

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET OPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA



**Mémoire de fine d'étude en vue l'obtention de diplôme de
MASTER PROFESSIONNEL**

Domaine : sciences appliquées

Filière : génie civil

Spécialité : étude et contrôle des bâtiments et des routes

Présenté par :

DEBBAH Otmane
MAHDJOUBI Mohamed

Thème

**Élaboration d'un liant hydraulique routier à
la base de la cendre des résidus des palmiers
dattiers**

Soutenu publiquement

Le : 20/09/2020

Devant le jury :

Mr. KHELLOU Abdrezak
Mr. BENTATA Aissa
Mme. KHENGAOUI Safia

Encadreur
Examineur
Examinatrice

UKM Ouargla
UKM Ouargla
UKM Ouargla

Remerciement

Nous tenons à remercier dans un premier temps mon encadreur de mémoire **KHELLOU Abderrezak**, enseignant à l'université de **KASDI MERBAH OUARGLA**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Nous remercions aussi monsieur **HAFSI Abdellatif** responsable de **LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLIC DU SUD** et toute l'équipe de laboratoire qui nous ont aidés dans la partie expérimentale.

Nous exprimons nos sincères remerciements au prof **ZENKHRI Abdrrezak** pour ses aides, à mes amis **Abayhia abdlouahab**, **Hathat Aimad**.

Sans oublier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre mémoire et qui m'ont aidée lors de la rédaction et ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

ملخص	I
RÉSUMÉ	I
ABSTRACT	I
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES TABLEAUX	III
INTRODUCTION GENERALE.....	IV
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	1
I.1 INTRODUCTION.....	1
I.2 LES LIANT HYDRAULIQUE ROUTIERS (LHR)	1
I.2.1 Clinker Portland (K)	1
I.2.2 Laitier granulé de haut fourneau (S)	2
I.2.3 Pouzzolanes naturelles (Z).....	2
I.2.4 Cendres volantes	2
I.2.5 Schistes calcinés (T).....	2
I.2.6 Calcaires (L)	3
I.2.7 Fumées de silice (D).....	3
I.2.8 Chaux	3
I.2.8.1 Chaux vives	4
I.2.8.2 Chaux hydraulique naturelle.....	4
I.2.8.3 Chaux aériennes.....	4
I.2.8.4 Chaux éteintes	5
I.3 TUF D'ENCROÛTEMENT	5
I.3.1 Les encroûtements calcaires	5
I.3.2 Les encroûtements gypseux	6
I.3.3 Les encroûtements mixtes (Tufts gypso-calcaires).....	6
I.4 LE TRAITEMENT DES SOLS.....	7
I.4.1 Traitement à la chaux.....	7
I.4.2 Traitement à la cendre	7
I.5 CENDRE DU BOIS	8
I.6 CONCLUSION.....	9

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	10
II.1 INTRODUCTION	10
II.2 LE TUF D'ENCROÛTEMENT.....	10
II.2.1 Caractérisation physiques	11
II.2.1.1 Masse volumique apparente	11
II.2.1.2 Analyse granulométrique (par tamisage)	11
II.2.1.3 Limite d'Atterberg	12
II.2.1.4 Bleu méthylène	13
II.2.2 Caractérisation mécaniques	14
II.2.2.1 Proctor modifié	14
II.2.2.2 CBR (California Bearing Ratio)	14
II.2.3 Caractérisation chimiques	15
II.2.3.1 Détermination du taux de carbonates.....	15
II.2.3.2 Détermination du taux de sulfates	15
II.2.3.3 Détermination du taux d'insolubles	15
II.2.4 Classification des matériaux selon GTR 92.....	16
II.3 LA CHAUX	18
II.4 LA CENDRE DES RÉSIDUS DES PALMIERS DATTIERS (CRPD)	19
II.5 CONCLUSION	20
CHAPITRE III : INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	21
III.1 INTRODUCTION	21
III.2 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SIMPLE (R_c)	21
III.3 RÉSISTANCE À LA TRACTION INDIRECTE (R_{TI})	22
III.4 LES RÉSULTATS POUR LA COMPRESSION SIMPLE (R_c)	25
III.4.1 La R_c pour une teneur en eau de 12%.....	25
III.4.1.1 Traitement à la chaux.....	25
III.4.1.2 Traitement à la CRPD	25
III.4.1.3 Traitement mixte	26
III.4.1.4 Comparaison entre les valeurs maximales.....	27

III.4.2 La R_c pour différentes teneurs en eau de confection	28
III.4.2.1 Traitement mixte	28
III.4.3 Sensibilité à l'eau	29
III.4.3.1 Traitement à la chaux	30
III.4.3.2 Traitement à la CRPD	30
III.4.3.3 Traitement mixte	31
III.5 LES RÉSULTATS POUR LA TRACTION INDIRECTE (R_{TI})	32
III.5.1.1 Traitement à la chaux	32
III.5.1.2 Traitement à la CRPD	32
III.5.1.3 Traitement mixte	33
III.5.1.4 Comparaison les valeurs maximales	34
III.5.2 La R_{ti} pour différentes teneurs en eau.....	35
III.5.2.1 Traitement mixte	35
III.5.2.2 Sensibilité à l'eau	36
III.6 CONCLUSION	36
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS	38
RÉFÉRENCES	39
ANNEXES	41

ملخص

الهدف من هذا العمل هو معالجة طف القشرة (المعروف بالتيف) المستغل في إنجاز مختلف طبقات الطرق وذلك باستعمال رماد بقايا النخيل لغرض معرفة إمكانية تصرف هذا لأخير كرابط. حيث يتم ذلك بملاحظة تطور المقاومة الميكانيكية (مقاومة للضغط البسيط والشد الغير مباشر)، النتائج أظهرت تحسن معتبر لمقاومة العينات المنجزة من التيف المعالج مقارنة بتلك المسجل للتيف وحده خصوصا عند عمر 180 يوم. دراسة الحساسية للماء أبرزت التماسك جيد لعينات التيف المعالجة بعد عملية الغمر في الماء لمدة 48 ساعة، بينما انهيار كامل للعينات المنجزة بالتيف بعد 24 ساعة فقط.

الكلمات المفتاحية: رماد بقايا نخيل، الجير، طف القشرة، رابط هيدروليكي، معالجة التربة، الضغط البسيط، الشد الغير مباشر.

Résumé

L'objectif de ce travail est de traiter un tuf encroûtement en utilisant la cendre des résidus de palmiers dattiers (CRPD) afin de tester la capacité liante de cette dernière. Ceci est effectué par l'examen de l'évolution des résistances mécaniques (compression simple et traction indirecte) à courts terme et long terme, À l'âge de 180 jours, les résultats obtenus montrent l'amélioration considérable la résistance des éprouvettes confectionnées du tuf traité au CRPD associée avec la chaux en comparant avec celles tuf seul. L'étude de la sensibilité décèle l'excellente tenue à l'eau des éprouvettes du tuf traité après 48 heures d'immersion, tandis que un effondrement total de celles confectionnée du tuf seul après 24 heures.

Mots-clés : cendre des résidus des palmiers dattiers tuf d'encroûtement, liant hydraulique, traitement, compression simple, traction indirecte.

Abstract

The objective of this work is to treat encrusting tuff using ash of date palm residues (ADPR) in order to test its binding capacity. This is done by examining the evolution of short-term and long-term mechanical strengths (simple compressive and indirect traction strength). At the age of 180 days, the results obtained show the considerable improvement in the strengths of test specimens made from tuff treated with ADPR associated with lime, compared with those with tuff alone. The sensitivity study revealed the excellent water resistance of the test specimens made from treated tuff after 48 hours of immersion, while those of tuff alone had completely collapsed after 24 hours.

Keywords: ash of date palm residues, crusting tuff, hydraulic binder, treatment, simple compression, indirect traction.

LISTE DES FIGURES

Figure II-1 Le tuf d'encroûtement étudié	10
Figure II-2 photo des sacs du tuf.....	11
Figure II-3 Séchage du tuf.....	11
Figure II-4 Courbe granulométrique du tuf.....	12
Figure II-5 La courbe de la limite de liquidité (WL).....	13
Figure II-6 La courbe de Proctor.....	14
Figure II-7 tableau synoptique de classification des matériaux	17
Figure II-8 la chaux utilisée	19
Figure II-9 Différents résidus utilisé pour la cendre	19
Figure II-10 La combustion préliminaire des résidus	19
Figure II-11 La deuxième combustion de la CRPD.....	19
Figure II-12 Le broyage de la CRPD	19
Figure II-13 la cendre avant et après le broyage	20
Figure II-14 La température pendant la cuisson	20
Figure III-1 des éprouvettes de compression préparées à l'écrasement.....	21
Figure III-2 Des éprouvettes de traction préparées à l'écrasement.....	22
Figure III-3 presse hydraulique pendant la confection	23
Figure III-4 la moule à double piston pour la confection.....	23
Figure III-5 presse hydraulique pour l'écrasement	24
Figure III-6 Une éprouvette de compression pendant l'écrasement	24
Figure III-7 Une éprouvette de traction pendant l'écrasement	24
Figure III-8 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la chaux	25
Figure III-9 variation de la R_c en fonction du pourcentage de CRPD	26
Figure III-10 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la chaux et la CRPD	26
Figure III-11 variation de la R_c maximale en fonction de deux mélange	27
Figure III-12 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la CRPD (7 jours).....	28
Figure III-13 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la CRPD (180 jours).....	29
Figure III-14 variation de la R_c après l'immersion (24h) pour la chaux.....	30
Figure III-15 Les éprouvettes de compression au tuf seul après 24h d'immersion	30
Figure III-16 Des éprouvettes de compression à la chaux pendant et après l'immersion....	30
Figure III-17 des éprouvettes de compression à la CRPD après l'immersion de 24h	31

Figure III-18 des éprouvettes de compression au traitement mixte après l'immersion	31
Figure III-19 variation de la R_c après l'immersion (48h) pour la CRPD	31
Figure III-20 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la chaux	32
Figure III-21 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de CRPD	33
Figure III-22 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la chaux et la CRPD	33
Figure III-23 variation de la R_{ti} maximale en fonction de deux mélange	34
Figure III-24 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la CRPD (7 jours)	35
Figure III-25 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la CRPD (180 jours)	35
Figure III-26 Les éprouvettes à la traction du tuf après 24h d'immersion.....	36
Figure III-27 Des éprouvettes de traction à la chaux pendant et après l'immersion.....	36
Figure III-28 variation de la R_{ti} après l'immersion (24h) pour la chaux	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 Résultats d'analyse granulométrique du tuf	12
Tableau II-2 Les classifications des sols en fonction de VBS.....	13
Tableau II-3 Résultats d'analyse chimique du tuf	16
Tableau II-4 Les différents types d'encroûtement selon la nature chimique	16
Tableau II-5 synthèse des résultats de caractérisation.....	17
Tableau II-6 Fiche technique des Propriétés physico-chimiques de la chaux de Saida	18
Tableau III-1 Les différentes abréviations des mélanges adoptés.....	23

INTRODUCTION GENERALE

Les régions sud de l'Algérie sont connues par son grand nombre de palmiers dattier, qui dépasse les 17 millions [1], Durant l'opération de la récolte et du nettoyage périodique des palmiers, Les agriculteurs collectent des quantités énormes des résidus (palme sèche, pétiole, régime de dattes, liffes...) qui restent sans aucune exploitation conséquente, Souvent, le recours à la combustion de ces résidus demeure la voie principale pour les débarrasser. La cendre issue de cette opération, lui aussi, reste inexploitable.

Le traitement des matériaux routiers aux liants lors de la réalisation de différentes couches de chaussées présente une solution alternative lorsque ces matériaux ont de qualité médiocre de point de vue propriétés mécaniques. Le traitement est souvent effectué à l'aide de liants normalisés, et approuvés, à savoir : la chaux, le ciment, la cendre volante, fumée de silice...etc.

L'utilisation d'autres sous-produits industriels et déchets comme des ajouts ou des liants (la cendre de bois, la cendre de biomasse, la cendre de foyer ... etc.) fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans l'objectif des valoriser et des recycler.

Dans ce contexte, notre travail consiste de tester la capacité liante de la cendre des résidus palmiers dattiers (CRPD) en recourant au traitement d'un tuf d'encroûtement et l'examen de l'évolution de ses propriétés mécaniques (résistance à la compression simple et à traction indirecte) à courts terme et à long terme, ainsi que sa sensibilité à l'eau.

En Algérie, les tufs encroûtement couvrent approximativement une superficie de 300.000 km² [2], ils sont utilisés en construction routière, notamment en assise de chaussée (couche de base et couche de fondation) à moyen et faible trafic.

Ce manuscrit comporte trois chapitre : le premier est présente une revue bibliographiques sur le les différents liants hydrauliques, les cendres d'origine diverse, le traitement des sols et les tufs d'encroûtement, le seconde chapitre est consacré à la caractérisation et l'identification des matériaux et produits utilisés et le dernier chapitre fournit des analyses et des interprétations des résultats obtenus, Ce travail se termine par une conclusion générale et des recommandations pour l'amélioration de la recherche dans ce domaine.

