

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة – د. الطاهر مولاي –

UNIVERSITÉ DE SAÏDA – Dr MOULAY TAHAR – Faculté de Technologie
Département de Génie Civil & Hydraulique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de **MASTER en Génie Civil**

Spécialité : « Géotechnique »

THEME

Influence des déchets de matériau de construction sur le comportement des remblais derrière les ouvrages de soutènement

Présenté par :

M^{elle}. HACHEMI Wassila

M^{elle}. ZERDANI Hadjira

Membres du jury

Pr. N. MAHMOUDI
Dr. H. HACHEMI
Dr. A. SEKKEL

Professeur
Maitre de conférences B
Maitre de conférences B

Université Dr. TAHAR Moulay de Saida
Université Dr. TAHAR Moulay de Saida
Université Dr. TAHAR Moulay de Saida

Président
Examineur
Encadreur

Année Universitaire : 2019 – 2020

جامعة سعيدة – د. الطاهر مولاي –

UNIVERSITÉ DE SAÏDA – Dr MOULAY TAHAR – Faculté de Technologie

Département de Génie Civil & Hydraulique



Influence des déchets de matériau de construction sur le comportement des remblais derrière les ouvrages de soutènement

ZERDANI Hadjira
HACHEMI Wassila

2019-2020

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu DIEU Miséricordieux qui nous a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

Nous adressons nos profondes et respectueuses gratitudee à Monsieur Abdelkrim SEKKEL directeur de ce mémoire, qui a dirigé ce travail de recherche attentivement et efficacement l'évolution de ce travail.

Nous voudrions aussi remercier le président du jury et les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs observations et critiques

Nous disons merci à tous nos collègues

Enfin, tous les enseignants qui ont contribué à notre formation trouveront ici notre profonde reconnaissance

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, le fruit de mes efforts et ma réussite.

A mon Père.

A ma très chère Mère

Qui n'ont jamais cessé de m'entourer de leur affection, de leur soutien et de leur amour.

A mes frères et toute la famille.

Que dieu vous préserve tous, bonne santé et longue vie.

A mes enseignants et mes amis pour leurs ententes toute cette période.

Que ce travail soit l'expression de ma grande affection et le signe de mon amour et attachement.

Hachemi Wassila

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, le fruit de mes efforts et ma réussite.

A mon Père.

A ma très chère Mère

Qui n'ont jamais cessé de m'entourer de leur affection, de leur soutien et de leur amour.

A mes frères et toute la famille.

Que dieu vous préserve tous, bonne santé et longue vie.

A mes enseignants et mes amis pour leurs ententes toute cette période.

Que ce travail soit l'expression de ma grande affection et le signe de mon amour et attachement.

Zerdani Hadjira

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
DEDICACES	III
TABLE DES MATIERES	IV
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
ملخص	IX
ABSTRACT.....	X
RESUME	XI
LISTE DES SYMBOLES & ABREVIATIONS	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1. ETATS D'EQUILIBRES LIMITES	3
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 ETATS EQUILIBRES LIMITES.....	4
1.3 NOTION DE POUSSEE-BUTEE DES TERRES	4
1.4 PRESSION DES TERRES AU REPOS	5
1.5 BUTEE	6
1.6 POUSSEE.....	6
1.7 APPROCHES THEORIQUES.....	6
1.7.1 THEORIE DE COULOMB (1773).....	7
1.7.2 ETUDE D'UN CAS SIMPLE.....	8
1.7.3 THEORIE DE RANKINE (1860).....	9
1.7.4 EQUILIBRE DE BOUSSINESQ.....	10
1.8 RELATION PRESSIONS LATERALES – DEPLACEMENTS.....	11
1.9 FORMULES DE CALCUL DE LA CONTRAINTE DE POUSSEE	12
1.10 PATHOLOGIES DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENTS	13
1.10.1 CAUSES DES DEGRADATIONS DES MURS.....	13
1.10.2 CAUSES DES DEGRADATIONS DES PALPLANCHES ET PAROIS MOULEES	14
1.10.2.1 Palplanches	14
1.10.2.2 Parois moulées	14
1.10.2.3 Conséquences.....	14
1.10.3 SOLUTIONS & REPARATIONS	15
1.10.3.1 TECHNIQUES ET CONSEILS.....	15

1.10.3.2	CONSEILS.....	16
1.10.3.3	ENTRETIEN.....	16
1.10.4	SURVEILLANCE.....	16
1.10.4.1	Pour les murs.....	16
1.10.4.2	REPARATION.....	17
1.11	STATISTIQUES DES DESORDRES EN ALGERIE.....	18
1.12	CONCLUSION.....	18

CHAPITRE 2. PROBLEMATIQUE DES DECHETS DE CONSTRUCTION..... 19

2.1	INTRODUCTION.....	20
2.2	DECHETS DANS LE MONDE.....	20
2.3	PROBLEMES D'ENVIRONNEMENT.....	21
2.3.1	POLLUTION.....	21
2.4	RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE.....	22
2.5	PROBLEMATIQUE DES DECHETS EN ALGERIE.....	22
2.6	DECHETS DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....	25
2.6.1	IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT.....	25
2.6.2	IMPACT ECONOMIQUE.....	26
2.7	ASPECTS REGLEMENTAIRES.....	26
2.7.1	RESPONSABILITE.....	26
2.7.2	TRI DES DECHETS.....	26
2.7.3	LIMITER ET STOCKAGE.....	26
2.7.4	EMBALLAGES.....	27
2.7.5	DEEE.....	27
2.7.6	SUIVI DES DECHETS.....	27
2.7.7	TRANSPORTS DES DECHETS.....	27
2.7.8	FILIERES D'ELIMINATION AGREEES.....	27
2.7.9	DIAGNOSTIC DECHETS.....	27
2.8	TYPES DE DECHETS.....	28
2.8.1	DECHETS INERTES.....	28
2.8.1.1	Bétons et gravats.....	28
2.8.1.2	Matériaux bitumineux sans goudron (agrégats d'enrobés, grave bitume) /Enrobés.....	29
2.8.1.3	Terres et pierres (y compris déblais mais hors terre végétale).....	30
2.8.2	DECHETS NON DANGEREUX.....	31
2.8.2.1	Bois brut.....	31
2.9	CONCLUSION.....	31

CHAPITRE 3. UTILISATION DES DECHETS DE CONSTRUCTION DANS LE GENIE CIVIL. 33

3.1	INTRODUCTION.....	34
3.2	PRODUITS DE RECYCLAGE.....	34
3.2.1	GRAVES DE RECYCLAGE (G.R.).....	35
3.2.2	SABLES, GRAVILLONS ET CAILLOUX DE RECYCLAGE.....	36
3.3	UTILISATIONS POSSIBLES ET CONDITIONS.....	36
3.3.1	GRAVES GR0 ET GR1.....	36
3.3.1.1	Graves GR0.....	36
3.3.1.2	Graves GR1.....	37
3.3.2	GRAVES GR2, GR3 ET GR4.....	37
3.3.2.1	Graves non traitées (GNT).....	37
3.3.2.2	Graves traitées aux liants hydrauliques (GH).....	38
3.3.3	SABLES ET GRAVILLONS.....	39

3.3.3.1	Domaine d'emploi	39
3.3.3.2	Spécifications relatives aux mélanges.....	39
3.4	EXEMPLES DE VALORISATION.....	40
3.4.1	VALORISATION DES DECHETS DE MARBRE COMME AGREGATS GROSSIERS.....	40
3.4.1.1	Caractérisation des matériaux.....	41
3.4.2	ÉVALUATION DES PROPRIETES DE DURABILITE DU BETON AUTO COMPACTANT FABRIQUE A PARTIR DE GRANULATS DE BETON RECYCLE.....	42
3.4.2.1	Matériaux	43
3.4.3	ÉTUDE DES PROPRIETES DES BETONS A PARTIR DE GRANULATS RECYCLES PRE-SATURES.....	43
3.4.3.1	Matériaux	44
3.4.4	PERFORMANCE DE DURABILITE DU BETON VERT INCORPORANT DIVERS DECHETS.....	45
3.4.5	REVUE SUR LA STABILISATION DES SOLS ARGILEUX A L'AIDE DES FINES OBTENUES A PARTIR DE STRUCTURES EN BETON DEMOLIES	47
3.4.5.1	Utilisation des déchets de démolition dans la stabilisation des sols	47
3.5	CONCLUSION.....	51

CHAPITRE 4. TRAVAUX ET PERSPECTIVES D'APPLICATION AUX OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT **52**

4.1	INTRODUCTION.....	53
4.2	VALORISATION DES DECHETS DE BRIQUE	54
4.2.1	ÉVOLUTION DE LA RUPTURE SANS RENFORCEMENT.....	54
4.2.2	ÉVOLUTION DE LA RUPTURE AVEC RENFORCEMENT.....	55
4.2.2.1	Renforcement avec 20% de substitution en brique	55
4.2.2.2	Renforcement avec 40% de substitution en brique	57
4.3	VALORISATION DES DECHETS DE MARBRE	58
4.3.1	ÉVOLUTION DE LA RUPTURE DU SOL RENFORCE PAR 02 NAPPES EN MARBRE	58
4.3.2	COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DU LABORATOIRE L.G.C.E	60
4.4	VALORISATION DES DECHETS DE BETON	61
4.4.1	DEFINITION DES DECHETS DE BETON.....	61
4.4.2	ESSAI AVEC CONFÈTEMENT A 20 % DES GRAINS DE DECHETS DE BETON	61
4.4.3	COMPARAISON DES RESULTATS.....	63
4.5	DECHETS DE VERRE	66
4.5.1	VALORISATION DES DECHETS DE VERRE	66
4.6	DECHETS DE CERAMIQUE.....	66
4.7	RECYCLAGE DE L'ASPHALTE	67
4.7.1	LE CHALLENGE : AUGMENTER LA QUANTITE D'ASPHALTE RECYCLE	68
4.7.2	LA SOLUTION : A CONTRE-COURANT – UN TAUX DE RECYCLAGE DE 90 % + X.....	68
4.7.3	INSTALLATIONS DE CIBLAGE : OPTIMISER LA COURBE GRANULOMETRIQUE POUR AUGMENTER LE TAUX D'ADJONCTION DE MATIERE RECYCLEE	69
4.7.4	UN FRAISAGE « INTELLIGENT » : ECONOMIQUE ET RESPECTUEUX DE L'ENVIRONNEMENT	69
4.8	CONCLUSION.....	70

CONCLUSION GENERALE..... **71**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **72**

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1.ETATS D'EQUILIBRES LIMITES	3
FIGURE 1.1 : CONTRAINTES PRINCIPALES DANS UN SOL A SURFACE HORIZONTALE [2]	5
FIGURE 1.2 DEPLACEMENT DE L'ECRAN CORRESPONDANT A UNE MISE EN BUTEE [2].....	6
FIGURE 1.3 CERCLE DE MOHR, MILIEU PULVERULENT [4]	7
FIGURE 1.4 ETATS DES CONTRAINTES EN M [2]	8
FIGURE 1.5 ÉTATS DE CONTRAINTES DE POUSSEE ET DE BUTEE POUR UN SOL PULVERULENT.[2]	10
FIGURE 1.6 SCHEMA DE BOUSSINESQ [4].....	11
FIGURE 1.7 RELATION FORCE-DEPLACEMENT POUR UN ECRAN RIGIDE EN TRANSLATION [10]	11
FIGURE 1.8 : DEPLACEMENTS NECESSAIRES A LA MOBILISATION DES ETATS D'EQUILIBRES LIMITES DE POUSSEE ET DE BUTEE	12
FIGURE 1.9 EXEMPLES DE QUELQUES CAS PATHOLOGIQUES D'OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT [9]	13
FIGURE 1.10 CONSEQUENCES D'AGGRAVATION DES SYMPTOMES [9].....	15
FIGURE 1.11 CORROSION DES PALPLANCHES MÉTALLIQUES QUI ENGENDRE DES FUITES D'EAU[9].....	15
FIGURE 1.12 PAROIS MOULEES : ABSENCE DE DRAINAGE ENGENDRANT UNE RUPTURE [9]	15
FIGURE 1.13 SYSTEME DE DRAINAGE [9].....	16
FIGURE 1.14 ENTRETIEN DU SYSTEME DE DRAINAGE [9].....	16
FIGURE 1.15 STATISTIQUES DES DESORDRES AFFECTANT LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT EN ALGERIE [9]	18
.....	18
CHAPITRE 2. PROBLEMATIQUE DES DECHETS DE CONSTRUCTION	19
FIGURE 2.1 DECHETS DE BETONS ET GRAVATS [10]	28
FIGURE 2.2 DECHETS DE MATERIAUX BITUMINEUX SANS GOUDRON [10].....	29
FIGURE 2.3 DECHETS DE TERRES ET PIERRES [10].....	30
FIGURE 2.4 DECHETS DE BOIS BRUT EN EMBALLAGES [10]	31
CHAPITRE 3. UTILISATION DES DECHETS DE CONSTRUCTION DANS LE GENIE CIVIL. 33	
CHAPITRE 4. TRAVAUX ET PERSPECTIVES D'APPLICATION AUX OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT	52
FIGURE 4.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE POUSSEE	53
FIGURE 4.2 : DIMENSIONS DE LA MASSE GLISSANTE [53].....	63
FIGURE 4.3 : VOLUMES DES MASSES GLISSANTES ET TAUX DE REDUCTION EN FONCTION DES POURCENTAGES DES MELANGES [53].....	64
FIGURE 4.4 : LONGUEURS DES MASSES GLISSANTES LEURS TAUX DE REDUCTION EN FONCTION DES POURCENTAGES DES MELANGES [53]	65

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1. ETATS D'EQUILIBRES LIMITES.....3

TABLEAU 1.1 : VALEURS DE K_0 POUR DIFFERENTS MILIEUX [6]5

TABLEAU 1.2 EXEMPLES DE REPARATION DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES [9] 17

CHAPITRE 3. UTILISATION DES DECHETS DE CONSTRUCTION DANS LE GENIE CIVIL.33

TABLEAU 3.1. GRANULATS DE RECYCLAGE [22] 34

TABLEAU 3.2. CATEGORIES DES GRAVES DE RECYCLAGE [31]..... 35

TABLEAU 3.3. CARACTERISTIQUES DES SABLES ET GRAVILLONS [31]..... 36

TABLEAU 3.4. DOMAINE D'EMPLOI DES GR2, GR3 ET GR4 NON TRAITES [31] 38

TABLEAU 3.5. CLASSES DE TRAFIC [31] 38

TABLEAU 3.6. EMPLOI DES GR2, GR3 ET GR4 TRAITES [31] 39

TABLEAU 3.7. EMPLOI DES MELANGES TRAITES [31] 40

TABLEAU 3.8. PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES GRANULATS [35]..... 41

TABLEAU 3.9. ANALYSE CHIMIQUE DU CIMENT [36] 44

TABLEAU 3.10. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES AGREGATS [36]..... 44

CHAPITRE 4. TRAVAUX ET PERSPECTIVES D'APPLICATION AUX OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT.....52

TABLEAU 4.1. L'ETUDE DU SOL SANS CONFORTEMENT [53] 54

TABLEAU 4.2. EVOLUTION DE LA RUPTURE DU SOL AVEC RENFORCEMENT A 20% DE DECHETS EN BRIQUE [54] 56

TABLEAU 4.3. EVOLUTION DE LA RUPTURE DU SOL AVEC RENFORCEMENT A 40% DE DECHETS EN BRIQUE [54] 57

TABLEAU 4.4. EVOLUTION DE LA RUPTURE : RENFORCEMENT AVEC 02 NAPPES EN MARBRE [55]..... 59

TABLEAU 4.5. PRESENTATION DES RESULTATS AU LABORATOIRE L.G.C.E[54]..... 60

TABLEAU 4.6. UN CONFORTEMENT AVEC 20 % DES GRAINS DE DECHETS DE BETON [53] 61

TABLEAU 4.7. EVOLUTION DES PROPRIETES DE LA MASSE GLISSANTE [53]..... 63

ملخص

يتعلق هذا العمل بمجال تقييم نفايات مواد البناء في الهندسة المدنية. في الواقع، كل عام، ينتج البشر بضع مليارات من النفايات: النفايات المنزلية، والنفايات الصناعية أو حتى النفايات في الموقع من البناء والهدم. الأرقام مقلقة ويجب على المهندسين تغيير نهجهم لإنقاذ كوكبنا. ستكون المواد البيئية والخرسانة الخضراء والركام الخرساني المعاد تدويره وغيرها مواد المستقبل، وفي هذه الحالة ستركز خطوط البحث على هذا الموضوع الذي يجمع بين براعة البناء التكنولوجي والتحديات البيئية.

تشكل هذه المراجعة الببليوغرافية منصة مرجعية لأي فني جيوتقني مستقبلي يرغب في الاستثمار في هذا المجال لاستعادة نفايات مواد البناء وتأثيرها على سلوك الردم خلف الجدران الاستنادية.

يتم تقديم بعض تطبيقات النفايات في الهندسة المدنية بالإضافة إلى الأعمال المنفذة والآفاق المحتملة حول هذا الموضوع.

الكلمات المفتاحية: الدفع، نمو الأرض، تمزق، نفايات، استرجاع، إعادة تدوير، بيئة.

Abstract

The work focuses on the field of waste construction material recovery in civil engineering. Indeed, each year, several billion wastes are generated by man: household waste, industrial waste or those on construction sites from construction and demolition. The figures are alarming and engineers must change their approach to safeguard our planet. Eco-materials, green concretes, recycled concrete aggregates and others will be the materials of the future, in which case, research will focus on this theme combining technological construction prowess with environmental challenges.

This literature review constitutes a reference platform for any future geotechnical engineer wishing to invest in this field of waste construction materials recovery and their influence on the behavior of embankments behind retaining walls.

Some applications of wastes in civil engineering are presented as well as the work carried out and the possible perspectives on this subject.

Keywords: Earth thrust, rupture, waste, recovery, recycling, environment.

Résumé

Le présent travail s'intéresse au domaine de valorisation des déchets de matériau de construction en génie civil. En effet, chaque année, quelques milliards de déchets sont générés par l'homme : déchets ménagers, déchets industriels ou encore ceux sur chantier provenant de la construction et démolition. Les chiffres sont alarmants et les ingénieurs doivent changer d'approche pour la sauvegarde de notre planète. Eco-matériaux, bétons verts, granulats de bétons recyclés et autres seront les matériaux du futur auquel cas, les axes de recherches s'orienteront vers cette thématique associant les prouesses de construction technologiques aux défis environnementaux.

Cette revue bibliographique constitue une plateforme référentielle pour tout futur géotechnicien voulant s'investir dans ce domaine de valorisation des déchets de matériaux de construction et leur influence sur le comportement des remblais derrière les murs de soutènement.

Quelques applications des déchets au génie civil sont présentées ainsi que les travaux réalisés et les perspectives possibles à ce sujet.

Mots clés : Poussée des terres, rupture, déchets, valorisation, recyclage, environnement.

Liste des Symboles & Abréviations

σ_h' : Contrainte horizontale effective

σ_v' : Contrainte verticale effective

σ_3, σ_{ha} : Contrainte principale mineure de poussée

σ_1, σ_{hp} : Contrainte principale majeure de butée

τ : Contrainte tangentielle

K_0 : coefficient des terres au repos

K_a : coefficient de poussée des terres

K_p : Coefficient de butée des terres

Δa : Déplacement nécessaire pour mobiliser la poussée

Δp : Déplacement nécessaire pour mobiliser la butée

ϕ : Angle de frottement

ϕ' : Angle de frottement effectif

C : cohésion

C' : cohésion effective

U : pression interstitielle

Z : profondeur

γ : Poids volumique des terres

β : Inclinaison de la surface du sol

W : Poids propre

G.R : Graves de Recyclage

GR0 : Graves criblées

GR1 : Craie

GR2 : Calcaire

GR3 : Roche argileuses (Marnes)

GR4 : Roche Siliceuses (Grès)

VBS : valeur Bleu de méthylène

FTP : Fiche Technique de Produits

GNT : Graves non traitées

GH : Graves traitées aux liants hydrauliques

INTRODUCTION GENERALE

Au cours de l'histoire, notre planète a subi de nombreux changements à travers ses 4,5 milliards d'années. Sa faune et sa flore, ses mers et océans, ces rivières et ses terres font d'elle la candidate idéale pour héberger toute forme de vie.

Depuis la révolution industrielle, nos usines tournent à plein régime. Le monde s'accélère mais pas que. Les émissions de gaz s'accroissent à un rythme inquiétant, les nappes souterraines et les océans sont pollués, les montagnes taillées et les forêts déboisées. L'environnement dans lequel nous vivons est amené à disparaître si l'on garde nos mêmes habitudes de l'art de vivre et de bâtir.

La terre s'est épuisée et l'urgence est signalée. A présent, l'homme devra tout repenser auquel cas, l'on devrait revendiquer une révolution environnementale au lieu d'industrielle.

Et pourquoi pas les deux, allier la technologie à l'environnement afin de produire les matériaux de demain. Un nouveau concept basé sur l'emploi de matériaux innovants à partir de déchets ménagers, industriels ou provenant de la démolition et de construction.

Le présent mémoire présente une synthèse bibliographique de ce que pourrait être les matériaux de demain ou, trier, recycler et valoriser seront à l'ordre du jour. L'application dans le domaine de génie civil visera essentiellement la problématique des ouvrages de soutènement. Mais il n'en demeure pas moins que le domaine de valorisation puisse s'étaler sur les trois pivots en génie civil à savoir : structures, géotechnique et matériaux.

Pour ce faire, le présent travail est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est réservé aux états d'équilibres limites régies par les phénomènes de poussée des terres et butée, indispensables au calcul des murs de soutènement. Quelques pathologies seront exposées ainsi que les moyens de réparations ;
- Le deuxième chapitre constitue le cœur du problème ; il traite la problématique des déchets de construction et leur impact sur l'environnement et l'économie. Il apporte au lecteur des éléments de réponse sur la gestion des déchets ; suivi, transport, élimination ainsi que les différentes filières de valorisation.

- Le troisième chapitre, très instructif, est réservé à l'utilisation des déchets de construction dans le domaine de génie civil. Des déchets de graves et de sables aux granulats de béton recyclé, les exemples de valorisation ne manquent pas, et les centres d'intérêts s'étalent également sur la stabilisation des sols gonflants ;
- Le dernier chapitre est consacré aux travaux réalisés sur la valorisation des déchets de constructions, aussi bien au sein de notre établissement que ceux réalisés conjointement avec le Laboratoire de Génie Civil & Environnement (L.G.C.E) de Sidi Bel Abbés. L'ensemble traite du comportement des remblais renforcés par des déchets de marbre, brique et bétons ou l'évolution de la rupture au sein du milieu sollicité en poussée est clairement mise en évidence.

A l'issue de ce travail, une conclusion générale est donnée ainsi que les perspectives possibles à ce travail.

Chapitre 1. Etats d'équilibres limites

<u>1.1 INTRODUCTION.....</u>	<u>4</u>
<u>1.2 ETATS EQUILIBRES LIMITES.....</u>	<u>4</u>
<u>1.3 NOTION DE POUSSEE-BUTEE DES TERRES.....</u>	<u>4</u>
<u>1.4 PRESSION DES TERRES AU REPOS</u>	<u>5</u>
<u>1.5 BUTEE.....</u>	<u>6</u>
<u>1.6 POUSSEE.....</u>	<u>6</u>
<u>1.7 APPROCHES THEORIQUES</u>	<u>6</u>
<u>1.8 RELATION PRESSIONS LATERALES – DEPLACEMENTS</u>	<u>11</u>
<u>1.9 FORMULES DE CALCUL DE LA CONTRAINTE DE POUSSEE</u>	<u>12</u>
<u>1.10 PATHOLOGIES DES OUVRAGES DE SOUTENEMENTS.....</u>	<u>13</u>
<u>1.11 STATISTIQUES DES DESORDRES EN ALGERIE</u>	<u>18</u>
<u>1.12 CONCLUSION.....</u>	<u>18</u>

1.1 INTRODUCTION

Le problème de la poussée et de la butée des terres est un sujet courant dans l'ingénierie géotechnique, il se manifeste dans la conception de plusieurs ouvrages géotechniques tels que les murs de soutènement, les palplanches, les culées des ponts et les blocs d'ancrage, qui nécessitent la détermination des pressions passives et actives des terres.

Ces problèmes ont fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux, analytiques et numériques. Les approches fondamentales pour l'analyse des pressions passives et actives des terres sont proposées premièrement par Coulomb puis Rankine, ces deux approches reposent sur la méthode de calcul à la rupture qui admet que le sol est en état d'équilibre limite.

1.2 ETATS EQUILIBRES LIMITES

Les équilibres limites (**E.L.**) permettent de déterminer les contraintes dans les zones où le sol a été amené à la rupture. En tout point de ces zones, la contrainte peut être représentée par un cercle de **Mohr** à la rupture qui est tangent aux droites intrinsèques.

