

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'Enseignement Supérieur de la Recherche Scientifique

Université de Kasdi Merbah d'Ouargla
Faculté des Sciences Appliqués
Département de génie civil et hydraulique



Mémoire de fin d'étude en vue l'obtention de diplôme de master

Domaine : Sciences Appliquées

Filière : génie civil

Spécialité : **Voies et Ouvrages d'Arts**

Thème

**Effet de l'ajout de la cendre de la boue résiduelle des stations
d'épuration sur les propriétés mécaniques des tufs
d'encrouement**

Présenté par :

- ❖ DAHMANI Mohammed
- ❖ SAOULA Ala eddine

Devant le jury :

Mr. GHOUGALI M.	Président	UKM Ouargla
Mr.HASINI Slimane	Examineur	UKM Ouargla
Mr. KHELLOU Abderrezak	Encadreur	UKM Ouargla

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le bon Dieu, le clément et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Notre encadreur KHALOU Abderezzak, pour son suivi ses Conseils et ses orientations.

Tous les membres des jurys, pour l'honneur qu'ils nous font
En acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur
Bienveillante attention

Tous les personnels du laboratoire d'hydraulique et génie civil, du L.T.P.S Ouargla

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous qui nous ont toujours soutenues et Encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

DÉDICACES

*Je remercie ALLAH tout puissant de m'avoir motivé à réaliser ce
modeste travail.*

Je dédie Ce modeste travail à :

*Ma très chère mère et mon père pour leurs sacrifices, sans jamais
oublier Mes très chers frères et sœurs.*

Mes grands-parents

Mes oncles et tantes

À tous mes amis d'enfance et du

Long parcours scolaire et

Universitaire Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

L'étudiant : DAHMNI MOHAMMED.

DÉDICACES

Je remercie ALLAH tout puissant de m'avoir motivé

À réaliser ce modeste travail

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon père pour

Leurs sacrifices, sans jamais oublier

Mes très cher frères et sœurs.

À tous mes amis d'enfance et du

Long parcours scolaire et

Universitaire

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

L'étudiant : SAOULA ALA EDDINE

Table des matières

ملخص.....	I
RESUME.....	I
ABSTRACT	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES TABLEAUX	III
INTRODUCTION GENERALE.....	IV
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	1
I.1 DECHETS UTILISES DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL	1
I.1.1 Déchets de chantier recyclés	1
I.1.2 Matériaux de chaussées recyclés	1
I.1.3 Les laitiers de haut fourneau	1
I.1.4 La terre cuite.....	1
I.1.5 Les cendres volantes.....	2
I.1.6 Les cendres des boues de station d'épuration des eaux usées.....	2
I.2 LA CENDRE DES BOUES DE STEP	2
I.2.1 Introduction	2
I.2.2 Origine de boue d'opération.....	3
I.2.3 Les différentes voies de valorisation et d'élimination des boues de STEP	3
I.2.3.1 L'épandage agricole	3
I.2.3.2 Le compostage.....	3
I.2.3.3 Méthanisation.....	4
I.2.3.4 Incinération.....	4
I.2.4 Caractéristiques des cendres d'incinération de boues d'épuration.....	5
I.2.4.1 Caractéristiques chimiques:	5
I.2.4.2 Paramètres de dangers sanitaires et environnementaux des cendres.....	5
I.2.5 Les différentes filières de valorisation des cendres	6
I.2.5.1 Les cendres pour leur teneur en phosphore.....	6
I.2.5.2 Utilisation des phosphates des cendres en tant qu'engrais	6

I.2.5.3	<i>Production d'acide phosphorique</i>	6
I.2.5.4	<i>Stabilisation de sol de fondation</i>	6
I.2.5.5	<i>Les cendres dans les produits céramiques</i>	7
I.2.5.6	<i>Fabrication de tuiles et de briques</i>	7
I.2.5.7	<i>Les cendres en granulats de faible densité</i>	7
I.2.6	<i>Valorisation des cendres dans le domaine de la construction</i>	7
I.2.7	<i>Influence des paramètres des cendres sur l'incorporation dans des produits de construction</i>	8
I.2.7.1	<i>Forme des particules</i>	8
I.2.7.2	<i>Granulométrie des cendres</i>	8
I.2.7.3	<i>Activité pouzzolanique des cendres</i>	8
I.2.7.4	<i>Teneur en soufre des cendres</i>	9
I.2.7.5	<i>Influence des éléments traces</i>	9
I.2.8	<i>Réutilisation des cendres dans des produits de types « béton »</i>	9
I.3	<i>CONCLUSION</i>	9
CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX		11
II.1	<i>INTRODUCTION</i>	11
II.2	<i>TUF D'ENCROUTEMENT</i>	11
II.2.1	<i>Caractérisation physiques</i>	11
II.2.1.1	<i>Masse volumique apparente</i>	11
II.2.1.2	<i>Analyse granulométrique (par tamisage)</i>	12
II.2.1.3	<i>Limite d'atterberg</i>	14
II.2.1.4	<i>Bleu méthylène</i>	15
II.2.2	<i>Caractérisation mécaniques</i>	16
II.2.2.1	<i>Proctor modifié</i>	16
II.2.2.2	<i>CBR (California Bearing Ratio)</i>	17
II.2.3	<i>Caractérisation chimiques</i>	18
II.2.4	<i>Classification des matériaux selon GTR 92</i>	18
II.3	<i>LA CHAUX</i>	19
II.4	<i>LA CENDRE DE LA BOUE DE STATION D'EPURATION</i>	21
II.5	<i>CONCLUSION</i>	22

CHAPITRE III : INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	23
<i>III.1 INTRODUCTION.....</i>	<i>23</i>
<i>III.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION</i>	<i>23</i>
<i>III.2.1 Préparation des éprouvettes</i>	<i>23</i>
<i>III.2.2 Evolution de la résistance à la compression simple (Rc).....</i>	<i>25</i>
• <i>Traitement du tuf à la chaux.....</i>	<i>25</i>
• <i>Traitement du tuf à la cendre</i>	<i>26</i>
• <i>Traitement mixte du tuf à la cendre +chaux.....</i>	<i>26</i>
<i>III.2.3 Effet de la teneur en eau de confection des éprouvettes.....</i>	<i>27</i>
<i>III.3 RESISTANCE A LA TRACTION RTI.....</i>	<i>29</i>
<i>III.3.1 Préparation des éprouvettes</i>	<i>30</i>
• <i>Traitement du tuf à la chaux.....</i>	<i>30</i>
• <i>Traitement du tuf à la cendre</i>	<i>31</i>
• <i>Traitement mixte du tuf à la cendre +chaux.....</i>	<i>32</i>
<i>III.3.2 Effet de la teneur en eau de confection des éprouvettes.....</i>	<i>33</i>
<i>Sensibilité à l'eau:</i>	<i>34</i>
• <i>Résistance à la compression.....</i>	<i>34</i>
<i>III.4 CONCLUSION.....</i>	<i>36</i>
ANNEXES.....	40

ملخص

الهدف من هذا العمل هو معالجة طف القشرة (التيف) المستغل في إنجاز مختلف طبقات الطرق وذلك باستعمال رماد حمأة محطات تصفية المياه المستعملة لغرض معرفة إمكانية تصرفه 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 لدى التيف وحده خصوصا عند عمر 180 يوم. دراسة الحساسية للماء أبرزت التماسك الجيد للعينات التيف المعالجة بعد عملية الغمر في الماء لمدة 24 ساعة، بينما انهيار كامل للعينات المنجز بالتيف وحده.

الكلمات المفتاحية: رماد حمأة محطات تصفية، الجير، طف القشرة رابط هيدروليكي، معالجة التربة الضغط البسيط، الشد الغير مباشر

Résumé

L'objectif de ce travail est de traiter tuf encroûtement en utilisant la cendre de boue des stations d'épuration (CBSE) afin de tester sa capacité liante . Ceci est effectué par l'examen de l'évolution de la résistance mécanique (résistance à la compression simple et à traction indirecte) à courts terme et long terme. A l'âge de 180 jours, les résultats obtenus montrent l'amélioration considérable la résistance des éprouvettes confectionnées du tuf traité à la CBSE associée avec la chaux en comparant avec celles du tuf seul. L'étude de la sensibilité décèle l'excellente tenue à l'eau des éprouvettes confectionnées du tuf traité après leur immersion pendant 24 heures, tandis que un effondrement total de celles du tuf seul.

Mots-clefs : la cendre des stations d'épuration tuf d'encroûtement, liant hydraulique, traitement, compression simple, traction indirecte.

LISTE DES FIGURES

Figure II-1 Le tuf d'encroûtement étudié	11
Figure II-2 Courbe granulométrique du tuf utilisé	13
Figure II-3 Coupelle de Casagrande pendant l'essai	14
Figure II-4 Courbe la limite de liquidité	15
Figure II-5 Teste de bleu méthylène	15
Figure II-6 Des taches bleues sur	15
Figure II-7 résultat positif	16
Figure II-8 résultat négatif	16
Figure II-9 Courbe de l'essai de Proctor modifié	17
Figure II-10 tableau synoptique de classification des matériaux	19
Figure II-11 la chaux utilisée	21
Figure II-12 La boue de station d'épuration utilisée	21
Figure II-13 le séchage de la boue	21
Figure II-14 la combustion de la boue	21
Figure II-15 Incinération des boues dans le four	22
Figure II-16 Le broyage de la cendre	22
Figure II-17 la cendre après le broyage	22
Figure II-18 La température pendant la cuisson	22
Figure III-1 Les éprouvettes préparées pour l'essai de compression simple et traction	24
Figure III-2 Moule et pistons des éprouvettes des essais de compression simple	24
Figure III-3 Machine de presse hydraulique	25
Figure III-4 variation de RC en fonction de l'âge (7 et 180 jours) pour le tuf + x % chaux	25
Figure III-5 variation de RC en fonction de l'âge (7 et 180 jours) pour le tuf + cendre.	26
Figure III-6 variation de RC en fonction de l'âge (7 et 180 jours) pour le (tuf + 4%cx) pour (tuf + cn + cx).	27
Figure III-7 Variation de RC en fonction teneur de confection (10,12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4,8 et 12%).	28
Figure III-8 Variation de RC en fonction teneur de confection (10,12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4,8 et 12%).	29
Figure III-9 Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction	29
Figure III-10 Schéma du mode d'application de l'effort	30
Figure III-11 variation de RT en fonction de l'âge (7 et 180 jour) pour le tuf + chaux.	31

Figure III-12 variation de RT en fonction de l'âge (7et180 jour) pour le tuf +cendre.	31
Figure III-13variation de RT en fonction de l'âge (7et180 jour) pour le (tuf +4%cx) pour (tuf+ cn+ cx.)	32
Figure III-14Variation de RT en fonction teneur de confection (10,12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4,8 et12%).	33
Figure III-15Variation de RT en fonction teneur de confection (10,12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4,8 et12%).	34
Figure III-16l'immersion des éprouvettes (tuf) pour 24 heures dans l'eau nous avons.....	35
Figure III-17l'immersion des éprouvettes (tuf+chaux) pour 24 heures dans l'eau nous avons	35
Figure III-18Sensibilité à l'eau 180 jours (tuf+chaux).....	35
Figure III-19l'immersion des éprouvettes (tuf + cendre) pour 24 heures dans l'eau nous avons.....	36
Figure III-20Sensibilité à l'eau 180 jours (tuf +cendre).....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 masse volumique du tuf	12
Tableau II-2 classification du module de finesse	12
Tableau II-3 Résultats d'analyse granulométrique du tuf	13
Tableau II-4 Les classifications des sols en fonction de VBS	16
Tableau II-5 Résultats de l'essai C.B.R	17
Tableau II-6 Le résultat d'analyse chimique.....	18
Tableau II-7 synthèse des résultats de caractérisation	19
Tableau II-8 Fiche technique des Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida	20
Tableau III-1 Diffèrent mélanges élaborés	23
Tableau III-2 Diffèrent mélanges élaborés	30

INTRODUCTION GENERALE

Dans le souci d'augmentation de la production de déchets et des sous produit industriels affectant l'environnement, l'exploitation de certains déchets comme des ajouts ou des matériaux alternatifs dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics devient un impératif afin de contribuer à la résolution de cette problématique environnementale.