CHAPITRE I: Revue bibliographique

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va essayer de mettre certaines définitions importantes qui concerne notre domaine de recherche telles que les liants hydrauliques, tufs d'encroûtement, le traitement des sols afin de clarifier et de définir l'usage de ces matériaux et produits dans le domaine de construction des routes.

I.2 Les Liant Hydraulique Routiers (LHR)

Un liant hydraulique, mélangé à de l'eau, durcit aussi bien à l'air que sous l'eau et reste solide, même sous l'eau. Un LHR est un liant hydraulique produit en usine, distribué prêt à l'emploi et dont les propriétés sont spécifiquement adaptées pour le traitement des granulats et des sols pour la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme, et de terrassements. [3]

Un liant hydraulique routier se présente sous forme d'une poudre obtenue en mélangeant différents constituants et dont la composition est statistiquement homogène. Pour produire les liants hydrauliques routiers traités, il est essentiel de disposer des installations nécessaires, pour contrôler et évaluer la qualité des produits, et procéder aux ajustements nécessaires. [3]

L'utilisation des LHR présente de multiples avantages :

- La réutilisation des sols en place ;
- La possible valorisation des matériaux de déconstruction ;
- La réutilisation des matériaux de la chaussée à rénover ;
- Une reprise rapide du chantier ;
- L'allongement de la durée de vie de l'ouvrage : gain de résistance faces aux contraintes mécaniques et climatiques ;

On peut citer aussi les différents liants utilisés dans le domaine de construction :

I.2.1 Clinker Portland (K)

Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins deux tiers (2/3), en masse, de silicates de calcium $[(CaO)_3.SiO_2]$ et $[(CaO)_2.SiO_2]$, la partie restante contenant de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes. Le rapport en masse $(CaO)/(SiO_2)$ ne doit pas être inférieur à 2,0 et la teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5,0 % en masse. [4]

Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle, d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte ou suspension) contenant CaO, SiO₂, Al₂O₃ et de petites quantités d'autres matières. [4]

I.2.2 Laitier granulé de haut fourneau (S)

Le laitier de haut fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable. Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. [4]

I.2.3 Pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont :

- ✓ Des substances d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriée.
- ✓ Des argiles et des schistes activés thermiquement.

Les pouzzolanes naturelles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température ambiante habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium [Ca(OH)₂] dissous, pour former des composés de silicate de calcium et d'aluminate de calcium développant des résistances. Ces composés sont semblables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matières hydrauliques. [4]

I.2.4 Cendres volantes

Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse ou silico-calcaire. Les premières ont des propriétés pouzzolanique ; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques. [5]

Les cendres volantes sont résultantes de la combustion du charbon pulvérisé, ils sont obtenus par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les gaz de fumée des chaudières. [5]

I.2.5 Schistes calcinés (T)

Les schistes calcinés, et en particulier les schistes bitumineux calcinés, sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. Du fait de la composition de la matière naturelle ainsi que du procédé de production. [4]

les schistes calcinés contiennent des phases du clinker, principalement du silicate bi-calcique et de l'aluminate mono-calcique, de même que de petites quantités de chaux libre CaO et de sulfate de calcium, ainsi que des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, particulièrement SiO₂. De ce fait, les schistes calcinés finement broyés montrent de fortes propriétés hydrauliques, comme le ciment Portland, et, en plus, des propriétés pouzzolaniques. [4]

I.2.6 Calcaires (L)

Les calcaires sont des roches sédimentaires, tout comme les gypses, facilement solubles dans l'eau, composée majoritairement de carbonate de calcium Ca CO₃, mais aussi de carbonate de magnésium Mg CO₃. [6]

I.2.7 Fumées de silice (D)

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines ayant une très haute teneur en silice amorphe. Les fumées de silice proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de Ferro-silicium. [4]

I.2.8 Chaux

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'Antiquité, notamment dans la construction. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium (CaO) avec plus ou moins d'oxyde de magnésium (MgO) mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. [7]

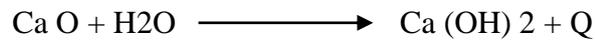
Il est nécessaire de concasser le calcaire afin de réduire sa granulométrie, ensuite, le porter à une température suffisamment élevée pour le transformer en chaux vive, Pour ce faire, tout type de combustible peut être utilisé.

- Le gaz naturel (méthane), c'est le plus commode et le plus utilisé.
- Le plus ancien, le bois. Il est employé en buches mélangées à la pierre, ou réduit en sciure, dans les fours modernes.
- Le fuel lourd et ses résidus plus épais, également pour les fours modernes.

Lorsqu'on chauffe le calcaire à haute température (900°C), le carbonate de calcium se décompose selon : [8]



Le produit obtenu est la chaux vive que l'on peut "éteindre" par action de l'eau selon : [8]



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur

La prise de la chaux se fait selon le processus inverse, c'est-à-dire que le gaz carbonique CO_2 présent dans l'air réagit lentement avec la chaux pour redonner de carbonate de calcium, généralement sous forme minéralogique de calcite. Ce phénomène n'a rien d'hydraulique s'il a la propriété de faire prise et de durcir par réaction chimique avec l'eau. [8]

En technique routière, on utilise les chaux comme stabilisants ou pour rendre compactables des sols fins trop humides. La chaux est également utilisée comme on le verra plus loin, pour enclencher le phénomène de prise des laitiers granulés et également en addition avec d'autres liants (pouzzolanes et cendres volantes silico-alumineuses). [8]

Il existe divers matériaux appelés chaux qui diffèrent entre eux par leur teneur en impuretés, on cite :

I.2.8.1 Chaux vives

Chaux constituées principalement d'oxyde de calcium (CaO) et de magnésium produits par la calcination de calcaire (passage dans un four à 900°C) et/ou de dolomie. Les chaux vives ont une réaction exothermique lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau. Les chaux vives se présentent en différents états granulaires, allant de la roche à des matériaux finement pulvérisés. [9]

I.2.8.2 Chaux hydraulique naturelle

Provenant d'un calcaire argileux, riche en fer, alumine et surtout en silice environ 15 à 20 %. À température entre 800 et 1500°C , le CaO du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium, des aluminates et des Ferro-aluminates de calcium que l'on trouve sous l'appellation standard chaux Hydraulique Naturelle (XHN). [7]

I.2.8.3 Chaux aériennes

Chaux constituées principalement d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium qui durcissent lentement à l'air sous l'effet du dioxyde de carbone présent dans l'air. En général, elles ne durcissent pas sous l'eau, car elles n'ont pas de propriétés hydrauliques. [9]

I.2.8.4 Chaux éteintes

Chaux aériennes constituées principalement d'hydroxyde de calcium et éventuellement de magnésium, résultant d'une extinction contrôlée de chaux vives. Elles n'ont pas de réaction exothermique lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau, elles sont produites sous forme de poudre sèche ou de coulis. [9]

I.3 Tuf d'encroûtement

Pour tester l'efficacité de la capacité liante de la cendre, l'objet de notre travail, nous avons choisi comme des matériaux de base les tufs d'encroûtement.

Les tufs d'encroûtements se définissent comme étant des formations Superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de couleur claire. Elles datent du Quaternaire et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et Précipitation. Suivant leur composition chimique. [10]

Ils font partie des matériaux disponibles en grande quantité, ils couvrent près de 50% de la superficie de l'Algérie. Dans certaines régions relativement riches en granulats, ils sont utilisés comme matériaux de substitution pour économiser les ressources en matériaux nobles, d'autres parts, ils représentent la seule ressource en matériaux routiers. [11]

Les tufs d'encroûtements se regroupent en Trois catégories : les tufs calcaires, les tufs gypseux et les tufs mixtes (gypso-calcaire). [10]

I.3.1 Les encroûtements calcaires

Les encroûtements calcaires se sont les calcaires des régions semi-aride ou aride, des formations récentes et de dureté très variables. Ces matériaux acquièrent une forte cohésion après séchage lorsqu'ils ont été compactés en présence d'eau, cette cohésion disparaît si le matériau est à nouveau saturé. Les tufs calcaires existent dans la plupart des pays du bassin méditerranéen et occupent les zones à climat sec. L'abondance de cette ressource naturelle, fait que leur utilisation comme matériau routier est devenu de plus en plus répandue. [7]

La croute calcaire est un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement des carbonates de calcium. Les croutes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement des quantités plus au moins grandes de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration. [7]

D'après certains résultats effectués, les tufs calcaires sont des roches calcaires ayant un Los Angeles supérieur à 60, une masse volumique inférieure à 20 Kn/m³, une résistance à la compression simple comprise entre 5 et 10 Mpa, et dont la teneur en éléments fins passant au tamis de 80 microns, obtenus sur la fraction 0/20 du matériau après extraction, est de l'ordre de 10 à 40%. [7]

I.3.2 Les encroûtements gypseux

Les gisements des sables gypseux en zone aride, se sont formés à différentes époques du quaternaire par dépôt de gypse dans le sol à partir des nappes phréatiques séléniteuses. Les sables gypseux ont un grain dont le diamètre est compris entre 0,1 et 2 mm, chaque grain est agglutination des cristaux microscopiques, il peut se présenter aussi en cristaux plus gros allant jusqu'à 5 mm. [7]

Les sables gypseux formés aux alentours des chotts contiennent une proportion plus ou moins importante de sel. Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont très abondants dans les régions à climat aride où les précipitations sont insuffisantes pour lixivier le gypse, qui existe déjà dans les formations géologiques anciennes. Ce minéral qui présente l'élément actif de la cimentation de ces formations, possède une dureté très faible : il peut être rayé à l'ongle ; cette particularité pourrait paraître suffisante pour interdire l'utilisation du gypse comme matériau de chaussée en zones climatiques subhumides et semi-arides. [7]

I.3.3 Les encroûtements mixtes (Tufs gypso-calcaires)

La granulométrie de ces tufs est aléatoire, avec une tendance à se classer du côté des matériaux fins. Les matériaux appartenant à la première catégorie sont les plus prisés pour la construction routière mais sont peu abondants. Ceux appartenant aux deux autres catégories font partie des matériaux fins, sans squelette granulaire. Leur utilisation est admise en Technique Routière Saharienne à condition qu'ils remplissent un certain nombre de critères. [7]

Les tufs d'encroûtements sont des matériaux dotés de cohésion qu'ils acquièrent après compactage puis dessiccation prolongée, ce durcissement appelé aussi auto-stabilisation, qui a permis leur utilisation en corps de chaussée malgré des caractéristiques géotechniques qui s'écartent des spécifications usuelles des pays tempérés. [7]

I.4 Le traitement des sols

À titre d'indicatif, dans cette section on va aborder quelques traitements à savoir le traitement à la chaux et à la cendre de bois.

I.4.1 Traitement à la chaux

Le traitement avec la chaux est une méthode qui utilise les affinités physiques du sol et d'un liant, contrairement au seul traitement mécanique qu'est le compactage (lequel doit naturellement se superposer au premier). Le traitement des sols en place évite le transport et valorise les matériaux locaux, ce qui permet de stabiliser des sols à des coûts très intéressants, avant la mise en place des couches superficielles. [12]

L'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau du sol provoque une consommation d'eau et une évaporation importante (la réaction exothermique entraîne une évaporation). Cette propriété est mise à profit pour l'assèchement des sols fins argileux et humides. [12]

Par ailleurs, l'adjonction de chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na^{2+} , K^+ , Al^{3+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , etc....) par des cations Ca^{2+} apportés par la chaux; ceci développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables. Un sol argileux et humide passe d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travaillable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau. [12]

L'addition de chaux a des effets à long terme (plus d'un an) par combinaison avec les constituants des argiles : [12]

- L'augmentation de la cohésion, de la résistance au poinçonnement (l'indice CBR peut être multiplié par 4 ou 10 au bout de deux heures) ;
- L'augmentation des résistances mécaniques ;
- Une meilleure perméabilité de l'argile ;
- Dans le cas d'argiles gonflantes : diminution des variations volumiques ;

I.4.2 Traitement à la cendre [13]

La combinaison des cendres (qui présentent un caractère pouzzolanique) et la chaux hydratée peuvent être utilisées pour améliorer les propriétés et la résistance du sol de fondation cohésif souple, En plus de leur richesse en silicium et en aluminium, les cendres offrent des caractéristiques intéressantes en termes de surface spécifique et d'échange ionique,

Ainsi, il a été montré que les cendres peuvent être utilisées en tant que filler minéral dans le pavage bitumineux.

L'absorption d'eau des agrégats contenant des cendres est plus faible. Toutefois, ces agrégats présentent une résistance à la compression comparable à celle des agrégats usuels.

La céramique peut être produite à partir des cendres seules ou en mélange avec des additifs (kaolin, montmorillonite, illites, poudre de verre plat) auxquelles on applique un traitement thermique.

Les cendres peuvent être utilisées dans des matériaux d'isolation thermique. En effet, elles présentent une structure poreuse et des particules irrégulières, ce qui permet d'obtenir des matériaux à faible conductivité thermique.