Les théories des **E.L.** sont relatives aux contraintes effectives.

On distingue (02) types d'équilibres limites : L'équilibre de **POUSSEE** ou état **ACTIF** qui correspond à l'action du sol sur l'ouvrage, et l'équilibre de **BUTEE** ou état **PASSIF** qui correspond à l'action de l'ouvrage sur le sol [1].

1.3 NOTION DE POUSSEE-BUTEE DES TERRES

La poussée et la butée d'un sol pulvérulent sont des phénomènes très courants que l'ingénieur est amené à rencontrer et à traiter aussi bien dans l'étude que sur terrain :

Le problème des notions de poussée et de butée a un intérêt particulier dans des problèmes pratiques pour l'ingénieur, on peut citer :

- Pathologie des fondations par l'intermédiaire de la capacité portante ;
- Les ouvrages de soutènement ;
- Les glissements de terrains naturels (effondrements, éboulements...etc.) ;
- Les massifs et les tirants d'ancrage.

Du point de vue historique, **Coulomb** a été le premier à avoir proposé en 1773 une méthode de calcul sérieuse des pressions dans le sol ; il s'agit du mémoire intitulé « Essai sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture ».

Puis vient **Rankine** en 1857 qui a introduit la notion d'équilibres limites dans l'étude de la stabilité d'un massif ainsi que la définition de la poussée et de la butée. [2] [3]

Les travaux de Coulomb et Rankine conservaient l'hypothèse de rupture plane dans un massif au passage des équilibres limites.

Pour cerner de plus près la réalité, la théorie moderne de Boussinesq reprise par Caquot et Kerisel a offert la possibilité de déterminer des lignes de ruptures CURVILIGNES dans les massifs.

A l'école américaine représentée par Peck, Terzaghi, Taylor et Tschebotarioff, ils ont proposé des règles expérimentales pour déterminer la poussée et la butée dans les cas les plus courants. [4]

1.4 PRESSION DES TERRES AU REPOS

On considère le cas simple d'un massif de sol semi-infini à surface libre horizontale non surchargée.

En un point **M** quelconque du milieu s'exerce sur une facette horizontale une contrainte verticale σ_v produit du poids volumique du milieu noté γ et une profondeur **h**.

Cette contrainte est principale car il n'y a pas de contrainte de cisaillement le long de tout le plan horizontal.

Sur une facette verticale du même point M s'exerce une contrainte horizontale σ_h qui elle aussi est principale (**Fig. 1.1**).

Le massif étant initialement au repos, nous avons une relation liant σ_h et σ_v : $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$ [1.1]

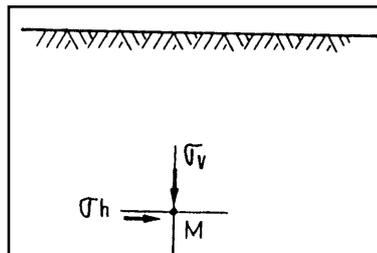


Figure 1.1 : Contraintes principales dans un sol à surface horizontale [2]

K_0 : coefficient de pression des terres au repos. [5]

Il dépend de la nature du sol, de la profondeur considérée et de l'histoire du sol.

Tableau 1.1 : Valeurs de K_0 pour différents milieux [6]

Milieu	Valeur approximative de K_0
Sable	0.5
Argile	0.7
Argile très molle, vase	1
Roche à très grande profondeur	Supérieur à 1
Eau	1

A noter que K_0 est estimé d'après la formule de Jacky [7] comme suit : $K_0 = 1 - \sin \varphi$.

1.5 BUTEE

On suppose que dans le cas précédant la partie à gauche du point M soit remplacée par un écran. En ce point, la contrainte régnant sur l'écran est égale à σ_h (**Fig 1.2**).

Si on force l'écran dans le massif, la réaction de ce dernier fera augmenter la pression jusqu'à un maximum appelé **Butée** à partir duquel vont apparaître des ruptures dans le terrain.

La résistance maximale atteinte juste avant la rupture correspond à un état d'équilibre limite ou état d'équilibre passif. La contrainte σ_h prend alors la valeur suivante :

$$\sigma_h = k_p \cdot \sigma_v$$

k_p : coefficient du Butée des terres.

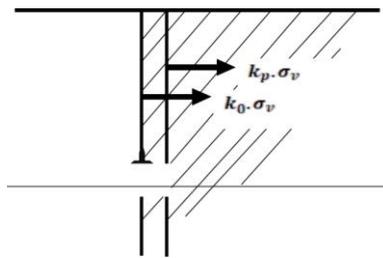


Figure 1.2 Déplacement de l'écran correspondant à une mise en butée [2]

1.6 POUSSEE

Si au contraire, l'écran se déplace vers la gauche, cela va permettre la décompression ou le relâchement du terrain et σ_h diminue jusqu'à un minimum appelé **poussée** à partir duquel vont apparaître des ruptures dans le terrain.

La résistance minimale atteinte juste avant la rupture correspond à un état d'équilibre limite ou état d'équilibre actif défini par la formule suivante :

$$\sigma_h = k_a \cdot \sigma_v$$

k_a : Coefficient de poussée des terres.

Pour conclure on peut dire que la pression exercée par les terres se situe entre deux limites qui ne sont obtenues que par le déplacement de l'écran soit dans le sens de la décompression dans le cas de la poussée ou dans le sens de la compression dans le cas de la butée. [8]

1.7 APPROCHES THEORIQUES

Les problèmes plans de poussée et de butée peuvent être approchés par des théories. Les plus connus sont celles de Coulomb, Rankine et Boussinesq. Une description brève des bases fondamentales sera abordée.

1.7.1 Théorie de Coulomb (1773)

COULOMB (1773) a proposé la loi selon laquelle pour un milieu pulvérulent, sur les facettes situées tout le long d'une ligne de rupture, il y a proportionnalité entre la contrainte tangentielle et la contrainte normale (Fig. I.3), le coefficient de proportionnalité étant le frottement $\text{tg}\varphi$ soit : $\tau = \sigma \text{tg}\varphi$.

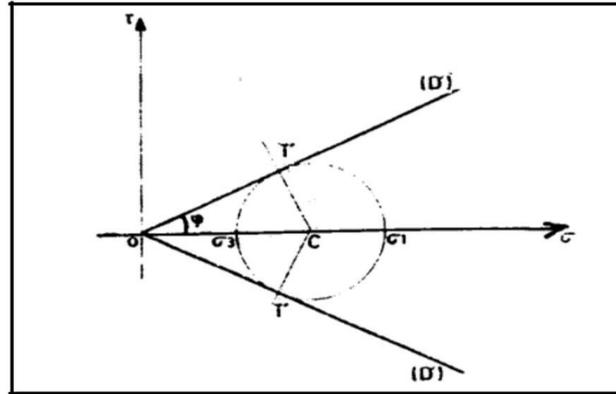


Figure 1.3 Cercle de Mohr, milieu pulvérulent [4]

D'une manière générale et pour un milieu quelconque cette loi s'écrit :

$$\tau = c + \sigma \text{tg}\varphi$$

C : étant la cohésion avec des dimensions d'une contrainte.

$$\sigma_3 = OO' - TO'$$

$$TO' = OO' \sin\varphi$$

$$\text{D'où: } \sigma_3 = OO' (1 - \sin\varphi)$$

$$\sigma_1 = OO' + TO' = OO' (1 + \sin\varphi)$$

$$\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) = k_a = \frac{1}{k_p} \quad [1.2]$$

$k_a = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$ est dénommé coefficient de poussée (l'indice a : état actif)

$k_p = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$ est dénommé coefficient de butée (L'indice p : état passif)

σ_3 : contrainte principale mineure ou contrainte de poussée.

σ_1 : contrainte principale majeure ou contrainte de butée.

A l'équilibre limite, le cercle de Mohr est tangent à la courbe intrinsèque, ainsi il définit les contraintes principales normales σ_1 et σ_3 .

L'équation générale à l'équilibre limite pour un milieu quelconque s'écrit :

$$\sigma_1 = tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sigma_3 + 2tg \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) c \quad [1.3]$$

En milieu saturé, on différencie les contraintes effectives s'appliquant à la phase solide et la pression interstitielle de l'eau.

Sol pulvérulent :

$$\zeta = (\sigma - u)tg\varphi' - \sigma'tg\varphi' \quad [1.4]$$

Sol cohérent :

$$\zeta = c' + (\sigma - u)tg\varphi' - c' + \sigma'tg\varphi' \quad [1.5]$$

c' et φ' étant respectivement la cohésion effective et l'angle de frottement effectif.

1.7.2 Etude d'un cas simple

Soit un massif de sol pulvérulent frottant, $\varphi \neq 0$, $C=0$ de poids volumique γ ;

- Surface du sol horizontale.
- Ecran vertical et lisse.
- Pas de surcharge.

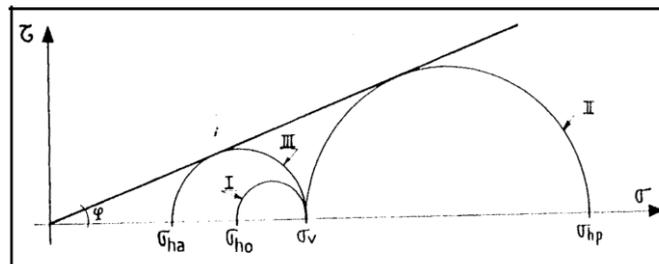


Figure 1.4 Etats des contraintes en M [2]

La figure 1.4 illustre l'état des contraintes sur un point M appartenant au massif de sol étudié. Le cercle I représente l'état de contraintes au repos avec $\sigma_h = k_0 \cdot \sigma_v$

Ou l'équilibre est surabondant, par conséquent le cercle I n'est pas tangent à la courbe intrinsèque.

On déplace l'écran vers la droite, σ_h augmente jusqu'à un maximum et devient σ_{hp} , le cercle II représente l'équilibre limite de butée tel que $\sigma_{hp} = k_p \cdot \sigma_v$

On déplace l'écran vers la gauche σ_h diminue à un minimum et devient σ_{ha} et le cercle III représente l'équilibre limite de poussée tel que $\sigma_{ha} = k_a \cdot \sigma_v$

On aura par conséquent :

$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad [1.6]$$

$$\sigma_{hp} = \sigma_v \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad [1.7]$$

De ces formules on conclut que : Puisque $\sigma_v = \gamma \cdot Z$ avec Z étant la profondeur alors les contraintes horizontales sont proportionnelles à la profondeur ;

Les résultantes de poussé et de butée s'appliquent au tiers inférieur du mur.

-Volume plastifié

Des propriétés du cercle de Mohr, il résulte qu'en chaque point le plan de rupture fait un angle de $\pm\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$ avec le plan sur lequel s'exerce la plus grande contrainte principale.

1.7.3 Théorie de Rankine (1860)

La théorie de Rankine permet de déterminer l'état de contrainte dans un sol en butée où en poussée derrière un mur de soutènement calcul des forces exercées sur le mur.

Hypothèses :

- Le sol est isotrope.
- Le mur ne modifie pas la répartition des contraintes verticales

Pour un sol à surface horizontale :

$$\sigma_v = \gamma \cdot h$$

Pour un sol à surface inclinée dans d'un angle β sur horizontale :

$$\sigma_v = \gamma \cdot h \cdot \cos \beta$$

Nous considérons seulement le cas d'un écran vertical.

Pour les sols pulvérulents ($c = 0$) :

Et en surface horizontale la contrainte de poussée (active) est :

$$\sigma_a = k_a \gamma \cdot h$$

Avec :

$$k_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \tan^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad [1.8]$$

Valeur identique à celle donné par la théorie de Coulomb avec les mêmes hypothèses. Cette formule se vérifie simplement sur le graphique de Mohr de la (fig 1.5) ou

$$LA = OA \cdot \sin j.$$

De même , la contrainte de butée (passive) est :

$$\sigma_p = k_p \gamma \cdot h$$

Avec :

$$k_p = 1 / k_a = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad [1.9]$$

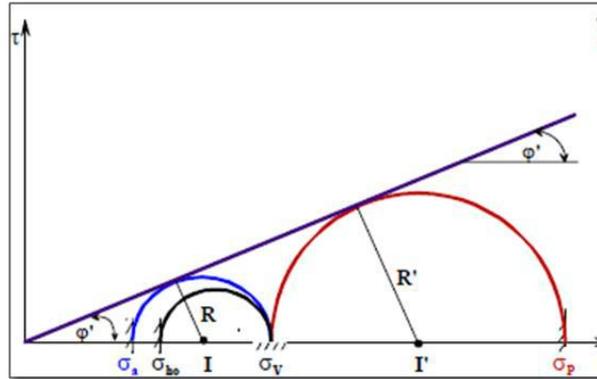


Figure 1.5 États de contraintes de poussée et de butée pour un sol pulvérulent. [2]

Pour les sols purement cohérents ($\varphi = 0$) :

$$K_a = 1 - 2 \frac{c}{\gamma h} \quad [1.10]$$

$$K_p = 1 + 2 \frac{c}{\gamma h} \quad [1.11]$$

Pour les sols cohérents et frottants :

Un changement d'origine sur l'axe des σ tel que $OO' = H \cdot \cot \varphi$ ramène en cas d'un sol sans cohésion.

$$K_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 \frac{c}{\gamma h} \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad [1.12]$$

$$K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \frac{c}{\gamma h} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad [1.13]$$

1.7.4 Equilibre de Boussinesq

La théorie de Boussinesq est un schéma Général permettant de prendre en compte le frottement sol- écran. Initialement, on suppose que le sol soit un matériau pulvérulent en équilibre limite sous son propre poids. (La prise en compte de la cohésion et des forces extérieures viendra par la suite). Le massif est limité par deux plans : la surface libre et un écran latéral. Sur l'écran, l'obliquité δ des contraintes est imposée. On plusieurs éléments de mécanique des sols admet une distribution triangulaire des contraintes sur chaque rayon polaire, c'est-à-dire que l'obliquité est constante et que l'intensité de la contrainte est proportionnelle à la position radiale (résultats de la théorie de Rankine). (fig 1.6)

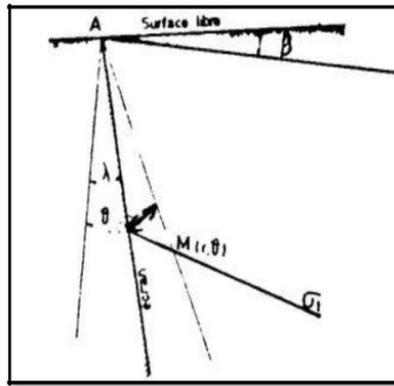


Figure 1.6 Schéma de Boussinesq [4]

1.8 RELATION PRESSIONS LATÉRALES – DEPLACEMENTS

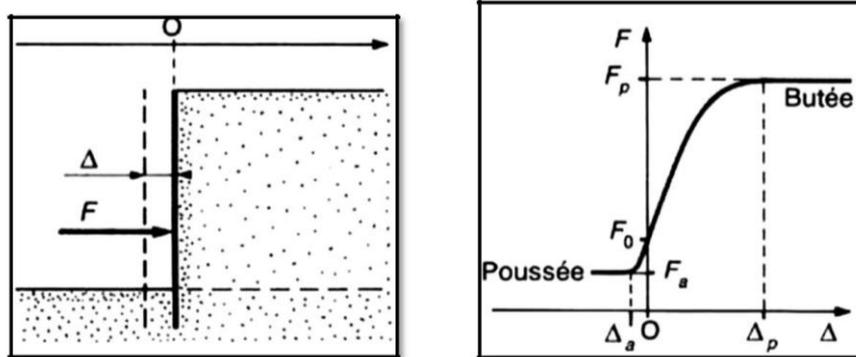
Des expériences simples, sur modèles réduits, montrent que les valeurs des forces latérales précédemment introduites (forces de Poussée et de Butée) dépendent essentiellement des déplacements horizontaux de l'ouvrage de soutènement.

Supposons, par exemple, que l'on encastre légèrement à la surface horizontale d'un massif de sable un écran vertical parfaitement lisse et que l'on remblaye progressivement et horizontalement derrière l'écran, en appliquant à ce dernier des efforts de résultante générale \mathbf{F} tels qu'il n'y ait aucun déplacement de l'écran (**Fig.1.7 a**).

Ce dernier étant parfaitement lisse, la force \mathbf{F} est horizontale (pas de frottement entre l'écran et le massif). Elle est appelée poussée au repos et notée F_0 .

Si l'on effectue une translation horizontale de l'écran vers l'intérieur du remblai, la force \mathbf{F} croît en fonction du déplacement Δ jusqu'à un maximum F_p qui correspond à la mobilisation totale de la Butée (**Fig.1.7 b**). La valeur de F_p est de 3 à 4 fois la valeur de la force initiale F_0 .

Inversement, si l'on effectue une translation horizontale de l'écran vers l'extérieur du remblai, la force \mathbf{F} diminue jusqu'à une valeur minimale F_a qui correspond à l'état complet de poussée. La valeur de F_a est de l'ordre de la moitié de celle de F_0 . [10]



a- Écran rigide en translation

b-Relation force-déplacement

Figure 1.7 Relation force-déplacement pour un écran rigide en translation [10]

On parle aussi de butée limite et de poussée limite pour préciser qu'il s'agit des efforts extrêmes correspondant à la rupture du sol. Mais dans la pratique, on omet souvent l'adjectif « limite », les termes de poussée et de butée correspondant alors implicitement à la rupture.

Si l'on compare les déplacements, on constate qu'il faut un déplacement Δ_p beaucoup plus important pour atteindre l'état complet de butée que le déplacement Δ_a nécessaire pour atteindre celui de poussée.

Plus précisément, si H est la hauteur hors fiche de l'écran, les ordres de grandeur de ces déplacements sont (Fig.1.8) :

$$\Delta_a = H/1000 \quad \text{pour la poussée}$$

$$\Delta_p = H/100 \quad \text{pour la butée}$$

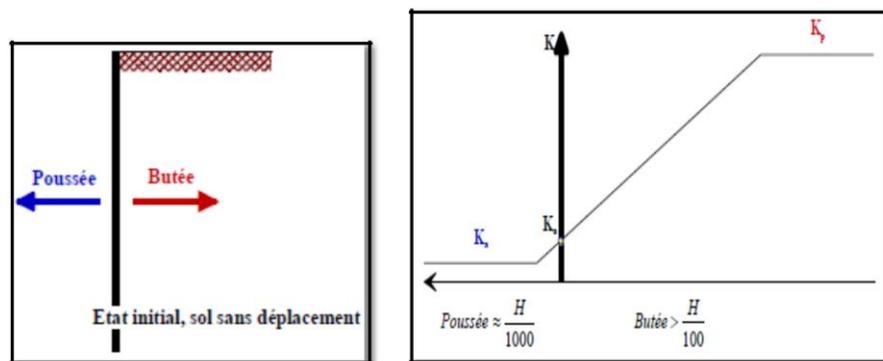


Figure 1.8 : Déplacements nécessaires à la mobilisation des états d'équilibres limites de Poussée et de Butée

1.9 FORMULES DE CALCUL DE LA CONTRAINTE DE POUSSEE

- Cas de la surcharge :

$$\sigma_a = k_a \cdot \gamma \cdot L + k_q \cdot q \quad [1.14]$$

$$k_q = \frac{k_a}{\cos(\lambda - \beta)}$$

- Cas de cohésion :

$$\sigma_a = k_a \cdot \gamma \cdot L + k_c \cdot C \quad [1.15]$$

$$k_c = 2\sqrt{k_a}$$

Cas général surcharge et cohésion :

$$\sigma_a = k_a \cdot \gamma \cdot L + k_q \cdot q - k_c \quad [1.16]$$

1.10 PATHOLOGIES DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENTS

Les mouvements de terre sont parmi les phénomènes géodynamiques les plus répandus et souvent les plus graves à la surface de la terre. Il est donc à l'ingénierie civile d'arrêter ou de limiter l'impact de ce phénomène sur l'homme qui peut nuire à sa sécurité ou à celle de ces biens.

Les ouvrages de soutènement sont donc une solution pour parer à ce phénomène de glissement de terrain. Il est donc important de bien construire cet ouvrage afin d'éviter tout désastre.

Cependant, ces ouvrages soumis à de très grandes forces dues au talus et à la pression interstitielle subissent certaines déformations ou même ruptures qui sont parfois partielles ou même totales, cela pour bien des causes. [9]

Les ouvrages de soutènement présentent des symptômes différents d'un ouvrage à un autre et qui a défauts d'être traités mènera à une rupture évidente.



Bombement du parement et déjoints important



Fissures verticales du parement



Affaissements et fissures du terre-plein



Plein Bombement du parement



Corrosion des palplanches



Inclinaison de la partie supérieure d'une paroi moulée

Figure 1.9 Exemples de quelques cas pathologiques d'ouvrages de soutènement [9]

1.10.1 Causes des dégradations des murs

Absence d'étude de sol qui entraîne une conception hasardeuse ;

- Dimensionnement insuffisant du mur et de la fondation notamment en zone sismique ;
- Absence ou insuffisance de drainage ;
- Manque de rigidité des fondations ou portance faible du sol d'assise, ou ancrage insuffisant ;
- Absence ou insuffisance d'armature ou leur mauvais positionnement ;
- Utilisation de Matériaux inappropriés (blocs de béton, maçonnerie) ;
- Utilisation d'un béton de mauvaise qualité ;
- Utilisation de matériaux non normalisés ;

- Manque d'entretien des barbacanes qui entraîne l'accumulation des eaux derrière le mur ;
- Application en tête de l'ouvrage de surcharges non prévues ;
- Remblaiement prématuré ou excessivement compacté ;

Ce risque est aggravé en présence de pluie importante, zone sismique, argiles gonflantes, hauteur importante du talus.

1.10.2 Causes des dégradations des palplanches et parois moulées

1.10.2.1 Palplanches

- Mauvais dimensionnement ;
- Mauvais choix du module des palplanches (sous-estimation) ;
- Insuffisance d'encrage ;
- Le sur-battage provoquant des déformations ou des déchirures des palplanches.

1.10.2.2 Parois moulées

- Méconnaissance de la nature géologique et des caractéristiques des terrains de fondation et des sols soutenus ;
- Etude de stabilité insuffisante ou incomplète (sous-estimation de la fiche) ;
- Inclusion de boue ou de sol en place dans le béton : cela peut être le résultat d'une boue de mauvaise qualité ou d'un désamorçage du tube plongeur ;
- Béton en pied de paroi de mauvaise qualité : cela peut provenir d'un mauvais curage ou d'un temps d'attente trop long entre la fin du forage et le début du bétonnage ;
- Une remontée de la nappe lors du bétonnage (éboulement de la trachée).



1.10.2.3 Conséquences

A défaut de négligence ces symptômes peuvent s'aggraver et causer des pertes matérielles voire humaines.





Figure 1.10 Conséquences d'aggravation des symptômes [9]



Figure 1.11 Corrosion des palplanches métalliques qui engendre des fuites d'eau [9]



Figure 1.12 Parois moulées : Absence de drainage engendrant une rupture [9]

1.10.3 Solutions & Réparations

1.10.3.1 TECHNIQUES ET CONSEILS

Au regard des risques réels que présente l'ouvrage, il est nécessaire de :

- Mettre en place un système de drainage efficace (selon les normes) car la plupart des sinistres sont causés par l'eau et défauts de drainages ;
- Faire attention aux sols gonflants



Figure 1.13 Système de drainage [9]

1.10.3.2 CONSEILS

- Engager un géotechnicien pour une étude de sol,
- Faire appel à un bureau d'étude pour le dimensionnement du mur,
- Engager une entreprise de réalisation compétente pour la réalisation de l'ouvrage,
- Ne pas s'immiscer en tant que maître d'ouvrage dans la réalisation,

1.10.3.3 ENTRETIEN

- Vérifier l'efficacité du drain au pied du mur au moins deux fois par an ou après de fortes pluies ;
- Vérifier le bon fonctionnement des Barbacanes et les nettoyer avant les saisons de pluies ;
- Eviter de planter des arbres a grosse racine à proximité du mur et ses fondations ;
- Ne pas réaliser de travaux (tranchées...) à côté des fondations du mur ;
- Ne pas rehausser le mur existant ;
- Ne pas créer de surcharges sur les murs sans l'avis des spécialistes
- Signaler toutes anomalie visible sur le mur (fissure, bombement...)



Figure 1.14 Entretien du système de drainage [9]

1.10.4 SURVEILLANCE

1.10.4.1 Pour les murs

Cette visite comporte un examen visuel de la zone d'influence de l'ouvrage et de l'ensemble de l'ouvrage lui-même. Dans le cas d'ouvrages supportant une plate-forme routière, des indications de désordres peuvent être données par l'examen de celle-ci :

- Etat du revêtement,
- Fissures, et leurs orientations,
- Déformations importantes,
- Etat des caniveaux et regards.