Le traitement des matériaux routiers aux liants lors de réalisation de différentes couches chaussées présente une solution alternative lorsque ces matériaux ont de qualité médiocre de point de vue propriétés mécaniques. Le traitement est souvent effectuée 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 et des déchets (cendre de bois, cendre de biomasse, la cendre de foyer , cendre de la boue des saltations d'épuration..) comme des ajouts ou des liants fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le but de les valoriser et de les recycler.

Dans ce contexte, notre travail consiste de tester la capacité liante de la cendre de la boue des stations d'épuration des eaux usées (boue de STEP) en recourant au traitement d'un tuf 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.

Ce mémoire comporte trois chapitres:

- **Le premier chapitre** présente une revue bibliographique sur l'utilisation des déchets dans le domaine de génie civil et une synthèse sur les boues de STEP
- **Le deuxième chapitre** est consacré à la caractérisation des différents matériaux et produits utilisés.
- **Le troisième chapitre** fournit des interprétations et discussions 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 Déchets utilisés dans le domaine de génie civil

I.1.1 Déchets de chantier recyclés

La politique de gestion des déchets de construction et de démolition a suivi une stratégie de réduire les déchets d'une manière rentable et dans le respect de l'environnement, tout en se conformant à des règlements et aux priorités de traitement des déchets sur la base de :

- Réduction de la quantité déchets à la source de sa production ;
- Réutilisation directe de la matière ou du matériau récupéré ;
- Recyclage, axé sur la fabrication de granulats ;

I.1.2 Matériaux de chaussées recyclés [1]

Les matériaux de chaussées sont de plus en plus recyclés et réutilisés aux mêmes fins que les déchets de construction et de démolition ou pour la construction de divers remblais.

De même, il est possible, techniquement, de recycler une grande partie des enrobés (couches de roulement). Mais cette solution qui permettrait de réduire de façon notable les extractions de granulats de la meilleure qualité (de nature généralement siliceuse), est encore peu pratiquée en raison du prix de revient élevé des granulats recyclés ; elle ne peut être envisagée que sur des chantiers de grande importance.

I.1.3 Les laitiers de haut fourneau [2]

Sont utilisés comme matériaux de construction depuis assez longtemps. Les laitiers granulés sont utilisés dans l'industrie du ciment, dans la construction des couches de base, dans la fabrication des briques. Les laitiers expansés sont utilisés pour la production des granulats légers et les laitiers refroidis à l'air, sont concassés et utilisés comme granulats pour les mortiers. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable, L'utilisation des laitiers de haut fourneau est réglementée par des prescriptions techniques

I.1.4 La terre cuite

Les débris de terre cuite sont, généralement, classés parmi les déchets de démolition, que ce soit du point de vue recyclage ou réutilisation comme granulats légers. En effet, ceux sont : l'argile cuite non moulée (chamotte), l'argile cuite, les briques concassées, les surcuits et les

incuits de briqueteries, ainsi que les débris de briques contenus dans les déchets de démolition et les décombres, qui sont désignés sous le nom collectif de « débris de terre cuite »

I.1.5 Les cendres volantes

Provenant de la combustion des charbons dans les centrales thermiques, peuvent être utilisées à la fabrication des ciments, à l'exécution des mortiers, où elles remplacent en partie le ciment portland, à la production des granulats légers et d'autres matériaux de construction, ainsi qu'à l'exécution des remblais dont elles ont un effet favorable grâce à leur faible poids. Notant que les cendres volantes sont sensibles au gel, du fait de leur composition granulométrique.

I.1.6 Les cendres des boues de station d'épuration des eaux usées [1]

Les cendres issues de l'incinération de boues de station d'épuration, (appelés boues de STEP), à une température qui varie entre 600°C et 1100°C, sont classées des déchets comme « cendres volantes d'incinération provenant des installations de gestion de déchets ». Ces cendres peuvent être utilisées dans le domaine comme substitution de sable ou de ciment dans la fabrication des bétons de briques, des blocs de parpaing, renforcement des sols de fondations des chaussées...etc.

Dans la suite de ce chapitre une étude bibliographique particulière est consacrée à cette cendre de boue :

I.2 La cendre des boues de STEP

I.2.1 Introduction

Une grande quantité de boues de station d'épuration des eaux usées sont produites en Algérie, une quantité qui ne cesse de s'accroître, avec une perspective de quatre cent mille tonnes/an de boues à l'année 2025[10].

Dans le contexte actuel de protection de l'environnement, l'élimination des boues d'épuration, en les valorisant, constitue un des enjeux majeurs pour notre pays. (Domaine agricoles, énergie en biogaz).

Le récent domaine de valorisation c'est l'incinération de ces boues pour réduire la quantité et produire de l'énergie.

I.2.2 Origine de boue d'épuration

Les boues de station d'épuration (STEP) sont issues des différents eaux usées:

- Les eaux domestiques : elles comprennent les eaux usées ménagères (lavabos, douches, lavage du linge, de la vaisselle, des sols,), et les eaux-vannes (toilettes).
- Les eaux du service public : elles sont utilisées pour le lavage des rues et des caniveaux.
- Les eaux industrielles : elles seront traitées sur le site industriel si elles contiennent des matières polluantes particulières et puis elles rejoindraient la station d'épuration.
- Les eaux pluviales.

En station d'épuration, les traitements biologiques des eaux usées, conduisent à la multiplication de microorganismes qui se développent en consommant la charge organique. Le traitement produit une eau épurée de sa charge carbonée, et des boues riches en microorganismes collectées par sédimentation de l'effluent traité. Ces boues dites biologiques peuvent être pour partie recyclées dans le bassin d'aération (système à boues activées), le reste éventuellement mélangé avec les boues primaires collectées par sédimentation des eaux usées brutes.[15]

I.2.3 Les différentes voies de valorisation et d'élimination des boues de STEP

Dans le souci d'éliminer les quantités abondantes de la boue, beaucoup de voies se sont projetées pour la valoriser tout en conservant l'environnement : [10]

I.2.3.1 L'épandage agricole

Les boues épandues en agriculture sont soit liquides, soit pâteuses, soit solides. Elles peuvent être chaulées ou compostées. [16]

I.2.3.2 Le compostage

Le compostage est une décomposition naturelle des matières organiques par voie aérobie, le processus consiste en :

- Élévation de température (55°C pendant au moins 72h) ;
- Oxydation de la fraction fermentescible et stabilisation de la matière organique ;
- Déshydratation suite à l'échauffement et à l'aération pour réduire le volume ;

I.2.3.3 Méthanisation [10]

La méthanisation (ou fermentation anaérobie) est un procédé biologique permettant de valoriser des matières organiques qui sont dégradées partiellement en l'absence de l'oxygène (digestion anaérobie), par l'action combinée de plusieurs types de microorganismes qui conduit à la formation du biogaz qui est source d'énergie renouvelable et d'un d'énergie utilisé comme fertilisant.

I.2.3.4 Incinération

Plusieurs filières peuvent être envisagées pour la gestion des boues d'épuration, telles que

- L'épandage après chaulage ;
- Le stockage en centre d'enfouissement technique ;
- La digestion anaérobie ;
- Le compostage ;
- L'incinération ;

L'incinération correspond à un traitement thermique à haute température en présence d'un excès d'air. Les résidus solides générés sont les cendres d'incinération et les résidus d'épuration des fumées.

L'avantage de ce procédé se manifeste en la réduction du volume des boues qui peut atteindre 90 % et la réduction massique est d'environ 60 %. En effet, au cours de la combustion, non seulement l'eau est évaporée, mais la quasi-totalité de la matière organique est brûlée. Ainsi, les matières résiduelles sont essentiellement minérales et doivent être gérées à l'issue de l'incinération. Ce qui nous permis de réduire l'espace de stockage nécessaire, et économiser dans les frais de transport à la décharge, ainsi que les émissions potentielles d'odeurs sont éliminées à l'encontre des dépôts en centre de stockage direct sans prétraitement. En revanche, l'incinération génère des effluents gazeux qui doivent être épurés avant rejet, ainsi que des résidus solides minéraux, un autre inconvénient est que l'incinération est très couteuse (sauf une récupération d'énergie dégagée est mise en œuvre).

I.2.3.4.1 Les étapes d'incinération :

- Dans une première étape, les boues d'épuration sont déshydratées mécaniquement, par exemple par centrifugation ou filtration. Ceci permet d'atteindre une teneur en eau de

l'ordre de 70 à 85 % de la masse brute. Puis stockés dans des aires de stockage à l'air libre pour une déshydratation qui atteint les 90% (teneur en eau de l'ordre de (5% à 9%))

- Les boues sont incinérées à une température de l'ordre de 600 °C à 1100°C (les gaz de combustion sont refroidis et traités).

Ainsi, deux résidus solides principaux sont produits au cours de l'incinération de boues :

- 1) Les cendres d'incinération qui sont récupérées sous le four.
- 2) Les résidus d'épuration des fumées d'incinération issues du traitement des gaz.

I.2.4 Caractéristiques des cendres d'incinération de boues d'épuration

I.2.4.1 Caractéristiques chimiques:

De par leur mode de production, les cendres d'incinération ont une teneur en matière organique et une humidité très faibles, voire nulles. Elles sont principalement composées de silice, de fer, de calcium, d'alumine, d'oxyde de magnésium, et de pentoxyde de phosphore. Comme noté précédemment, compte-tenu de la variété des eaux usées traitées et donc de la variété des boues incinérées, la composition de la cendre peut varier significativement. Elle dépend, notamment, en grande partie des additifs introduits lors du conditionnement des boues (opération qui précède la déshydratation).

I.2.4.2 Paramètres de dangers sanitaires et environnementaux des cendres

En raison de leurs caractéristiques physico-chimiques intrinsèques, les cendres issues de l'incinération des boues d'épuration peuvent présenter un danger pour les cibles environnementales ou la santé humaine, selon les paramètres suivants :

- Présence de particules fines : Le caractère pulvérulent des cendres d'incinération de boues d'épuration peut permettre la pénétration des particules les plus fines par les voies respiratoires de l'homme et des animaux, et leur contact avec les yeux et la peau.
- La présence dans les cendres de certains polluants (métaux lourds) peut alors présenter une toxicité aiguë ou chronique.
- Présence de métaux lourds : En contact avec l'eau, certains métaux lourds peuvent être lixivités (notamment en cas de pluies acides), et être transportés jusqu'aux eaux souterraines ou de surface. Ils peuvent ensuite être éventuellement intégrés dans les chaînes alimentaires et présenter un danger pour les écosystèmes.

I.2.5 Les différentes filières de valorisation des cendres [1]

Les différentes filières de valorisations des cendres, peuvent être classées en plusieurs groupes, selon la propriété physique, chimique ou minérale recherchée. On peut citer les voies de valorisation :

I.2.5.1 Les cendres pour leur teneur en phosphore

Les cendres issues de l'incinération des boues d'épuration sont riches en phosphore. En effet, la teneur de cet élément dans les cendres est comprise entre 4 % et 9 % Le phosphore vient de la chaîne d'alimentation de l'Homme et de la chaîne de traitement des eaux, La valorisation du phosphore dans les cendres peut être réalisée de deux façons différentes :

I.2.5.2 Utilisation des phosphates des cendres en tant qu'engrais

Différentes études proposent l'utilisation des phosphates contenus dans les cendres en tant qu'extraction des phosphates est alors préconisée, tout en assurant des teneurs en métaux lourds dans l'engrais compatibles avec cette forme de valorisation.