I.5 Cendre du bois

La composition des débris pulvérulents nommés cendres varie selon de nombreux paramètres, qui sont essentiellement les espèces végétales brûlées, les parties des plantes (écorce, tronc, ou jeunes branches avec feuillage par exemple), la nature du sol, ainsi que la période de l'année durant laquelle ces plantes ont été récoltées. Les cendres obtenues selon le foyer ou le mode de combustion se distinguent fortement. [14]

Les cendres de bois, outre les matières carbonées résiduelles contiennent beaucoup de calcium (sous forme d'oxyde de calcium, c'est-à-dire de chaux) et sont généralement riches en potasse alors que celles d'herbes, en particulier de graminées, ou simplement de paille, sont riches en silice. La coloration des cendres est assurée par de petites proportions d'oxydes de fer, de manganèse...etc. Ce sont des matières minérales, non organiques. [14]

Les cendres ont des compositions très variables en fonction des types de bois utilisés : [15]

- 17 à 33% de calcium (exprimé sous forme d'oxyde de calcium CaO) ;
- 2 à 6% de potassium (exprimé sous forme d'oxyde de potassium K₂O) ;
- 2,5 à 4,6% de magnésium (exprimé sous forme d'oxyde de magnésium MgO) ;
- 1 à 6,1 % de phosphore (exprimé sous forme d'oxyde de phosphore P₂O₅) ;
- Un pH entre 10 et 13 ;

Les cendres ne contiennent pas : [15]

- D'azote ;
- De matière organique ;
- D'éléments pathogènes ;

I.6 Conclusion

Dans cette recherche bibliographique, on a exposé tous les types des encroûtements (calcaires, gypseux et gypso-calcaires) utilisés dans le domaine de construction routière en zone aride et semi-aride et les différents liants hydrauliques et ses compositions chimiques et on met en évidence la méthode du traitement des sols avec la chaux ce qui semblait généralement plus économique et permet de la valorisation des matériaux locaux.

À partir de cette revue bibliographique, On peut conclure que :

la stabilité est améliorée dans le sol par la présence des cations bivalents (comme le calcium), Ils sont capables de faire des « ponts » entre les micro-agrégats du sol c'est-à-dire faire une augmentation de la résistance aux perturbations (passage d'engins, précipitations), comme on dit précédemment la cendre du bois est contient beaucoup de calcium donc l'apport de la cendres de bois au sol permet toujours d'améliorer la stabilité de la structure.

D'après tous les explications ci-dessus, On a choisi l'ajout de la chaux vive activé par la cendre des résidus des palmiers dattiers (CRPD) comme un liant du traitement pour étudier l'amélioration du comportement mécanique d'un matériau local (tuf gypseux) pour répondre aux exigences techniques relatives à la construction routière de la région aride.

CHAPITRE II: Caractérisation des matériaux

II.1 Introduction

Dans étude expérimentale, Il est évident de caractériser les matériaux et les produits utilisés, notre caractérisation est focalisée sur la détermination de certaines propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

Dans ce chapitre on décrira toutes les précautions et les processus appliqués pour la préparation des matériaux utilisés (le tuf, la chaux et la cendre des résidus des palmiers dattiers(CRPD)) et décrire en bref aussi tous les essais en laboratoire réalisés sur le tuf et la CRPD au cours de la présente recherche ainsi que les résultats obtenus.

La plus part des essais de caractérisation ont été effectués au niveau du laboratoire des travaux publics du sud (LTPS), et le laboratoire de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

II.2 Le tuf d'encroûtement

Le tuf d'encroûtement étudié dans cette recherche est extrait d'Ouargla (Figure II-1).



Figure II-1 Le tuf d'encroûtement étudié

Le tuf a été mis dans des sacs spéciaux pour l'isoler du vent et de la pluie afin de préserver au maximum ses caractéristiques initiales (Figure II-2). Mais d'abord un séchage préalable dans un endroit ensoleillé pendant quelques jours (Figure II-3) afin d'éliminer de toute humidité.



Figure II-2 photo des sacs du tuf



Figure II-3 Séchage du tuf

II.2.1 Caractérisation physiques

II.2.1.1 Masse volumique apparente

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-053, il a pour objectif de déterminer la masse volumique apparente d'un échantillon prélevé sur site, la masse volumique des sols est un paramètre d'état. Elle permet de déterminer l'indice des vides, la porosité, le degré de saturation et la masse volumique du sol sec, L'essai de détermination de la masse volumique apparente permet d'obtenir une $\gamma_{ap} = 1.16 \text{ g/cm}^3$.

II.2.1.2 Analyse granulométrique (par tamisage)

L'analyse granulométrique se fait selon la norme NF P 18-560, il permet de déterminer la grosseur des grains d'un matériau et le pourcentage des grains de chaque grosseur.

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique), Le but d'essai détermine la grosseur, forme de granulats constituant les échantillons.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un coefficient d'uniformité (C_u) ou coefficient de Hazen qui est égal au rapport « D_{60}/D_{10} » (on rappelle que d_y est l'ouverture du tamis au travers duquel passe y % du poids des grains). Pour Caquot et Kérisel, une granulométrie est étalée dès que le coefficient d'uniformité dépasse 2, on remarque que plus la granulométrie est serrée, plus la pente de la partie médiane de la courbe granulométrique est prononcée. [16]

Tableau II-1 Résultats d'analyse granulométrique du tuf

Tamis (mm)	poids refus partiels (g)	poids refus cumulés (g)	poids refus cumulés (%)	Tamisats (%)
50	0	0	0,00	100,00
31,5	86,8	86,8	1,74	98,26
20	225,98	312,78	6,26	93,74
10	365,44	678,22	13,56	86,44
5	353,42	1031,64	20,63	79,37
2	459,62	1491,26	29,83	70,17
1	389,88	1881,14	37,62	62,38
0,63	444,7	2325,84	46,52	53,48
0,315	382,5	2708,34	54,17	45,83
0,16	1060,5	3768,84	75,38	24,62
0,08	809,2	4578,04	91,56	8,44
récepteur	422	5000	100,00	0,00

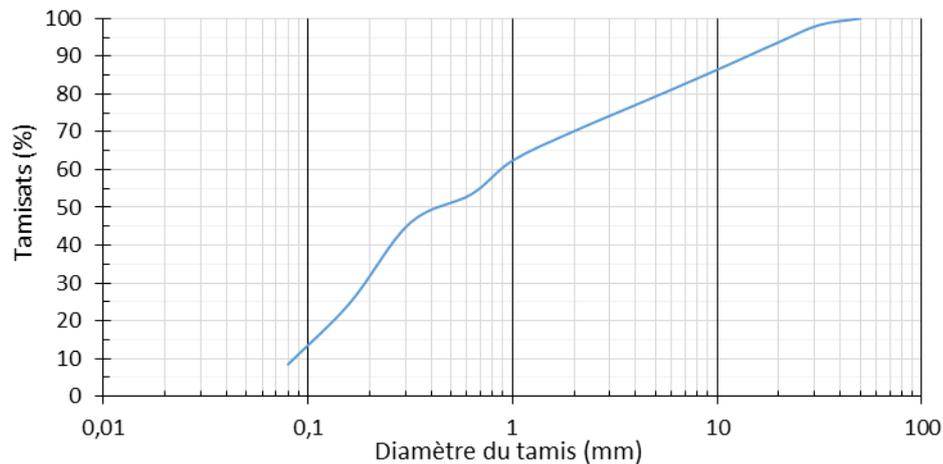


Figure II-4 Courbe granulométrique du tuf

Nous pouvons voir sur la courbe que le pourcentage d'éléments inférieurs à 0,08 mm est 8,44%, La valeur du coefficient d'uniformité (C_u) vaut 10,6, D'après Caquot et Kérisel la courbe granulométrique est de nature étalée ($C_u > 2$).

II.2.1.3 Limite d'Atterberg

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-051, il a pour objectif de déterminer les limites d'Atterberg (limite de liquidité et plasticité) et donc la valeur de l'indice de plasticité, Il est réalisé sur la fraction inférieure à 0,4 mm.

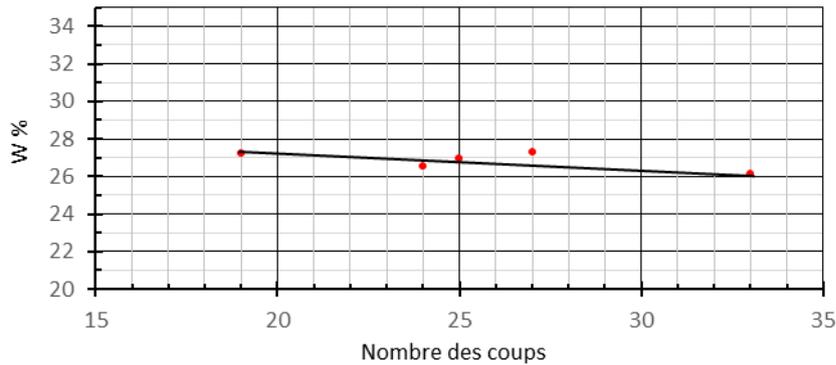


Figure II-5 La courbe de la limite de liquidité (W_L)

D'après la Figure II-5 on constate que la limite de liquidité est de l'ordre de 26,85%, La limite de plasticité (W_P) non mesurable donc l'indice de plasticité (I_p) non mesurable aussi.

II.2.1.4 Bleu méthylène

L'essai est réalisé selon la norme P94-068, il constitue un des paramètres d'identification de la classification des sols son but est de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse.

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache. Une classification des sols en fonction de la valeur de bleu méthylène adsorbée est montrée par le tableau ci-dessous :

Tableau II-2 Les classifications des sols en fonction de VBS [20]

$VBS \leq 0.2$	Sols sableux
$0.2 < VBS \leq 2.5$	Sols limoneux
$2.5 < VBS \leq 6$	Sols limono-argileux
$6 < VBS \leq 8$	Sols argileux
$VBS > 8$	Sols très argileux

Le volume de bleu méthylène absorbé par le tuf est de l'ordre de 68 ml, donc la valeur de bleu méthylène adsorbée (VBS) est 0.93, À partir du tableau précédent (Tableau II-2) on peut conclure que notre tuf est de nature de sol limoneux.

II.2.2 Caractérisation mécaniques

II.2.2.1 Proctor modifié

Réalisé à la base de la norme NF P 94-093, cet essai simule l'évolution du sol au cours du compactage et permet de déterminer pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau optimale pour obtenir la densité sèche maximale.

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

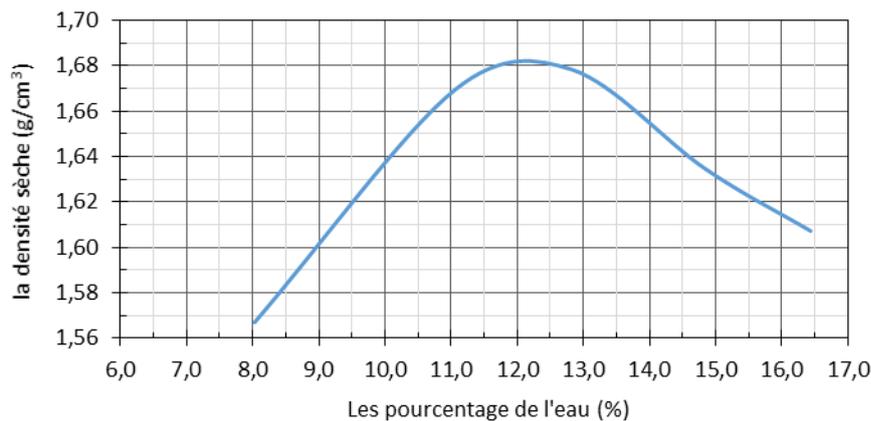


Figure II-6 La courbe de Proctor

D'après la courbe précédente, on déduit que la densité sèche maximale est de l'ordre de 1,68 g/cm³ pour une teneur en eau optimale équivalente à 12%.

II.2.2.2 CBR (California Bearing Ratio)

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-093, Il sert à déterminer l'indice CBR après immersion (I.CBR immersion) et l'indice portant immédiat (IPI).

Le principe consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

Les deux indices sont des nombres sans dimension exprimant en pourcentage, l'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'nfancement (en KN)}}{13,35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'nfancement (en KN)}}{19,93} \times 100$$

D'après l'essai de CBR on conclut que l'IPI est d'ordre de 69.14, On peut dire que la qualité du matériau est une bonne qualité, Selon la recherche d'Alol (Annexe A).

II.2.3 Caractérisation chimiques

Elle est réalisée à la base des normes NF P 15-461 et BS 1377, pour la détermination des taux d'insoluble (le quartz principalement), le taux de gypse, le taux de carbonate et la teneur en sels. On donnera ci-dessous un résumé de la méthode.

Les essais de détermination du taux de carbonates et de sulfates sont réalisés sur la fraction granulométrie inférieure à 1 mm.

II.2.3.1 Détermination du taux de carbonates

L'essai de détermination du taux de carbonate est effectué suivant la norme NF P 15-461 Mai 1964. On applique sur l'échantillon de sol un excès d'acide chlorhydrique et l'excès est dosé en retour par une solution d'hydroxyde de sodium, d'où on détermine exactement le taux de carbonate existant dans le sol.