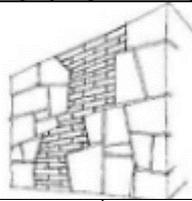
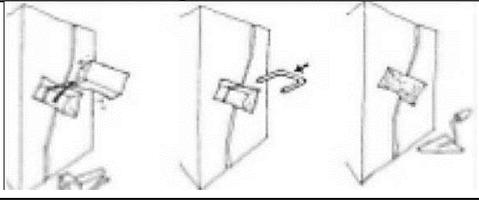
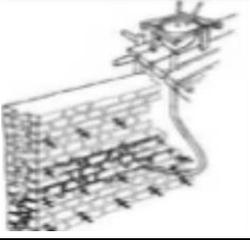
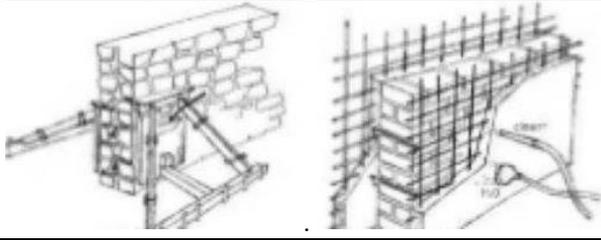
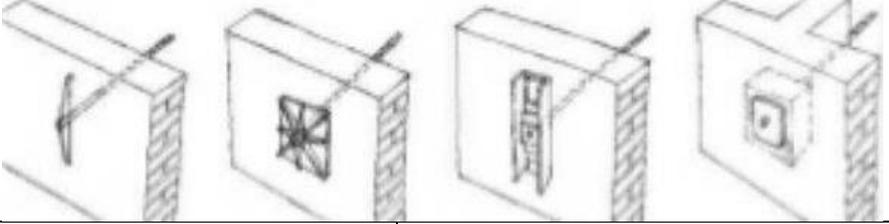
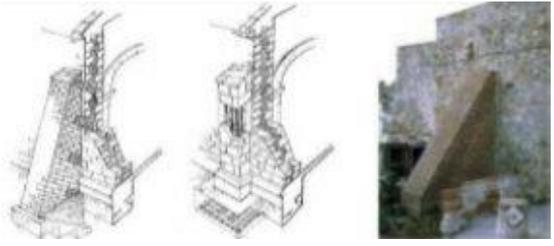
Pour les rideaux de palplanches

- La surveillance doit porter sur l'aspect des agrafages, l'apparition de déchirures, la formation de ventres, l'amorce d'un déversement, etc.
- Pour les parois moulées
- A l'occasion de surveillance de l'état de la partie visible de la paroi, doivent être notées les zones où le béton est dégradé ou éclaté.

1.10.4.2 REPARATION

Le tableau suivant illustre quelques exemples de réparation des ouvrages géotechniques

Tableau 1.2 Exemples de réparation des ouvrages géotechniques [9]

1. Remplacement physique de la partie endommagée		2. Reprise de fissures	
			
3. Injections	4. Rejointoiements	5. Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé	
			
6. Pose de tirants			
			
7. Contreforts		8. Drainage horizontal	
			

1.11 STATISTIQUES DES DESORDRES EN ALGERIE

Le graphe ci-après récapitule les statistiques des différents désordres affectant les ouvrages de soutènement en Algérie.

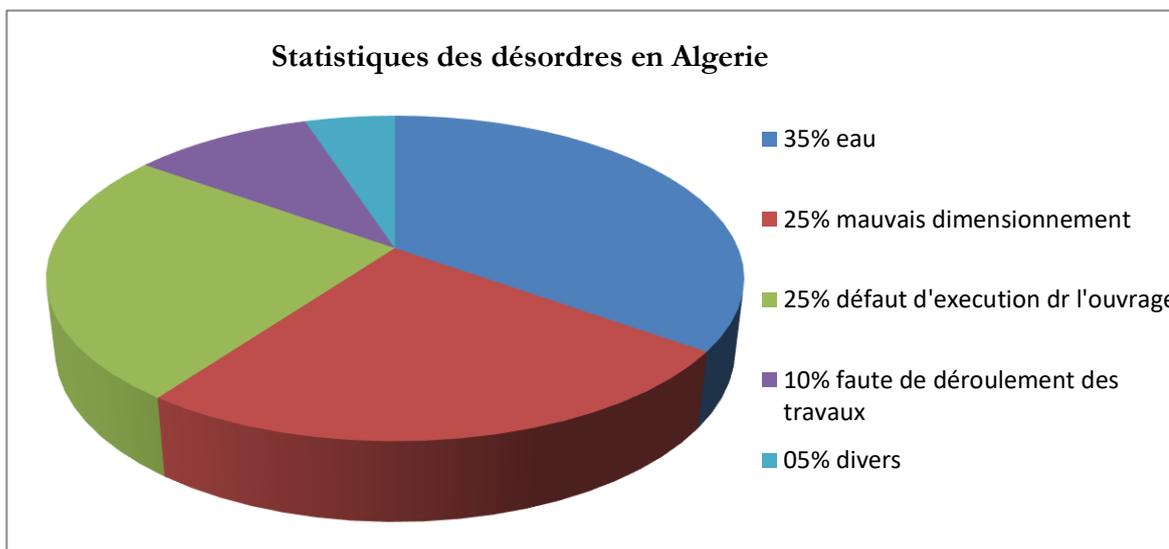


Figure 1.15 Statistiques des désordres affectant les ouvrages de soutènement en Algérie [9]

1.12 CONCLUSION

A la fin de ce chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La poussée et la butée sont liées à la nature du milieu ;
- La pression exercée par les terres se situe entre deux limites qui ne sont obtenues que par le déplacement de l'écran soit dans le sens de la décompression dans le cas de la poussée ou dans le sens de la compression dans le cas de la butée ;
- Les ouvrages de soutènement constituent des éléments très importants dans la sécurité, la stabilité et la durabilité des projets de génie civil.
- La rupture d'un ouvrage survient souvent après l'apparition de certains symptômes qui a défaut d'être traité entraîne une évidente dégradation partielle ou totale de l'ouvrage. Bien que ces symptômes soient multiples et différent d'un d'ouvrage à un autre, ils doivent être repéré lors des contrôles de l'ouvrage, d'où il est impératif de ne pas négliger l'ouvrage et d'organiser un planning de visite annuelle ou continu afin d'envisager éventuellement une réparation de l'ouvrage.

Le chapitre suivant traitera la problématique des déchets de construction ainsi que les différents procédés de suivi, recyclage, élimination et leur valorisation.

Chapitre 2. Problématique des déchets de construction

<u>2.1 INTRODUCTION</u>	<u>20</u>
<u>2.2 DECHETS DANS LE MONDE.....</u>	<u>20</u>
<u>2.3 PROBLEMES D'ENVIRONNEMENT.....</u>	<u>21</u>
<u>2.4 RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE.....</u>	<u>22</u>
<u>2.5 PROBLEMATIQUE DES DECHETS EN ALGERIE</u>	<u>22</u>
<u>2.6 DECHETS DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....</u>	<u>25</u>
<u>2.7 ASPECTS REGLEMENTAIRES</u>	<u>26</u>
<u>2.8 TYPES DE DECHETS.....</u>	<u>28</u>
<u>2.9 CONCLUSION</u>	<u>31</u>

2.1 INTRODUCTION

Du fait de l'augmentation des activités du Bâtiment et des Travaux Publics depuis quelques décennies, on constate un afflux croissant du volume des déchets issus des chantiers. L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais.

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique. Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer son traitement. Il s'agit donc de « mesurer pour connaître et connaître pour agir ». L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir. « Toute personne qui produit ou détient des déchets, dans des conditions de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits et des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination conformément aux dispositions du Code de l'Environnement, dans des conditions propres à éviter les dits effets. » [10]

A travers ce chapitre, les différents déchets issus de différents secteurs seront abordés ainsi que leur gestion dans divers domaines de valorisation.

2.2 DECHETS DANS LE MONDE

Chaque jour, sur terre, quatre millions de tonnes d'ordures ménagères sont produites, l'équivalent de 400 tours Eiffel ! S'en débarrasser est un véritable casse-tête.

New York, octobre 2017. Alors que se tenait l'assemblée des Nations unies, le secrétaire général de l'organisation a reçu une pétition signée par 190 000 internautes du monde entier, qui avaient été invité à devenir citoyens des Trash Îles, littéralement les « îles poubelle ». En même temps, dans un spot diffusé sur le Web, Al Gore, l'ancien vice-président américain, prêtait sa voix à une demande symbolique de reconnaissance par l'O.N.U de ce « nouvel Etat ». Des graphistes ont même imaginé le design d'un passeport, d'un drapeau et de billets de banque d'une monnaie baptisée « débris » ... Non sans humour noir, cette campagne de sensibilisation, menée par le site d'actualité et de divertissement LAD Bible et l'ONG américaine Plastic Océans Fondation, voulait attirer l'attention sur un phénomène inquiétant : la persistance d'un amas de détritiques en plastique de la taille de la France au milieu du Pacifique. Un continent dont l'existence est attestée depuis deux décennies déjà : un certain capitaine Charles J. Moore fit cette peu ragoûtante découverte en 1997, lors d'une course nautique entre la

Californie et Hawaii. Et depuis, des expéditions scientifiques ont permis de révéler et d'étudier quatre autres formations géantes de ce type, dans tous les océans. Les chercheurs les décrivent comme des « soupes de plastique » en suspension.

Sous l'effet de l'eau salée et du soleil, les rebuts se décomposent en micro fragments, la plupart d'un diamètre inférieur à cinq millimètres. Portés par les courants, ils forment de grands tourbillons. Une étude internationale menée conjointement par une dizaine de centres de recherche, dont l'institut français Ifremer, s'est appuyé sur vingt-quatre missions conduites entre 2007 et 2013 pour estimer l'étendue des dégâts : ces monstrueuses masses se composeraient d'au moins 5 250 milliards de particules, pour un poids total de 269 000 tonnes ! « Et il ne s'agit là que de ce qui flotte en surface, insiste François Galbani, océanographe spécialiste des déchets à l'Ifremer. On n'arrive pas à chiffrer ce qui s'accumule dans les fonds marins... » Seule certitude : c'est beaucoup plus encore ! Car chaque année, dans le monde, huit millions de tonnes de plastique, échappées des égouts, charriées et vomies par les cours d'eau et dispersées par les courants, viennent alimenter ces dépotoirs immergés. Pour le bonheur des micro-organismes – surtout les bactéries et les micros algues – qui s'accrochent à ces résidus et finissent par former, avec leurs radeaux artificiels, un écosystème nouveau, appelé « plastisphère ». Et qui pourrait avoir de graves répercussions sur les équilibres naturels...

Aujourd'hui, 95 % des emballages plastique finissent au rebus après une très courte période d'utilisation. Avec un bilan terrible : d'ici à 2050, si la tendance actuelle se confirme, la production de ce matériau sera responsable, dans le monde, de 15 % des émissions de gaz à effet de serre et de 20 % de la consommation de pétrole.

Avant l'interdiction, cinq milliards de sacs étaient distribués gratuitement en caisse chaque année dans l'Hexagone. Durée moyenne d'utilisation : vingt minutes – le temps de rapporter ses achats à la maison. Alors que ces sacs mettent jusqu'à 400 ans pour se dégrader dans la nature. « Nos déchets s'accumulent en tas, mais produisent aussi des “creux” : fabriquer un objet dont on ne fait presque rien, c'est épuiser bêtement nos ressources », explique Christian Duquennoi, spécialiste des déchets à l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Istra) et auteur des Déchets : du bige bang à nos jours (éd. Que, 2015). [11]

2.3 PROBLEMES D'ENVIRONNEMENT

À travers le monde, les problèmes environnementaux ont des conséquences néfastes. Pour cela, il est donc primordial de les identifier et de trouver les solutions adéquates pour en venir à bout. [12]

2.3.1 Pollution

La pollution est l'un des plus graves problèmes de l'environnement. Elle endommage la couche d'ozone, cause l'effet de serre et accélère le réchauffement climatique. La cause fondamentale de la

pollution de l'environnement est l'activité humaine, surtout dans les grandes agglomérations. Cela est lié à la densité de la population et aux activités qu'elle développe, ainsi qu'aux moyens de déplacement.

À part les activités industrielles la pollution peut être engendrée par :

- Les moyens de transport qui contribuent en grande partie à la dégradation de l'air avec les émissions d'hydrocarbures et d'autres gaz polluants ;
- Le chauffage qui constitue la première source de gaz à effet de serre ;
- Les installations d'incinération par le biais d'incinérateur d'ordures qui émettent des gaz polluants et des métaux lourds ;
- La consommation des ménages avec l'émission des produits solvants qui sont à l'origine de la formation de l'ozone troposphérique.

2.4 RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Ce phénomène est caractérisé par une augmentation des températures qui découle des activités industrielles et des gaz à effet de serre. Ce changement climatique est également provoqué par la combustion du charbon, du pétrole et du gaz, la disparition des forêts, l'augmentation de l'élevage bovin et ovin, ainsi que par l'utilisation des gaz fluorés. Plusieurs conséquences sont notables comme la fonte des glaces notamment dans les régions les plus froides, l'élévation du niveau des océans, la transformation des paysages entraînant la disparition de certaines espèces animales et végétales. Face à ce changement climatique, il y a une recrudescence des maladies à cause des canicules et des inondations.

2.5 PROBLEMATIQUE DES DECHETS EN ALGERIE

En Algérie, la priorité écologique officielle est la gestion des déchets. Non qu'elle soit la seule problématique de ce type à gérer de toute urgence. Cependant, ce secteur impacte quasiment tous les domaines les plus essentiels de notre environnement. Il est donc légitime de le considérer comme une prérogative de premier ordre.

Qu'en est-il donc de notre politique nationale pour ce secteur ? Ne sommes-nous pas en train de focaliser seulement sur l'urgence présente, sans nous préoccuper des mesures les plus efficaces et durables à entreprendre ? Quelles sont les limites et contraintes de tous les procédés d'élimination existants ? Ne faut-il pas s'engager plutôt dans une approche plus stratégique du problème ? Celle de la prévention.

Depuis 2001, en ce qui concerne la gestion des déchets, outre de nombreuses lois, l'Etat algérien a créé plusieurs outils institutionnels : une Agence Nationale des Déchets, un Centre National des Technologies plus Propres, l'Observatoire National de l'Environnement, ainsi qu'un Centre National

des Formations à l'Environnement. Suite au Plan d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable, notre pays s'est également doté de deux programmes visant une gestion intégrée de ce secteur : Le « Progdem », relatif aux déchets solides municipaux, ainsi que le « Pnagdes », plan national pour les déchets spéciaux.

Ainsi sur le site de l'AND on apprend que « 135 centres d'enfouissement techniques sont réalisés ou en cours de réalisation ». Des schémas directeurs ont été envisagés pour la gestion des déchets municipaux ». Les grandes décharges publiques ont été éradiquées ou sont en cours de réhabilitation, nous dit-on. « Les pouvoirs publics incitent au tri et au recyclage via des actions pilotes de gestion des déchets à la source ». « Des unités de tri et de déchetteries ont été réalisées. », enfin « un système public de reprise et de traitement des déchets d'emballages (Eco-Jem) a été instauré ».

L'Algérie ne semble-t-elle pas ainsi aborder ce problème en faisant de l'élimination la priorité ? Les annonces concernant le recyclage et la prévention paraissent beaucoup plus vagues comparées au seul chiffre indiqué pour ce projet. Celui relatif à la construction de Centres d'Enfouissement Techniques. Dès 2012, le Ministère de l'Environnement l'annoncera dans la presse comme une mesure généralisée. En 2014, l'objectif affiché dans les médias était celui de passer dès 2015 à 25% de déchets recyclés. Pour atteindre 40% à l'horizon 2020. Alors qu'en réalité nous arrivons cette année à en recycler que 10%. Tandis que des pays comme l'Autriche ou l'Allemagne peuvent recycler bien au-delà des 50%.

Dans une étude publiée en 2015, des experts Coréens, ayant observé les wilayas de Blida et de Bordj Bou Arreridj, révèlent un faible taux de collecte en raison de l'insuffisance des bacs de récupération des déchets, de l'irrégularité des fréquences de collecte, ainsi que du manque ou de la vétusté des moyens de collecte. Entre temps, de nombreuses communes, comme celle de Béchar, se plaignaient encore en 2014 du retard de la mise en pratique des outils de ce projet national.

Pourtant, 11 millions de tonnes de déchets municipaux collectés pourraient être revalorisables à 80%, sur les 13,5 millions annuels annoncés.

Selon une étude récente réalisée pour le CARE, [13] le chiffre total des déchets municipaux risque d'atteindre les 30 Millions de tonnes en 2025. Actuellement nous accusons une moyenne de 0,8kg par hab. /jour. Ce qui ne doit pas nous induire en erreur. Certes, c'est un peu moins que celle de pays comme la France, mais déjà trop quand on sait que notre société commence à peine à consommer des produits alimentaires conditionnés !

Il paraît donc évident que la stratégie de l'élimination en Algérie n'a pas encore fait ses preuves. Même si notre pays semble prôner également celle de la prévention, les faits sont là pour montrer que ce n'est pas encore une priorité. Certes, elle est longue à mettre en place, et, en attendant, il faut bien éliminer ce qui existe. Mais sommes-nous bien informés des dangers environnementaux des

technologies les plus modernes d'élimination ? Il ne faudrait pas trop compter exclusivement sur ces dernières, au risque de ne régler le problème qu'en apparence.

Au Danemark, par exemple, une part infime de déchets part en décharge [14], alors qu'il en détient le record mondial de poids par habitant (833/ hab. / an, soit plus de 260kg de plus que la moyenne européenne) Et ce chiffre ne fait qu'augmenter ! Ce pays en incinère presque 80 pour cent dans des centrales spécialisées. [15] Cependant, malgré une nette amélioration du procédé, ce processus génère encore de nombreux déchets et impacte l'environnement. Il permet certes la production d'énergie, mais il génère à son tour des déchets dits « ultimes » : du mâchefer, des cendres, des poussières et des gaz, dont certains sont toxiques.

De plus, si un tri sélectif n'est pas effectué en amont, les combustibles obtenus en aval ont une valeur énergétique très faible et génèrent des déchets toxiques. Les métaux lourds et les polluants organiques (dioxines) polluent les sols, tandis que les fumées de l'incinération contenant des molécules toxiques sont libérées dans l'atmosphère. Ces dernières se fixent sur les particules fines et ultrafines qui ne sont pas filtrées, puis, transportées par le vent, elles se fixent sur les végétaux, et ainsi contaminent toute la chaîne alimentaire. Par ailleurs, les substances chimiques utilisées pour assurer l'entretien de ces centrales posent problème. Le risque de les retrouver dans les cours d'eau environnants reste important.

Si ces risques ont été largement diminués par tout un protocole de traitement ainsi que des installations d'épurations, cette technique nécessite donc une rigueur et éthique de fonctionnement qui n'est pas un des points forts des entrepreneurs privés ou publics algériens.

Même chose pour l'enfouissement technique, qui est réservé au stockage des déchets ultimes. Si les conditions de confinement sont insuffisantes, les déchets peuvent répandre des contaminants chimiques et microbiologiques dans l'environnement. Soit par infiltration de lixiviats ou bien à cause de formation de biogaz. Il y a risque de pollution des sources d'eau (par ruissellement d'eau de lessivage vers les cours d'eau voisins, les nappes phréatiques, etc.), de l'air (par dégazage de composés organiques volatils, par envol de débris et poussières emportés par le vent ou transportés par les animaux, etc.). L'exposition des populations riveraines est alors soit directe, par inhalation, soit indirecte, par ingestion d'eau contaminée ou de produits consommables irrigués par une eau contaminée.

Les CET de classe I et II sont cependant conçus de manière à limiter ces phénomènes. Mais le refus systématique des populations locales algériennes d'héberger de tels sites sur leurs territoires n'est pas infondé. Les risques sanitaires sont réels, surtout à cause du laxisme observé dans la gestion de ces infrastructures. Pour preuve, le dernier scandale lié au transfert de déchets très toxiques de Constantine à Souk Haras, dénoncé dans un article d'El Wantan datant d'octobre dernier. Et ce n'est malheureusement pas un cas isolé.

Quant à la méthanisation des déchets organiques, elle peut s'avérer relativement intéressante, comme pour le compostage industriel, si un tri préalable très sélectif des déchets fermentaires ou bien contaminés par des substances chimiques est mis en place en amont. Sans cela, la qualité des matières réutilisables comme combustibles ou bien fertilisants ne peut pas répondre à une norme de qualité suffisante.

Dans tous les cas le tri sélectif en amont permet non seulement d'augmenter la qualité de ces traitements, mais en plus permet considérablement de limiter leur utilisation en favorisant le recyclage ainsi que le réemploi de nombreux déchets.

Les professionnels du recyclage comme de la revalorisation des déchets se plaignent notamment du fait que les poubelles contiennent souvent plus de 60% de matières organiques. Elles ne sont pas triées à la source. Elles humidifient ou contaminent les matériaux qui pourraient être recyclés et dégradent fortement leur qualité, et par conséquent leur valeur commerciale.

Enfin, dans le domaine de l'élimination, il faudrait faire évoluer les procédés techniques en fonction de l'évolution constante de la composition des emballages, qui peut rendre caduque n'importe quelle installation.

Il faudrait ajouter une facture [16] souvent conséquente, notamment en ce qui concerne le transport, le traitement, et même le stockage des déchets à recycler ou éliminer.

A vrai dire, selon une étude de l'ADEME réalisée en 2013 [17], il s'avère même que le coût en matières gaspillées durant la production de certains produits varie entre 30 à 181 fois le prix de la gestion de leurs déchets. Cette perte représente de 5 à 10 fois la recette de leur éventuel recyclage. La conclusion de ce rapport est sans appel : « Face à la crise et la hausse du prix des matières premières, réduire les pertes de matière est un bon moyen de faire des économies. ». Comme dit l'adage : « le meilleur déchet est celui que l'on ne produit pas » !

Avant d'envisager l'élimination ou le recyclage, il faudra donc veiller en priorité à limiter la quantité comme la toxicité des déchets, avant même de les produire. De même, il s'agira ensuite de concentrer nos efforts sur le recyclage ainsi que de tri sélectif. La phase d'élimination devrait être celle du dernier recours. [18]

2.6 DECHETS DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION

2.6.1 Impact sur l'environnement

Mettre en place une politique de gestion des déchets de chantier permet de réduire les comportements non respectueux de l'environnement, tels que le stockage de déchets dans des décharges sauvages, les brûlages intempestifs ou les enfouissements directement sur le chantier... Toutes ces pratiques irresponsables et illégales, génèrent des pollutions importantes :

- Dans l'air (dégagements toxiques, risques importants d'incendie, fermentation et production de méthane...);
- Dans le sol (contamination des sols par des métaux lourds ou hydrocarbures...);
- Dans l'eau (ruissellements des eaux de pluie, infiltrations dans les nappes phréatiques, eutrophisation...);
- Sans oublier de mentionner les risques importants sur la faune locale (pièges, intoxication...) et sur la santé publique (milieux propices aux nuisibles et à la prolifération de gènes pathogènes).

2.6.2 Impact économique

Point encore trop peu connu, assurer un tri des déchets sur le site même de l'opération permet de réaliser des gains tout à fait substantiels. En moyenne, une gestion efficace des déchets de chantier permet une réduction des coûts de l'ordre de 30 à 40%.

Le tri des déchets sur un chantier de construction s'inscrit donc tout à fait dans une démarche de développement durable. [19]

2.7 ASPECTS REGLEMENTAIRES

2.7.1 Responsabilité

- Le producteur ou détenteur d'un déchet est légalement responsable de son élimination dans des conditions n'impactant pas la santé et l'environnement.
- Une entreprise doit ainsi envoyer ses déchets dans des installations appropriées, respectant notamment la réglementation ICPE (déclaration ou autorisation) en passant par un transporteur agréé ou par un intermédiaire autorisé (collecteur, déchèterie professionnelle ou de collectivité).

2.7.2 Tri des déchets

- Bien qu'aucune obligation réglementaire n'existe actuellement, le tri des déchets dès le chantier constitue l'une des exigences des opérations à haute qualité environnementale (HQE) ou visant l'obtention du label Habitat et Environnement (H&E).
- La directive cadre européenne (2008) impose la valorisation de 70% en poids des déchets de construction et de déconstruction du BTP à partir de 2020.

2.7.3 Limiter et stockage

- Depuis le 13/07/1992, afin de développer les filières de valorisation des déchets, le stockage des déchets n'est autorisé que pour les déchets ultimes

- Un déchet ultime est un déchet dont on a extrait la part valorisable et qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment (notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux).

2.7.4 Emballages

- Le décret n°94-609 rend obligatoire le tri et la valorisation de tous les emballages à partir d'une production hebdomadaire de 1100 L.

2.7.5 DEEE

La directive 2003-108-CE fixe les obligations de collecte, de tri et de valorisation des DEEE.