I.2.5.3 Production d'acide phosphorique

Le phosphore contenu dans les cendres de boues d'épuration peut aussi être utilisé pour obtenir une solution d'acide phosphorique de qualité technique à partir d'une procédure délavage à l'acide sulfurique.

I.2.5.4 Stabilisation de sol de fondation

Kézdi [1979] a constaté que le mélange de ciment avec du sol provoque des réactions d'hydratation, qui contribuent à diminuer le pH, la quantité d'ions calcium et la quantité de portlandien $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du mélange. Ainsi, ces réactions peuvent être définies comme des réactions pouzzolaniques.

Les cendres issues de l'incinération des boues d'épuration présentent également un caractère pouzzolanique. Ainsi, les cendres de boues d'épuration et la chaux hydratée peuvent être utilisées pour améliorer les propriétés et la résistance du sol de fondation. Dans ce cadre, il est recommandé de les utiliser en mélange avec du ciment selon un ratio fixe de 4:1 pour cendres: ciment. La résistance à la compression des éprouvettes de sol avec l'ajout de cendres/ciment est d'environ 3 à 7 fois supérieure à celle du sol non traité. En outre, le gonflement est également réduit dans une fourchette de 10 à 60 %.

L'ajout d'un mélange cendres/ciment améliore la valeur du California Bearing Ratio (CBR) [ASTM D1883–87 Spécification], qui est alors jusqu'à 30 fois supérieur à celle du sol non traité.

I.2.5.5 Les cendres dans les produits céramiques

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

I.2.5.6 Fabrication de tuiles et de briques [1]

Des études ont montré que les cendres issues d'incinération des boues d'épuration peuvent être ajoutées à l'argile pour fabriquer des tuiles et/ou briques.

I.2.5.7 Les cendres en granulats de faible densité

La production de granulats légers représente une filière de valorisation particulièrement intéressante pour les cendres. En effet, les granulats de faible densité ont pour certaines applications plus de valeur que des agrégats de densité normale.

Les granulats légers sont utilisés pour produire du béton léger et d'autres produits de construction légère, et dans d'autres applications telles que le remplissage géotechnique léger, les produits d'isolation. La faible densité offre également des avantages supplémentaires tels qu'une meilleure isolation thermique.

I.2.6 Valorisation des cendres dans le domaine de la construction

Plusieurs résidus de combustion tels que les cendres de balles de riz, les cendres volantes de charbon et les fumées de silice ont été utilisés avec succès dans le domaine de la construction.

L'incorporation de cendres de boues d'épuration en remplacement du ciment ou du sable est utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques de Tufs les matériaux cimentaires est également signalé dans quelques études récentes. [8]

I.2.7 Influence des paramètres des cendres sur l'incorporation dans des produits de construction

I.2.7.1 Forme des particules

Une des particularités communes aux cendres de charbon et aux cendres de boues est la forme non sphérique de leurs particules. Ceci a une influence négative sur la « maniabilité » des mortiers contenant des cendres, et notamment des cendres de boues d'épuration, et les cendres absorbent plus d'eau que le ciment. Pour pallier ce problème et obtenir une maniabilité équivalente à celle d'un mélange sans cendres, on pourrait naturellement augmenter la quantité d'eau. Toutefois, l'augmentation de ratio eau/ciment n'est pas sans conséquence sur les propriétés mécaniques des matériaux obtenus après hydratation.

L'étude de l'influence liée à la présence des cendres de boues d'épuration dans les formulations de mortier, à savoir l'influence des cendres sur les procédés d'hydratation du ciment peut être, dans un premier temps, effectuée par la mesure des propriétés mécaniques des matériaux obtenus. [1]

I.2.7.2 Granulométrie des cendres

La granulométrie des cendres a également une influence sur la maniabilité déjà évoquée des mortiers. En effet, celle-ci diminue lorsque la finesse des cendres augmente. La finesse des cendres est un paramètre important pour le développement de la résistance mécanique des mortiers : les fractions les plus grossières rendent les plus faibles valeurs de résistance. Le broyage mécanique peut diminuer la granulométrie, tandis que l'activité pouzzolanique des cendres change peu en fonction de leur surface spécifique. Ce broyage ne modifie pas les constituants cristallins et la densité. La surface spécifique augmente de 100 m²/kg. [1]

I.2.7.3 Activité pouzzolanique des cendres

Les cendres de boues d'épuration présentent des teneurs relativement faibles en SiO₂ et Al₂O₃, les deux oxydes responsables de l'activité pouzzolanique dans les matériaux cimentaires. Par ailleurs, une fraction de ces oxydes est cristallisée, et ils n'interviennent donc pas dans l'activité pouzzolanique. Ceci limite ainsi l'activité pouzzolanique des cendres par rapport à d'autres adjuvants minéraux classiques dont la fraction cristalline est moins importante. On peut considérer que dans la littérature, la cendre est à environ 40 % amorphe et qu'il y a déjà eu une consommation notable de Ca(OH)₂(CH), qui a fourni une activité légère mais significative à long terme. [4]

I.2.7.4 Teneur en soufre des cendres

Fréquemment, les cendres de boues d'épuration sont riches en soufre ($\text{SO}_3 > 10\%$ de la masse sèche). Le phénomène lié à la dégradation du béton par une attaque sulfatique doit donc être pris en compte. Le gonflement, qui est susceptible d'abaisser la résistance mécanique des mortiers, doit être vérifié. Le soufre diminue donc la résistance. Par contre si la teneur en C_3A augmente, la résistance augmente. Ainsi avec l'augmentation du remplacement du ciment par les cendres, les effets s'annulent. Une autre recherche a montré que la teneur en soufre dans les cendres de boues d'épuration n'a pas une influence décisive sur les résistances mécaniques.

I.2.7.5 Influence des éléments traces

Comme on a vu précédemment, les cendres des boues d'épuration contiennent des éléments traces qui sont des métaux lourds pour la plupart. Les plus présents sont le zinc, le chrome et le cuivre, à des concentrations supérieures à 2 g par kg de résidus. La présence de métaux lourds dans les cendres a une influence négative sur l'hydratation du ciment et le temps de prise des bétons.

I.2.8 Réutilisation des cendres dans des produits de types « béton »

Dans la littérature, aucun domaine où les bétons incorporant des cendres de boues sont utilisés en pratique n'est décrit. Les classes d'exposition des bétons incorporant des cendres sont très certainement les mêmes que celles des bétons classiques, si tant est que les formulations répondent bien aux exigences en termes de classes de résistance, durabilité ou consistance.

I.3 Conclusion

On conclut que:

- La valorisation des boues de station d'épuration des eaux usées, et en particulier la cendre des boues, a reconnu une grande avance dans les recherches (agriculture, énergie et matériaux de construction)
- La forme non sphérique ainsi que la granulométrie des particules des cendres des boues ont une influence négative sur la maniabilité des mortiers.
- La température élevée de l'incinération a un grand effet sur la qualité de la cendre des boues : élimine la matière organique et fait apparaître les minéraux.

- Le broyage de la cendre des boues, pour augmenter la finesse, diminue l'effet négatif sur la maniabilité et augmente la résistance du mortier.
- Les cendres des boues ont un effet pouzzolanique vu la présence des SiO_2 et Al_2O_3

CHAPITRE II : Caractérisation des matériaux

II.1 Introduction

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

Les essais de caractérisation ont été effectués au niveau du laboratoire des travaux publics du sud (LTPS), et le laboratoire de l'université KasdiMerbah Ouargla.

II.2 Tuf d'encroûtement

Le tuf d'encroûtement étudié dans cette recherche est extrait d'Ouargla (carrière de Rouissat) (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. Mais d'abord un séchage préalable dans un endroit ensoleillé pendant quelques jours afin d'éliminer de toute humidité.

II.2.1 Caractérisation physiques

II.2.1.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cubedu matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de laParticule ainsi que les vides entre particules, Cette essai est réalisé selon la norme (NF p 94-053) et pour but de déterminer la masse volumique apparente du sol.

Tableau II-1 masse volumique du tuf

Poids total (g)	Poids sec (g)	Volume (cm ³)	Masse volumique (g/cm ³)
1405,95	1114,61	950	1,17
1384,96	1093,62		1,15
1404,95	1113,61		1,17
1368,89	1077,55		1,13
		Moyenne	1,16

II.2.1.2 Analyse granulométrique (par tamisage)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. C'est un essai très utile pour la classification des sols. Cette essai est réalisé selon la norme (NF P 94-57) l'objectif est de déterminer la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un coefficient de la finesse des sables selon La norme NF P18-540, Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui demande une augmentation du dosage en eau, et au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Tableau II-2 classification du module de finesse

M_f	remarques
$1,8 < M_f < 2,2$	Utilisable pour faciliter la mise en œuvre au détriment la résistance
$2,2 < M_f < 2,8$	Utilisable si on recherche une ouvrabilité Satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités
$2,8 < M_f < 3,2$	Utilisable si on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation
$3,2 < M_f$	le sable est à rejeter

Le module de finesse peut être calculé par la formule suivante : $Mf = \frac{\sum Rc}{100}$

Reste le refus cumulé en pourcentage sous les tamis de 50 ; 31,5 ; 20 ; 10 ; 5 ; 2 ; 1 ; 0,63 ; 0,315 ; 0,16 et 0,08 (mm).

Tableau II-3 Résultats d'analyse granulométrique du tuf

5000 g				
Tamis (mm)	poids refus partiels (g)	poids refus cumulés (g)	poids refus cumulés (%)	Tamisats (%)
50	0	0	0	100
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
réceptier	422	5000	100	0

Le pourcentage d'éléments inférieurs à 0,08 et 2 mm est respectivement de l'ordre de 8,44 % et 8.894%.

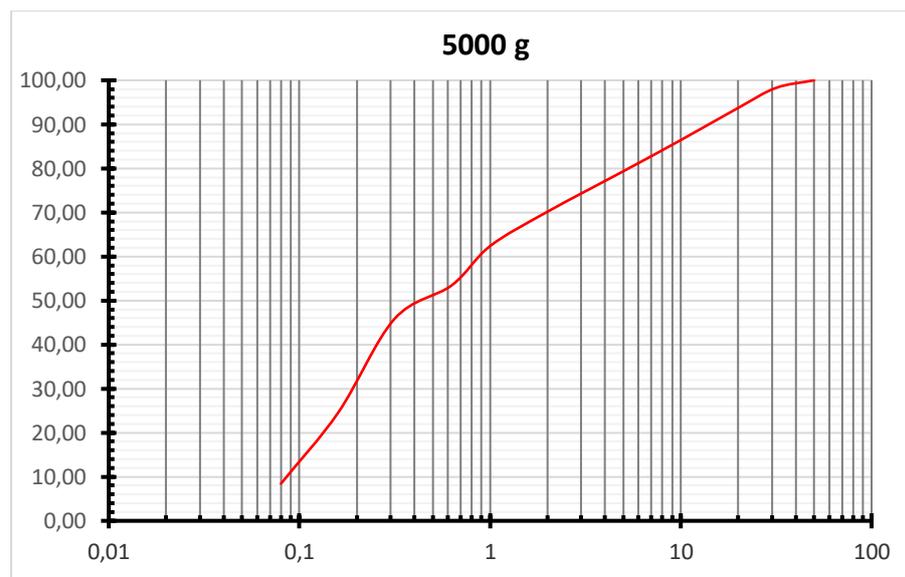


Figure II-2 Courbe granulométrique du tuf utilisé

$$Mf = 2.85$$

$2,8 < Mf < 3,2$: donc le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées.