II.2.3.2 Détermination du taux de sulfates

L'essai est réalisé à la base de la norme BS 1377 Décembre 1990, le taux de sulfate dans un sol est déterminé par la méthode gravimétrique selon laquelle on ajoute du chlorure de baryum à l'eau ou l'extrait acide de sol, puis on assèche et on pèse le précipité de sulfate de baryum.

On calcul alors le taux à partir de la masse du matériau utilisé dans l'analyse et de la masse de sulfates de baryum précipité.

II.2.3.3 Détermination du taux d'insolubles

Les insoluble sont les silicates (en particulier le quartz : principal composant du sable) corps insolubles dans l'acide chlorhydrique.

L'essai de détermination du taux d'insolubles est effectué suivant la norme NF P 15-461 Mais 1964. Une masse de 2g d'échantillon est additionnées à une quantité d'acide chlorhydrique (HCl), après chauffage et filtration de la liqueur, on rajoute une solution de carbonate de sodium, on bouillie l'ensemble, et après filtration, on procède à un double lavage avec l'HCl et l'eau distillée, et enfin, on calcine le filtre avec son contenu et on pèse.

Tableau II-3 Résultats d'analyse chimique du tuf

Insolubles (%)		8.2
Sulfates (%)	SO ₃ ²⁻ (%)	12.89
	SO ₄ ²⁻ (%)	15.49
	CaSO ₄ 2H ₂ O	69.21
Carbonates de calcium CaCO ₃ (%)		20
Chlorure de sodium « Méthode de Mohr »	Cl ⁻ (%)	0.593
	NaCl (%)	0.912
Potentiel Hydrogène (PH)		8.48

Tableau II-4 Les différents types d'encroûtement selon la nature chimique [21]

		Calcaire	Gypse	Gypso-Calcaire
Taux de Gypse et de Calcaire	Encroûtement calcaire	50 à 95 %	Moins de 10 %	10 à 50 %
	Encroûtement gypseux	Moins de 10 %	40 à 90 %	10 à 50 %
	Encroûtement gypso-calcaire	Plus de 50 %	Plus de 50 %	Plus de 50 %

D'après le Tableau II-4 et vu du pourcentage élevé du gypse (69.21%) et le pourcentage de carbonates de calcium (20%) on peut classer notre tuf comme un tuf gypseux.

II.2.4 Classification des matériaux selon GTR 92

L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992) et la norme qui en découle NF- P 11-300 (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

Cette classification est la seule présentant un réel intérêt pratique et utilisée dans les travaux de terrassement. Son utilisation est détaillée dans le Guide Technique pour la réalisation des Remblais et couches de forme. [17]

Les résultats obtenus lors de la caractérisation physico-mécanique effectuée sur notre matériau sont synthétisés dans le Tableau II-5.

Tableau II-5 synthèse des résultats de caractérisation

Caractéristique	Valeur
La masse volumique apparente (g/cm^3)	1.16
Diamètre maximal (mm)	50
Coefficient d'uniformité	10.6
Éléments < 0.08 mm	8.44 %
Élément < 2 mm	7.8 %
Limite de liquidité (%)	26.85
La densité sèche maximale (g/cm^3)	1.68
La teneur en eau optimale (%)	12
Indice portant immédiat (IPI)	69.14
VBS	0.93
SO_3^{2-} (%)	12.89
Insolubles (%)	8.2
SO_4^{2-} (%)	15.49
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (%)	69.21
CaCO_3 (%)	20
Cl^- (%)	0.593
NaCl (%)	0.912
PH	8.48

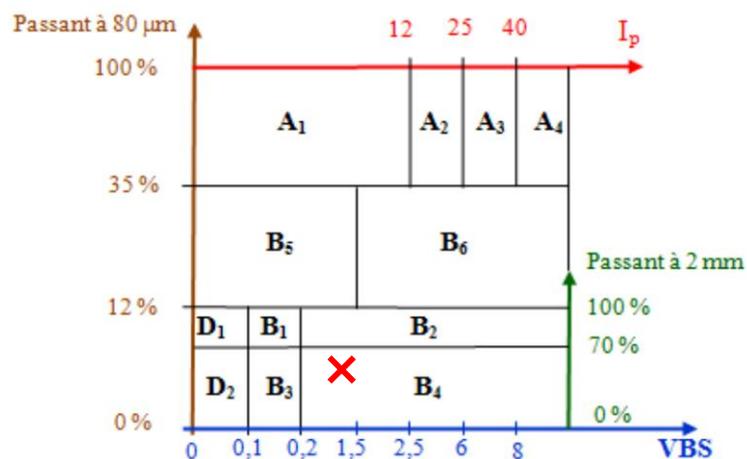


Figure II-7 tableau synoptique de classification des matériaux [17]

D'après les résultats de caractérisation, le tuf d'encroûtement est rangé dans la classe B₄ (Figure II-7) Sols sableux et graveleux avec fines.

II.3 La chaux

La chaux est l'un des liants les plus anciennement utilisés. Les Romains l'additionnaient de pouzzolane pour donner un mortier qui, dans des constructions remarquables. [18]

La chaux désigne toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium (Ca(OH)₂ et Mg(OH)₂). Elle se présente sous deux formes : aérienne et hydraulique. [19]

La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Saida; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO₂, et aluminates Al₂O₃ et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO, ce qui donne à notre liant son aspect aérien, D'où sa fiche technique des propriétés chimiques et physiques est résumée dans le Tableau II-6.

Tableau II-6 Fiche technique des Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida

Caractéristique	Valeur
Apparence physique	Poudre blanche sèche
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.2 à 2.4
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.5 à 0.65
Surface spécifique (cm ² /g)	8000 à 12000
CaO (%)	> 73,3
MgO (%)	< 0,5
Fe ₂ O ₃ (%)	< 2
Al ₂ O ₃ (%)	< 1,5
SiO ₂ (%)	< 2,5
SO ₃ (%)	< 0,5
Na ₂ O (%)	0,4 à 0,5
CO ₂ (%)	< 5
CaCO ₃ (%)	< 10
Densité spécifique	2
Plus de 90µm (%)	< 5
Plus de 630µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600 à 900



Figure II-8 la chaux utilisée

II.4 La cendre des résidus des palmiers dattiers (CRPD)

La cendre exploitée est l'issue de la combustion des résidus des palmiers dattiers (Figure II-9).



Figure II-9 Différents résidus utilisé pour la cendre

Cette combustion a été réalisée en deux phases :

- 1) par la combustion préliminaire dans un tonneau de fer (Figure II-10) et ensuite faire une combustion secondaire dans un four à 800°C (Figure II-11).
- 2) La cendre obtenue est ensuite broyée pendant 30 minutes pour chaque 400 gramme (Figure II-12) pour la rendre plus fine.



Figure II-10 La combustion préliminaire des résidus

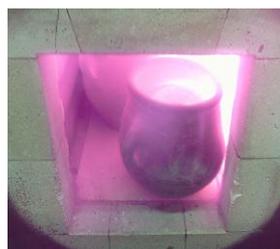


Figure II-11 La deuxième combustion de la CRPD



Figure II-12 Le broyage de la CRPD

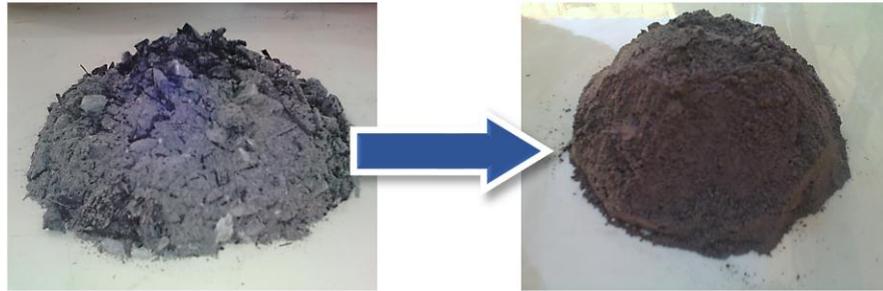


Figure II-13 la cendre avant et après le broyage

NB :

- Notre cendre finale est d'une masse volumique de l'ordre de 0.734 g/cm^3 .
- La deuxième combustion de la CRPD à 800°C se fait pendant 45 min, cette dernière peut être traduite par la courbe suivante :

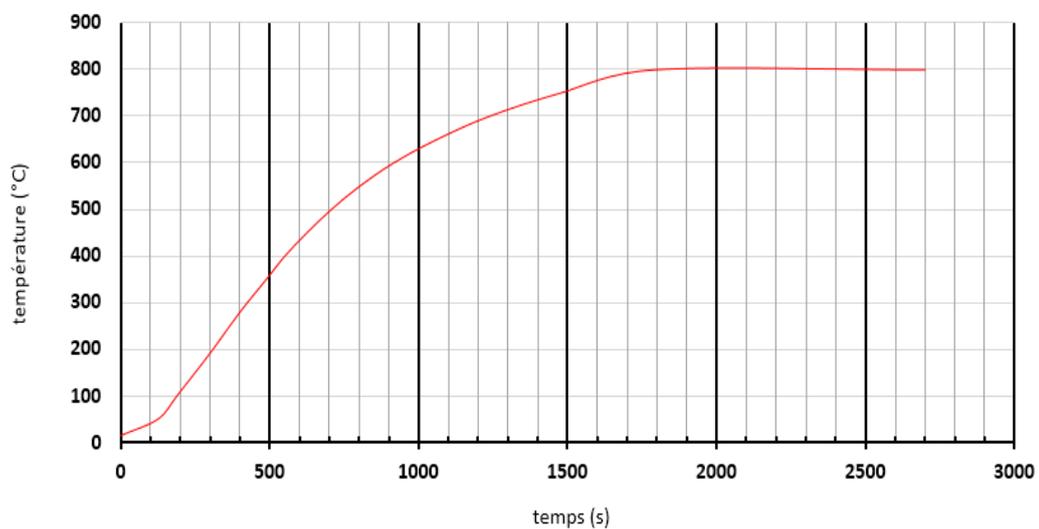


Figure II-14 La température pendant la cuisson

II.5 Conclusion

Les résultats de caractérisation révèlent que notre matériau de base est un tuf gypseux ayant une teneur en eaux optimale égale 12%, une densité sèche maximale de 1.68 .et indice portant immédiat de 69.14%.

Selon la classification GTR92, le tuf est rangé dans la classe B4. Il est considéré comme une grave argileuse.

CHAPITRE III: Interprétation des résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans cette partie expérimentale et afin d'atteindre notre objectif, des essais de compression simple, de traction indirecte (par fendage) et de sensibilité à l'eau sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques confectionnée à partir de :

- tuf seul ;
- tuf + chaux ;
- tuf+ cendre des résidus des palmiers dattiers (CRPD) ;
- tuf + chaux + cendre des résidus des palmiers dattiers.

III.2 Résistance à la compression simple (R_c)

C'est un essai empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par FENZY (1957) [7], il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction 5 mm, les éprouvettes sont de dimension de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur.

Les éprouvettes sont confectionnées avec une compacité de 95% de la densité sèche maximale de Proctor. La résistance est évaluée pour les cas suivants :

- 1) La R_c a l'âge de 7 et 180 jours pour une teneur en eau de confection d'éprouvette égale à celle de l'optimum Proctor (12%) (Figure III-1), Les mélanges testés sont :
 - Tuf seul ;
 - Tuf + chaux (2, 4%) ;
 - Tuf + CRPD (4, 8, 12%) ;
 - Tuf + 4% chaux + cendre (4, 8, 12%) ;
- 2) La R_c à l'âge de 7 et 180 jours pour différents teneurs en eau de confection des éprouvettes (10, 12, 14%), les mélanges testés sont :
 - Tuf + 4% chaux + CRPD (4, 8, 12%)



Figure III-1 des éprouvettes de compression préparées à l'écrasement

3) la R_c à l'âge de 180 jours puis l'immersion des éprouvettes dans l'eau et pour une teneur en eau optimale (12%) (Figure III-15 et Figure III-16), les mélanges testés sont :

- Tuf + chaux (2, 4%) (+24 heures d'immersion) ;
- Tuf + CRPD (4, 8, 12%) (+24 heures d'immersion) ;
- Tuf + 4% chaux + CRPD (4, 8, 12%) (+48 heures d'immersion) ;

III.3 Résistance à la traction indirecte (R_{ti})

Cet essai est réalisé par des éprouvettes de 5 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur, confectionnée pour compacité de 95% de la densité sèche maximale. L'évaluation de la résistance à la traction se fait par une méthode indirecte dite « essai brésilien ». Cette résistance est évaluée pour les cas suivants :

1) La R_{ti} à l'âge de 7 et 180 jours pour une teneur en eau de confection d'éprouvette égale à celle de l'optimum Proctor (12%) (Figure III-2), Les mélanges testés sont :

- Tuf seul ;
- Tuf + chaux (2, 4%) ;
- Tuf + CRPD (4, 8, 12%) ;
- Tuf + 4% chaux + cendre (4, 8, 12%) ;

2) la R_{ti} à l'âge de 7 et 180 jours pour les différents teneurs en eau de confection des éprouvettes (10, 12, 14%), les mélanges testés sont :

- Tuf + 4% chaux + CRPD (4, 8, 12%)



Figure III-2 Des éprouvettes de traction préparées à l'écrasement

1) La R_{ti} à l'âge de 180 jours après l'immersion des éprouvettes en eau à 24 heures et pour une teneur en eau optimale (12%) afin de connaître la sensibilité à l'eau de chaque mélange qui sont :

- Tuf + chaux (2, 4%)

NB :

- On a confectionné 3 éprouvettes pour chaque mélange étudié et pour chaque âge.
- Les abréviations des mélanges adoptés s sont représentées ci-dessous :

Tableau III-1 Les différentes abréviations des mélanges adoptés

tuf avec	traitement à la chaux	Chaux	2%	Tuf + 2% CX
			4%	tuf + 4% CX
	traitement à la CRPD	CRPD	4%	tuf + 4% CN
			8%	tuf + 8% CN
			12%	tuf + 12% CN
	traitement mixte	4% Chaux + CRPD	4%	tuf + 4% CX + 4% CN
			8%	tuf + 4% CX + 8% CN
			12%	tuf + 4% CX + 12% CN

- Le compactage des éprouvettes (de la compression simple et de la traction indirect) est effectué à une presse hydraulique (Figure III-3) dans un moule cylindrique à double piston (Figure III-4).