2.7.6 Suivi des déchets

- Réglementairement, il est obligatoire de pouvoir présenter les bordereaux de suivi de déchets pour trois types de déchets : déchets d'emballages, déchets d'amiante et déchets dangereux. Néanmoins, pour les autres déchets, il est conseillé de garder une trace de l'élimination des déchets (justificatifs).
- Sur une opération à hautes performances environnementales, les BSD doivent être collectés pour tout type de déchets.
- L'arrêté du 29/02/2012 fixe le contenu des registres de suivi des déchets. Sont concernés les exploitants des établissements produisant ou expédiant des déchets.

2.7.7 Transports des déchets

- Le décret n°98-679 impose la déclaration en préfecture de tout transport de plus de 100 kg de déchets dangereux où
- 500 kg de déchets non dangereux et non inertes. Les déchets inertes ne sont pas réglementairement concernés.

2.7.8 Filières d'élimination agréées

- Les filières d'élimination des déchets suivants doivent posséder un agrément : lampes, déchets d'équipements électriques et électroniques, huiles usagées, pneumatiques, emballages industriels et commerciaux, véhicules hors d'usage, PCB.

2.7.9 Diagnostic déchets

- Le décret n°2011-610 instaure la réalisation obligatoire d'un diagnostic déchets préalable à toute opération de déconstruction. Ce décret s'applique à tous les bâtiments dont la SHOB dépasse 1000 m² et dont la date d'acceptation des marchés est postérieure au 1er mars 2012.

- Ce diagnostic préalable permet de recenser les différents types de déchets et leurs quantités respectives, tout en indiquant les filières locales d'évacuation et de traitement de ces déchets.

2.8 TYPES DE DECHETS

Nous vivons dans un contexte dans lequel la production de déchets ne cesse d'augmenter et l'activité économique qui leur est liée prend de plus en plus d'ampleur. Cela implique l'adoption d'un ensemble de mesures :

- Mesures de prévention : Avant qu'un produit ne devienne un déchet, l'objectif principal est de réduire la quantité et le type de substances dangereuses utilisées. Le but est d'éviter les impacts négatifs sur la santé humaine et l'environnement.
- Recyclage : Transformation en produit secondaire utilisable à travers les efforts et la préparation pour que les déchets puissent être réutilisés, recyclés ou autres formes de valorisation (énergie, matière...)

Le secteur des Travaux Publics produit 3 types de déchets :

Déchets Inertes ;

Déchets non dangereux, appelés aussi DIB (déchets industriels banals) ;

Déchets dangereux.

2.8.1 Déchets Inertes

Les déchets inertes sont définis par l'article R541-8 du Code de l'Environnement comme des « tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé.

2.8.1.1 Bétons et gravats

Définition : Ciment où sont incorporés des gravillons ou des cailloux, dits granulats.



Figure 2.1 Déchets de bétons et gravats [10]

A. Valorisation

- Remblaiement en carrière autorisée à recevoir les matériaux concernés (au regard des caractéristiques environnementales des matériaux) ;
- Recyclage pour redevenir un produit (sous forme de gravillons ou de graves) pour une réutilisation en projet d'aménagement en sous-couche routière (selon exigences de qualité des granulats et respects des critères environnementaux).

B. Elimination

- Installations de stockage de déchets inertes (ISDI également appelée ICPE 2760-3).

C. Coût

- Recyclage : 4 et 6 € /
- ISDI : entre 1 et 8 € / t

2.8.1.2 Matériaux bitumineux sans goudron (agrégats d'enrobés, grave bitume) /Enrobés

Définition : Mélanges bitumineux ne contenant pas de substance dangereuse.



Figure 2.2 Déchets de matériaux bitumineux sans goudron [10]

D. Valorisation

- Recyclage : sur plate-forme de recyclage ;
- ICPE : Rubriques 2515 et 25/7 ;
- Les agrégats d'enrobés peuvent être réincorporés dans la fabrication de nouveaux matériaux bitumineux, et les acteurs sont incités à le faire.

Basée sur le retour d'expérience, la convention d'engagement volontaire de mars 2009 signée entre les professionnels de la route, le Ministère et l'ADF vise à atteindre un recyclage de 100% des routes, dont dès 2012 recyclages en centrale à 60% des matériaux bitumineux issus de la déconstruction routière.

A. Elimination

- Installations de stockage de déchets inertes (ISDI également appelée ICPE 2760-3).

B. Coût :

- Recyclage : 5 et 8 € / t
- ISDI : entre 1 et 8€ / t

2.8.1.3 Terres et pierres (y compris déblais mais hors terre végétale)

Définition : Pierres et terres de déblais ne contenant pas de substance dangereuse



Figure 2.3 Déchets de terres et pierres [10]

A. Valorisation

- Recyclage : pour redevenir un produit (sous forme de gravillons ou de graves) pour une réutilisation en sous-couche routière ou consolider des infrastructures en remplacement du granulats naturels (selon exigences de qualité des granulats et respects des critères environnementaux) ;
- Remblaiement en carrière autorisée à recevoir les matériaux concernés (au regard des caractéristiques environnementales des matériaux).

B. Elimination

- Installations de stockage de déchets inertes (ISDI également appelée ICPE 2760-3).

C. Coût

- Recyclage : 15 €
- ISDI : entre 1 et 8€ / [20]

2.8.2 Déchets non dangereux

Anciennement nommés déchets industriels banals (DIB), les déchets non dangereux sont des déchets ni inertes, ni dangereux pour l'environnement ou la santé.

Les déchets non dangereux sont qualifiés aussi « d'assimilés aux déchets ménagers » car ils peuvent être traités dans les mêmes filières et avec les mêmes moyens que les déchets ménagers.

2.8.2.1 Bois brut

Définition : Bois ou emballages en bois, palettes (non traitées par des substances dangereuses).



Figure 2.4 Déchets de bois brut en emballages [10]

D. Valorisation

- Réutilisation : Palettes intactes réutilisables ou réparées ;
- Recyclage : Transformation des matériaux pour réutilisation en matière première ;
- Valorisation énergétique : Les palettes restent valorisables énergétiquement en chaufferies bois, après broyage et dé ferrailage.

E. Coût

- Recyclage : Bois propre (classe A) et bois en mélange (classe B) 70 et 90 € / t
- Valorisation énergétique : entre 60 et 110 € / t

2.9 CONCLUSION

A l'issue de ce chapitre, on tire les conclusions suivantes :

- Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités ;
- L'utilisation des divers déchets en fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

- Toutefois, certains déchets pourront être réutilisés dans le domaine de la construction. Il s'agit des granulats de bétons recyclés, des graves et du sable qui font actuellement l'objet de travaux de recherches.

Le chapitre suivant détaillera l'utilisation des déchets de matériaux de construction dans le domaine de génie civil

Chapitre 3. Utilisation des déchets de construction dans le génie civil

<u>3.1 INTRODUCTION</u>	<u>34</u>
<u>3.2 PRODUITS DE RECYCLAGE.....</u>	<u>34</u>
<u>3.3 UTILISATIONS POSSIBLES ET CONDITIONS.....</u>	<u>36</u>
<u>3.4 EXEMPLES DE VALORISATION.....</u>	<u>40</u>
<u>3.5 CONCLUSION</u>	<u>51</u>

3.1 INTRODUCTION

Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources, nécessite d'établir des nouvelles lois et d'adapter des nouveaux concepts [22]. La valorisation et le recyclage des déchets est un moyen efficace face aux contraintes d'ordres économiques et écologiques de ces dernières années [23] [24]. Les déchets constituent un réel problème, inévitable à toute vie biologique et à toute activité industrielle [25]. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement [26]. Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles [27].

On estime que seulement 30% des matériaux utilisés dans la construction sont actuellement recyclés, alors que la pratique dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables [28]. En France la loi du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et la protection de l'environnement interdit à partir de l'an 2002 la mise dans les anciennes décharges des déchets tels que les matériaux de démolition [29]. Le Danemark dispose d'une loi spécifique depuis 1990 concernant l'utilisation des granulats recyclés. En 2007, l'Europe a élaboré une législation pour encadrer la gestion des déchets [30].

L'objectif de cette étude est de contribuer à la l'utilisation des déchets de construction dans le génie civil. Cela permet d'éliminer les déchets par recyclage et utilisation d'où la protection de l'environnement, et aide à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats.

3.2 PRODUITS DE RECYCLAGE

Les produits sont de natures différentes allant des graves non calibrées aux granulats classés tels que les sables et gravillons, en passant par diverses qualités de graves.

Les productions observées sur différents centres de recyclage figurent au tableau ci-dessous, ainsi que les normes permettant de les classer.

L'essentiel de la production est constitué par des graves 0/D, sables, gravillons et cailloux.

Tableau 3.1. *Granulats de recyclage* [22]

Type de matériaux	Norme	Installation
Matériau de pré-criblage	NF P 11-300	Toute installation avec scalpage avant concassage
Grave non calibrée	NF P 11-300	Concassage primaire sans criblage
Grave 0/D	XP P 18-540 et NF P 11-300 ou NF P 98-129	Concassage primaire ou secondaire avec criblage
Sable	XP 18-540	Concassage primaire ou secondaire avec criblage

3.2.1 Graves de recyclage (G.R.)

Afin de faciliter la caractérisation des Graves de Recyclage dénommées "GR", il a été défini cinq catégories : GR0, GR1, GR2, GR3, GR4 et ce, compte tenu de la nature de la production et des critères figurant dans les normes citées.

En ce qui concerne le critère de "dureté" (essais Los Angeles et Micro Deval en présence d'eau), il a été procédé à un aménagement de la norme XP P 18-540 pour mieux caractériser la production dans le but d'une meilleure valorisation (cf. § 4) en distinguant la classe E+ ($LA \leq 40$, $MDE \leq 35$, $LA + MDE \leq 65$) dans la classe E. Compte tenu de l'origine de ces matériaux, il convient d'être vigilant aux exigences de la norme XP P 18-540 sur la présence de sulfate qui peut être la cause de désordres de l'ouvrage (gonflement). Ces exigences sont étendues aux matériaux GR1 relevant de la norme NF P 11-300.

Les catégories ainsi établies figurent dans le tableau ci-après :

Tableau 3.2. *Catégories des graves de recyclage [31]*

Référence à la norme	NF P 11-300		XP P 18-540 et NF P 98-129 (GNT A)		
	F 72	F 71			
Catégories de Grave Recyclée	GR0	GR1	GR2	GR3	GR4
Granularité	Non calibrée	0/D $D \leq 80$ mm	0/D $D \leq 31,5$ mm	0/D $D \leq 20$ mm	0/D $D \leq 20$ mm
Dureté	Non spécifiée	$LA \leq 45$ $MDE \leq 45$	$LA \leq 45$ $MDE \leq 45$ $LA+MDE \leq 80$ soit E	$LA \leq 40$ $MDE \leq 35$ $LA+MDE \leq 65$ soit E+	$LA \leq 35$ $MDE \leq 30$ $LA+MDE \leq 55$ soit D
Propreté	Non spécifiée	VBS ⁽¹⁾ $\leq 0,2$	($ES \geq 50$ ou $MB^{(2)} \leq 2,5$) soit b	($ES \geq 50$ ou $MB^{(2)} \leq 2,5$) soit b	($ES \geq 50$ ou $MB^{(2)} \leq 2,5$) soit b
Sulfates	Selon utilisation	SS b ($\leq 0,7$ %)			

1 VBS selon norme NF P 94-068

2 MB selon norme NF EN 933-9

Remarques concernant la teneur en sulfates

La teneur en sulfates est établie conformément à la norme NF P 18-581.

Le seuil absolu est porté à 0,20 % (soit catégorie SSa) en cas d'emploi sous dallage béton de bâtiment. Dans ce cas, la teneur en plâtre doit être nulle, les sulfates ne provenant que du ciment contenu dans le matériau d'origine. Seuls les matériaux des catégories 1 et 2 définies au § 2, peuvent être employés.

Pour appartenir à l'une des catégories GR1, GR2, GR3 ou GR4, les matériaux doivent satisfaire à chacun des critères relatifs à cette catégorie.

3.2.2 Sables, gravillons et cailloux de recyclage

En ce qui concerne les sables et les gravillons, les caractéristiques retenues sont :

La granularité, la propreté, la forme, les résistances mécaniques (ou dureté).

Le plus souvent, ces produits se classent selon les catégories indiquées dans le tableau ci-dessous selon la norme XP P 18-540.

Tableau 3.3. *Caractéristiques des sables et gravillons [31]*

	Caractéristiques de fabrication	Caractéristiques intrinsèques	Sulfates solubles
Gravillons	III ou IV	D à E	SSb ($\leq 0,7\%$)
Sables	b ou c		SSb ($\leq 0,7\%$)

Pour l'ensemble des produits de recyclage, la caractérisation de la fourniture relève du domaine de compétence et de la responsabilité des producteurs. Elle doit faire l'objet d'une Fiche Technique de Produits (FTP).

3.3 UTILISATIONS POSSIBLES ET CONDITIONS

Les produits de recyclage concernés sont les suivants :

- Les graves 0/D : GR0, GR1, GR2, GR3 et GR4,
- Les sables 0/D, gravillons et cailloux d/D de catégories mentionnées ci-dessus. Ces matériaux peuvent être utilisés en construction routière pour réaliser :
 - Les terrassements (remblayages divers, couches de forme ...),
 - Les chaussées (assises), selon les modalités ci-après.

3.3.1 Graves GR0 ET GR1

3.3.1.1 Graves GR0

Ces graves sont criblées, déferrillées, épurées (bois, papiers, plastiques, ...), homogénéisées, mais peuvent contenir un peu de plâtre en proportion visuellement inférieure à 5%. (Cette dernière spécification vise à limiter la fragmentabilité et la dégradabilité du matériau).

- Inutilisable en couche de forme.
- Emploi possible en remblai selon les conditions suivantes :
 - Assimilation à la classe de sol naturel de mêmes caractéristiques géotechniques (NF P 11-300).
 - Appliquer les conditions d'emploi définies dans le GTR pour cette classe à l'exclusion des solutions faisant intervenir le traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques.

→ Pour les mêmes raisons que ci-dessus, si le remblai est réalisé avec plusieurs natures de sols, les graves GR0 ne doivent pas être en contact avec des sols traités.

→ Pas d'emploi dans les remblais contigus aux ouvrages.

→ Pas d'emploi en PST si la couche de forme est prévue en sols traités.

→ Ne pas utiliser en partie basse de remblais réalisés en zone inondable.

3.3.1.2 Graves GR1

- Emploi possible en remblai selon les conditions d'emploi définies dans le GTR pour le sol naturel auquel ses caractéristiques géotechniques permettent de l'assimiler (en général B31, C1B31, C2B31 ou D31). En particulier, les graves GR1 peuvent être employées là où les GR0 sont interdites. - Emploi en couche de forme :

→ Si les caractéristiques sont assimilées à la classe B31, les conditions d'emploi du GTR sont applicables.

→ Si les caractéristiques sont assimilées à la classe C1B31, C2B31 ou D31, on pourra imposer, selon les cas de chantier, et en particulier si la couche de forme est traitée, une élimination de la fraction grossière (> 50 mm ou même 31,5 mm) qui conduirait à de la ségrégation et à des difficultés de réglage.

→ Si le projet envisage de retenir une couche de forme traitée, il est nécessaire de disposer d'une vérification de l'aptitude au traitement (selon NF P 94-100).

L'essai d'aptitude étant réalisé sur la fraction 0/5 mm du matériau, les éléments friables > 5 mm seront broyés et intégrés au 0/5 mm.

3.3.2 Graves GR2, GR3 et GR4

Leur emploi en assises de chaussées est possible, soit sous forme brute (GNT), soit après traitement au liant hydraulique en centrale de malaxage (GH). Le traitement par d'autres liants (bitumes en particulier), qui manque de développement, n'est pas traité dans ce guide.

3.3.2.1 Graves non traitées (GNT)

Ce type de graves est défini dans la norme NF P 98-129. Pour cette technique, les modalités d'emploi sont décrites par référence à cette norme et au document d'application afférent.

Les spécifications relatives aux possibilités ou aux conditions d'emploi sont données en fonction de :

- La position de la couche dans l'assise (fondation ou base),
- L'intensité du trafic selon l'échelle indiquée ci-dessus.

Tableau 3.4. *Domaine d'emploi des GR2, GR3 et GR4 non traitées [31]*

Type de Grave	Foundation	Base	Définition complémentaire selon la norme NF P 98-129(2)
GR2	$\leq T4$ (0/31,5)	(0/20)	Grave de type A (non reconstituée) D = 20 mm (fuseau 7) D = 31,5 mm (fuseau 6)
GR3	$\leq T3^+$	$\leq T3^{(1)}$	Grave de type A (non reconstituée) ⁽³⁾ D = 14 mm (fuseau 8) D = 20 mm (fuseau 7)
GR4	$\leq T3$		

(1) Pour un tel trafic, l'emploi n'est pas envisagé par le document d'application de la Norme qui ne distingue pas E+ et E qui discriminent les graves GR2 et GR3. L'expérience régionale résultant d'une volonté de valorisation des produits de recyclage a conduit cependant à envisager un tel emploi pour la catégorie E+.

(2) S'agissant de graves de type A de la Norme (c'est-à-dire non recomposées), il n'y a pas de spécifications autres que celles de respect du fuseau granulométrique de type 6, 7 ou 8 données en annexe 8-2.

(3) Pour les graves GR3 et GR4 utilisées en couche de base pour un trafic T3- et T3+, il faut obtenir :

- Une régularité granulométrique comparable à celle d'une grave de type B, c'est-à-dire recomposée pondéralement à partir de fractions granulaires,
- Une compacité à l'OPM $\geq 82\%$.

Les classes de trafic sont déterminées par les limites données dans le tableau ci-dessous

Tableau 3.5. *Classes de trafic [31]*

Classe	T5	T4	T3		T2		T1		T0		TS		TE X
			T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	TS-	TS+	
MJA 0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	300	5000	0

3.3.2.2 Graves traitées aux liants hydrauliques (GH)

Les graves GR2, GR3 et GR4 traitées par un liant hydraulique sont définies par la Norme NF 98-116 du produit correspondant à la technique de traitement : laitier, ciment, liant spécial routier...

Pour ces techniques, le domaine d'emploi est décrit par référence aux Normes et aux documents d'application correspondants.

Les spécifications relatives aux possibilités et aux conditions d'emploi sont en fonction de :

- La position de la couche dans l'assise (fondation ou base),

- L'intensité du trafic selon l'échelle déjà indiquée.

Tableau 3.6. *Emploi des GR2, GR3 ET GR4 traitées [31]*

Type de Grave	Foundation	Base	Définition complémentaire sur les graves traitées
GR2(1)	$\leq T3^+$	$\leq T4$	Respect du fuseau granulométrique de la norme
GR3(1)	$\leq T2^+ T1^{+(2)}$	$\leq T4$ $T3^{+(2)}$	
GR4(1)	$\leq T1^+$	$\leq T3^+$ $T2^{+(2)}$	

Les graves GR2, GR3 et GR4 n'étant pas recomposées pondéralement en centrale, il est nécessaire de s'assurer de leur régularité granulométrique en fonction du fuseau de spécification retenu.

Cet emploi implique que le choix du matériau soit agréé par le maître d'ouvrage et que la maîtrise d'œuvre prenne les dispositions pour qu'un contrôle soit effectué au moment de la réalisation des travaux. Un suivi de comportement de la chaussée doit être réalisé. Ces dispositions doivent permettre, à terme, l'assimilation à la technique normalisée.

3.3.3 Sables et gravillons

3.3.3.1 Domaine d'emploi

Les sables et les gravillons sont destinés à la réalisation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou de graves non traitées reconstituées après recombinaison et humidification en centrale de malaxage. Les domaines d'emploi de ces matériaux dépendent essentiellement des caractéristiques mécaniques des gravillons (dureté).

3.3.3.2 Spécifications relatives aux mélanges

Les matériaux reconstitués à partir de produits de recyclage peuvent être constitués à 100 % de ceux-ci ou bien faire appel à des granulats naturels, notamment en vue de rendre le mélange conforme aux normes. Celles-ci sont : NF P 98-116 pour les grave traitées aux liants hydrauliques. NF P 98-113 pour les sables traités aux liants hydrauliques. NF P 98-129 pour les graves non traitées de type B.

Pour la formulation des sables traités, il est souhaitable d'associer au sable de recyclage des correcteurs granulométriques. Par ailleurs, il peut constituer un correcteur efficace de sable naturel.

Les caractéristiques mécaniques sont établies conformément aux normes en vigueur, notamment NF P 98-114-1 et

NF P 98-114-2 pour les matériaux traités aux liants hydrauliques.

Les liants hydrauliques seront préférentiellement choisis parmi les liants hydrauliques routiers ou les laitiers de haut fourneau (en excluant les activants sulfatiques et sulfatocalciques). Dans le cas d'un

traitement au ciment, on privilégiera les ciments à faible teneur en C3A dont la réactivité avec les sulfates est plus faible. Ceci conduit à éviter les CPA CEM I et les CPJ CEM II/A.

Ils sont fabriqués et mis en œuvre conformément à NF P 98-115.

Ces mélanges, traités ou non, contenant une forte proportion de matériaux poreux, nécessitent en général un surdosage de l'ordre de 1 % d'eau par rapport à l'optimum Proctor modifié pour permettre une mise en œuvre satisfaisante. La vérification des caractéristiques de masse volumique sèche (OPM) doit être réalisée régulièrement, du fait de la variabilité des sources de matière première.

Le domaine d'emploi des différents produits possibles est récapitulé dans le tableau ci-dessous

Tableau 3.7. *Emploi des mélanges traités [31]*

		T5	T4	T3	T2	T1	T0
GNT B Gravillon E	Base	X	X				
	Fondation	X	X				
GNT B Gravillon E+ou D	Base	X	X	X			
	Fondation	X	X	X			
STLH	Base	X	X	X	X		
	Fondation	X	X	X	X	X	
GTLH Gravillon E	Base	X	X				
	Fondation	X	X	X	X		
GTLH Gravillon E⁺	Base	X	X	X	X	(1)	
	Fondation	X	X	X	X	X	(1)
GTLH Gravillon D	Base	X	X	X	X	X	
	Fondation	X	X	X	X	X	X

X utilisable (1) Cet emploi implique que le choix du matériau soit agréé par le maître d'ouvrage et que la maîtrise d'œuvre prenne les dispositions pour qu'un contrôle soit effectué au moment de la réalisation des travaux. Un suivi de comportement de la chaussée doit être réalisé. Ces dispositions doivent permettre, à terme, l'assimilation à la technique normalisée. [31]

3.4 EXEMPLES DE VALORISATION

3.4.1 Valorisation des Déchets de marbre comme agrégats grossiers

Des tentatives ont été faites pour obtenir un produit concret durable et rentable en utilisant les déchets de marbre. Les granulats obtenus à partir des déchets de carrières de marbre ont été utilisés à 75 % comme partie des gros granulats et le reste était des gros granulats classiques. Il a été observé que la résistance à la compression était presque la même que celle du béton de contrôle. Les propriétés de durabilité comme la perméabilité et la pénétration des ions chlorure se sont améliorées d'environ 30%

et 15%, respectivement. La résistance aux acides et à la carbonatation a été la moins affectée. La comparaison des coûts a montré qu'avec 20 % de ciment en moins, une réduction de 14 % du coût du béton a été obtenue lorsque les déchets de marbre ont été utilisés avec l'approche de la densité de tassement pour la conception des mélanges de béton. En minimisant la teneur en ciment sans perdre les propriétés mécaniques et de durabilité du béton, la production mondiale de ciment est passée de 4,2 milliards de tonnes à 3,36 milliards de tonnes, ce qui a permis de réduire les émissions de CO₂ de 3,95 milliards de tonnes à 0,79 milliard de tonnes. [32]

3.4.1.1 Caractérisation des matériaux

Le ciment Portland Pouzzolane utilisé dans cette étude répond à l'exigence de la norme BIS : 1489-part 1 :1991 [33] . Le sable utilisé dans cette étude est conforme à la zone de classement II selon la norme BIS : 383-1997. Le quartzite conventionnel à gros agrégats utilisé dans cette étude est conforme à la norme BIS : 383-1997 [34]. Les déchets de marbre utilisés dans cette étude ont été broyés dans un concasseur pour obtenir la granulométrie souhaitée de gros agrégats. La taille nominale maximale des déchets de marbre et d'agrégats conventionnels utilisés était de 20 mm. Les propriétés physiques et chimiques des granulats grossiers, des granulats de marbre et des granulats fins sont présentées dans les tableaux 3.8. Pour obtenir l'affaissement souhaité de 75 mm à 100 mm, un super plastifiant de troisième génération à base de poly-carboxylate Rheobuild 522 ND conforme à la norme BIS : 9103-1999 [35] a été utilisé.