II.2.1.3 Limite d'atterberg

Cette essai est réalisé selon la norme NF p 94-051, il a pour objet de déterminer les teneurs en eau situées à la frontière entre ces différents états sont les «Limites d'Atterberg» :

- Limite de Liquidité : WL (entre l'état plastique et liquide) ;
- Limite de Plasticité : WP (entre l'état solide et plastique) ;

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, fissure ;

Les résultats sont représentés dans une courbe, afin de déterminer la limite de liquidité qui correspond à 25 coups.



Figure II-3 Coupelle de Casagrande pendant l'essai

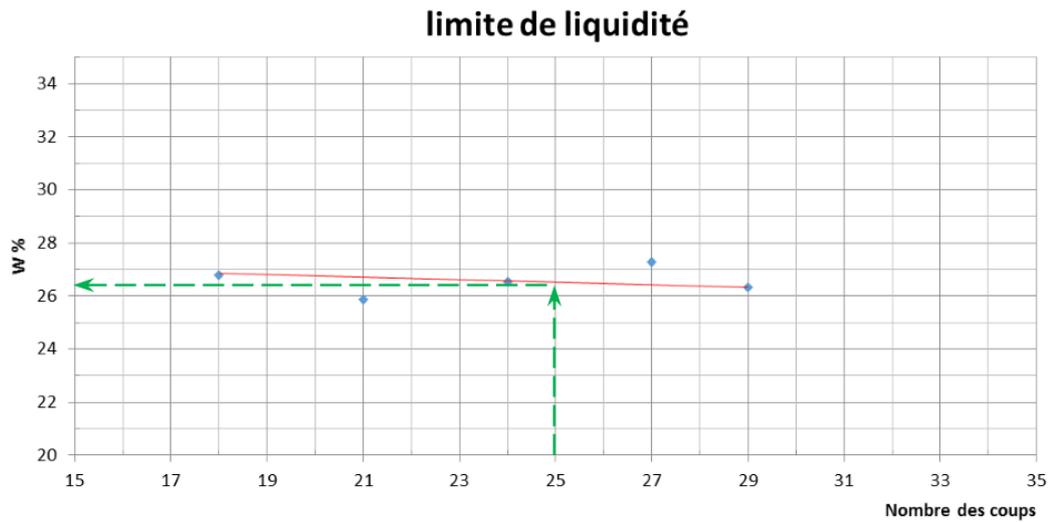


Figure II-4 Courbe la limite de liquidité

D'après la (Figure II-4) la limite de liquidité prend une valeur de 26.37 %, La limite de plasticité (W_P) non mesurable donc l'indice de plasticité (I_P) non mesurable aussi.

II.2.1.4 Bleu méthylène

Cette essai est réalisé selon la norme NF P 94-068 Le but de l'essai est de déterminer la valeur de bleu méthylène absorbée (VBS) d'un sol ou d'un matériau rocheux, La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux, Cette valeur permet de caractériser la phase argileuse d'un sol.



Figure II-5 Teste de bleu méthylène

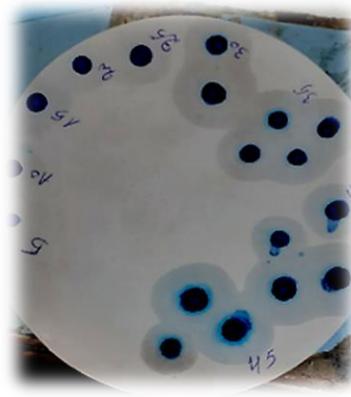


Figure II-6 Des taches bleues sur Le papier filtre

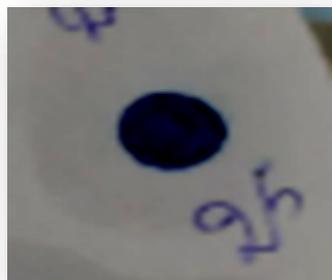


Figure II-8 résultat négatif

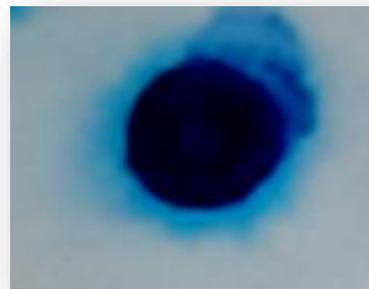


Figure II-7 résultat positif

Pour notre tuf, nous avons obtenus une VBS de 0,93, Si on classe le tuf selon la valeur VBS seule, le matériau est placé dans la catégorie des sols limoneux

Tableau II-4 Les classifications des sols en fonction de VBS

$VBS \leq 0.2$	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

II.2.2 Caractérisation mécaniques

II.2.2.1 Proctor modifié

Cette essai est réalisé selon la norme NF P 94-093 il a pour objet de déterminer la teneur en eau optimale pour obtenir la densité sèche maximale.

Le Proctor modifié correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec les rouleaux à pied de mouton. Il est utilisé pour le compactage des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussées des routes et des pistes d'aérodromes.

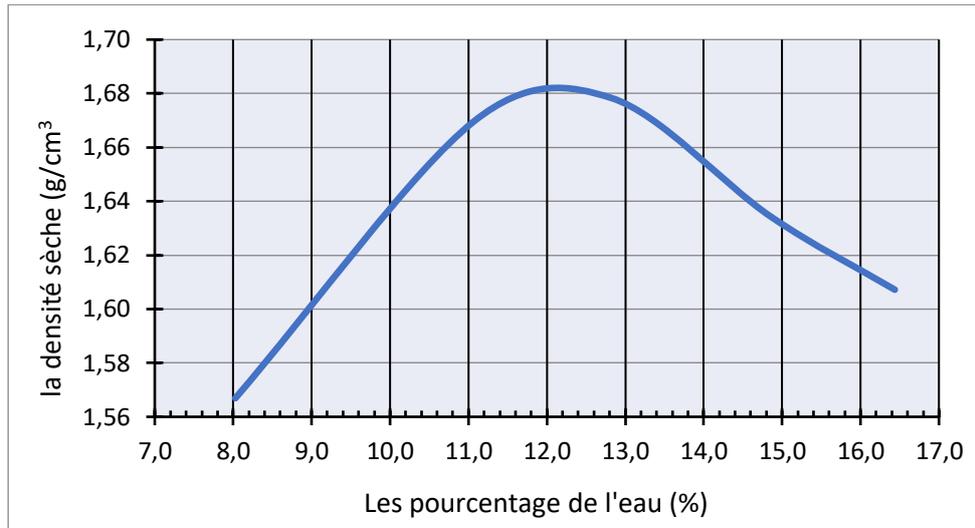


Figure II-9 Courbe de l'essai de Proctor modifié

On peut conclure d'après la courbe que la densité sèche maximale est d'ordre de 1.68 g/cm³ avec un pourcentage de l'eau de 12%.

II.2.2.2 CBR (California Bearing Ratio)

Cet essai est réalisé selon la norme NF P 94-078, Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau afin de déterminer L'Indice Portant Immédiat (IPI) que nous pouvons le calculer par convention la plus grande des deux valeurs F_{2.5} et F₅, d'où :

$$F_{2.5} = \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm (kN)}}{13,35 \text{ kN}} \times 100$$

$$F_{2.5} = \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm (kN)}}{19,93 \text{ kN}} \times 100$$

Tableau II-5 Résultats de l'essai C.B.R

Déformation (mm)	Force (Kn)		IPI
2,5	8,37	62,70	69,14
5	13,78	69,14	

Si on adopte la norme française [NF P 98 115] qui considère l'IPI comme un critère satisfaisant pour assurer la circulation normale des engins sur le chantier, les valeurs

souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieures à 35 pour la couche de fondation et 45 pour la couche de base, donc selon la norme précédente notre tuf est utilisable à la couche de fondation et de base.

II.2.3 Caractérisation chimiques

L'analyse chimique consiste à déterminer le taux des composants suivants :

- Les insolubles
- Les sulfates (CaSO_4)
- Les carbonates de calcium (CaCO_3)
- Chlorure de sodium (Cl)
- Chlorures (NaCl)
- Potentiel Hydrogène (PH)

D'après cette analyse chimique réalisée au niveau de LTPS d' Ouargla sur notre tuf, on obtient les résultats suivants :

Tableau II-6 Le résultat d'analyse chimique

Insolubles %		76
sulfates	%SO ₃	1.3
	%SO ₄	1.5
Les carbonates CaCO_3 (%)		1.4
Chlore %Cl		0.65
Chlorures %NaCl		1.07
PH		8.41

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. [12]

Les résultats obtenus lors de la caractérisation physico-mécanique effectuée sur notre matériau sont synthétisés dans le (Tableau II-7).

Tableau II-7 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
CaSO ₄ 2H ₂ O (%)	69.21
CaCO ₃ (%)	20
Cl ⁻ (%)	0.593
NaCl (%)	0.912
PH	8.48

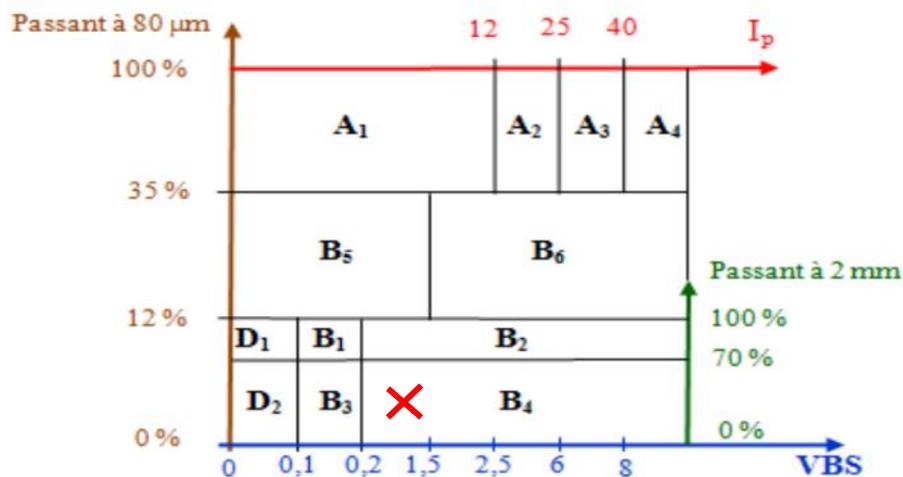


Figure II-10 tableau synoptique de classification des matériaux

D'après les résultats de caractérisation, le tuf d'encroûtement est rangé dans la classe **B₄** (Figure II-10) qui considère comme grave argileuse.

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.[13]

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. [14]

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 notre liant son aspect aérien, D'où sa fiche technique des propriétés chimiques et physiques est résumée dans le Tableau II-8 Fiche technique des Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida (Tableau II-8).

Tableau II-8 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-11 la chaux utilisée

II.4 La cendre de la boue de station d'épuration

La boue utilisée dans cette recherche est extrait de station d'épuration située dans la ville d'Angoussa (Figure II-12), après l'extraction, on a séché les boues à l'air libre (Figure II-13),

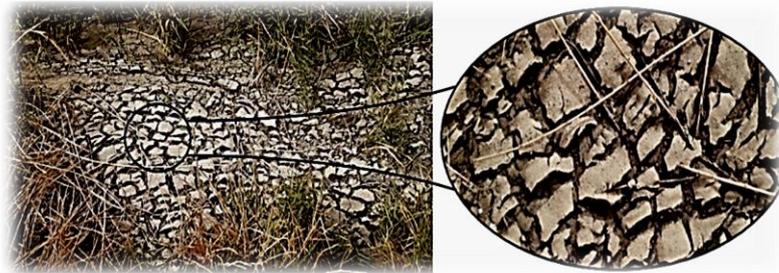


Figure II-12 La boue de station d'épuration utilisée



Figure II-13 le séchage de la boue



Figure II-14 la combustion de la boue

La cendre exploitée est l'issue de la combustion de la boue.