Figure III-3 presse hydraulique pendant la confection



Figure III-4 la moule à double piston pour la confection

- L'écrasement (des éprouvettes de compression et de traction) se fait par une presse hydraulique à une vitesse de 1.6 mm/min (Figure III-5).



Figure III-5 presse hydraulique pour l'écrasement

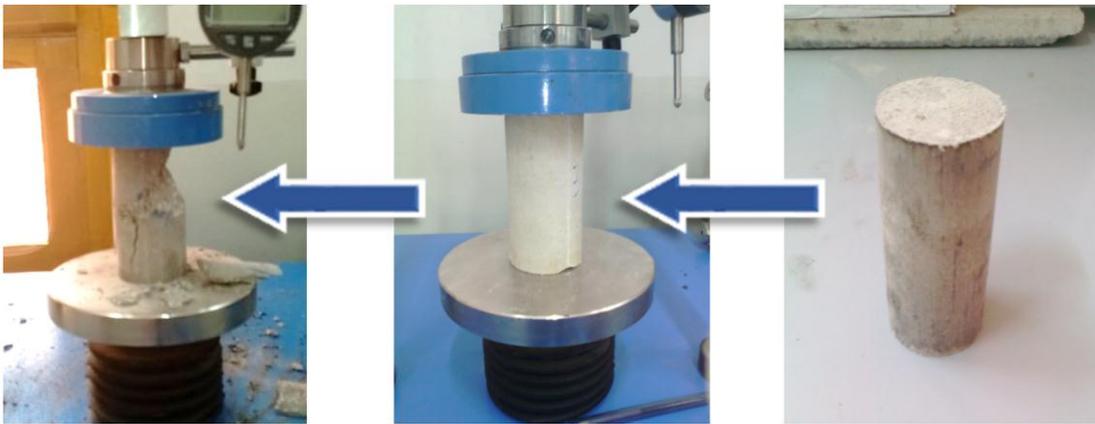


Figure III-6 Une éprouvette de compression pendant l'écrasement

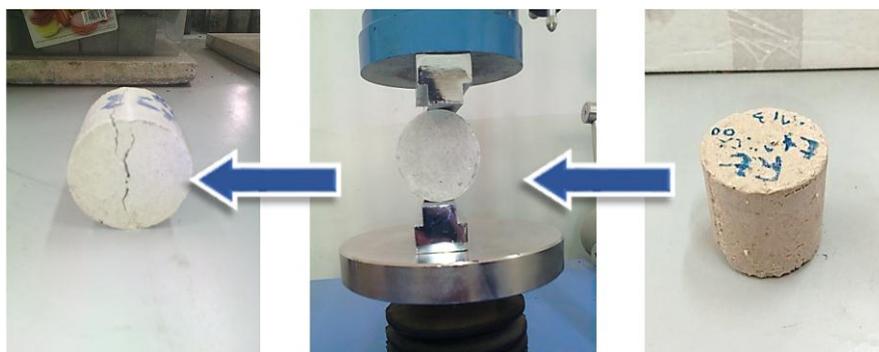


Figure III-7 Une éprouvette de traction pendant l'écrasement

III.4 Les résultats pour la compression simple (R_c)

III.4.1 La R_c pour une teneur en eau de 12%

III.4.1.1 Traitement à la chaux

La Figure III-8 montre la variation de la résistance à la compression simple du tuf traitée en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de tuf + chaux.

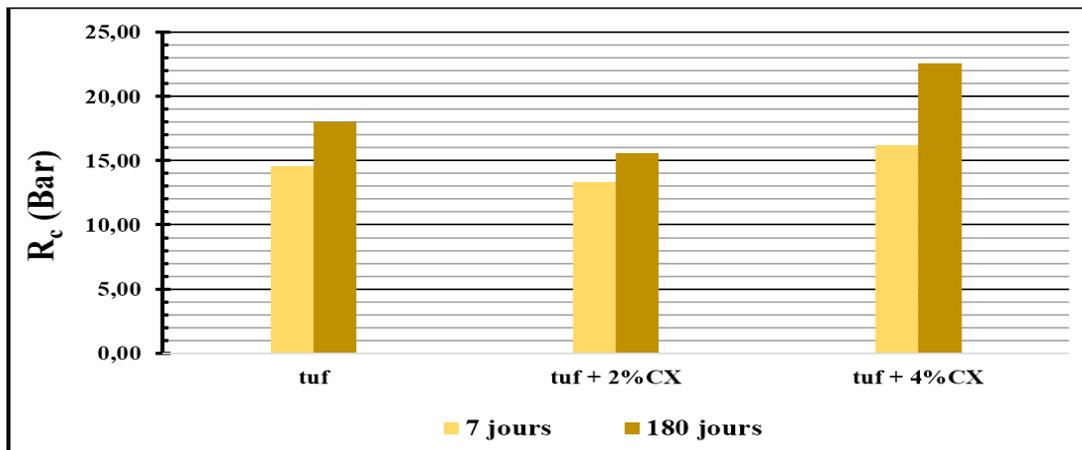


Figure III-8 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la chaux substituée dans le mélange

Les histogrammes de la figure ci-dessus montrent :

- l'augmentation de la R_c avec l'âge, soit pour le tuf ou pour le tuf traité à la chaux, cette tendance est compatible avec celle constatée par plusieurs travaux de recherche réalisés sur ce type de matériau.
- À 180 jours, la R_c du tuf traité de 4% chaux est de l'ordre de 22 bars tandis que pour le tuf seul est d'environ 18 bars.

III.4.1.2 Traitement à la CRPD

La Figure III-9 montre la variation de la résistance à la compression simple du tuf traité en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + CRPD ».

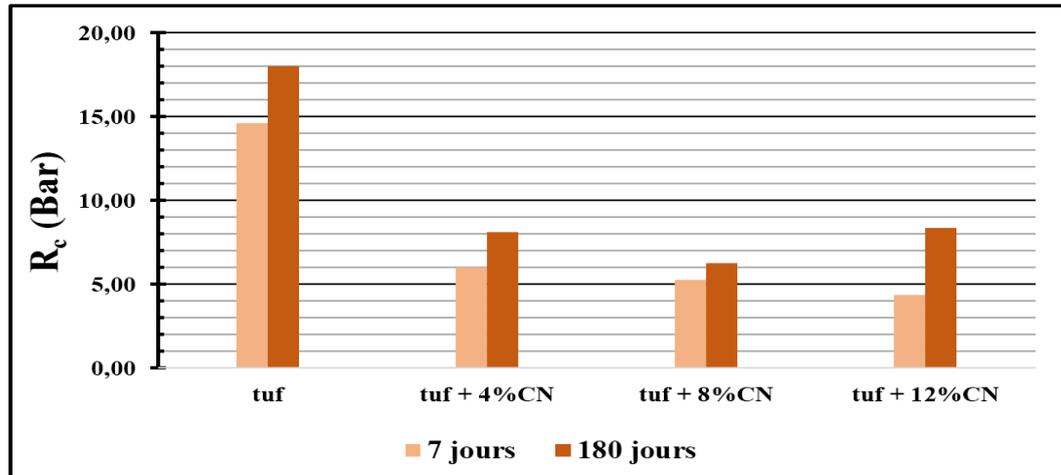


Figure III-9 variation de la R_c en fonction du pourcentage de CRPD substituée dans le mélange

D'après les histogrammes tracés, nous constatons que l'ajout de la cendre des résidus des palmiers dattiers n'arrive pas à améliorer la résistance en comparant avec celle du tuf seul quel que soit l'âge, ce que permet de dire que l'ajout de la cendre seule n'a aucun effet positif sur les tufs.

III.4.1.3 Traitement mixte

Après le traitement à la chaux et à la CRPD et dans le but de rechercher une meilleure solidification de notre tuf, un traitement mixte (chaux + CRPD) a été étudié.

Les résultats de ce traitement sont traduits par l'histogramme de la Figure III-10 qui montre la variation de la résistance à la compression simple du tuf traitée en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + chaux +CRPD ».

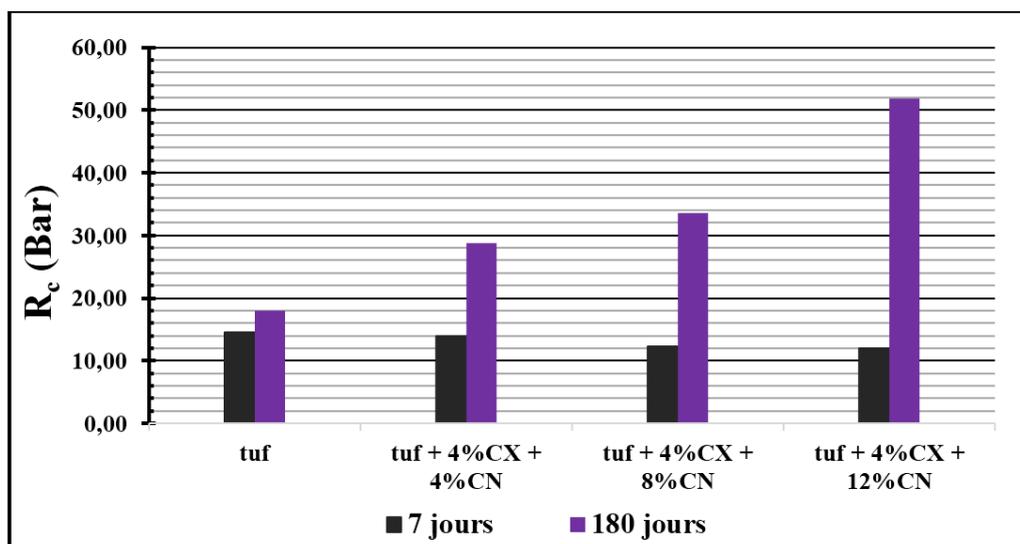


Figure III-10 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la chaux et la CRPD substituée dans le mélange

Les résultats obtenus (Figure III-10) montrent clairement que le traitement mixte du tuf, pour 7 jours, donne presque les mêmes résistances qui oscillent autour de 13 bars. En revanche, à 180 jours la résistance marque une augmentation considérable, elle est de l'ordre de 51 bars pour le mélange de tuf + 4%CX + 12% CRPD et qui vaut plus de deux fois de la R_c du tuf seul.

Ceci prouve l'existence des réactions chimiques entre certains constituants de la chaux et ceux de la cendre qui permet d'augmenter la liaison entre les particules du tuf. Cette tendance est similaire à celle enregistré lors des traitements mixtes des matériaux routiers avec liants pouzzolaniques (cendre volante, fumé de silice...) combinée avec la chaux.

III.4.1.4 Comparaison entre les valeurs maximales

Pour illustrer quel est le traitement le plus efficace, une comparaison a été faite entre les résistances maximales obtenues à partir des mélanges tuf + chaux et tuf + chaux + cendre.

La Figure III-11 montre la variation de la résistance maximale à la compression simple du tuf traitée en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + chaux » et « tuf + chaux + CRPD ».