Tableau 3.8. *Propriétés physiques et mécaniques des granulats [35]*

Type d'agrégat	Poids spécifique	Absorption d'eau (%) en poids	Zone de classement
Agrégat grossier conventionnel	2.78	0.54	Selon le tableau 2 de la BIS 383
Agrégats fins	2.66	2.0	Zone II Selon le tableau 4 de la BIS 383
Marbre grossier Agrégat	2.88	0.05	Selon le tableau 2 de l'IS 383

D'après Sudarshan D. Kore, A. K. Vyas qui ont fait des recherches sur la valorisation des déchets de marbre comme agrégats grossiers a pour but de profiter de certaines de leurs caractéristiques. Sur la base des résultats obtenus ils ont conclu que :

- L'incorporation de déchets de marbre en tant que gros granulat n'affecte pas la maniabilité des mélanges de béton ;
- La résistance à la compression des mélanges de béton n'est pas affectée par l'utilisation de déchets de marbre comme granulat grossier. Les résultats sont presque proches de ceux du

béton de contrôle. Mais dans les mélanges de béton conçus selon l'approche de la densité de compactage, la résistance à la compression est presque égale à celle du mélange de contrôle avec une économie de ciment d'environ 20% à rapport eau-ciment constant ;

- La perméabilité a été réduite de 15 % par rapport à celle du béton de contrôle utilisant l'approche de la densité de tassement. La perméabilité réduite est une indication de l'amélioration des propriétés de durabilité du béton ;
- Les résultats des essais d'abrasion montrent que le béton produit à partir de granulats de marbre peut être utilisé dans les travaux de revêtement ;
- La profondeur de carbonatation du béton contenant des agrégats de marbre montre une tendance presque identique à celle du béton de contrôle ;
- La réduction significative de la profondeur de pénétration des ions chlorure a été observée dans le mélange de béton contenant des agrégats de marbre ;
- La résistance à l'acide du béton contenant des déchets de marbre a été observée comme étant marginalement faible par rapport à celle du béton témoin. Il n'y a donc pas beaucoup d'effets négatifs des acides sur la performance du béton contenant des agrégats de marbre ;
- L'utilisation de l'approche de la densité de tassement pour la conception des mélanges de béton et l'utilisation des déchets de marbre comme agrégats grossiers ont permis d'économiser 20 % de la teneur en ciment et 14 % du coût global de production du béton, ce qui montre que l'approche de la densité de tassement est rentable. En minimisant la teneur en ciment sans perdre les propriétés mécaniques du béton, on obtient une réduction de 20 % des émissions de CO₂.
- L'étude a permis de conclure que l'utilisation d'agrégats produits à partir de déchets de marbre peut remplacer les gros agrégats classiques dans les mélanges de béton. L'augmentation de la résistance à l'abrasion et la réduction significative de la profondeur de pénétration des chlorures sont des avantages supplémentaires qui garantissent une durée de vie accrue de la structure du béton sans sacrifier la résistance. Ainsi, le produit devient durable avec une économie de 14% du coût global du béton conçu par l'approche de la densité de compactage.

3.4.2 Évaluation des propriétés de durabilité du béton auto compactant fabriqué à partir de granulats de béton recyclé

Cette recherche présente les propriétés de durabilité du béton auto compactant (SCC) fabriqué avec des granulats de béton recyclé (RCA) en remplacement partiel ou total des granulats naturels grossiers (NCA). L'effet du RCA sur les propriétés fraîches des BCC a été mesuré à l'aide d'un test d'écoulement d'affaissement, d'un test en V, d'un test L-box et d'un test J-ring. Alors que les propriétés de durabilité telles que l'absorption de surface initiale, la perméabilité à l'eau, l'aspiration capillaire et la pénétrabilité rapide des chlorures ont été étudiées pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en RCA sur les

CSC. La résistance à la compression de différents mélanges de CSC a également été déterminée à titre de référence. Les résultats indiquent que l'augmentation de la teneur en RCA dans la fissuration par corrosion sous tension entraîne une détérioration des propriétés de la fissuration par corrosion sous tension liées à la durabilité. Il a également été constaté que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en RCA. On a constaté que la réduction des performances était marginale jusqu'à un niveau de remplacement de 50 % de l'acide chlorhydrique, mais on a constaté qu'un remplacement de 100 % de l'acide chlorhydrique affectait sensiblement les propriétés liées à la durabilité et la résistance à la compression.

3.4.2.1 Matériaux

Le ciment Portland (PC) était le principal liant du béton et il était mélangé avec du FA de classe F. Les pourcentages de remplacement du NCA par le RCA ont été maintenus à 0%, 50% et 100%. Les RCA ont été tamisés et remélangés pour obtenir une granulométrie comparable à celle du NCA dans les limites de la norme IS 383 :1970 [36].

Les résultats d'études sont résumés :

- Par rapport au contrôle SCC réalisé avec la NCA, la résistance à la compression sur 28 jours a diminué de 13 % lorsque toutes les NCA ont été remplacées par la RCA. La diminution de la résistance à la compression est insignifiante pour un remplacement de 50 % des NCA par des RCA ;
- L'absorption de surface initiale du béton témoin a augmenté avec l'augmentation de la teneur en RCA pour tous les âges de durcissement, des changements de l'ordre de 30 % étant observés lorsque les NCA ont été complètement remplacés par les RCA ;
- Les profondeurs de pénétration de l'eau ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en RCA dans les mélanges de SCC ;
- L'augmentation du taux initial d'absorption de la CSC avec 50 % d'ACR était marginale, mais avec le remplacement complet, elle devient significative. De même, une augmentation d'environ 40 % de l'ARI a été observée pour le remplacement complet de l'ANC par l'ACR par rapport au mélange de contrôle de la CSC fait uniquement avec l'ANC ;
- La résistance à la pénétration des ions chlorure a diminué avec l'augmentation de la teneur de tous les âges de durcissement testés dans cette étude. [37]

3.4.3 Étude des propriétés des bétons à partir de granulats recyclés pré-saturés

L'objectif est la récupération des déchets de béton en remplaçant les agrégats naturels (NA) par des agrégats recyclés (RA) à des taux de 0, 50 et 100 %. Les granulats recyclés provenant des déchets de construction et de démolition (CDW) présentent une qualité inférieure à celle des granulats naturels, l'absorption d'eau étant leur principal inconvénient. Les quantités d'eau absorbées et leurs variations

dans le temps ont été mesurées selon la norme européenne (EN 1097-6). L'ajout d'eau absorbée lors du malaxage a provoqué la ségrégation des bétons et un volume d'eau excédentaire a été observé à la surface du béton. L'eau ajoutée n'a pas été totalement absorbée par les granulats. La pré-saturation des granulats 24 heures avant le mélange et leur introduction en tant que composant du béton était la meilleure méthode. Les agrégats initialement saturés n'ont pas consommé l'eau de mélange du béton. L'ouvrabilité par essai d'affaissement et les résistances mécaniques développées avec des granulats pré-saturés (100 % RA) et (50 % RA - 50 % NA) ont été mesurées sur des bétons, puis comparées à celles des bétons de référence fabriqués avec 100 % de granulats naturels.

3.4.3.1 Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette enquête comprennent le ciment, les agrégats naturels, les agrégats recyclés, le plastifiant de sable et l'eau. Tous les matériaux utilisés ont été produits localement en Algérie. Le ciment utilisé est le CPA- CEM I 42.5 R nommé "CRS" de la cimenterie de ZAHANA (ouest de l'Algérie), présente une surface spécifique (BET) de 4200 cm²/g et une densité absolue de 3,1 g/cm³. Le tableau 3.9 présente l'analyse chimique du ciment.

Le ciment utilisé est un ciment ordinaire Portland sans ajout CPA CEMI 42.5, présentant une résistance moyenne à la compression d'environ 44MPa à 28 jours [NF IN 196-1]. Sa surface spécifique Blaine est de (4200cm²/g) et sa densité est de 3050 kg/m³. Les compositions chimiques et minéralogiques sont données dans le tableau 1. Ce ciment contient une teneur plus élevée en C₂S, ce qui est favorable à l'amélioration des résistances mécaniques à long terme.

Tableau 3.9. *Analyse chimique du ciment [36]*

Oxydes	[%]	Minéraux (Bogue)	[%]
SiO ₂	21,12	C ₂ S	34,5
CaO	63,84	C ₃ S	38,5
Al ₂ O ₃	6,42	C ₃ A	10,7
Fe ₂ O ₃	3,74	C ₄ AF	11,3
MgO	0,21	Plâtre	4,5
Na ₂ O eq	0,14	Autres	0,5
SO ₃	0,51		
L.I 1	2,41		

1 (L.I) est la perte au feu (% en masse)

Tableau 3.10. *Caractéristiques physiques des agrégats [36]*

Caractéristiques	Naturel		Recyclé	
	Agrégat	Agrégat 3/8	Agrégat	Agrégat

	3/8 (NA 3/8)	(NA 8/16)	3/8 (RA 3/8)	8/16 (RA 8/16)
Absolute densité [g/cm ³]	2.56	2.67	2.38	2.35
Apparente densité [g/cm ³]	1.38	1.38	1.27	1.28
Absorption d'eau [%]	1.8	1.44	9.93	5.80

Le principal objectif est de mesurer les quantités d'eau absorbées par les granulats recyclés broyés aux classes 3/8 mm et 8/15 mm et d'améliorer les caractéristiques du béton. La détermination de ces différentes quantités d'eau a été suivie par la détermination des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des bétons ordinaires. Outre un béton témoin fait de granulats 100% naturels, des bétons avec des granulats recyclés ont été mis au point. Ces bétons ont été formulés selon deux méthodes. La première consiste à ajouter la quantité d'eau absorbée comme compensation lors du malaxage, la seconde a consisté à pré-saturer les graviers 24 H avant de les introduire dans le béton.

Selon les résultats de l'expérimentation, il a été constaté que :

- Les granulats recyclés de 3/8 mm absorbent plus d'eau que les granulats recyclés de 8/16 mm en raison de leur importante teneur en ancienne pâte de ciment entourant les petites surfaces naturelles des graviers ;
- Pour les granulats non saturés, l'ajout de la quantité d'eau absorbée en compensation lors du malaxage donne des bétons aux caractéristiques non souhaitées, un phénomène de rejet d'eau a été observé lors du malaxage du béton, entraînant par conséquent une augmentation de la maniabilité et une diminution de la résistance à la compression ;
- Avec des granulats recyclés initialement saturés, les bétons recyclés ont présenté des résultats très acceptables en matière d'ouvrabilité et de résistance mécanique. En remplaçant 50% d'agrégats recyclés initialement saturés, on a établi la meilleure formulation pour les bétons recyclés, et les résultats obtenus sur l'ouvrabilité et la résistance ont été similaires à ceux d'un béton de référence fait avec 100% d'agrégats naturels ;
- Il est recommandé d'introduire des granulats recyclés pré-saturés dans le béton afin d'obtenir des bétons ordinaires résistants contenant les granulats recyclés. Cette méthode garantit que les granulats recyclés n'absorbent pas la quantité d'eau efficace pour le béton. Le béton USRAC100 a la meilleure fluidité des bidonvilles mais il a la pire résistance à la flexion et à la compression, donc il peut être utilisé comme béton de remplissage, béton imprimé, réalisation de bordures de chaussées, dalle flottante et couche d'étanchéité. [38]

3.4.4 Performance de durabilité du béton vert incorporant divers déchets

Cette recherche a focalisé sur la durabilité des bétons développés au moyen d'une conception écologique avec incorporation de divers déchets industriels solides : scories de haut fourneau broyées et

granulées, fumée de silice, cendres de balle de riz, cendres volantes pulvérisées, déchets de poudre de verre ainsi que des matériaux ayant subi un recyclage afin de connaître leur degré de durabilité. Il est très recherché de transformer ces types de déchets en matériaux d'addition précieux à la place du ciment Portland ordinaire (CPO) dans la construction de béton vert à un coût abordable et plus essentiel avec une faible empreinte carbone. Cette étude s'intéresse principalement à la mesure dans laquelle ces bétons verts ont réussi, compte tenu de leurs caractéristiques de durabilité. Il existe une énorme demande de matériaux de construction rentables pour offrir suffisamment de logements et de réseaux d'infrastructures pour se débarrasser de la population croissante sur la planète. Le centre d'attention est de faire en sorte que les chercheurs, les ingénieurs et les personnes travaillant dans le domaine des infrastructures, ainsi que l'industrie de la construction, soient en mesure d'absorber et de dissiper les matériaux et de les promouvoir en tant que matériaux de construction acceptables, durables et rentables. Les normes de durabilité appropriées et les recherches encore excellentes sur la durabilité de ce nouveau concept de béton vert encourageront l'adoption de projets de construction et d'infrastructures gargantuesques à l'échelle mondiale. Au vu des faits ci-dessus, on peut prédire que ladite technologie verte donne l'impression d'avoir un potentiel éblouissant et son approbation dans les industries de la construction qui l'établit comme le matériau de construction le plus prometteur pour l'avenir.

L'étude a démontré que :

- Lorsque le sable est remplacé par des cendres volantes de classe F, du laitier de four de fusion impérial, du laitier de cuivre, le béton présente une durabilité accrue et mais la valeur de l'affaissement augmente puisque le taux de substitution augmente dans le cas des scories et que la valeur de l'affaissement diminue lorsque des cendres volantes de classe F sont utilisées ;
- Le clinker d'huile de palme et du laitier ferrochrome peut être employé comme matériau de remplacement du sable ;
- Une gamme de béton et de mortier de concept vert et leurs incorporations avec divers déchets et matériaux de déchets solides provenant de l'agriculture, des industries, des déchets biologiques, des matériaux recyclés, et certains autres ingrédients de substitution ont été jugés acceptables en termes de propriété de durabilité. Avec une diminution des coûts, des solutions aux crises environnementales et la préservation des ressources naturelles contre la dégradation, une excellente résistance au feu et aux produits chimiques sont quelques-unes des caractéristiques significatives de cette technologie ;
- L'application de ces déchets dans les composites verts permet non seulement d'améliorer la durabilité et la résistance, mais aussi de renforcer les microstructures. Les déchets durables et appropriés, ainsi que les matériaux de construction démolis dans le béton, sauvent les terres du remplissage et de la dégradation des ressources naturelles coûteuses et limitées des ingrédients

comme le sable de rivière, les calcaires, les charbons, etc. Une norme appropriée ainsi que des collaborations interdisciplinaires entre les acteurs de la construction sont essentiellement requises de toute urgence, afin d'encourager l'acceptation du béton vert dans les industries de la construction. Leur utilisation comme matériaux supplémentaires dans les structures est recommandée pour obtenir une plus grande résistance, une meilleure maniabilité et une excellente durabilité.

3.4.5 Revue sur la stabilisation des sols argileux à l'aide des fines obtenues à partir de structures en béton démolies

La stabilisation du sol peut être définie comme le processus de modification des propriétés techniques du sol pour améliorer la capacité portante et la durabilité des sols faibles. L'objectif de l'étude était de faire le point sur la stabilisation des sols argileux à l'aide de déchets démolis. Différentes méthodes sont disponibles pour stabiliser les sols argileux. Ces méthodes comprennent la stabilisation avec des additifs chimiques, le remplacement du sol, le contrôle du compactage, le contrôle de l'humidité et les méthodes thermiques. Toutes ces méthodes peuvent avoir les inconvénients d'être inefficaces et coûteuses. D'après la littérature, les fines obtenues à partir de déchets démolis sont une méthode de stabilisation des sols peu coûteuse et efficace.

3.4.5.1 Utilisation des déchets de démolition dans la stabilisation des sols

Les ingénieurs routiers sont constamment à la recherche de méthodes et de techniques d'ingénierie nouvelles et innovantes pour minimiser l'utilisation des ressources naturelles et protéger l'environnement. La construction routière est l'un des principaux domaines dans lesquels les chercheurs étudient l'utilisation de matériaux de substitution. Un certain nombre de déchets sont actuellement utilisés dans diverses applications routières. Depuis 1999, compte tenu des quantités énormes de déchets de construction et de démolition (DCD), cette étude se concentre sur l'utilisation possible de fines obtenues à partir de matériaux de DCD comme agent stabilisateur pour les sols de sous-sol. Les ingénieurs en matériaux sont constamment à la recherche de stabilisateurs appropriés et moins chers pour utilisation dans la stabilisation des sols argileux comme alternative aux additifs coûteux, comme le ciment, la chaux, etc. Comme les déchets de C&D contiennent des agrégats de tailles variables, y compris des agrégats plus grossiers et plus fins, la fraction la plus grossière a été utilisée comme agrégats recyclés dans la construction de chaussées, mais les fractions plus fines sont encore exclues comme déchets. Le matériau qui passe à travers le tamis IS de 1,18 mm contient à la fois du ciment et du sable en quantité suffisante et qui sont assez fins pour modifier la granulométrie du sol ; en les mélangeant, on pourrait améliorer la densité de tassement de la masse du sol et, en même temps, il y aurait une réaction chimique dans une certaine mesure en raison de la présence d'énormes grains de ciment restants. C'est pourquoi, dans la présente étude, des efforts ont été faits pour utiliser ces fines comme stabilisateur de sol afin d'améliorer les propriétés des sols argileux en tant que sous-sol.

F. EXAMEN SUR LA STABILISATION DES SOLS

Une procédure dans laquelle des additifs naturels ou synthétisés sont utilisés pour améliorer les propriétés techniques des sols fragiles. Plusieurs méthodes de renforcement sont disponibles pour stabiliser les sols. Par conséquent, les techniques de stabilisation des sols peuvent être classées en plusieurs catégories telles que la stabilisation physique, la stabilisation chimique et la stabilisation mécanique. Il existe un historique substantiel d'utilisation d'adjuvants de stabilisation des sols pour améliorer les performances des sols faibles en contrôlant les changements de volume et en augmentant la résistance.

Al-Sharif et al [39] ont mené une étude en laboratoire sur l'utilisation des boues brûlées comme nouvel agent de stabilisation des sols. La boue a été brûlée à 550°C et mélangée à un sol argileux à différents pourcentages. L'addition de pourcentages généralement supérieurs à 7,5 % en poids diminue à la fois la densité sèche maximale et la résistance à la compression non confinée. Les résultats des tests montrent que ce matériau peut être utilisé comme stabilisateur de sol.

Parsons et al [40] ont évalué l'utilisation de la poussière de four à ciment pour la stabilisation des sols. Les limites d'Atterberg et les essais de résistance ont été réalisés avant et après l'essai de durabilité sélectionné. Les valeurs relatives de la rigidité du sol ont également été suivies sur une période de 28 jours de durcissement. Les résultats des tests montrent une amélioration significative des performances avec l'ajout de poussière de four à ciment.

Seda et al [41] ont étudié l'utilisation du caoutchouc de pneus usagés pour l'atténuation du potentiel de gonflement dans les sols expansifs. Dans cette étude, l'effet de l'ajout de petites particules de caoutchouc de pneus usagés sur le potentiel de gonflement d'un sol expansif du Colorado a été évalué. Les propriétés d'indice et les paramètres de compactage du caoutchouc, du sol expansif et du mélange sol-caoutchouc expansif ont été déterminés. Des tests unidimensionnels ont été effectués pour évaluer la faisabilité de l'utilisation de petites particules de caoutchouc de pneus usagés comme additif mécanique pour atténuer le potentiel de gonflement du sol expansif. Les résultats des tests ont montré que le pourcentage de gonflement et la pression de gonflement sont tous deux réduits de manière significative par l'ajout de caoutchouc au sol expansif.

Okagbue [42] a évalué l'efficacité de la cendre de bois pour la stabilisation de l'argile. L'évaluation a consisté à déterminer les propriétés géotechniques du sol argileux à l'état naturel et lorsqu'il est mélangé

à des proportions variables de cendre de bois. Les paramètres testés comprenaient la distribution granulométrique, la gravité spécifique, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage, le taux de portance californien (CBR) et la résistance à la compression. Les tests de résistance et de CBR ont été répétés après 28 jours de durcissement des échantillons traités. Les résultats ont montré que les paramètres géotechniques des sols argileux sont considérablement améliorés par l'ajout de cendre de bois ; la plasticité a été réduite de 35 % et le CBR et la résistance ont augmenté de 23-50 % et 49-67 %, respectivement, en fonction de l'énergie de compactage utilisée. Les valeurs les plus élevées de résistance et de CBR ont été obtenues avec 10 % de cendre de bois. Les résultats ont également montré que le durcissement améliorait la résistance de l'argile traitée à la cendre de bois. Cependant, le gain de résistance a été de courte durée car la résistance a rapidement diminué après 7 à 14 jours de durcissement. Ces résultats impliquent que bien que la cendre de bois offre certains des effets bénéfiques de la chaux dans la stabilisation des sols, tels que la plasticité et la réduction du gonflement, l'amélioration de l'ouvrabilité et l'augmentation de la résistance, il est peu probable qu'elle puisse remplacer la chaux car le gain de résistance est de courte durée.

Choudhary et autres [43] ont évalué l'utilisation des déchets plastiques pour améliorer la couche de forme dans les chaussées souples. Dans cette étude, l'effet de la teneur en déchets de bandes plastiques (0,25 % à 4,0 %) et de la longueur des bandes sur le module CBR et sécant du sol renforcé par des bandes a été étudié. L'étude révèle que l'ajout de bandes de déchets plastiques de taille et de proportions appropriées dans le sol entraîne une augmentation appréciable de la valeur CBR et du module sécant du sol.

Rao et al [44] ont réalisé une évaluation en laboratoire sur l'utilisation des déchets industriels dans les chaussées posées sur des sous-couches d'argile expansive. Les déchets testés étaient du laitier de haut fourneau granulé et des cendres volantes. Des études de laboratoire détaillées ont été réalisées en utilisant ces matériaux pour amortir le système de sol. Les résultats indiquent une augmentation significative de la valeur du CBR imprégné. Cette étude montre l'utilité de ces deux déchets pour les couches de fondation des chaussées souples.

Saltan et al [45] ont examiné le potentiel des déchets de pierre ponce comme additif stabilisateur pour les sous-couches argileuses des chaussées. Les essais réalisés ont porté sur la solidité, la résistance, la limite d'Atterberg, le taux de portance en Californie et la charge dynamique répétée triaxiale. Les résultats de la recherche expérimentale ont montré que les déchets de pierre ponce peuvent être utilisés comme stabilisateur de sol pour les sous-niveaux argileux.

Zhang et al [46] ont mené une étude expérimentale pour évaluer l'utilisation des boues de chaux comme stabilisateur de sol. L'étude expérimentale a été menée sur cinq types typiques de sols de qualité inférieure dans l'Ohio. L'étude montre que l'ajout de boues de chaux augmente le module de déformation du sol et réduit le comportement plastique du sol.

Yadu (2013) a évalué le potentiel du laitier de haut fourneau granulé (GBS) avec des cendres volantes pour stabiliser l'argile. L'étude a montré que l'argile peut être stabilisée efficacement par l'ajout d'un mélange de cendres volantes et de GBS.

Ransinchung et al [47] ont évalué l'efficacité des fines obtenues à partir de dalles de béton démolies comme stabilisateur de sol. Les dalles de béton démolies ont été collectées auprès de Shabzi Mandi de Roorkee. En plus du FDCS, du ciment Portland ordinaire de qualité 43 a été choisi comme stabilisateur de base afin que les résultats obtenus à partir du sol mélangé au FDCS soient comparés avec. Le sol argileux utilisé dans la présente enquête appartient au groupe de sols CI lorsqu'il est classé conformément à la norme IS : 1498. Le ciment et le FDCS ont été mélangés séparément avec le sol argileux à des taux égaux de 3 à 15 pour cent. Des réductions des densités sèches et des indices de plasticité ont été observées lors du mélange du ciment et du FDCS. L'ajout de FDCS augmente la valeur CBR imprégnée, la résistance à la compression non confinée et la résistance à la traction fendue.

Thomas et al [48] éclairent l'importance du concept de réduction, réutilisation et recyclage (3R) pour la gestion des déchets de construction en Inde. L'étude montre que la quantité totale de déchets de C&D produits en Inde est estimée entre 11,4 et 14,69 millions de tonnes par an.

Vizcarra et al [49] ont évalué l'applicabilité des cendres d'incinération des déchets solides municipaux dans les couches de base des chaussées routières par le mélange des cendres avec le sol argileux. Les cendres volantes réduisent l'expansion des matériaux et augmentent la valeur CBR du sol. Les résultats obtenus sont satisfaisants en fonction de la teneur et du type de cendres utilisées.

Rifai et al [50] ont étudié l'effet de l'utilisation des cendres volcaniques comme matériau de substitution pour la stabilisation des sols du point de vue du géo environnement. Ils ont étudié les propriétés techniques du mélange de sol, l'effet de la teneur en cendres volcaniques et son niveau de fines. La finesse de la cendre volcanique est un facteur primordial dans la stabilisation. L'utilisation de cendres volcaniques dont la granulométrie passe au tamis n° 270 est plus efficace. L'étude a révélé que

la teneur en cendres volcaniques peut améliorer les propriétés techniques des sols mous, modifier la courbe de distribution de la taille des grains en diminuant la fraction fine, diminuer les limites de consistance et devenir un sol non plastique, augmenter la capacité de charge et diminuer le potentiel de gonflement.