Cette combustion a été réalisée en deux phases :

- une première combustion dans un tonneau de fer (Figure II-14) Une deuxième combustion secondaire dans un four à 800°C, effectuée pendant



Figure II-15 Incinération des boues dans le four



Figure II-16 Le broyage de la cendre



Figure II-17 la cendre après le broyage

- la cuisson de la cendre de boue à 800°C se fait pendant 45 min, cette dernière peut être traduite par la courbe suivante :

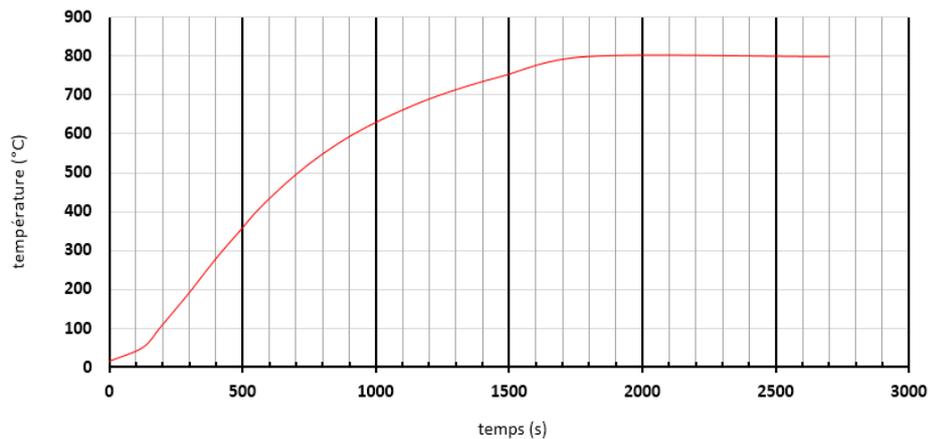


Figure II-18 La température pendant la cuisson

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 un grave argileux.

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 (épreuve témoin) ;
- tuf + différents taux de chaux (2% ,4%) ;
- tuf + différent taux de cendre de la boue de stations d'épuration des eaux usées- CBSE- (4% ,8%,12%).
- tuf + 4% chaux + différente taux de cendre (4% ,8%,12%) pour 03 teneur en eau de (10% ,12%,14%).

III.2 Résistance à la compression

III.2.1 Préparation des éprouvettes

Des séries d'éprouvettes (Figure III-1) sont confectionnées à partir des mélanges (indiqués dans le tableau (Tableau III-1) à réalisation 03 éprouvettes/âge pour chaque mélange.

Tableau III-1 Différent mélanges élaborés

Liant	Tuf+x%Chaux		Tuf+x%Cendre (CBSE)			Tuf+4%Chaux+x%Cendre		
	x=2%	x=4%	x=4%	x=8%	x=12%	x=4%	x=8%	x=12%
Mélanges élaborés	TCX4	TCX6	TCS4	TCS8	TCS12	TCC4	TCC8	TCC12



Figure III-1 Les éprouvettes préparées pour l'essai de compression simple et traction

Pour la compression simple, nous avons suivi l'évolution de cette résistance à 7 jours et 180 jours dans une série d'échantillons cylindriques ayant des dimensions ($\varnothing = 5$ cm, H = 10 cm)

NB: Les mélanges sont compactés statiquement dans un moule cylindrique à double piston (Figure III-2), de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, selon la norme (NF P 98-230-2).



Figure III-2 Moule et pistons des éprouvettes des essais de compression simple

Après chaque durée de conservation, les éprouvettes sont soumises à un effort de compression appliqué parallèlement à l'axe du cylindre à l'aide d'une presse hydraulique (Figure III-3) à une vitesse de 1,6 mm/min jusqu'à la rupture. La valeur de la résistance à la compression simple représentée, est la valeur moyenne de trois éprouvettes pour chaque période.



Figure III-3 Machine de presse hydraulique

III.2.2 Evolution de la résistance à la compression simple (Rc)

- **Traitement du tuf à la chaux**

La (Figure III-4) présente la variation de la Rc des mélanges tuf+x %chaux (x=2 % et x=4%) comparés avec celle de tuf seul pour l'âge de 7 et 180 jours.

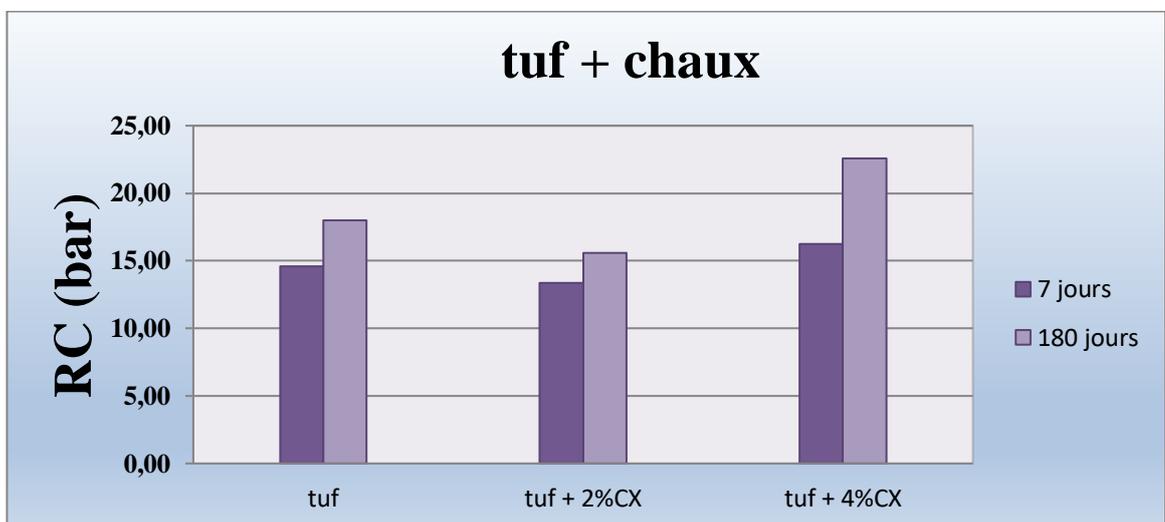


Figure III-4 variation de Rc en fonction de l'âge (7 et 180 jours) pour le tuf + x % chaux

Les histogrammes de la figure montre que :

- pour le tuf seul , la résistance à la compression simple à 180 jours plus élevée que celle obtenue à 7 jours , ce qui est conforme aux travaux de recherche réalisés sur les tufs c'est à dire que Rc s'améliore avec l'âge.

- pour les mélanges tuf + chaux, la l'ajout de 4% de chaux au tuf(TCX4) augmente la résistance pour les deux âges. la Rc maximale est enregistré à 180 jours .Elle atteint. les 22 bars contre une valeur de 18 bars pour le tuf seul.

- **Traitement du tuf à la cendre**

La (Figure III-5) illustre la variation de la Rc des mélanges tuf +x % cendre pour (x=4 % ,8 % ,12%) comparés avec celle de tuf seul pour l'âge de 7 et 180 jours.

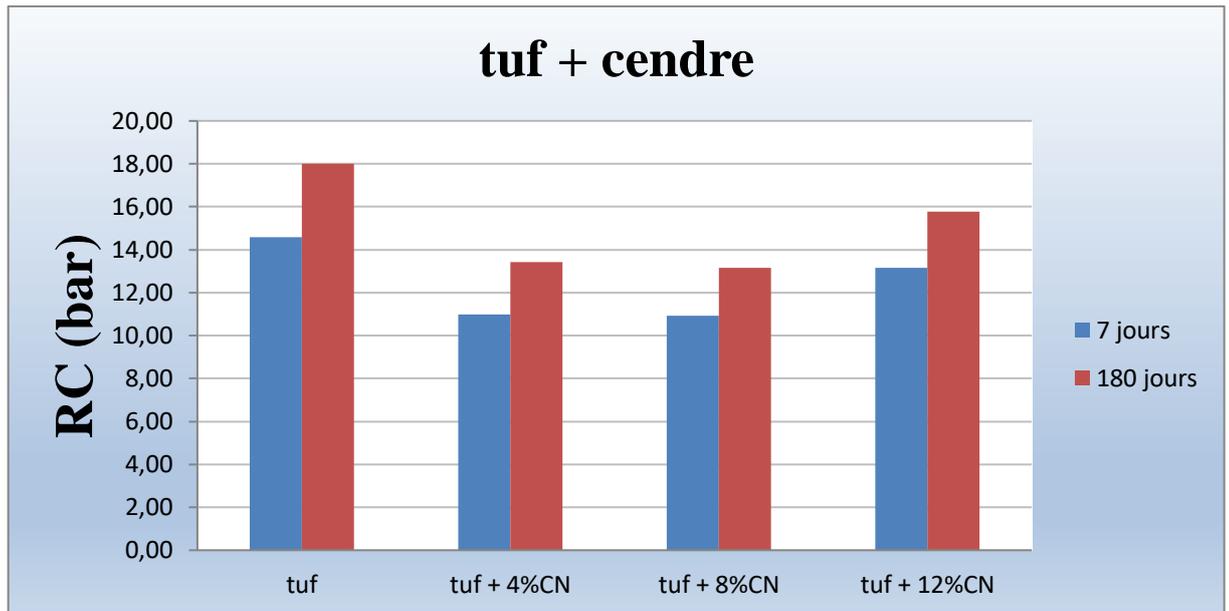


Figure III-5 variation de RC en fonction de l'âge (7 et 180 jours) pour le tuf +cendre.

D'après les histogrammes tracés, nous constatons que l'ajout de la cendre de la boue des stations d'épuration 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 les tufs.

- **Traitement mixte du tuf à la cendre +chaux**

La (Figure III-6) Représente la variation de la Rc des mélanges tuf+4% chaux + x% cendre(CBSE) pour (x=4 % ,8 % ,12%) comparés avec celle de tuf seul pour l'âge de 7 et 180 jours.

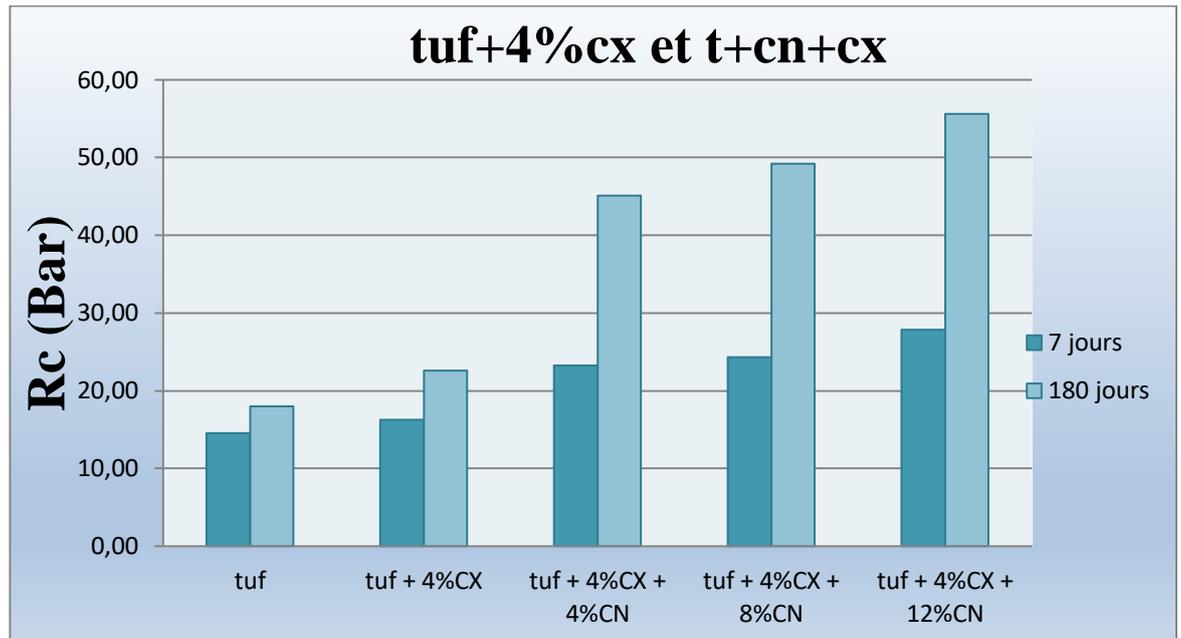


Figure III-6 variation de Rc en fonction de l'âge (7 et 180 jours) pour le (tuf + 4%cx) pour (tuf + cn + cx).