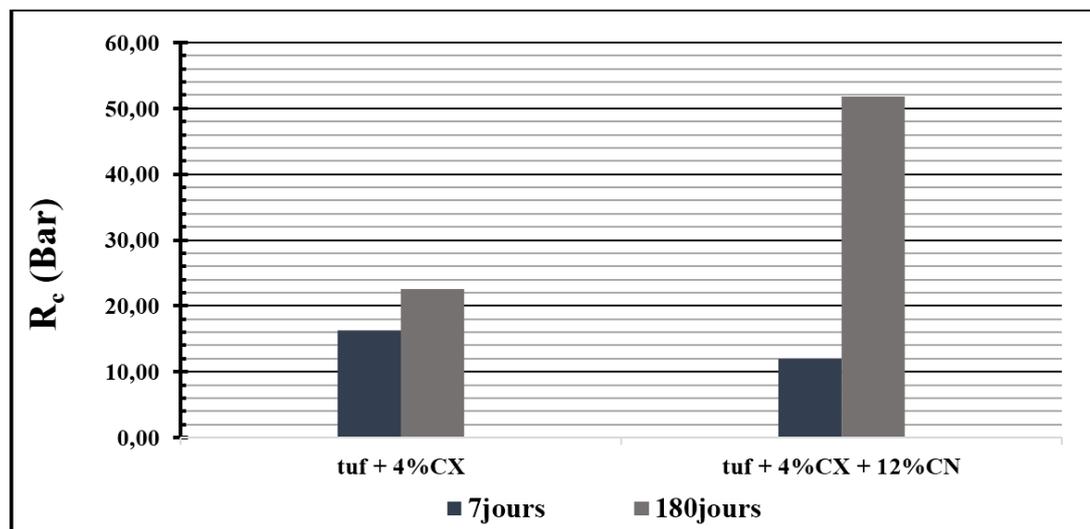


Figure III-11 variation de la R_c maximale en fonction de deux mélange (t+CX et t+CX+CN)

On remarque d'une manière générale que le traitement à court terme (7 jours) n'a presque aucun effet important sur la résistance de deux mélanges testés, cette dernière est d'ordre de 14 bars.

Contrairement au traitement mixte, à long terme (180 jours), la résistance à la compression s'améliore visiblement, et qui autour de 52 bars, quant au traitement avec 4% de chaux, augmentation relativement légère de la R_c qui atteint la valeur de 23 bars en comparant avec celle de 07 jours.

Ceci nous permet de dire que l'association CRPD avec la chaux peut jouer le rôle d'un liant.

III.4.2 La R_c pour différents teneurs en eau de confection

III.4.2.1 Traitement mixte

La résistance à la compression des matériaux routiers traités aux liants hydrauliques ou pouzzolaniques est souvent influencée par la quantité d'eau ajoutée, comme est le cas pour les mortiers et les bétons lors du gâchage.

Pour cette raison, des éprouvettes sont préparées à partir des mélanges (tuf + chaux + cendre)

La Figure III-12 et Figure III-13 montrent la variation de la résistance à la compression simple du tuf traité en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + chaux + CRPD » pour différentes teneurs en eau de confection (10, 12, 14%).

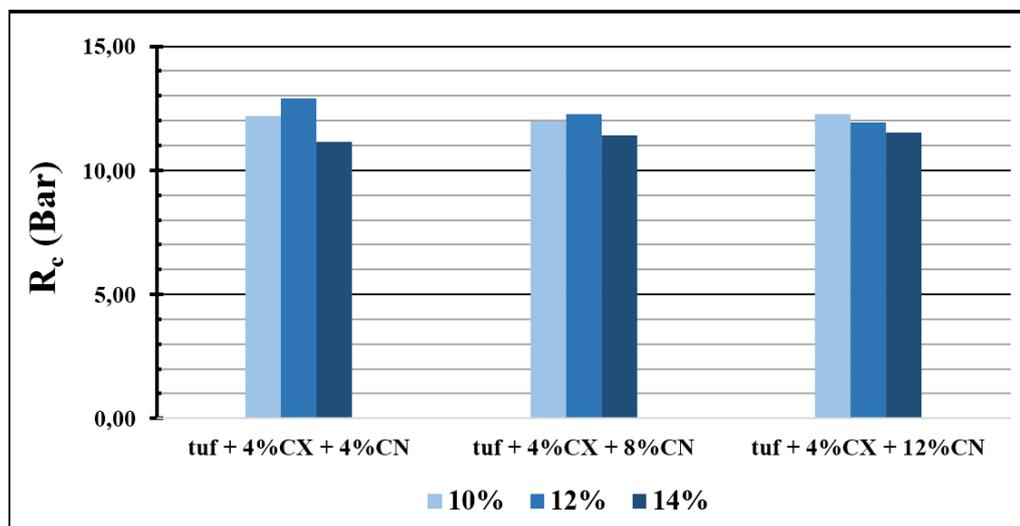


Figure III-12 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la CRPD (7 jours)

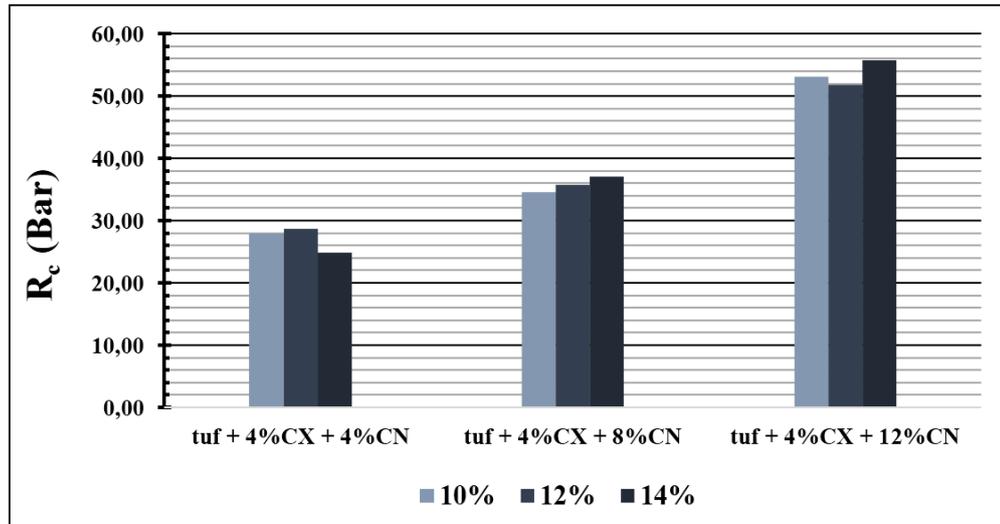


Figure III-13 variation de la R_c en fonction du pourcentage de la CRPD (180 jours)

On peut remarquer facilement d'après la Figure III-12 que tous les mélanges de 7 jours ont presque la même R_c , contrairement aux mélanges de 180 jours (Figure III-13) qui se portent clairement une modification importante par rapport à celle de 7 jours.

Le traitement mixte (4% chaux + 12% CRPD) par une teneur en eau de 14 % nous donne une R_c majeur (environ 55 Bar), La croissance de cette dernière a été augmentée par un pourcentage de 55 % par rapport au mélange initial (4% chaux +4% CRPD).

On peut remarquer que la résistance dépasse 15 Bar pour tous les mélanges de 180 jours (Figure III-12), ce que signifie, selon la Proposition de STRUILLLOU et ALLOUL (Annexe A), que le traitement mixte à long terme (180 jours) pourrait donner des résistances compatible à la réalisation des couches d'assise (couche de fondation et de base), contrairement à le traitement mixte à court terme de 7 jours (Figure III-13) qui nous a donné des résistance insuffisante pour la couche d'assise (environ 12 Bar).

III.4.3 Sensibilité à l'eau

Certainement, Les chaussées sont de temps en temps exposées aux eaux pluviales influant la durabilité des matériaux constituant les différentes couches de l'ouvrage. Donc, Ils évident que ces matériaux doivent avoir des performances mécaniques acceptables pour faire face à telle situation

C'est dans ce contexte que nous avons testé la sensibilité à l'eau en mesurant la résistance des éprouvettes à l'âge de 180 jours et après l'immersion dans l'eau.

III.4.3.1 Traitement à la chaux

La Figure III-14 montre la variation de la résistance à la compression simple après l'immersion de 24 heures du tuf traité en fonction du pourcentage de la chaux ajouté dans le mélange.

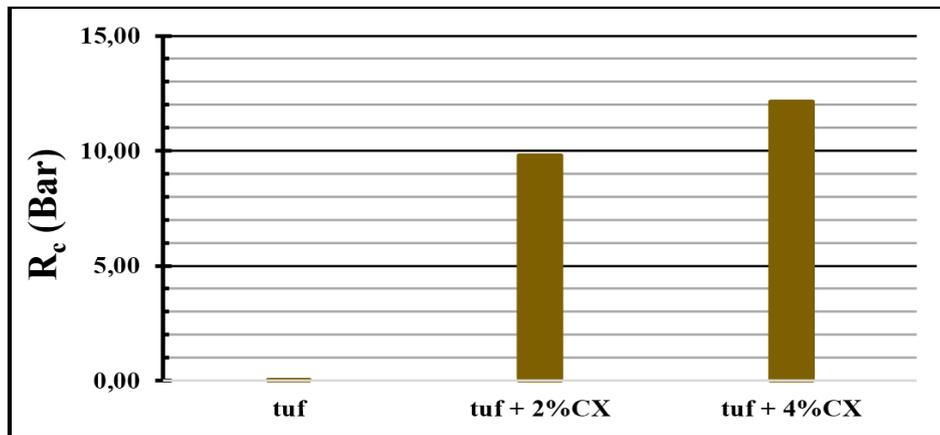


Figure III-14 variation de la R_c après l'immersion (24h) en fonction du pourcentage de la chaux substituée dans le mélange

D'après la Figure III-14, on remarque que la R_c de tuf seul est nulle, à cause de la dissolution totale des éprouvettes (Figure III-15).

On voit aussi que le traitement du tuf à la chaux permet de maintenir la forme des éprouvettes après l'immersion, une R_c de 12 bars est atteinte pour un traitement de 4% de la chaux.



Figure III-15 Les éprouvettes de compression au tuf seul après 24h d'immersion



Figure III-16 Des éprouvettes de compression à la chaux pendant et après l'immersion

III.4.3.2 Traitement à la CRPD

Le traitement à la CRPD nous mène à un effondrement quasi-total des éprouvettes (Figure III-17), ce qui nous clarifie que le traitement à la CRPD seul n'améliore pas la sensibilité à l'eau.



Figure III-17 des éprouvettes de compression à la CRPD après l'immersion de 24h

III.4.3.3 Traitement mixte

La Figure III-19 montre la variation de la résistance à la compression simple après l'immersion de 48 heures pour un mélange de « tuf + chaux + CRPD ».



Figure III-18 des éprouvettes de compression au traitement mixte après l'immersion de 24h

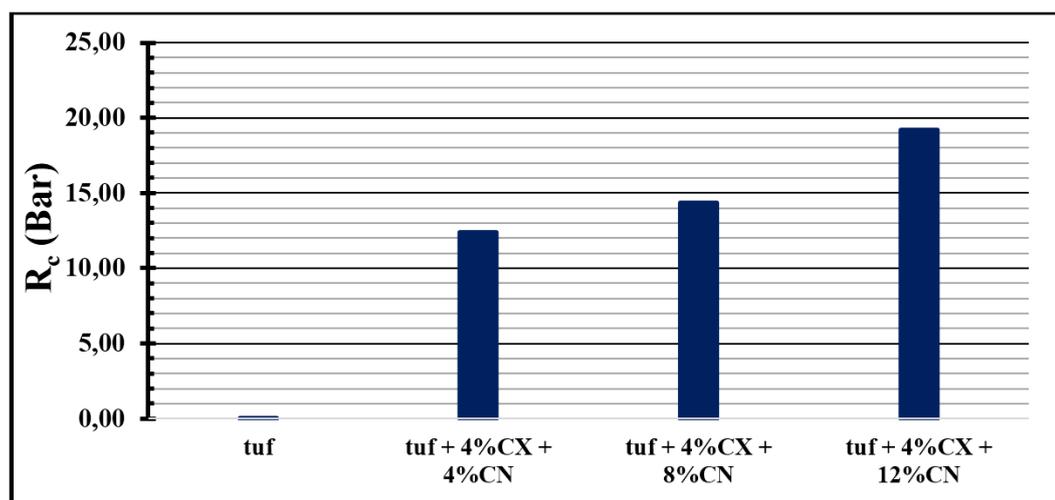


Figure III-19 variation de la R_c après l'immersion (48h) en fonction du pourcentage de la CRPD substituée dans le mélange

Après l'immersion, la chose la plus importante, qu'il faut signaler, est le maintien de la forme des éprouvettes, contrairement à ce qui est observée pour le tuf seul dont un effondrement total des éprouvettes.

La Figure III-19 montre que la R_c s'améliore au fur et à mesure en augmente le pourcentage de cendre, la résistance maximale est de l'ordre de 19 bars lors de l'ajout de 12% de cendre, c'est-à-dire pour le mélange (tuf + 4%CX + 12%CN).

III.5 Les résultats pour la traction indirecte (R_{ti})

III.5.1.1 Traitement à la chaux

La Figure III-20 montre la variation de la résistance à la traction indirecte du tuf traité en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + chaux ».