Edeh et al [51] ont réalisé une évaluation en laboratoire des caractéristiques des sols latéritiques stabilisés avec des cendres de sciure. Les tests effectués ont porté sur la résistance à la compression non confinée et le taux de portance californien (CBR). Les résultats des tests en laboratoire montrent que les propriétés du sol latéritique s'améliorent lorsqu'il est stabilisé avec de la cendre de sciure (SDA).

Kumar (2015) a mené une étude sur l'utilisation des déchets de construction et de démolition. L'étude conclut que les déchets de construction et de démolition comme les briques, le béton, les tuiles, etc. peuvent être utilisés pour la stabilisation mécanique de sols très pauvres, en ajoutant des matériaux cimentaires supplémentaires ou des stabilisateurs commerciaux accrédités par l'IRC selon IRC:SP:89. Les déchets de C&D doivent avoir une granulométrie conforme à l'IRC : SP : 89. Ils peuvent aussi être utilisés en partie comme sol après avoir fait des essais de lixivabilité, de durabilité en plus de la résistance à la compression non confinée. Après des résultats d'essais satisfaisants, ce type de matériau mélangé peut être utilisé pour la stabilisation d'un sol pauvre seul ou en le mélangeant avec quelques bons sols et/ou avec des additifs appropriés. La résistance à la compression non confinée obtenue doit être de 0,8 MPa pour la sous-couche et de 1,75 MPa pour la couche de base, conformément aux normes révisées MORTH et IRC : SP : 89.

3.5 CONCLUSION

On peut conclure à travers ce chapitre qu'il est nécessaire d'utiliser les déchets obtenus lors de la construction et de la démolition de bâtiments

- Valorisation des déchets de marbre comme agrégats grossiers ;
- Évaluation des propriétés de durabilité du béton auto compactant fabriqué à partir de granulats de béton recyclé ;
- Étude des propriétés des bétons à partir de granulats recyclés pré-saturés ;
- Performance de durabilité du béton vert incorporant divers déchets ;
- Stabilisation des sols argileux à l'aide de fines obtenues à partir de structures en béton démolies.

La valorisation des déchets reste ouverte, à d'autres utilisations et possibilités, permettant ainsi d'élargir la gamme des matériaux de construction, de réduire les déchets à la source et de développer l'utilisation des matériaux recyclés dans les chantiers.

Le dernier chapitre exposera les travaux réalisés et appliqués aux ouvrages de soutènement.

Chapitre 4. Travaux et perspectives

d'application aux ouvrages de

soutènement

<u>4.1 INTRODUCTION</u>	<u>53</u>
<u>4.2 VALORISATION DES DECHETS DE BRIQUE</u>	<u>54</u>
<u>4.3 VALORISATION DES DECHETS DE MARBRE</u>	<u>58</u>
<u>4.4 VALORISATION DES DECHETS DE BETON</u>	<u>61</u>
<u>4.5 DECHETS DE VERRE</u>	<u>66</u>
<u>4.6 DECHETS DE CERAMIQUE</u>	<u>66</u>
<u>4.7 RECYCLAGE DE L'ASPHALTE.....</u>	<u>67</u>
<u>4.8 CONCLUSION</u>	<u>70</u>

4.1 INTRODUCTION

Les déchets ménagers et industriels sont transformés, ailleurs, en énergie et autres produits dérivés. En Algérie, ils ne font que s'entasser et amoche l'environnement. Pourtant, des voix n'ont cessé de plaider pour transformer la gestion des déchets en une filière économique, mais en vain. Mais à en croire un responsable au ministère des ressources en eau et de l'environnement, pour qui, l'activité de gestion des déchets (collecte, tri et recyclage) devrait être transformée en une filière économique génératrice de richesse et pourvoyeuse d'emploi, la prise de conscience semble de mise « La gestion des déchets constitue, certes, un problème environnemental, mais dans la conjoncture actuelle, il faut considérer cette activité comme une opportunité économique et sociale, permettant de contribuer à réduire la dépendance des hydrocarbures et contribuer à la diversification économique [52].

A travers ce chapitre, nous verrons quelques travaux ayant fait l'objet de projets de fin d'études, au sein de notre établissement ainsi que d'autres comparés à ceux réalisés au laboratoire Génie civil & Environnement, par abréviation L.G.C.E de Sidi Bel Abbés. Ces travaux sur les déchets de brique, de marbre et de béton s'appliquent sur les ouvrages de soutènement.

Il est à noter que d'autres travaux ont été réalisés sur la stabilisation des argiles gonflantes dont les résultats sont assez concluants.

En gros l'ensemble des travaux ont été mené sur un modèle réduit (figure 4.1) servant de bac de remplissage au sol constitué de sable concassé provenant de la carrière de Sidi Ali Benyoub, commune de la wilaya de Sidi Bel Abbés.

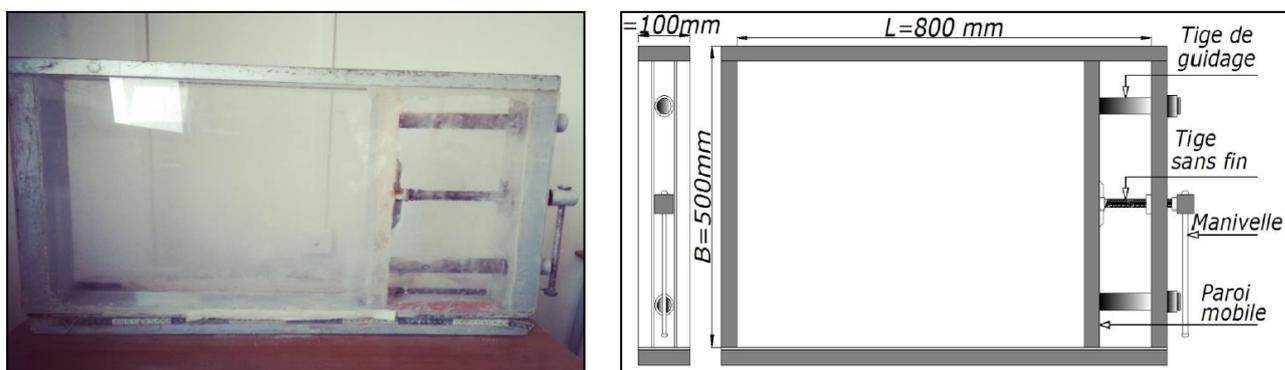


Figure 4.1 Dispositif expérimental de poussée

Les programmes expérimentaux se déroulent en deux phases :

La première phase comprend des essais réalisés sur un sol grenu sans renforcement :

- Le remplissage se fait par couches de 2 cm à 3 cm d'épaisseur jusqu'à atteindre 25 cm de hauteur ;
- Le sol est soumis au phénomène de poussée en actionnant la paroi mobile du dispositif vers le sens de décompression du sol sur une distance horizontale totale de 30cm avec une vitesse constante de 0,25mm/s ;

➤ Les résultats des essais sont analysés par corrélation d'images et la rupture est exprimée en cisaillement maximum.

La deuxième phase comprend des essais réalisés sur un sol conforté par des déchets à différents pourcentages avec les mêmes étapes 1, 2 et 3.

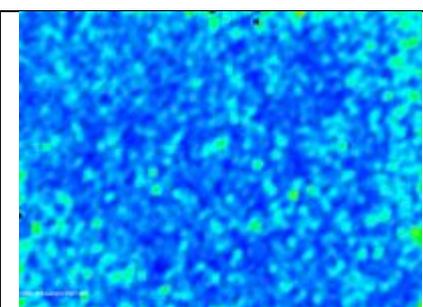
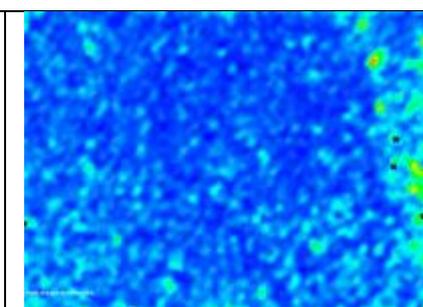
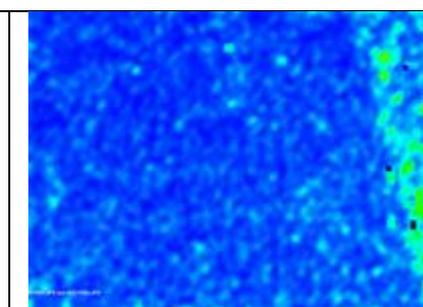
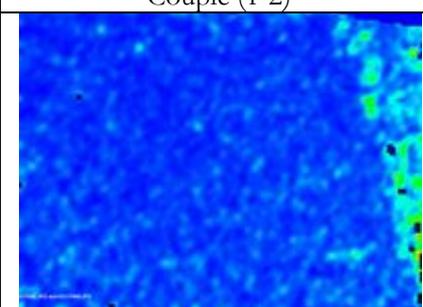
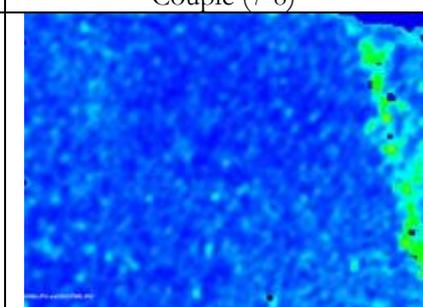
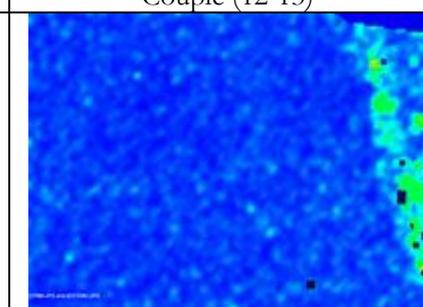
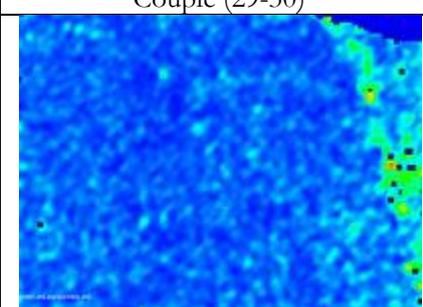
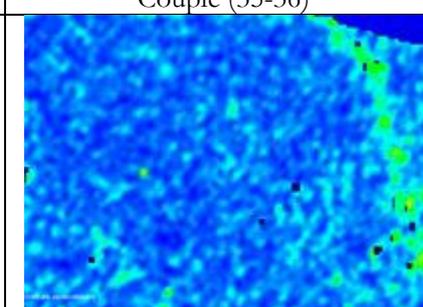
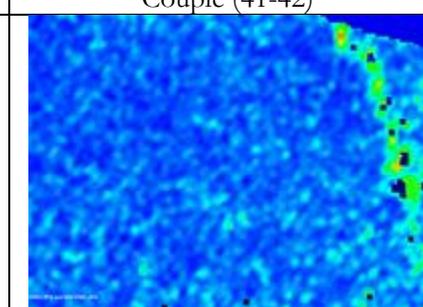
Des essais de répétabilité permettent de valider chaque programme.

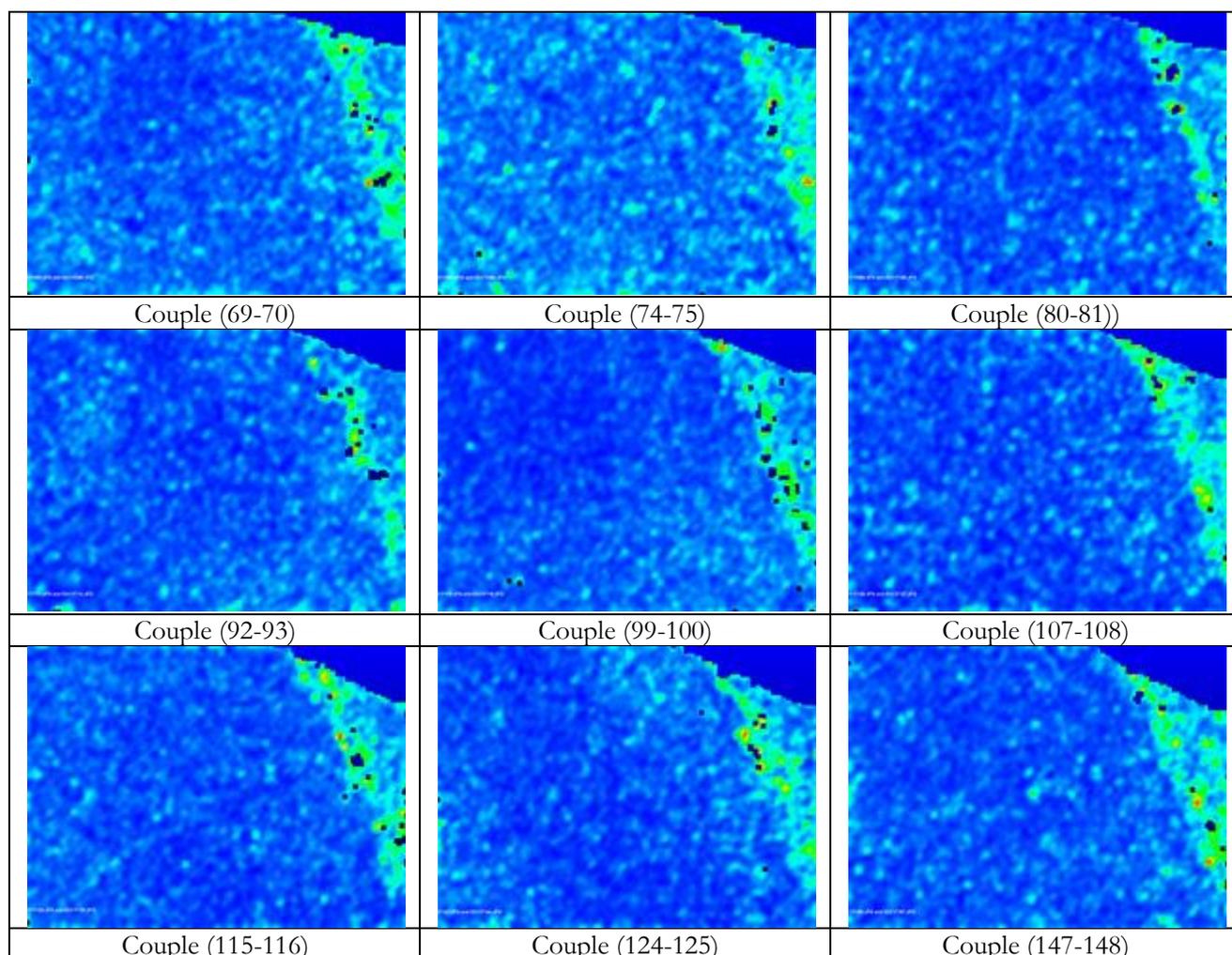
Les conditions aux limites sont identiques à chaque essai : terre-plein horizontal non surchargé, parement vertical lisse, densité initiale de 1,8 et volume totale de $(55 \times 25 \times 10) \text{ cm}^3$.

4.2 VALORISATION DES DECHETS DE BRIQUE

4.2.1 Evolution de la rupture sans renforcement

Tableau 4.1. *L'étude du sol sans confortement [53]*

		
Couple (1-2)	Couple (7-8)	Couple (12-13)
		
Couple (29-30)	Couple (35-36)	Couple (41-42)
		
Couple (52-53)	Couple (59-60)	Couple (63-64)



Commentaire :

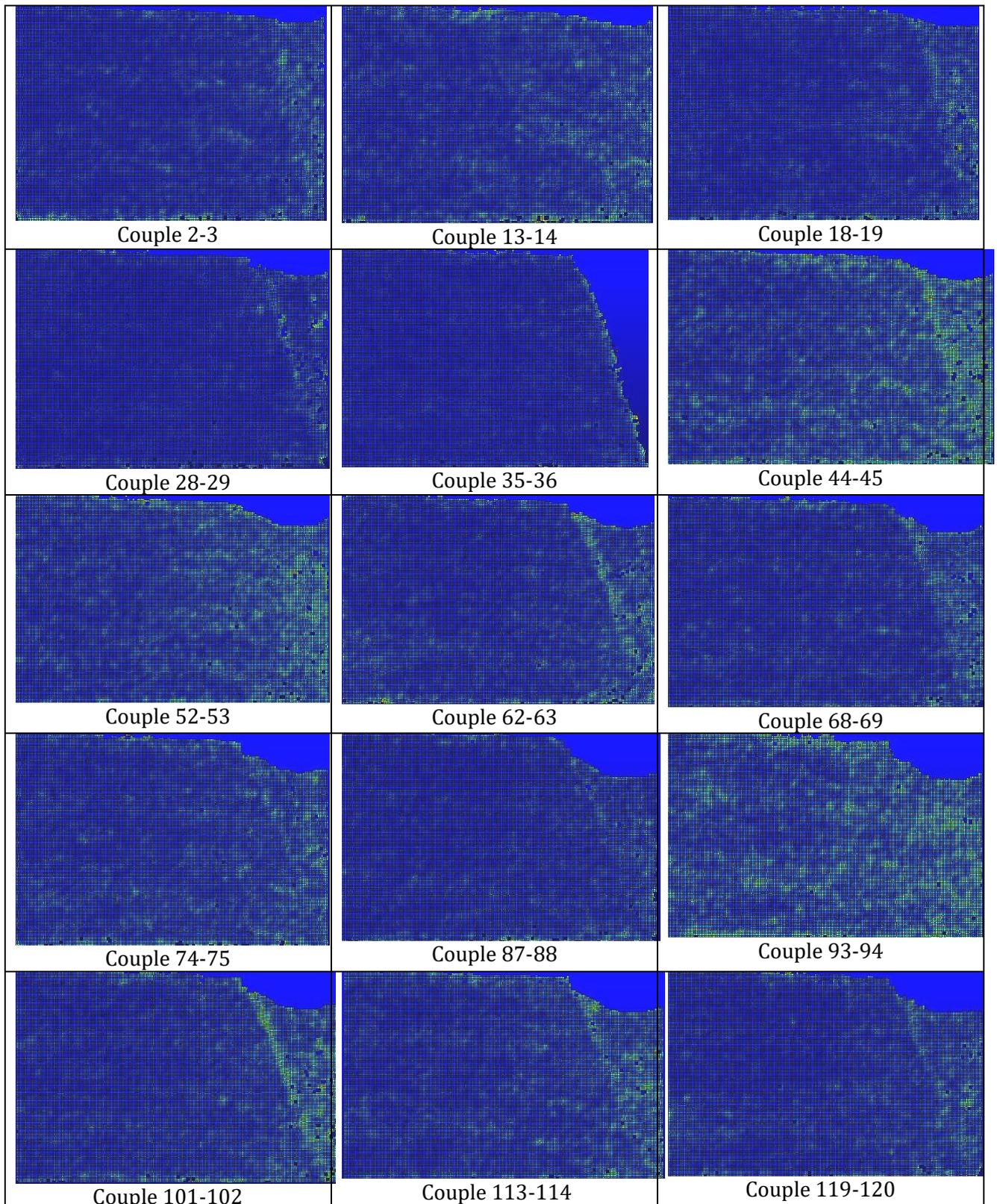
Au début de l'essai, le sol est en équilibre. La paroi mobile amorce son déplacement de façon ininterrompue jusqu'à atteindre l'état d'équilibre limite. Bien au-delà, une rupture alors apparaît, caractérisée par une bande de cisaillement de couleur verte au couple (12-13) correspondant à un déplacement de la paroi de 2,5mm et une intensité en cisaillement maximum de l'ordre de 5,7%.

Le processus de déformation se poursuit et un affaissement du sol est observé à partir du couple (29-30). Le coin de coulomb est perturbé et l'essai est conduit jusqu'à la fin ($D=30\text{mm}$) où l'on observe un affaissement important du milieu. Le volume de sol déplacé est de 390 cm^3 ce qui représente 2,84% du volume total du sol étudié.

4.2.2 Evolution de la rupture avec renforcement

4.2.2.1 Renforcement avec 20% de substitution en brique

Pour cet essai, une substitution en brique de 20% est proposée, l'essai est reconduit dans les mêmes conditions [54].

Tableau 4.2. *Evolution de la rupture du sol avec renforcement à 20% de déchets en brique [54]***Commentaire :**

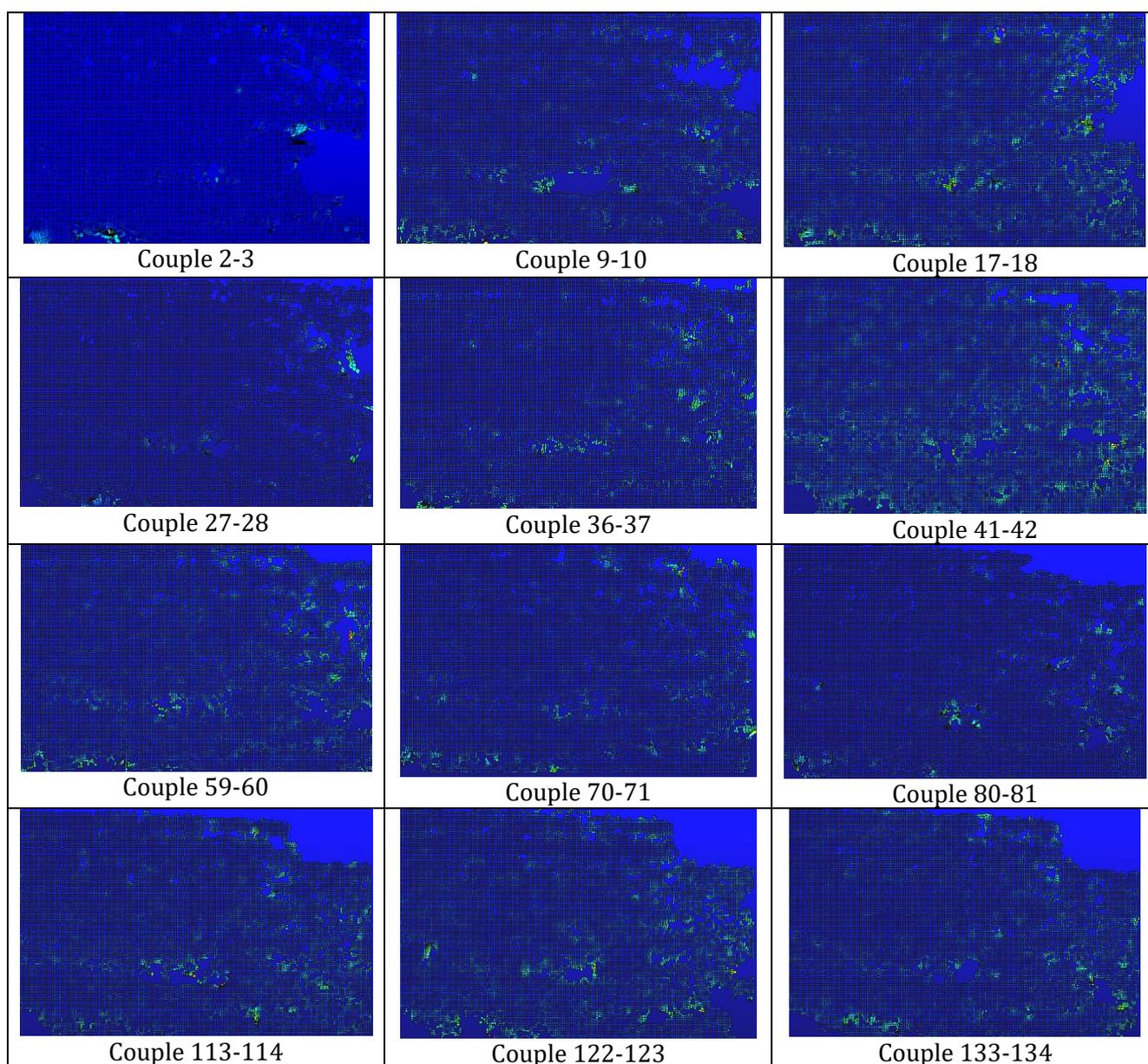
Le sol en équilibre est soumis au phénomène de poussée ou le déplacement de la paroi mobilise le cisaillement du sol (bande de rupture en couleur verte). Le processus se poursuit jusqu'à la fin où là aussi un tassement du sol est observé.

L'essai est analogue à celui réalisé sans confortement et il semblerait à première vue qu'il soit quasiment identique. Il en résulte que l'emploi de déchet de brique à 20% de substitution n'a pas d'impact positif sur la réponse du milieu. Mais il n'en demeure pas moins que sa substitution contribue à l'environnement puisqu'il n'y a pas non plus d'incidence négative ou préjudiciable sur la réponse du sol en question.