Les résultats obtenus montrent que le traitement mixte (chaux + cendre) permet l'augmentation de la résistance à la compression simple pour tous les taux de cendre ajoutés et pour les deux âges adoptés.

En comparant entre les résistances du tuf traité et celle de tuf, nous constatons que :

A 7 jours, la Rc maximale est enregistrée lors de l'ajout de 12% cendre (mélange TCC12), d'où elle atteint les 27 bars contre une valeur de Rc égale 13 bars pour le tuf seul.

A 180 jours, la Rc maximale est enregistrée aussi lors de l'ajout de 12% cendre (mélange TCC12). Elle dépasse les 55 bars, ce qui est trois fois de la Rc du tuf seul. Et de 2/3 de Rc du tuf traité de 4 % chaux.

Cet important écart montre l'effet positif du traitement mixte sur la résistance et qui prouve l'existence d'une réaction chimique entre les constituants de la chaux et de la cendre qui permet d'augmenter la liaison entre les particules du tuf.

III.2.3 Effet de la teneur en eau de confection des éprouvettes

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 préparé partir des mélanges (tuf +chaux +cendre), c'est dire pour les mélangesTCC4, TCC8etTCC12 à diverses teneurs en eaux de confection (10% ,12% ,14%)

Les résultats montrent que :

A 7 jours, les résistances maximales des mélanges sont enregistrées lors de l'utilisation une teneur en eau égale 14 % (Figure III-7) et la meilleure résistance est pour le mélangeTCC12.

A 180 jours, les résistances maximales des mélanges sont enregistrées lors de l'utilisation une teneur en eau égale 10 % (Figure III-8) et la meilleure résistance est pour le mélangeTCC12.

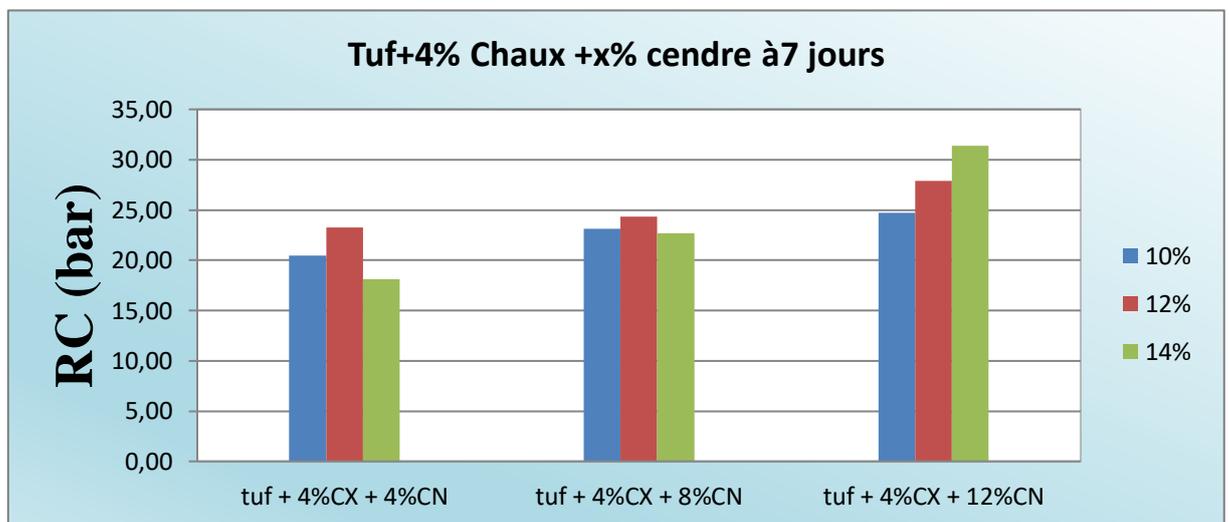


Figure III-7Variation de RC en fonction teneur de confection (10,12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4,8 et12%).

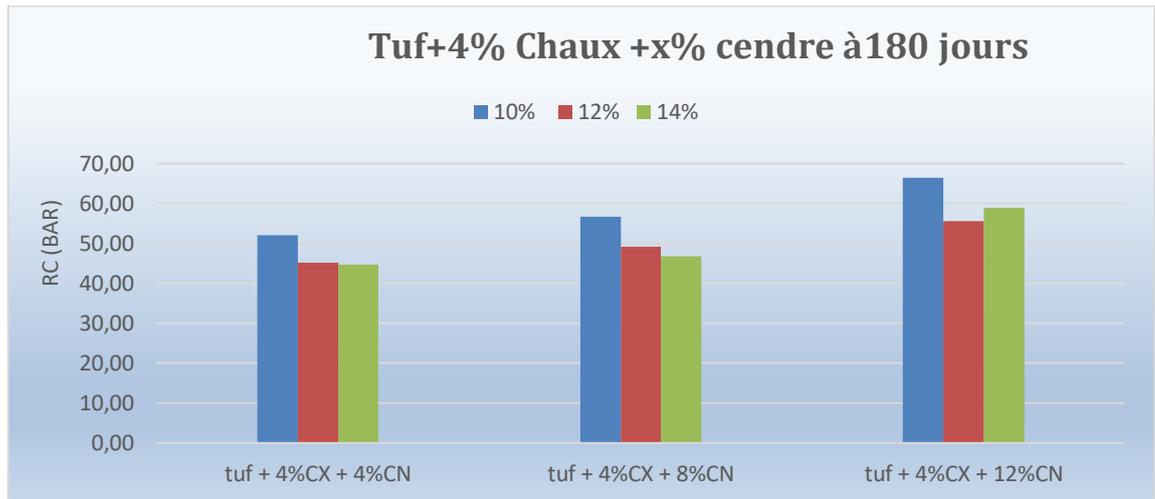


Figure III-8 Variation de RC en fonction teneur de confection (10,12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4,8 et 12%).

III.3 Résistance à la traction R_{ti}

Concernant l'essai de traction, il ya plusieurs modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction (Figure III-9), parmi ces essais nous citons:

- Traction directe (non applicable aux sols).
- Traction par flexion (non applicable aux sols).
- Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale NF P98-32-3.

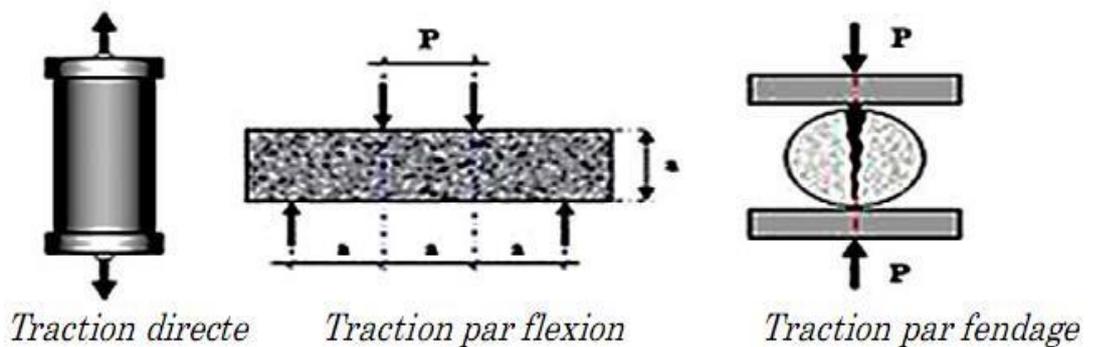


Figure III-9 Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction

Vu que les chaussées sont sollicitées par des efforts de compression conduisant à la traction indirecte, l'essai le plus proche à ce phénomène est l'essai de Traction par fendage (essai brésilien).

Cet essai de traction consiste à comprimer radialement l'éprouvette (Figure III-17), créant alors par effet Poisson des contraintes de traction horizontales au sein du matériau. Il fonctionne à condition que l'effet Poisson provoque la rupture du matériau avant les contraintes de compression.

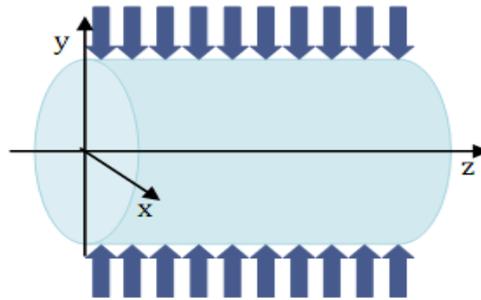


Figure III-10 Schéma du mode d'application de l'effort

III.3.1 Préparation des éprouvettes

Pour l'essai de traction indirect, des séries d'éprouvettes ($\varnothing=5\text{cm}$, $h=5\text{cm}$) (Figure III-1) sont confectionnées à partir des mélanges (indiqués dans le tableau (Tableau III-1) à réalisation 03 éprouvettes/âge pour chaque mélange.

Tableau III-2 Différent mélanges élaborés

Liant	Tuf+x%Chaux		Tuf+x%Cendre (CBSE)			Tuf+4%Chaux+x%Cendre		
	x=2%	x=4%	x=4%	x=8%	x=12%	x=4%	x=8%	x=12%
Mélanges élaborés	TCX4	TCX6	TCS4	TCS8	TCS12	TCC4	TCC8	TCC12

- **Traitement du tuf à la chaux**

La (Figure III-11) représente la variation de la R_{ti} des mélanges tuf+x %chaux ($x=2\%$ et $x=4\%$) comparés avec celle de tuf seul pour l'âge de 7 et 180 jours.

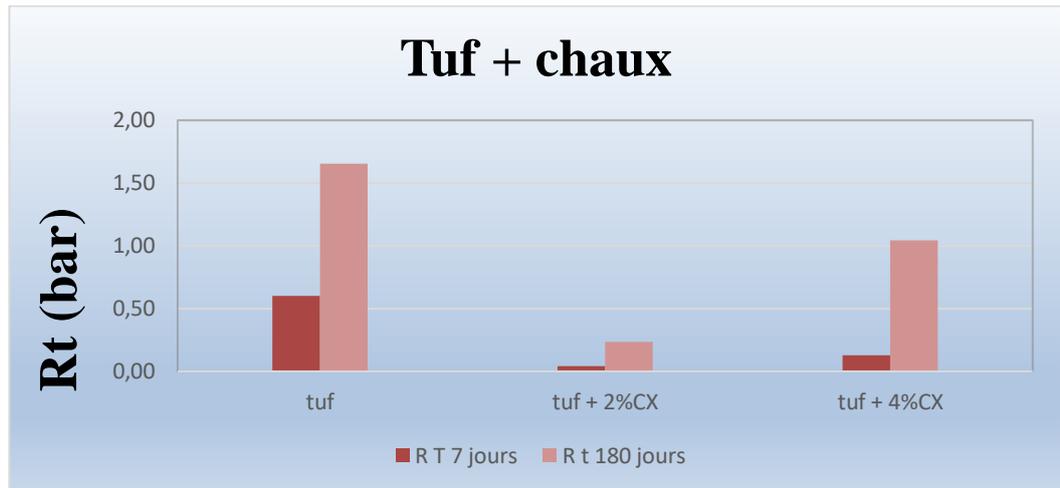


Figure III-11 variation de RT en fonction de l'âge (7 et 180 jour) pour le tuf + chaux.