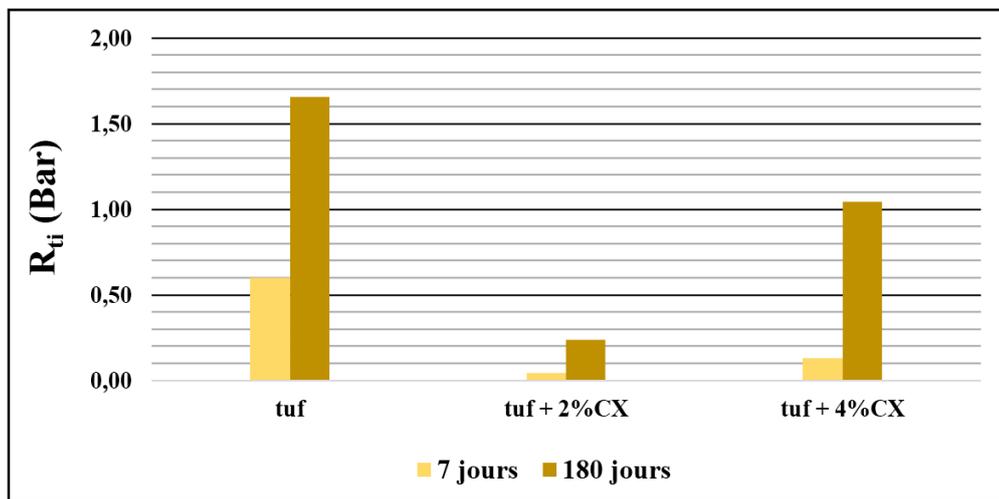


Figure III-20 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la chaux substituée dans le mélange

L'histogramme de la figure ci-dessus (Figure III-20) montre généralement pour les éprouvettes de 7 jours qu'une résistance à la traction indirecte du tuf seul est plus élevée que celle du tuf traité à la chaux.

III.5.1.2 Traitement à la CRPD

La Figure III-21 montre la variation de la résistance à la traction indirecte du tuf traité en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + CRPD ».

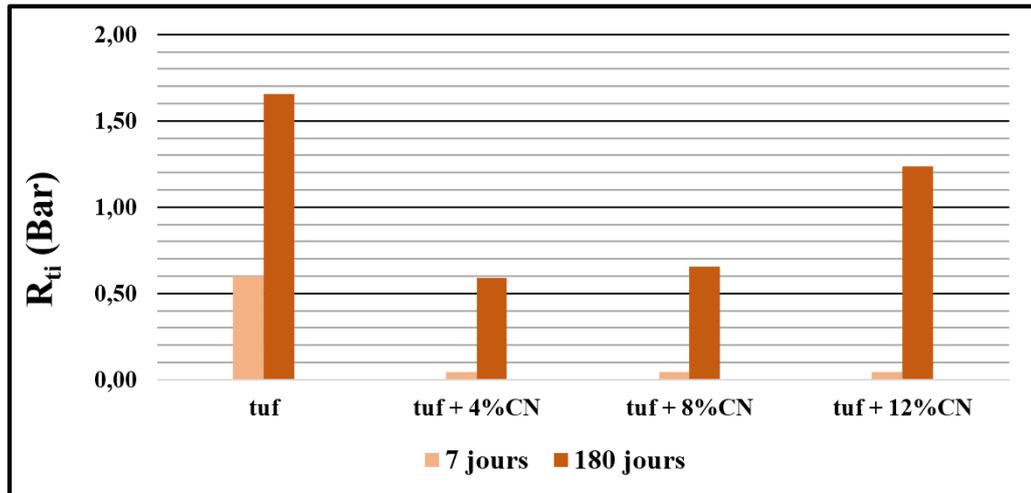


Figure III-21 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de CRPD substituée dans le mélange

D'après les histogrammes tracés, nous constatons que l'ajout de la cendre des résidus des palmiers dattiers n'arrive pas à améliorer la résistance en comparant avec celle du tuf seul quel que soit l'âge. Ce que permet de dire que la cendre n'a aucun effet positif sur la résistance du tuf.

III.5.1.3 Traitement mixte

La Figure III-22 montre la variation de la résistance à la traction indirecte du tuf traité en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + chaux +CRPD ».

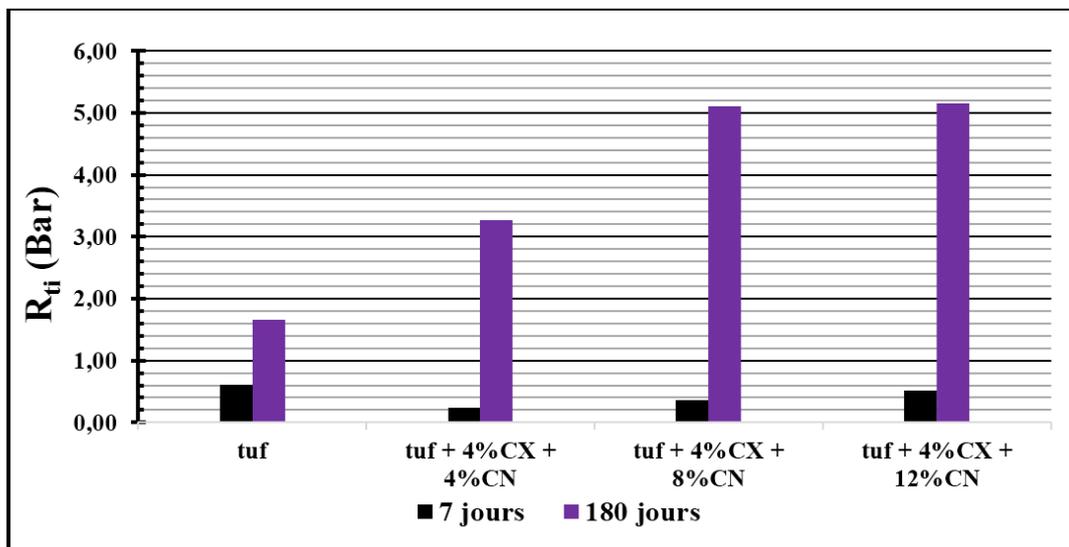


Figure III-22 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la chaux et la CRPD substituée dans le mélange

Les résultats obtenus montrent que le traitement mixte (chaux+ cendre) a augmenté la résistance à la traction, pour les deux âges, quel que soit le pourcentage de cendre ajoutée.

En comparant entre la résistance du tuf traité et celle du tuf seul, nous constatons que :

- À 7 jours et pour tous les mélanges, les résistances sont voisines, elles oscillent autour de 0.4 bars.
- À 180 jours, la R_{ti} maximale est enregistrée aussi lors de l'ajout de 12% cendre, elle atteint la valeur de 5 bars, ce qui est plus de trois fois de la R_{ti} du tuf seul, cet écart montre l'effet positif du traitement mixte sur la résistance à la traction.

III.5.1.4 Comparaison les valeurs maximales

La comparaison est nécessaire entre les valeurs maximales obtenues par le traitement à la chaux et le traitement mixte est illustré par la Figure III-23 montrant la variation de la résistance maximale à la traction indirecte du tuf traité en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + chaux » et « tuf + chaux +CRPD ».

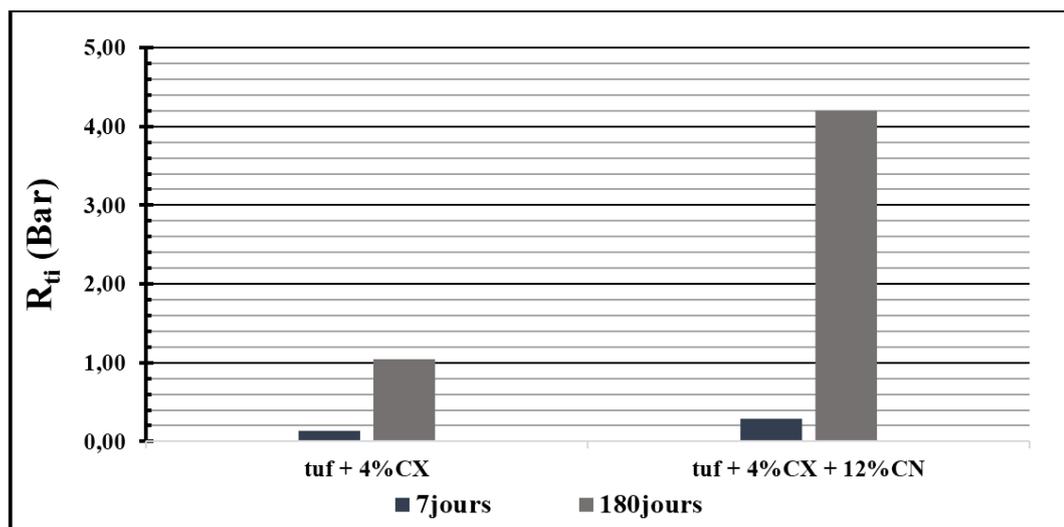


Figure III-23 variation de la R_{ti} maximale en fonction de deux mélange (t+CX et t+CX+CN)

On remarque d'une manière générale que le traitement à court terme (7 jours) n'a presque aucun effet important sur résistance de deux mélanges testés, Contrairement au traitement mixte à long terme (180 jours), la résistance à la compression marque une augmentation, elle dépasse les 4 bars.

III.5.2 La R_{ti} pour différentes teneurs en eau

III.5.2.1 Traitement mixte

La Figure III-24 et Figure III-25 montrent la variation de la résistance à la traction indirecte du tuf traité en fonction de l'âge des éprouvettes pour un mélange de « tuf + chaux + CRPD » pour une différente teneur en eau (10, 12, 14%).

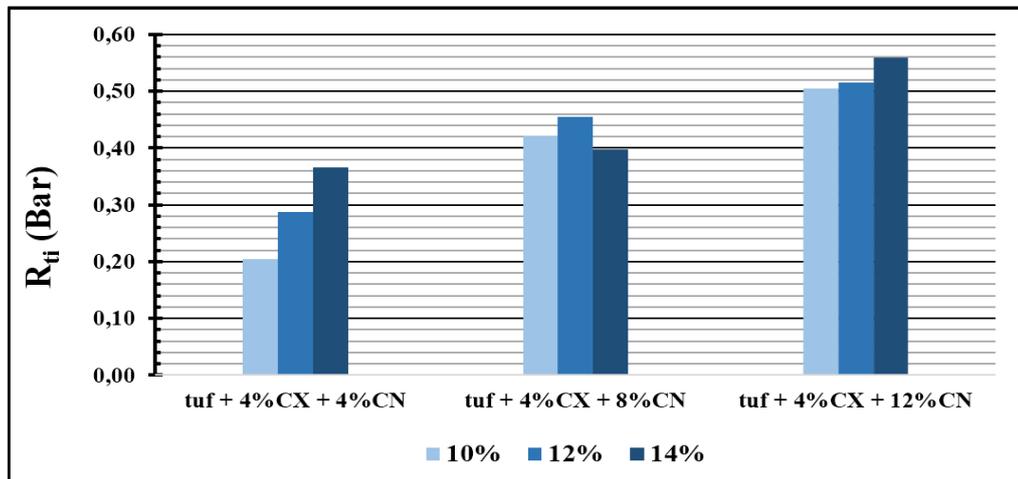


Figure III-24 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la CRPD (7 jours)

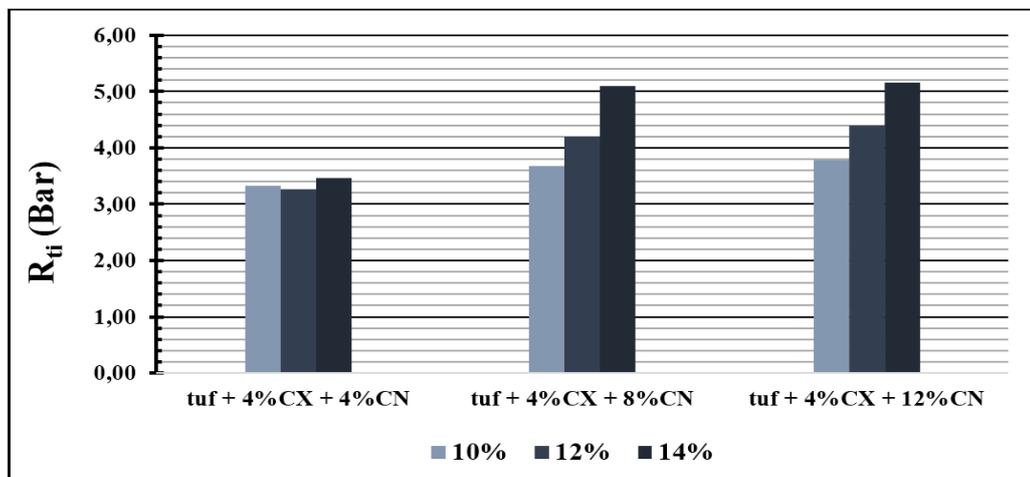


Figure III-25 variation de la R_{ti} en fonction du pourcentage de la CRPD (180 jours)

Les résultats montrent que :

Pour les deux âges et pour toutes les meilleures résistances maximales sont constatées lors de l'utilisation une teneur en eau égale 14 %.

À 180 jours, la résistance maximale est celle du mélange tuf +4%chaux+12% cendre.

III.5.2.2 Sensibilité à l'eau

Pour voir l'influence de l'ajout de la chaux au tuf sur la sensibilité à l'eau pour la traction indirect, nous avons confectionné des éprouvettes à partir des mélanges du tuf + chaux et sauvegardées jusqu'à 180 jours, puis Immergée dans l'eau pendant 24 heures.

Après 24 heures d'immersion les résultats montrent l'effondrement total des éprouvettes du tuf seul et le maintien les autres confectionnées du tuf + chaux.