4.2.2.2 Renforcement avec 40% de substitution en brique

Etant donné que l'essai avec renforcement à hauteur de 20% semble avoir moins d'influence sur l'évolution de la rupture, il a été décidé de doubler le dosage en substitution pour une meilleure appréciation du résultat.

Tableau 4.3. *Evolution de la rupture du sol avec renforcement à 40% de déchets en brique [54]*



Commentaire :

Sur ce type d'essai réalisé plusieurs fois dans les mêmes conditions, le traitement par corrélation d'images a posé problème lors de l'analyse. En effet, ce genre de scénario peut se produire dans deux cas possibles :

Le premier cas se produit pour les essais préliminaires en conditions d'éclairage défavorables et non encore maîtrisées. Un bon éclairage projette des ombres au niveau des contours des grains qui seront plus visibles donc assujettis au traitement par corrélation d'images. Un mauvais éclairage projette nettement moins d'ombre et les contours en question ne sont plus visibles. En conséquent, des flous peuvent apparaître et affectent directement la qualité des résultats.

Après vérification, cette hypothèse a été écartée car les conditions d'éclairage étaient respectées, ce qui nous ramène à la seconde hypothèse.

Le deuxième cas peut se produire lorsque les grains sont fins. En fait, le déchet de brique était finement broyé et à 40% de substitution, le procédé de remplissage a laissé plus de grains fins tant dans le milieu qu'au niveau des parois en plexiglas. En conséquence, trop de grains fins laissent nettement moins de contours et seront moins visibles donc indétectables par le logiciel, ce qui explique le faible pourcentage de quadrilatères traités.

Après vérification, la deuxième hypothèse est retenue et il a été décidé de corriger l'approche.

4.3 VALORISATION DES DECHETS DE MARBRE

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métallique, le plus souvent).

Certains types de marbre portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte.

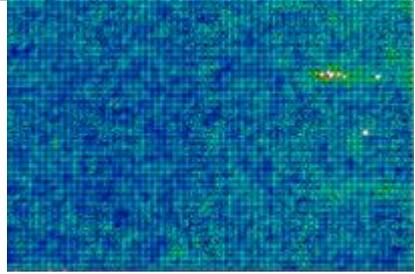
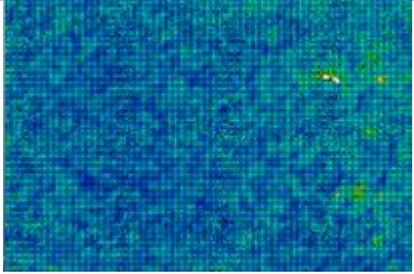
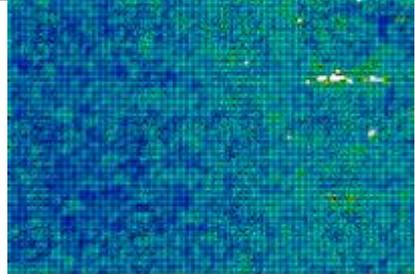
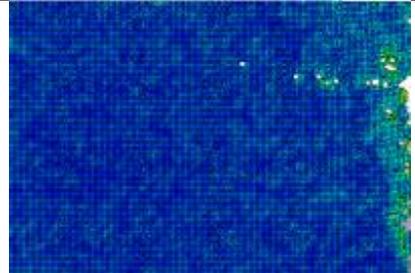
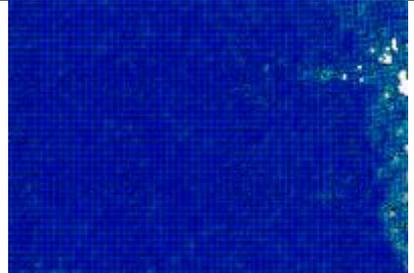
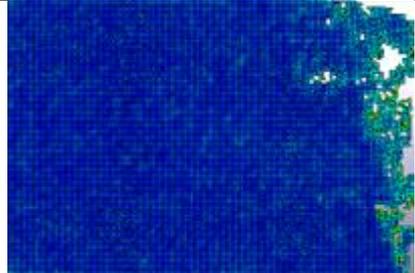
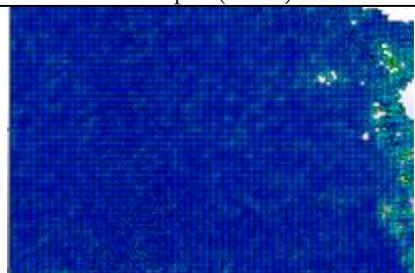
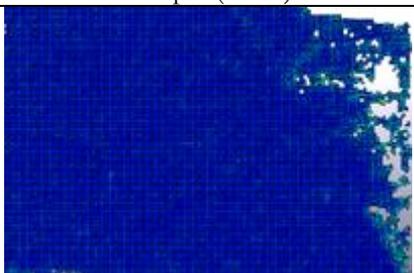
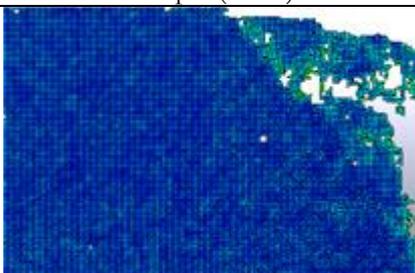
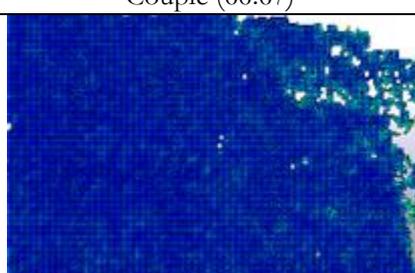
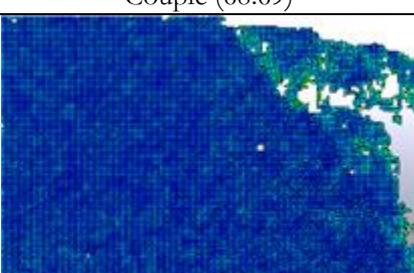
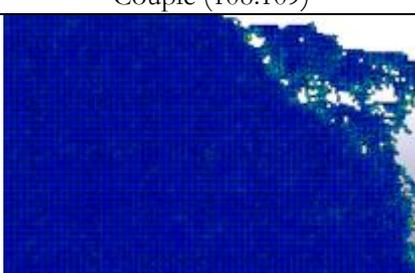
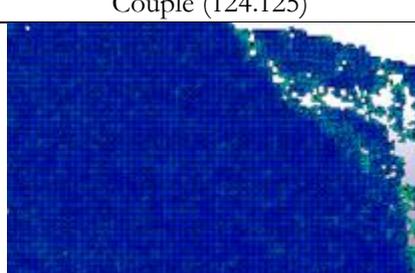
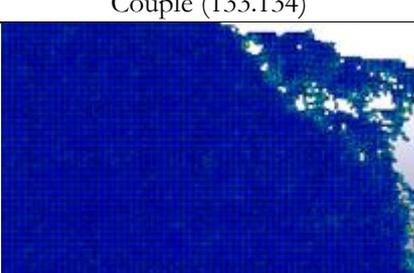
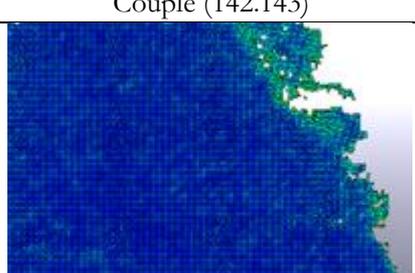
Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7.

La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés ; beiges ; bleues ; gris ; jaunes ; rouges ; vertes ou noires. [55]

4.3.1 Evolution de la rupture du sol renforcé par 02 nappes en marbre

La figure ci-dessous illustre la rupture en cisaillement maximum.

Tableau 4.4. *Evolution de la rupture : renforcement avec 02 nappes en marbre [55]*

		
Couple (01.02)	Couple (06.07)	Couple (19.20)
		
Couple (37.38)	Couple (44.45)	Couple (64.65)
		
Couple (66.67)	Couple (68.69)	Couple (108.109)
		
Couple (124.125)	Couple (133.134)	Couple (142.143)
		
Couple (158.159)	Couple (160.161)	Couple (168.169)

Commentaire :

Au début de l'essai, le sol est en état d'équilibre matérialisé au couple de photos (1-2) puis une bande de cisaillement apparait au couple (5-6) et se poursuit jusqu'à la fin de l'essai. Notons entre autres

l'apparition de deux bandes parallèles au couple (37-38) localisées au tiers de la hauteur, ce qui correspond exactement à l'emplacement des deux nappes.

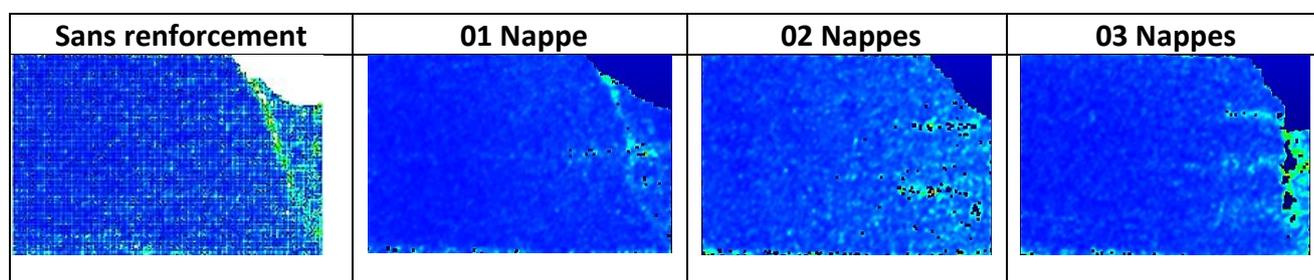
L'explication réside dans le fait que cette bande horizontale est due en fait à un glissement relatif nappe sol/ (ou marbre/sol) traduisant une mauvaise adhérence de la nappe auquel cas, il serait judicieux de lancer des investigations dans ce sens. Ce glissement relatif peut être corrigé ou affaibli en agissant sur le contact nappe/sol. Revoir la rugosité de la nappe ou sa longueur pour optimiser le rendement du contact semblent être des approches à explorer.

4.3.2 Comparaison avec les résultats du laboratoire L.G.C.E

Une comparaison qualitative est établie entre les résultats des essais du programme avec ceux obtenus au laboratoire L.G.C.E de Sidi Bel Abbés.

Il faut souligner que les conditions aux limites sont identiques sur tous les essais. La procédure de renforcement fixait trois variantes à savoir ; une (01) nappe à mi-hauteur, deux (02) nappes aux tiers et (03) trois nappes aux quarts.

Tableau 4.5. *Présentation des résultats au laboratoire L.G.C.E[54]*



En comparant les résultats illustrés ci-dessus en cisaillement maximum, on constate une meilleure réponse du sol conforté par l'ajout de deux (02) nappes en marbre.

Il est clair d'après les résultats que le sol renforcé par des nappes en marbre se comporte mieux vis-à-vis de la sollicitation de poussée et les essais de répétabilité l'ont confirmé.

La problématique reste dans la confection des nappes qui demeurent très problématiques à l'égard du programme. En effet la confection des nappes au laboratoire L.G.C.E a nécessité 25 % de teneur en eau (sans ajout de bandes a gaz) alors que dans notre cas elle était de 50 % (teneur en eau expérimentale). Ceci est sans doute dû au pourcentage des fines contenues dans le marbre qui était différente de celle sur laquelle nous avons travaillé.

En conclusion, l'ajout de nappes en marbre peut être retenu comme solution de renforcement sous certaines conditions qui reste à déterminer à savoir, sa teneur en eau, son épaisseur, sa longueur et son adhérence.

4.4 VALORISATION DES DECHETS DE BETON

4.4.1 Définition des déchets de béton

L'augmentation inquiétante des quantités des déchets provenant de la construction et la démolition, ainsi que l'extraction étendue des ressources naturelles nécessaire à la production des matériaux de construction sont sujettes aux critiques des écologistes.

Toutefois, de grandes parties des déchets peuvent être partiellement recyclées. L'un des principaux déchets de construction susceptible d'être recyclé est le béton démolé.

Dans cette optique, un projet de fin d'études fut réalisé sur la valorisation des déchets de bétons sur le renforcement des sols grenus derrière les ouvrages de soutènements.

Trois (03) pourcentages ont été proposés à savoir 10%, 15% et 20% de substitutions volumique. Nous nous limiterons à la présentation du meilleur résultat qui est celui de 20%.

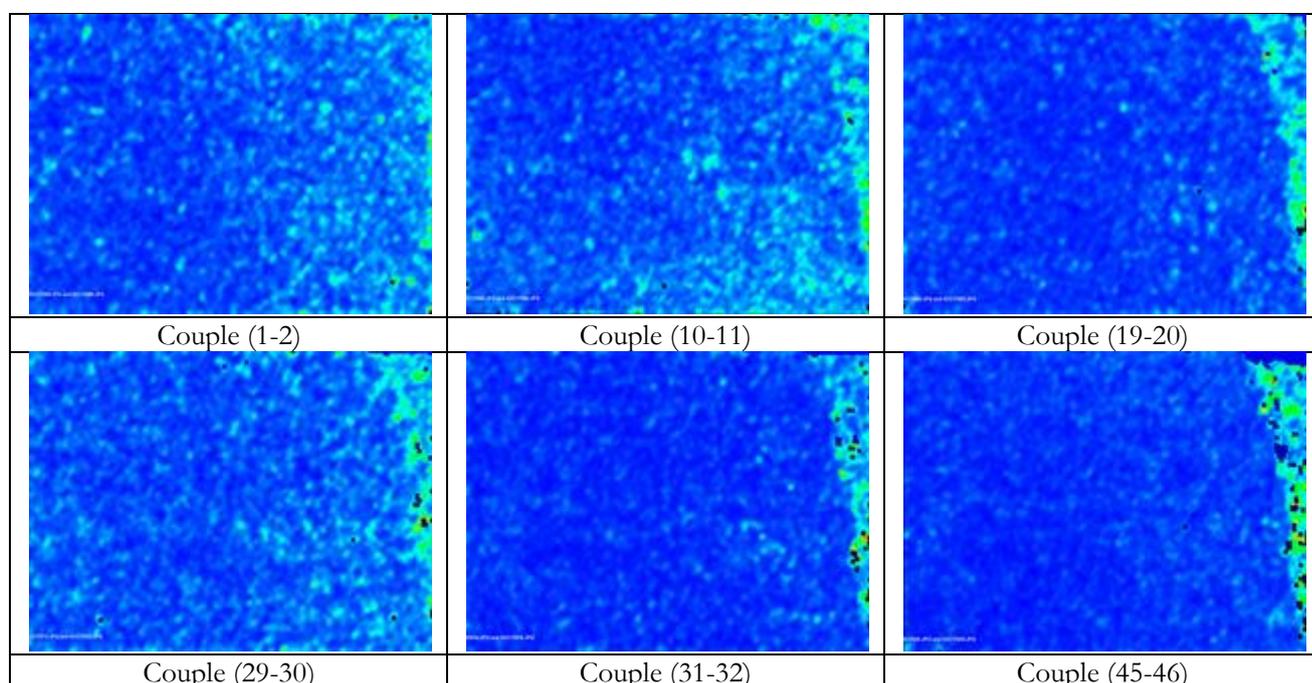
Quant aux résultats des essais réalisés sans confortement, il s'agit des mêmes résultats reportés sur le même sol en question.

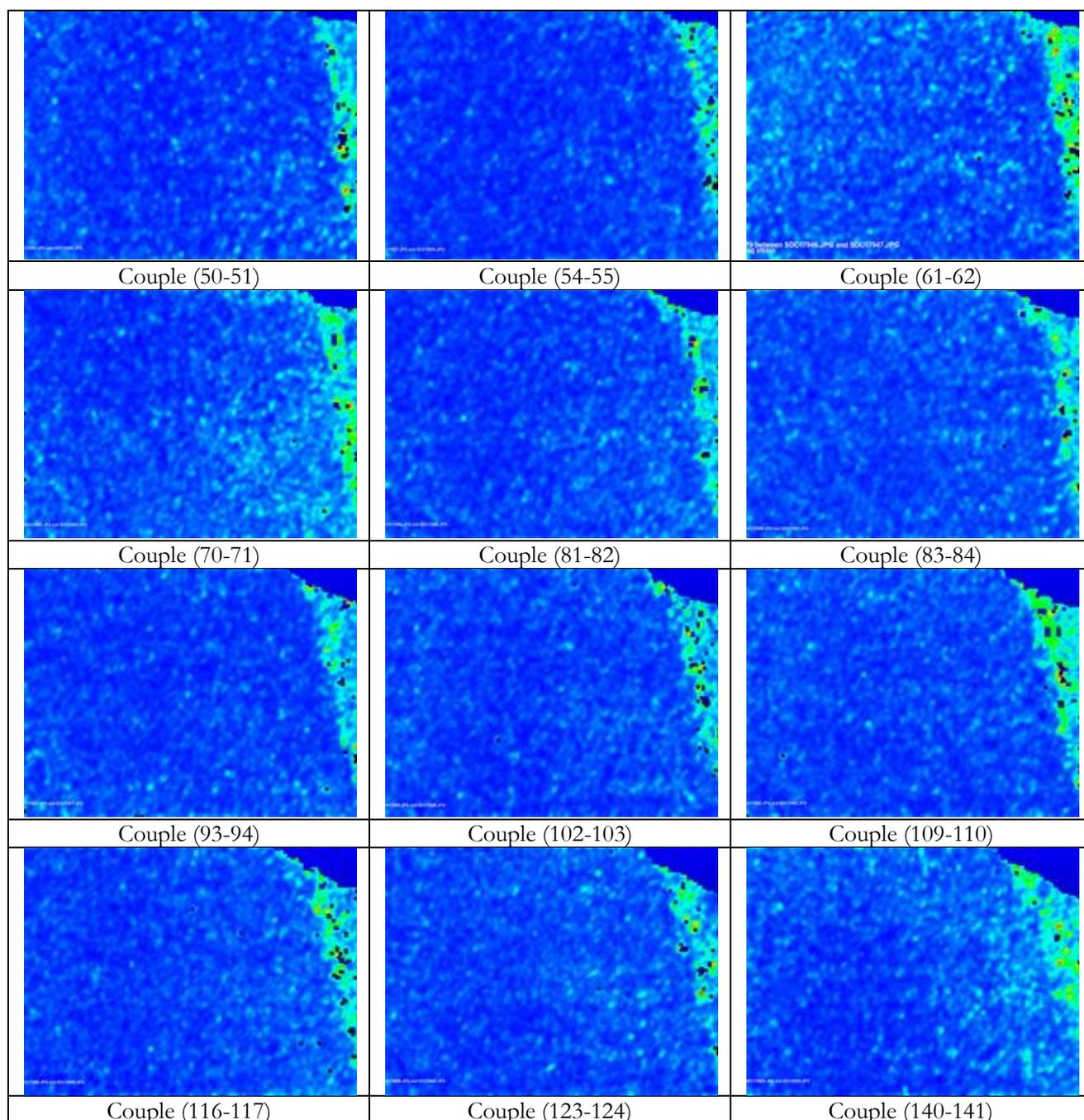
Les résultats présentés seront toujours exprimés en cisaillement maximum et le sol conforté est le même, c'est à dire sable de carrière de « sidi Ali Benyoub » commune de la wilaya de sidi bel abbés.

Les essais sont réalisés au laboratoire génie civil environnement par abréviation L.G.C.E à université Djilali Liabés de sidi bel abbés par Mr. BOUROKBA en 2019 et ce dans le cadre de collaboration inter universités. [53]

4.4.2 Essai avec confortement à 20 % des grains de déchets de béton

Tableau 4.6. Un confortement avec 20 % des grains de déchets de béton [53]





Commentaire :

Ce type d'essai semble prometteur et procure des résultats satisfaisants par rapport à l'évolution de la rupture. Aux premiers incréments, le sol est en équilibre. La paroi se déplace de façon continue et, quelques incréments de déplacements plus tard et tardivement, la rupture apparaît. Cette dernière est localisée au couple (19-20) correspondant à un déplacement de la paroi de 4mm pour une intensité en cisaillement maximum de 6,3%.

Le phénomène se poursuit et un affaissement du sol est observé au couple (31-32). Le coin de coulomb subit des déformations et l'essai est conduit jusqu'à la fin ($D=30\text{mm}$) où l'on observe un affaissement du milieu mais qui reste néanmoins inférieur à celui réalisé sans renforcement. Le volume de sol déplacé est de 236 cm^3 ce qui représente 1,72% du volume total du sol étudié.

4.4.3 Comparaison des résultats

Il est clair et évident que comparativement aux essais sans renforcement, les essais avec renforcement retardent l'apparition de la rupture. La rupture est moins violente et entraîne moins de masse glissante, ce qui peut offrir une sécurité supplémentaire car il rend le phénomène moins dommageable.

Une étude comparative est réalisée pour toutes les variantes. Elle est regroupée au tableau ci-dessous.

Tableau 4.7. *Evolution des propriétés de la masse glissante [53]*

Masses glissantes	0%	10%	15%	20%
Surface (cm ²)	39	32,67	26,84	23,6
Longueur (cm)	11,16	10,92	8,93	8,59
Profondeur (cm)	5,71	5,37	5,24	5,09
Volume (cm ³)	390,0	326,7	268,4	236,0
% du volume total (%)	2,836	2,376	1,952	1,716
Réduction vol (%)	0	16	31	39
Réduction longueur (%)	0	2	20	23
Réduction prof (%)	0	6	8	11

La longueur et la largeur sont illustrées sur la figure suivante :

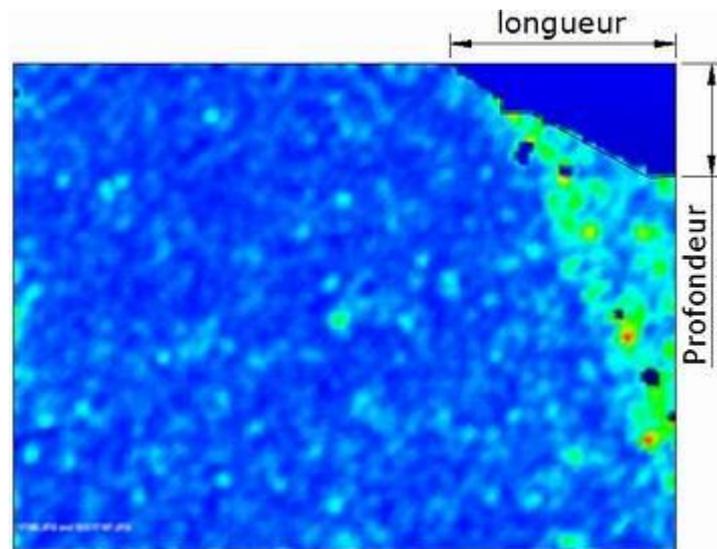


Figure 4.2 : *dimensions de la masse glissante [53]*

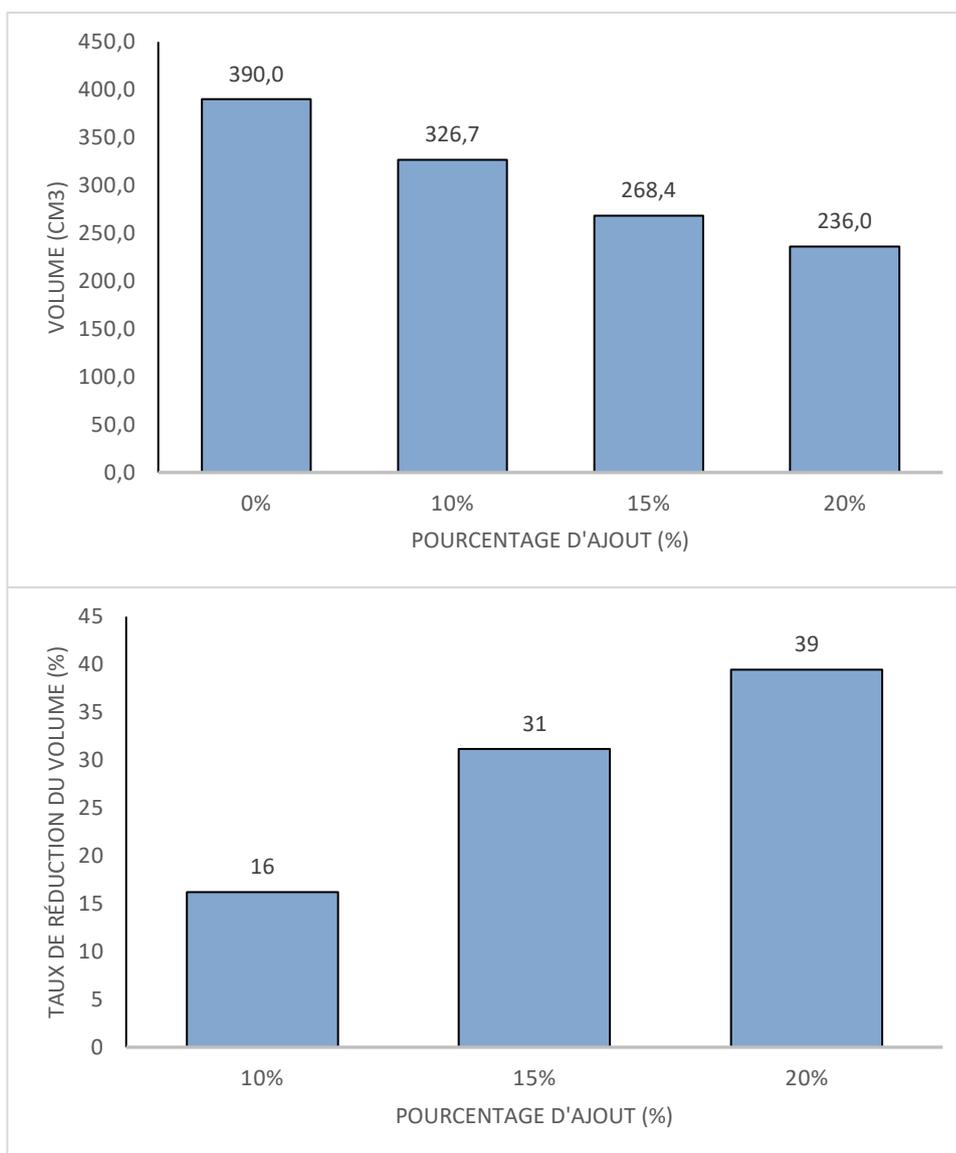


Figure 4.3 : Volumes des masses glissantes et taux de réduction en fonction des pourcentages des mélanges [53]

D'après les graphes, il existe une proportionnalité entre le volume de la masse glissante et le pourcentage de substitution en déchets de béton. En effet plus ce pourcentage augmente plus la masse glissante diminue. Et l'on remarque un taux de réduction de **39%** de la masse glissante pour un mélange à **20% en substitution**, ce qui est très encourageant.

