stations d'épuration. Eaux potables-Eaux usées, Editions Technique et Documentation, Paris.

W

Walter, F., Ullmann, F. (1953). Acetylen in Enzyklopädie der technischen Chemie, Urban & Schwarzenberg, 3 Edition. Tome III, pp.43-65.

Weiss, B., Roche, N., Potier, O., Pons, M, N., Cecile, J.L., Prost, C. (1999). Nouvelle utilisation de la respirométrie en ligne pour la gestion d'une station d'épuration à boues activées. *Techniques Sciences et Méthodes*, Vol.4, pp.78-95.

Whittington, B.I. (1996). The chemistry of CaO and Ca(OH)₂ relating to the Bayer process. *Hydrometallurgy*, Vol.43, pp.13-35.