Figure III-26 Les éprouvettes à la traction du tuf après 24h d'immersion



Figure III-27 Des éprouvettes de traction à la chaux pendant et après l'immersion

La Figure III-28 montre la variation de la résistance à la traction indirecte après l'immersion de 24 heures du tuf traité pour un mélange de « tuf + chaux ».

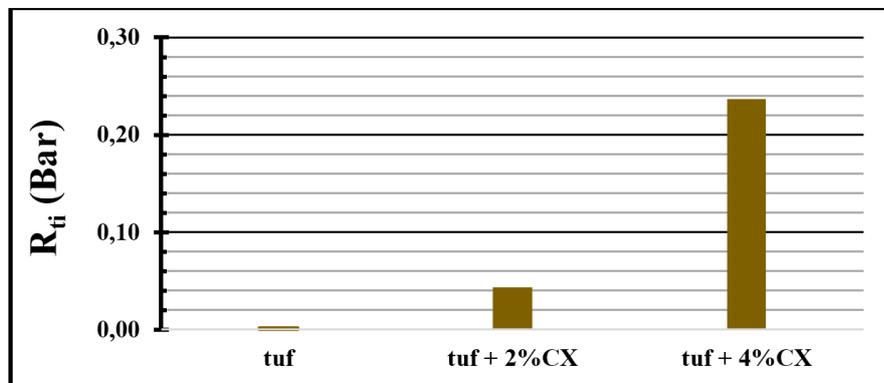


Figure III-28 variation de la R_{ti} après l'immersion (24h) en fonction du pourcentage de la chaux substituée dans le mélange

Pour le tuf traité à la chaux, la résistance maximale est constatée à l'ajout de 4% de chaux, elle atteint la valeur de 0.24 bars.

III.6 Conclusion

À la lumière des résultats obtenus, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Traitement dû à la chaux et à la chaux + cendre améliorent globalement la résistance à la compression simple et qui ne contredit pas la tendance générale des traitements des sols aux liants ;

- les meilleures résistances à la compression sont enregistrées lors de l'ajout de 04 chaux et 12% cendre ;
- la résistance à la traction du tuf traité à la chaux + cendre est nettement supérieure à celle du tuf seul et celle du tuf traité à la chaux ;
- L'étude de la sensibilité à l'eau montre le maintien des éprouvettes confectionnées à partir des mélanges tuf + chaux et tuf +4% chaux + cendre et l'effondrement total des éprouvettes du tuf seul.

Conclusion Générale et Recommandations

Dans Cette étude, notre objectif principal est de valoriser les résidus des palmiers dattiers en utilisant leur cendre comme ajout pour améliorer la résistance mécanique et la sensibilité à l'eau d'un tuf d'encroûtement (matériau à traiter) et élargir son utilisation en assise des chaussées sahariennes.

Les essais de cratérisation sur le tuf, dévoilent sa nature gypseuse. Selon la classification GTR 92, notre matériau est rangé dans la classe B4 (considérée comme une grave argileuse).

Les résultats des essais en compression simple révèlent une amélioration de la résistance (R_c) du tuf traité à la chaux, ce qui est conforme à la littérature existante, la plus importante et qui est visiblement remarquable, c'est l'augmentation de la R_c du tuf lors du traitement mixte (chaux + cendre) et son efficacité à long terme, d'où une valeur de 52 bars a été atteinte à 180 jours pour le mélange constitué de tuf + 4% chaux + 12% cendre.

Les essais de traction indirecte (par fendage) décèlent une nette progression de la résistance (R_{ti}) du tuf lors du traitement mixte (chaux +cendre), la valeur maximale est d'environ de 5 bars.

L'étude de la sensibilité à l'eau montre le maintien de la forme des éprouvettes confectionnées à partir des mélanges «tuf + chaux + cendre» d'où une résistance à la compressions de 18 bars est enregistrée pour les éprouvettes âgées de 180 jours et immergé dans l'eau pendant 48 heures, en revanche, un effondrement total de celles du tuf seul, il faut noter que cette amélioration de la sensibilité permet de surmonter l'inconvénient majeur des tufs d'encroûtement.

Recommandations

Dans ce travail, nous n'avons pas pu faire caractérisation approfondie sur la cendre des résidus des palmiers dattiers, vu le manque des moyens, donc, nous recommandons une étude consacrée à la caractérisation complète de cette cendre afin de la promouvoir comme un liant routier.

Cette étude est focalisé sur l'aspect mécanique de traitement du tuf à la cendre, par conséquence, un complément du travail est nécessaire prenant en compte l'aspect environnemental.

Références

- [1] «Les cendres volantes - ACPresse,» acpresse, 24 4 2019. [En ligne]. Available: <https://www.acpresse.fr/les-cendres-volantes/>. [Accès le 8 2 2020].
- [2] Joseif2, «Calcaire — Wikipédia,» Wikipédia, 1 11 2019. [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Calcaire>. [Accès le 8 2 2020].
- [3] c. BABILOTTE, COURS DE ROUTES 1ère Année, France, 1996.
- [4] AFNOR, «Ciment courant,» AFNOR, Paris, 1994.
- [5] AFNOR, «Liants hydrauliques routiers,» AFNOR, Paris, 2000.
- [6] d. ingénierie, «traitement des sols à la chaux ou au ciment,» Les Haras nationaux, paris, 2004.
- D. E. Guesmia, B. Mohamed et Z. Ali, «(PDF) Etude de traitements des tufs d'encroûtements, par les liants organique et hydraulique, dans le domaine de la géotechnique routière,» 10 2011. [En ligne]. Available: https://www.researchgate.net/publication/329428657_Etude_de_traitements_des_tufs_d'encroûtements_par_les_liants_organique_et_hydraulique_dans_le_domaine_de_la_geotechnique_routiere. [Accès le 15 02 2020].
- [7] G. ZAHRA et Z. MAROUANE, «Chapitre I : DESCRIPTION DES TUF CALCAIRE,» 03 07 2019. [En ligne]. Available: https://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=915. [Accès le 15 02 2020].
- C. COUTURIER et T. BRASSET, «gestion et valorisation des cendres de chaufferies bois,» 12 2005. [En ligne]. Available: <https://www.bioenergie-promotion.fr/wp-content/uploads/2012/03/6-agriculture-petite-chaufferie.pdf>. [Accès le 15 02 2020].
- [9] AFNOR, «Chaux de construction,» AFNOR, Paris, 1996.
- [10] CodexBot, «Cendre — Wikipédia,» Wikipédia, 16 01 2020. [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Cendre#Cendres_de_bois_ou_de_matières_végétales. [Accès le 15 02 2020].
- [11] B. Salem et M. Bachir, «Table des matières,» 2019. [En ligne]. Available: <http://dspace.univ-eloued.dz/bitstream/123456789/3505/1/624-002.pdf>. [Accès le 16 02 2020].
- [12] G. S. Jean COSTET, Cours pratique de mécanique des sols Tome 1, Paris: Bordas, 1981.
- [13] g. P. Bertrand Hubert, FONDATIONS ET OUVRAGES en TERRE, Paris: Eyrolles, 2007.
- [14] M. S. G. idriss Goual, «amélioration des propriétés d'un tuf naturel utilisé en technique routière saharienne par ajout d'un sable calcaire,» taylor & francis, Abingdon-on-Thames, 2012.
- [15] C. Mhamed et B. Nacereddine, Valorisation de sable de dune traité aux liants hydraulique et la poudrette de caoutchouc des pneus usées en technique routières, Djelfa, algérie: Université ziane achour, 2017.
- [16]

- M. aminou et M. Ivanete, Influence de la présence de sulfates sur le traitement du sol argileux par des ajouts minéraux, Khemis Miliana: université Djilali Bouanaama, 2015.
- [17]
- [18] GTR et AFNOR, «Chapitre 3 classification des sols,» AFNOR, France, 1992.
- RECORD, «Valorisation des cendres issues de la biomasse - RECORD,» 02
- [19] 2016. [En ligne]. Available: https://www.record-net.org/storage/etudes/14-0913-1A/rapport/Rapport_record14-0913_1A.pdf. [Accès le 09 09 2020].
- [20] S. E. BENZIOUCHE et F. CHERIET, «Structure et contraintes de la filière dattes en Algérie,» NEW MEDIT N, 2012.
- [21] MORSLI, «Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique, thèse de doctorat d'état école nationale polytechnique,» alger, 2007.

ANNEXES

Annexe A

				poids	lourd	/jour	
			< 130	130 300	300 600	600 1200	> 1200
Zone II sup- humide H=350 à 600 mm de pluie avec bon drainage exigé	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	55	35		
		F	100	100	100	100	100
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	10	10	10	10	10
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
% CaSO ₄ max. sur < 1 mm	BF	tr	tr	tr	tr	Tr	
Zone III semi-aride H= 100 à 350 mm de pluie par an sans exigence- de bon drainage	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	100	55	35	
		F	100	100	100	100	35
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	13	13	13	13	13
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70	70	
		F	60	60	60	60	60
% CaSO ₄ max. sur < 1 mm	BF	05	05	05	05	05	
Zone IV aride H<100 mm de pluie par an sans exigences de bon drainage	Rc (MPa) min. sur < 5 mm ; (yd = 0,95. yd opm ; 48 h à 55°C)	B	2,5	03	3,5		
		F	1,5	02	2,5	03	3,5
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	16	16	16	16	16
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	30	60	70	80	90
	%(CaCO ₃ + CaSO ₄) min Sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
%NaCL max. sur < 1 mm	BF	03	03	03	03	03	

Caractéristiques à viser si possible, en Algérie pour le choix des tufs d'encroûtements, suivant la zone climatique et le trafic prévu.

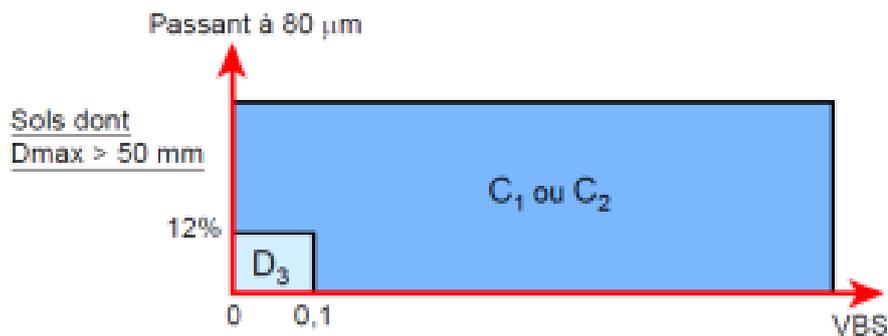
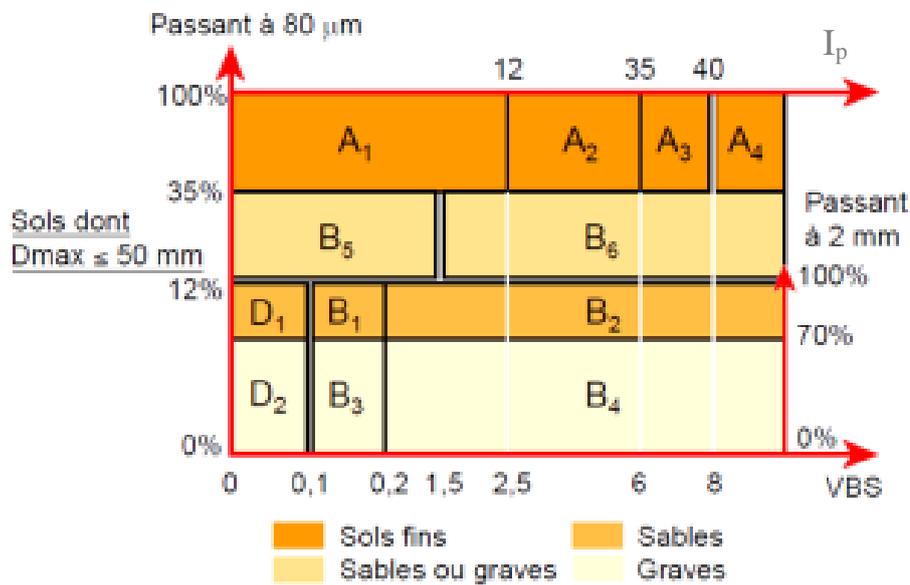
■ Tufts d'encroûtement déconseillés ; B : pour couche de Base ; F : pour couche de fondation ; traces ; Rc (Mpa) ; compression simple sur cylindres (5*10 cm) séchés 48 h à 55°C ; Ip indice de plasticité ; granulométrie sous eau après 48h dans l'eau ; compactage CBR à 55 cops/couche à W_{opm} puis 4 jours d'immersion ; la Los Angeles sur granulométrie A.

Propositions de spécifications pour l'Algérie par STRUILLOU et ALLOUL

Annexe B

Une classification de matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières et donne par le GTR (Setra LCPC, 1992), permet de classer les matériaux en fonction d'un certain nombre de paramètres cité :

- Classe A - Sols fins ;
- Classe B - Sols sableux et graveleux avec fines ;
- Classe C - Sols comportant des fines et des gros éléments ;
- Classe D - Sols insensibles à l'eau ;



Classification GTR