Les résultats montrent que :

- pour le tuf seul, la résistance à la traction à 180 jours plus élevée que celle obtenue à 7 jours, ce qui est conforme aux travaux de recherche réalisés sur les tufs c'est à dire que R_c s'améliore avec l'âge.
- pour les mélanges tuf + chaux, la l'ajout de 4% de chaux au tuf (TCX4) augmente la résistance pour les deux âges mais reste inférieure à celle du tuf seul

• Traitement du tuf à la cendre

La (Figure III-12) illustre la variation de la R_{ti} des mélanges tuf+x % cendre pour (x=4 %, 8 %, 12%) comparés avec celle de tuf seul pour l'âge de 7 et 180 jours.

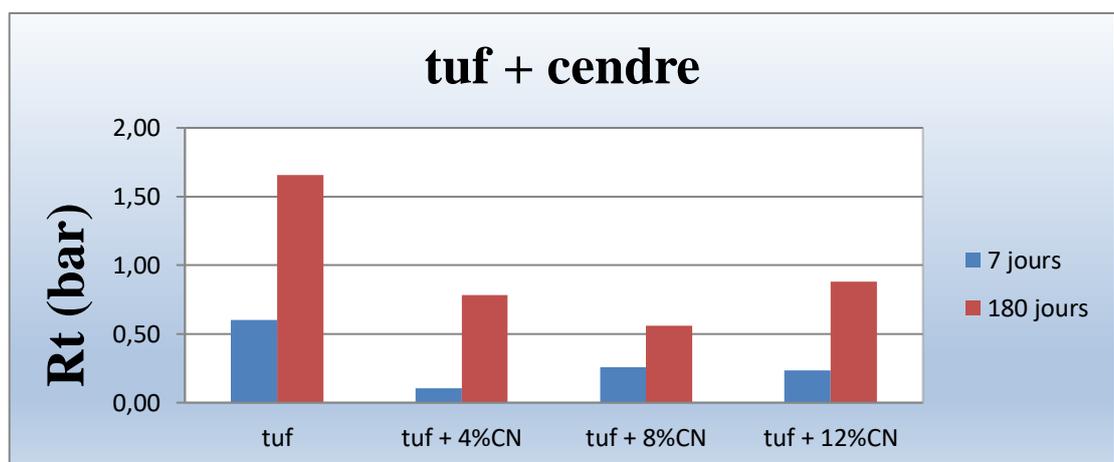


Figure III-12 variation de RT en fonction de l'âge (7 et 180 jour) pour le tuf + cendre.

D'après les histogrammes tracés, nous constatons que l'ajout de la cendre de la boue des stations d'épuration 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.

- **Traitement mixte du tuf à la cendre +chaux**

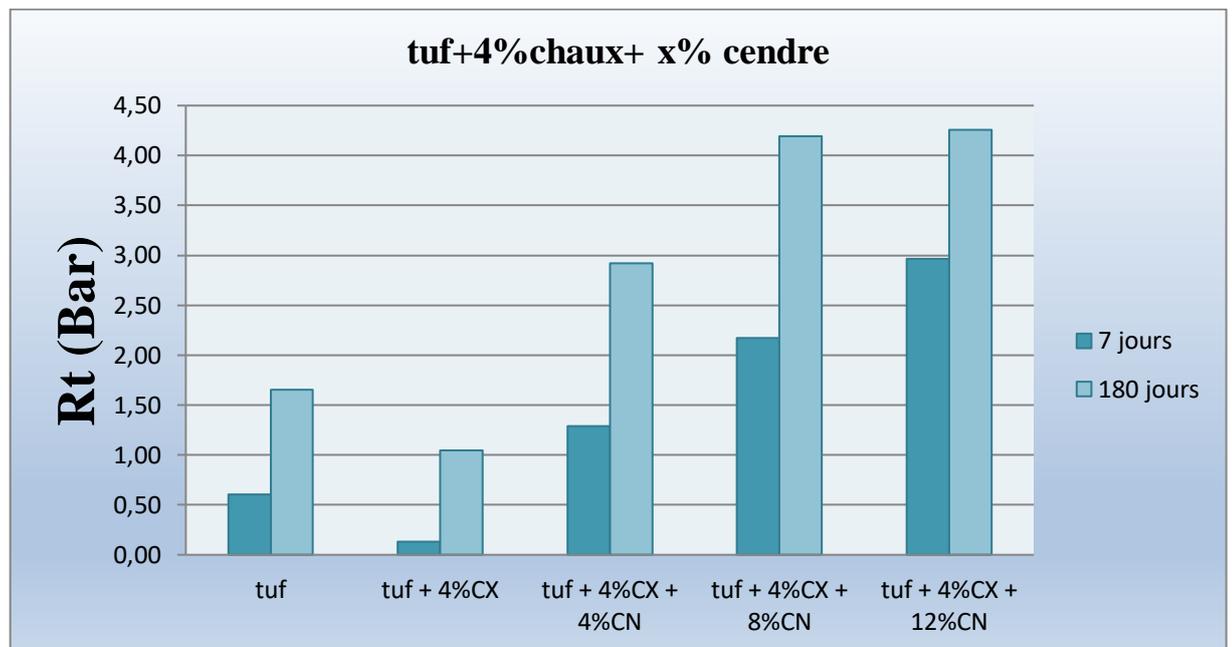


Figure III-13 variation de RT en fonction de l'âge (7 et 180 jour) pour le (tuf + 4%cx) pour (tuf + cn + cx.)

La (Figure III-13) représente la variation de la Rti des mélanges tuf+4% chaux + x% cendre (CBSE) pour (x=4 %, 8 %, 12%) comparés avec celle de tuf seul pour l'âge de 7 et 180 jours.

Les résultats obtenus montrent que le traitement mixte (chaux+ cendre) a augmenté la résistance à la traction pour tous les taux de cendre ajoutés et pour les deux âges

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

A 7 jours, la Rti maximale est enregistrée lors de l'ajout de 12% cendre (mélange TCC12), d'où elle dépasse les 2 bars contre une valeur de Rti égale 1.66 bars pour le tuf seul.

A 180 jours, la Rti maximale est enregistrée aussi lors de l'ajout de 12% cendre (mélange TCC12). Elle atteint la valeur de 4.25 bars, ce qui est plus de deux fois de la Rti du tuf seul. Cet écart montre l'effet positif du traitement mixte sur la résistance à la traction.

III.3.2 Effet de la teneur en eau de confection des éprouvettes

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) , c'est à dire pour les mélanges TCC4 ,TCC8 et TCC12 à diverses teneurs en eau de confection (10% ,12% ,14%)

Les résultats montrent que :

A 7 jours, les résistances maximales des mélanges sont enregistrées lors de l'utilisation d'une teneur en eau égale 14 % (Figure III-14.) et la meilleure résistance est pour le mélange TCC12.

A 180 jours, les résistances maximales des mélanges sont enregistrées lors de l'utilisation d'une teneur en eau égale 10 % (Figure III-15) et la meilleure résistance est pour le mélange TCC12.

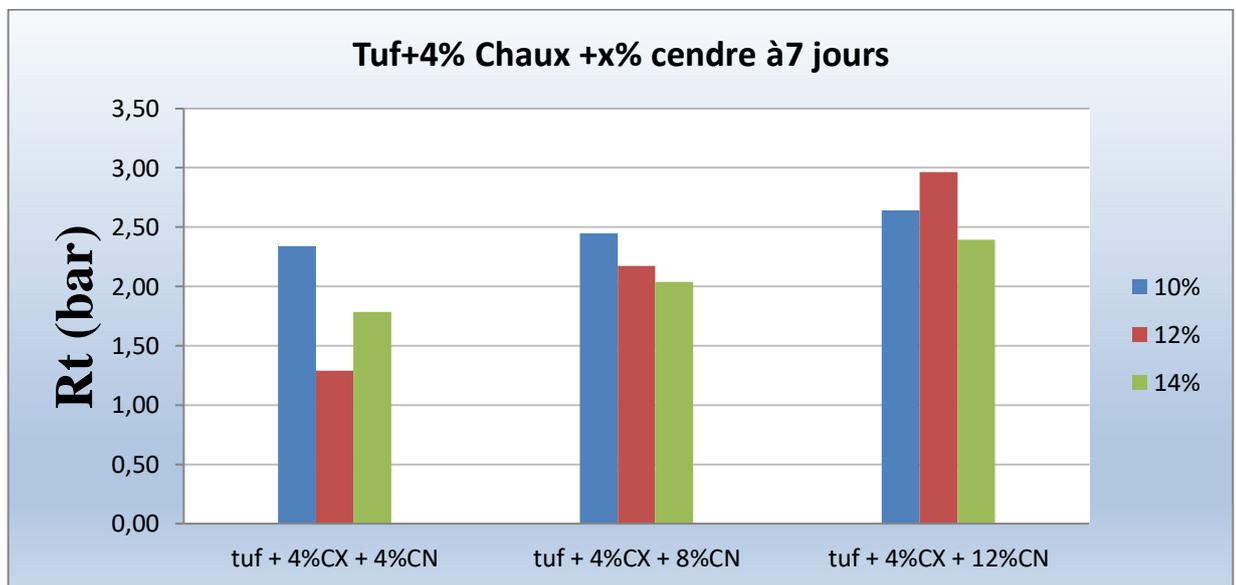


Figure III-14 Variation de R_t en fonction de la teneur de confection (10, 12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4, 8 et 12%).

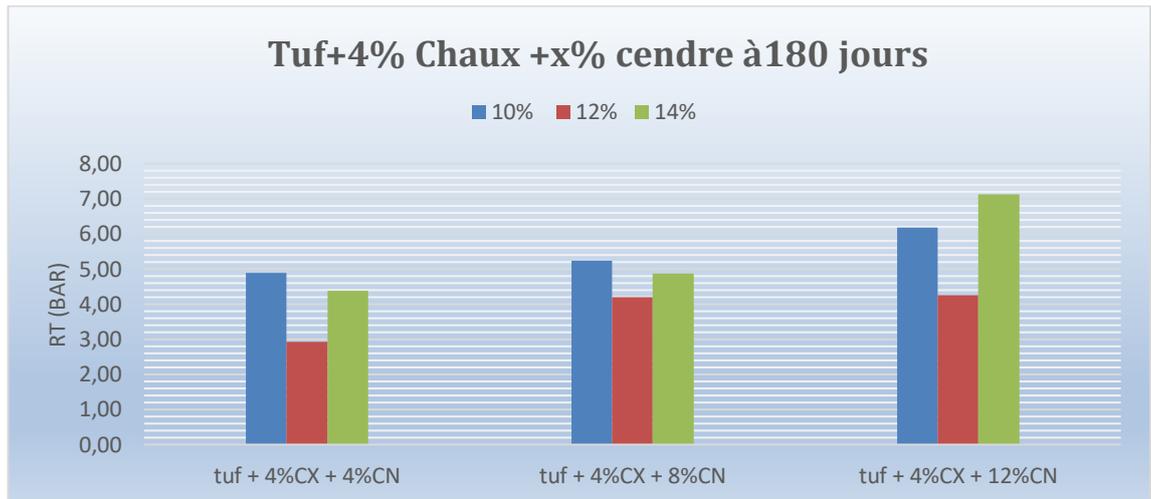


Figure III-15 Variation de RT en fonction teneur de confection (10,12% et 14 %) pour tuf + chaux (4%) + cendre (4,8 et 12%).

On remarque que :

– La résistance à traction est en évolution croissante un peut remarquable pour les, 7 et 180 jours pour toutes les formules on différentes teneures en eau.

– En observe une augmentation un peut remarquables de résistance a la traction pour (TCC4), (TCC8) et (TCC12) au teneur en eau (10% et 12%) mais une augmentation plus considérable au teneur en eau (14%) au-delà les autres.

– Il y a un plus au moins proportionnel entre le teneur en au et l'augmentation de résistance a la traction.

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'eaux en mesurant la résistance R_c à l'âge de 180 jour et après l'immersion ,pendant 24 heures ; des éprouvettes cylindrique (, $\varnothing=5\text{cm}$, $h=10\text{cm}$) confectionnées à partir des mélanges TCX2 ,TCX4, TCC4 ,TCC8 et TCC12.

- **Résistance à la compression**

Après 24 heures d'immersion les résultats montrent l'effondrement total des éprouvettes du tuf seul et le maintien les autres. (Figure III-16 et Figure III-17)

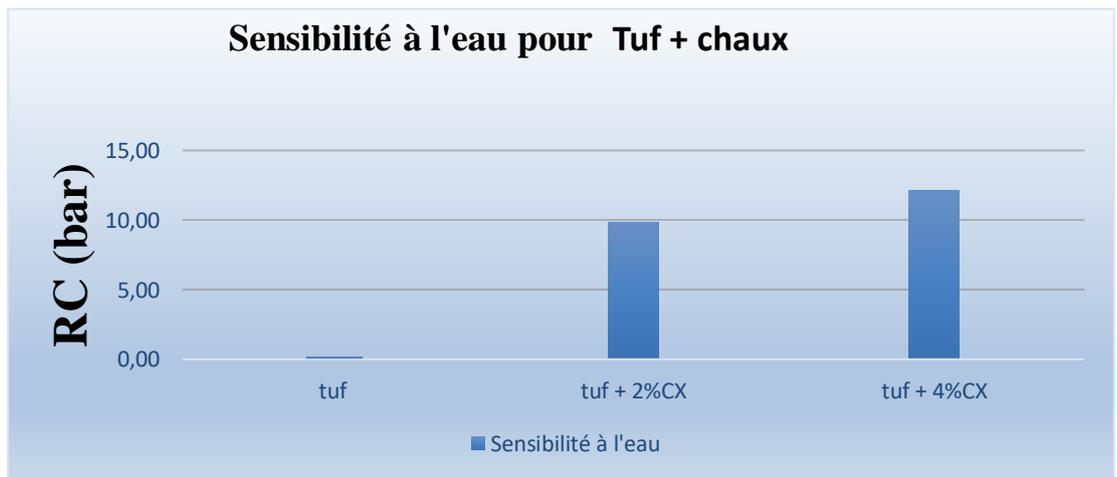
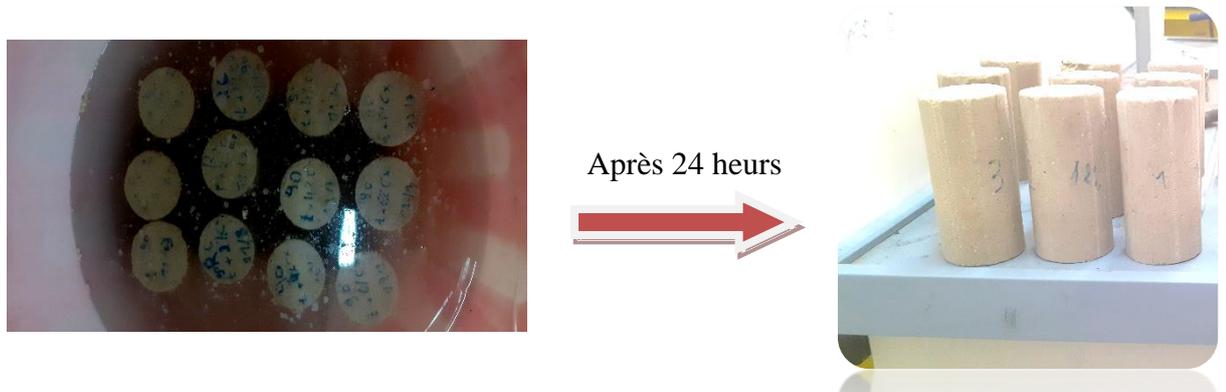
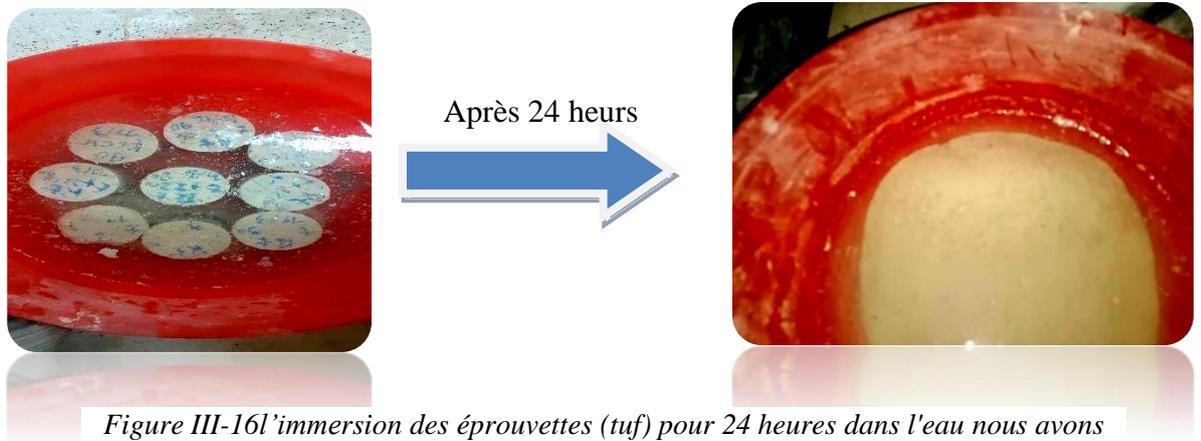


Figure III-18 Sensibilité à l'eau 180 jours (tuf+chaux)

- Pour le tuf traité à la chaux, la résistance maximale est constatée à l'ajout de 4% de chaux (pour le mélange TCX4). Elle atteint la valeur de 12 bars (Figure III-18)

- Pour le tuf traité à la chaux +cendre, la résistance maximale est observée à l'ajout de 4% de chaux +12 cendres (pour le mélange TCC12). Elle atteint la valeur de 14bars (Figure III-20).



Figure III-19 l'immersion des éprouvettes (tuf + cendre) pour 24 heures dans l'eau nous avons

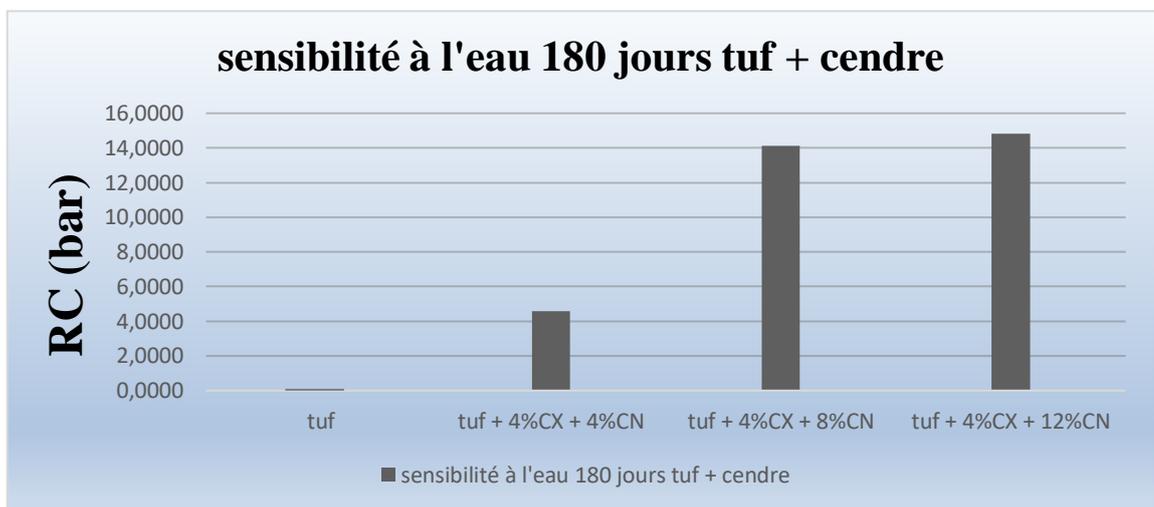


Figure III-20 Sensibilité à l'eau 180 jours (tuf + cendre).

III.4 Conclusion

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

- ✓ Traitement du tuf 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 pour les mélanges TCC12 (c'est -à-dire lors de l'ajout de 04 chaux et 12% cendre) en comparant avec celle du tuf seul.

- ✓ la résistance à la traction du TCC12 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 boues des stations d'épuration des eaux usées en utilisant leur cendre (CBSE) 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 effectués sur le tuf, le, dévoilent sa nature gypseuse. Selon la classification GTR 92 , notre matériau est rangé dans la classe B4 (considéré 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 55 bars à 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 4 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 est d'encirons 14 bars, enregistrée pour les éprouvettes âgées de 180 jours et immergé dans l'eau pendant 24 heures. En revanche, un effondrement total de celles du tuf seul. Il faut noter que cette amélioration de la sensibilité à l'eau permet de surmonter l'inconvénient majeur des tufs d'encroûtement.

Recommandations

Dans ce travail, nous n'avons pas pu faire caractérisation approfondie de la cendre des boues de saltation d'épuration, vu le manque des moyens. Donc, nous recommandons une étude consacrée à caractérisation complète de cette cendre afin de la promouvoir comme un liant routier.

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

Références

- [1] **Maozhe Chen** : Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction cimentaires de cendres d'incinération de boues de station d'épuration, **doctorat 2012 École doctorale de Chimie de Lyon**
- [2] **BARKAT A.** : valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton **magister 2006 Univ Ouargla.**
- [3] **MOKHTARI A.:** Influence des ajouts des fines sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier **magister 2006 Univ Ouargla**
- [4] **Siew Choo Chin** The use of sewage sludge ash (SSA) as partial replacement of cement in concrete **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences VOL11, NO 6, MARCH 2016**
- [5] **Jamshidi, A. Mehrdadi, N, Jamshidi, M.** Application of Sewage Dry Sludge as Fine Aggregate in Concrete **Journal of Environmental Studies, Vol 37, No 59, Dec 201**
- [6] **K.Nagarjuna, I.Prasanth Aryabhat**SEEWAGE SLUDGE ASH (SSA) IN PRECAST CONCRETE BLOCKS **IJESRT Nagarjuna, 4. (8.): August, 2015**
- [7] **Hamidi M** Etude de l'activité pouzzolanique d'une roche andésitique en Algérie, INVACO2 N° : 10-181 séminaire international
- [8] **M. Pérez-Carrión** Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concrete blocks **UnivPolitècnica Valencia, Españamars2014**
- [9] **Mohamed M** Use of wastewater sludge in concrete mixes, master 2008 Univ Gaza
- [10] **<http://www.ona-dz.org> site officiel del' Office National des Assainissements**
- [11] **NORMES ASTM Construction**
- [12] Chapitre3 Classification des sols Norme NF P 11 300 et G.T.R15
- [13] **CHOUKRI Mhamed, BAITICHE Nacereddine,** (Valorisation de sable de dune traité aux liants hydraulique et la poudrette de caoutchouc des pneus usés en technique routières). Université Ziane Achour de Djelfa, (17/06/2017).
- [14] **Marwana Aminou Muangongo Ivanete,** (Influence de la présence de sulfates sur le traitement du sol argileux par des ajouts minéraux), Université Djilali Bouanaama de Khemis Miliana, 2015.
- [15] **BOUMEDIENE MOHAMMED EI AMIN** : bilan de suivi des performances de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées : cas de la STEP AIN EL HOUTZ **Licence en Hydraulique 2013 UAB TELEMEN**
- [16] Courrier de l'environnement de l'INRA n°41, octobre 2000

ANNEXES

Annexe A :

Propositions de spécifications pour l'Algérie par STRUILLOU et LLOUL

			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 ; (γd = 0,95. γd 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.

■ Tufs 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.

Annexe B :

Classification GTR

Une classification de matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières et donne par le GTR (SetraLCPC, 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 ;