La relation masse glissante est inversement proportionnelle au pourcentage de substitution de déchets en béton et l'on note que la relation est linéaire.

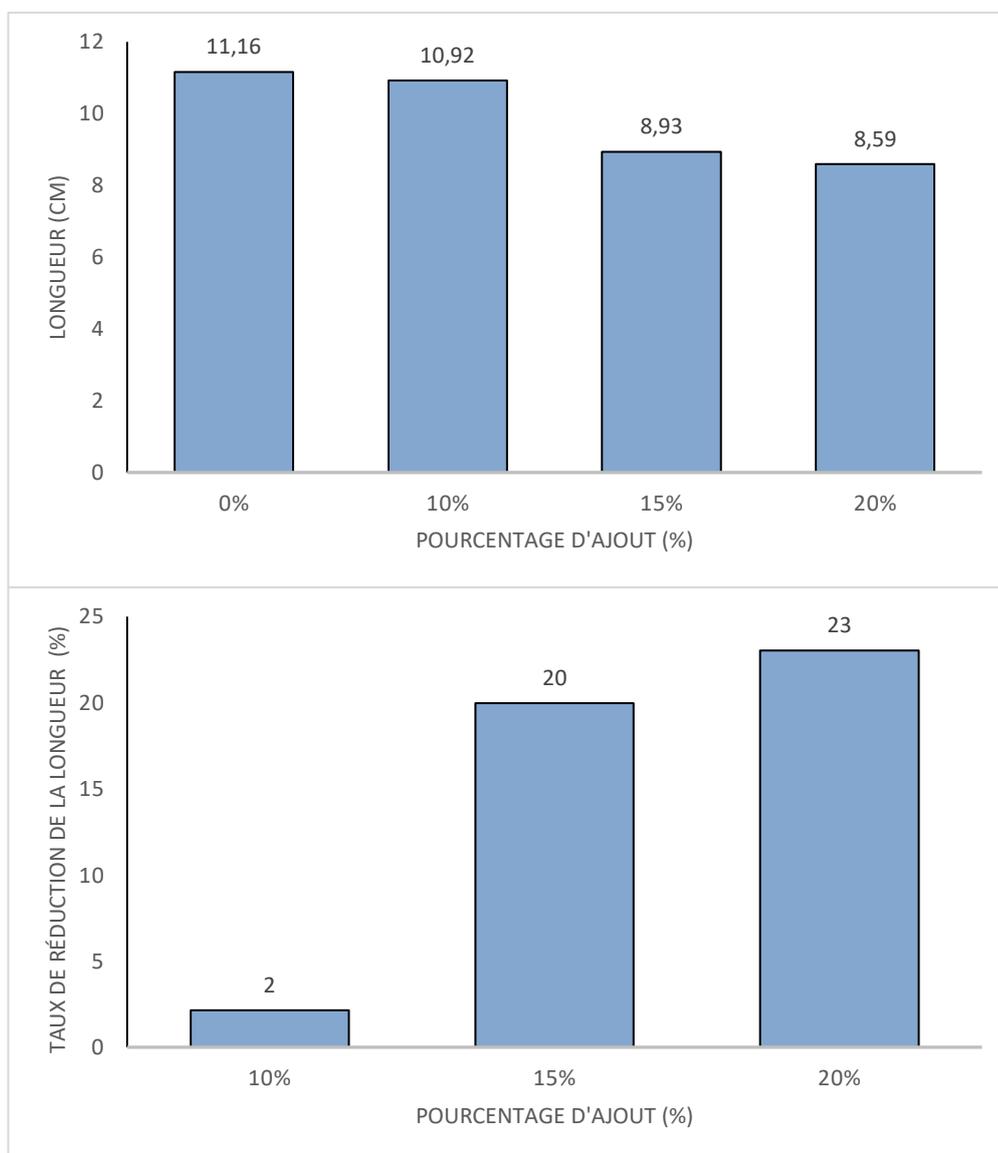


Figure 4.4 : Longueurs des masses glissantes leurs taux de réduction en fonction des pourcentages des mélanges [53]

L'étude s'intéresse de près à la réduction de la longueur qui constitue une sécurité supplémentaire surtout pour la construction de projets à proximité des zones de rupture éventuelles.

Pour ce qui est de la réduction de la longueur de la masse glissante, là aussi on note une diminution croissante avec le pourcentage de substitution en déchets de béton. La longueur passe de 11,16 cm à 8,59 cm quant au taux de réduction, il enregistre un saut spectaculaire en passant de 2% pour un mélange de 5% à 20% pour celui à 10%. Enfin, les mélanges de **20% de substitution** confèrent les meilleurs résultats en enregistrant le meilleur taux de réduction estimé à **23%**. Cependant et au vu de la complexité et le caractère aléatoire de la cinétique du mouvement de la masse glissante, l'on comprend pourquoi la relation longueur- pourcentage de substitution n'est pas linéaire.

Les mêmes observations sont reportées sur la profondeur de glissement ou le taux de réduction le plus élevé **11%** revient au mélange à **20% de substitution** en déchets de béton.

4.5 DECHETS DE VERRE

Le verre existe dans la nature et l'Homme l'exploite depuis des milliers d'années. Les utilisations du verre sont aujourd'hui très variées, notamment comme contenant pour les produits liquides ou alimentaires, mais aussi dans différentes industries. Le verre se collecte depuis le début des années 70, ce qui en fait un pionnier des déchets valorisables, d'autant plus intéressant qu'il se recycle à l'infini et à 100 % [56]

4.5.1 Valorisation des déchets de verre

Deux sources permettent le recyclage du verre :

- **Le verre ménager (emballages alimentaires)**, récupéré via les conteneurs installés dans les villes ou directement dans les bacs individuels des particuliers. Ce verre représente 85 % du recyclage global. Son avantage : une composition chimique stable et homogène.
- **Le verre industriel**, composé de verre plat ou creux. D'excellente qualité, il présente cependant l'inconvénient d'avoir une composition chimique variable.

A son arrivée au centre de traitement, **le verre subit différentes sortes de tris pour éliminer :**

- **Les capsules** par tri magnétique,
- **Les bouchons en céramique** par tri optique,
- **Les étiquettes** par soufflage.

Ensuite, le verre est broyé pour être transformé en calcin. Cette nouvelle matière est livrée aux verreries où elle est portée en fusion dans un four à plus de 1 500°C pour obtenir une pâte de verre. Le verre en fusion passe alors dans un moule pour fabriquer de nouveaux emballages. Il est ensuite refroidi délicatement avant d'être soumis au contrôle qualité.

4.6 DECHETS DE CERAMIQUE

« Céramique » désigne à la fois le matériau et la technique qui sert à le fabriquer. En fonction de leur composition chimique et de la température de cuisson, les matériaux céramiques disposent de propriétés spécifiques qui font varier leur usage.

La céramique est le plus souvent constituée d'alumine, de kaolin ou de silice. Ces matières premières sont transformées sous l'effet de températures élevées. Cette cuisson apporte aux produits une très grande solidité et leur permet de résister à l'usure ou la chaleur. Les céramiques disposent aussi de véritables propriétés isolantes.

Pendant des siècles, les céramiques ont servi à fabriquer des poteries, des faïences et des porcelaines. Aujourd'hui, elles sont très présentes dans les matériaux du bâtiment comme le carrelage ou la porcelaine sanitaire par exemple. [57]

Plus récemment, son usage s'est ouvert à d'autres industries. Appelées « céramiques techniques » elles se retrouvent comme isolant électrique, éléments de chauffage, renfort aux matériaux composites métalliques, Valorisation des déchets de céramique :

Les plus grands volumes de déchets de céramique proviennent des chantiers de démolition ou des travaux publics. Considérées comme inertes, les céramiques ne se décomposent pas, ne polluent pas les eaux de ruissellement et ne posent pas de problème pour la santé. Cependant, elles représentent des quantités importantes et nécessitent d'être traitées. Le recyclage de la céramique commence une fois triée et isolée des autres déchets.

Les céramiques sont d'abord concassées par des engins adaptés, le plus souvent installés directement sur les chantiers. Ensuite, on les passe au crible pour améliorer la pureté du produit fini. Un contrôle final permet de valider sa qualité et exclure tout risque de pollution.

Trois grandes manières de recycler les déchets de céramique :

- **Le remblai** : il représente la principale façon de réutiliser les céramiques. Il peut être réemployé directement in situ selon le type de chantier ou alors être vendu à des particuliers ou des professionnels pour renforcer et terrasser certains sols.
- **Les routes** : les granulats obtenus après broyage servent généralement au secteur du BTP pour le terrassement ou comme sous-couche pour la création de nouvelles routes.
- **Le béton** : si le granulats de céramique est d'excellente qualité et conforme à un cahier des charges précis (dureté, propreté, granulométrie...), il peut être utilisé dans la composition du béton.

4.7 RECYCLAGE DE L'ASPHALTE

Pour produire de l'asphalte de construction à partir de granulats et de bitume, un processus de malaxage thermique est nécessaire, et il requiert une centrale d'enrobage. Dans la fabrication de « l'or noir », l'asphalte de recyclage est une ressource qui occupe une place de plus en plus prépondérante partout dans le monde. S'ajoute à cela le fait que, dans les pays industrialisés, la réfection des routes l'emporte depuis longtemps sur la construction neuve.

Et qui dit réfection, dit le rabotage de millions de tonnes d'enrobé. Une tâche qui revient principalement aux fraiseuses à froid. Elles sont le premier maillon de la chaîne de traitement, suivies des installations de concassage, de criblage et des centrales d'enrobage, et enfin des finisseurs de routes qui assurent la pose du nouvel enrobé auquel l'ancien asphalte a été incorporé. La parfaite coordination des machines, l'utilisation de méthodes innovantes et de technologies modernes déterminent l'efficacité de cette chaîne de processus. Le bon déroulement de toutes les étapes accroît la rentabilité et la durabilité du recyclage de l'asphalte. [58]

4.7.1 Le challenge : augmenter la quantité d'asphalte recyclé

Dans de nombreux pays, il n'existe quasiment plus aucun chantier qui n'utilise pas au moins une partie d'asphalte recyclé. Ainsi, en 2018, en Allemagne, un quart de l'asphalte produit (41 millions de tonnes) l'était à partir d'asphalte recyclé (10,5 millions de tonnes). Avec un volume total de recyclage de 12 millions de tonnes d'asphalte l'année dernière, cela représentait une revalorisation de 87 %.

Le recyclage de l'asphalte pour la réfection routière est un impératif économique et écologique afin de préserver les ressources naturelles. L'industrie est donc constamment à la recherche de solutions pour optimiser les processus dans les centrales d'enrobage. Augmenter la quantité d'asphalte recyclé utilisée dans toutes les formulations des technologies de retraitement à chaud comme à froid constitue une approche majeure. L'utilisation de la quantité d'adjonction maximale possible est bénéfique non seulement pour l'environnement, mais aussi en termes de prix de l'enrobé.

Dans le cas d'une méthode classique de recyclage à écoulement parallèle, la température est limitée à 130°C en raison des émissions de gaz d'échappement, mais la température des gaz d'échappement est supérieure pour des raisons physiques, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie et une sollicitation accrue du système de dépoussiérage. Afin de porter l'enrobé à une température de 160 °C, le minéral blanc doit alors être surchauffé.

4.7.2 La solution : à contre-courant – un taux de recyclage de 90 % + X

À la différence des tambours de recyclage parallèles classiques, dans les tambours de recyclage avec générateur de gaz chaud, la matière recyclée est chauffée de manière indirecte selon un procédé à contre-courant. La matière circule dans le tambour dans le sens opposé à la source de chaleur. Ce procédé permet d'atteindre des températures de matériau plus élevées et en même temps, une réduction de la température des gaz d'échappement. La température de soufflage de 160 °C correspond à la température de traitement ultérieure, et la température des gaz d'échappement se situe au-dessus du point de rosée à environ 100 °C. Tout cela est uniquement possible avec l'utilisation d'un générateur de gaz chaud, car le chauffage direct brûlerait la matière recyclée et la rendrait inutilisable. Le brûleur de l'unité de bitume, le générateur de gaz chaud, le tambour de recyclage, la hotte d'aspiration et le système de circulation de l'air et de dégazage sont inter-compatibles. Effet positif : le minéral blanc n'a plus besoin d'être surchauffé, ce qui génère une nette économie d'énergie. Le principe du contre-courant permet de réduire significativement les émissions (instructions techniques sur la qualité de l'air) et, en fonction de la qualité de la matière recyclée, d'atteindre des taux de recyclage de 90 % + X. L'investissement dans cette technique aussi verte qu'efficace n'en est que plus attrayant.

La technique peut devenir encore plus écologique si les étapes en amont, à savoir l'ajustement de la courbe granulométrique et le fraisage de l'asphalte, sont réalisées elles aussi avec des méthodes et des technologies de pointe.

4.7.3 Installations de criblage : optimiser la courbe granulométrique pour augmenter le taux d'adjonction de matière recyclée

La quantité théorique la plus élevée possible d'asphalte recyclé dépend essentiellement de sa courbe granulométrique ou, autrement dit, des quantités, dimensions et compositions des substances qu'il contient. L'objectif est donc ici que la courbe granulométrique de l'asphalte recyclé s'approche au plus près de celle souhaitée pour l'enrobé final. C'est le rôle des installations de criblage mobiles. Elles permettent la réutilisation immédiate de jusqu'à 80 % d'asphalte recyclé (fraisats). Cela réduit considérablement les coûts de traitement qui sont nettement inférieurs à ceux du retraitement intégral du fraisait.

En cas de retraitement intégral, y compris des granulats surdimensionnés, il faudrait en plus utiliser un broyeur, qui serait équipé d'un crible secondaire.

4.7.4 Un fraisage « intelligent » : économique et respectueux de l'environnement

Tout commence par l'enlèvement et la récupération de l'asphalte de la structure de chaussée. Les fraiseuses à froid enlèvent l'asphalte couche après couche, si bien que les fraisats, séparés par type d'enrobé, peuvent être réintégrés dans le cycle des matériaux selon leur aptitude à être utilisés en techniques de construction et leurs propriétés qualitatives. La récupération sélective des couches de roulement, de liaison et portante présente à elle seule des avantages indéniables en termes d'environnement et de rentabilité.

Si l'on tient compte également du fait qu'une technologie de fraisage intelligente est utilisée, la réutilisation des granulats fraisés dans la centrale d'enrobage n'en est que plus économique. Le système d'arrosage d'eau des fraiseuses à froid, asservi à la charge, joue ici un rôle majeur. L'eau nécessaire au refroidissement des pics de fraisage est régulée en fonction de la charge du moteur et de la vitesse de fraisage. L'activation automatique du circuit d'eau au moment du positionnement du tambour de fraisage, ou sa désactivation à l'arrêt des travaux de fraisage, permet une réduction considérable de la consommation d'eau, qui peut atteindre 20 %. Au final, les pics ont une longévité accrue, la fraiseuse à froid doit être moins souvent ravitaillée en carburant, et les périodes d'immobilisation sont plus courtes. Et ce, pour la plus grande satisfaction non seulement du conducteur de la fraiseuse, mais aussi du responsable de la centrale d'enrobage. Grâce à la consommation d'eau réduite, l'humidité résiduelle du granulat fraisé est elle aussi réduite et s'élève à 3 à 4 % par tonne d'asphalte. Sans les technologies de fraisage de pointe, elle serait plus élevée.

Le séchage nécessaire pour réaliser le nouvel enrobé dans la centrale d'enrobage se calcule selon une équation très simple : une matière de départ de 1 % plus sèche permet d'économiser 1 l de fioul par tonne d'asphalte fini pendant son retraitement en enrobé de recyclage. S'ajoute à cela la réduction des émissions de CO₂ résultant des plus faibles besoins en énergie.

4.8 CONCLUSION

A la fin de ce chapitre, on tire les conclusions suivantes :

- Il est possible à l'aide du modèle réduit de simuler au mieux le phénomène de poussée des terres derrière les ouvrages de soutènement ;
- Les déchets issus de matériaux de construction peuvent être valorisés dans le domaine de la géotechnique. Pour les ouvrages de soutènement mais également comme solution de stabilisation aux sols expansifs ;
- L'emploi de déchet de brique à 40% de substitution a posé un problème lors du traitement par corrélation d'images, ce qui a amené la réflexion sur l'idée de revoir la granulométrie du matériau de substitution ;
- L'ajout de nappes en marbre peut être retenu comme solution de renforcement sous certaines conditions qui reste à déterminer à savoir, sa teneur en eau, son épaisseur, sa longueur et son adhérence ;
- La substitution en déchets de béton à **20%** donne les meilleurs résultats. La rupture tarde à apparaître, le volume de la masse glissante est fortement réduit à **39%**, et enfin la longueur de glissement enregistre le taux de réduction le plus élevé à **23%** offrant ainsi une sécurité supplémentaire en cas de sinistre ;
- D'autres déchets de matériaux peuvent être valorisés à savoir, l'asphalte, le verre et la céramique auquel cas les perspectives possibles dans le domaine de valorisation restent prometteuses.

CONCLUSION GENERALE

A L'issue du mémoire, nous arrivons à la conclusion générale ou certains passages doivent être pris en considération :

- La Poussée et la butée sont liées à la nature du milieu ;
- La pression exercée par les terres se situe entre deux limites qui ne sont obtenues que par le déplacement de l'écran soit dans le sens de la décompression dans le cas de la poussée ou dans le sens de la compression dans le cas de la butée ;
- Les ouvrages de soutènement constituent des éléments très importants dans la sécurité, la stabilité et la durabilité des projets de génie civil.
- Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités ;
- Les granulats de béton recyclé peuvent être réutilisés en géotechnique routière ou derrière les murs de soutènement ;
- Performance de durabilité du béton vert incorporant divers déchets peut être envisagée ;
- L'emploi de déchet de brique à 40% de substitution a posé un problème lors du traitement par corrélation d'images, ce qui a amené la réflexion sur l'idée de revoir la granulométrie du matériau de substitution ;
- L'ajout de nappes en marbre peut être retenu comme solution de renforcement sous certaines conditions qui reste à déterminer à savoir, sa teneur en eau, son épaisseur, sa longueur et son adhérence ;
- La substitution en déchets de béton à **20%** confère les meilleurs résultats. La rupture tarde à apparaître, le volume de la masse glissante est fortement réduit à **39%**, et enfin la longueur de glissement enregistre le taux de réduction le plus élevé à **23%** offrant ainsi une sécurité supplémentaire en cas de sinistre ;
- D'autres déchets de matériaux peuvent être valorisés à savoir, l'asphalte, le verre et la céramique auquel cas les perspectives possibles dans le domaine de valorisation restent prometteuses.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. COSTET et G. SANGLERAT, Ancien élève de l'école polytechnique Ingénieur général des ponts et chaussées ,ingénieur civil des ponts et chaussées Ingénieur en chef de secotec professeur a l'école centrale de Lyon.
- [2] C. Coulomb, Essai sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture”, Mémoires de mathématiques et de physique présentés à l'Académie royale des sciences par divers savants, et lus sans ses assemblées, Vols. %1 sur %2 7,343-382, 1773.
- [3] R. W. [W. Rankine, “On the Stability of Loose Earth”, Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 147, London, 1857, pp. 9-27.
- [4] G.Filliat, La pratique des sols et fondations, Moniteur, Éd., 1981.
- [5] F. Schlosser, Professeur à l'école Nationale des ponts et chaussées President-directeur Général de Terrasol.
- [6] P. G et H. B, Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles éd., 2002.
- [7] A. Bouafia, Calcul pratique des fondations et des soutènements- OPU, 2005.
- [8] D. Gérard et R. Paul, Aide mémoire mécanique des sols –ENGREF, 2005.
- [9] G. Mebarki, «pathologies-des-ouvrages-de-soutnements,» Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou , [En ligne]. Available: <https://www.slideshare.net/GhilesMEBARKI/pathologies-des-ouvrages-de-soutnements>. [Accès le 25 Janvier 2018].
- [10] «article L.541-3 Code de l'Environnement - Livre V, Titre IV – chapitre 1er relatif à L'élimination des déchets et à la récupération des matériaux,» *Legifrance*, p. 561562, 2007-2017.
- [11] C. Cazenave, «Déchets dans le monde : c'est l'overdose !,» 23 07 2018. [En ligne]. Available: <https://www.geo.fr/environnement/dechets-dans-le-monde-c-est-l-overdose-185938>. [Accès le 24 07 2018].
- [12] Mamitiana, «Les problèmes environnementaux majeurs en 2019,» 29 01 2019. [En ligne]. Available: <https://www.bio-ecoloblog.com/les-problemes-environnementaux-majeurs-en-2019/>.
- [13] B. Djemaci, La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité. Sciences de l'environnement, Université de Rouen: Université de Rouen, 2012.
- [14] K. ELLEMANN, Interviewee, [Interview].
- [15] «cniid,» 12 02 2014. [En ligne]. Available: <http://www.cniid.org/Incineration-la-fin-du-mythe-danois,749>.
- [16] C. Saïssset, «actu-Environnement.com,» 05 11 2012. [En ligne]. Available: <https://www.actu-environnement.com/ae/news/couts-gestion-dechets-menagers-fnade-amorce-16953.php4>.
- [17] «ADEME.fr,» entreprises témoins , 07 2013. [En ligne]. Available: http://multimedia.ademe.fr/catalogues/cout_complet_dechets/ADEME_Couts_complets_Fiche_chapeau.pdf.

- [18] K. Tedjani, «Gestion des déchets en Algérie : Pourquoi il est vital de préférer la politique de la prévention à celle de l'urgence...», 28 07 2017.
- [19] Entreprises et artisans du BTP responsables d'entreprises, Gestion et valorisation des déchets de chantier de construction, c. d. t. Chefs d'équipe, Éd., centres de formations Lycées professionnels, CFA-BTP: L'ADEME Haute-Normandie et L'ARE-BTP Haute-Normandie, pp. 06-07.
- [20] L. E. d. T. P. e. l. M. d'Ouvrages, Guide des déchets des travaux publics, pp. 06-14.
- [21] l. e. d. t. P. e. l. M. ouvrages, guide des déchets des travaux publics, pp. 17-29.
- [22] F. S. B. A. I. A. M. M. J. M. Faiz Z., Environ. Sci. 3 (6) (2012) 1129-1136..
- [23] B. N. B. M. A. M. K. T. A. J. M. 2. Kherbache S., Environ. Sci. 7 (1) (2016) 18-29..
- [24] H. B. T. A. D. Y. J. M. .. Handel N., . Environ. Sci. 2 (S1) (2011) 520-525..
- [25] J. R. Z. J. K. F. E. J. 4. Chaid R., Environ. Civil Eng. 15(3) (2011) 427-445..
- [26] B. M. Hebhouh H., Revue Nature et Technologie. 4 (1) (2011) 41-46.
- [27] E. G. M. M. K. H. B. S. P. Senhadji Y., Technology. 254 (2014) 314–323..
- [28] M. I. L. A. C. M. C. A. D. A. J. M. Lasfar S., Environ. Sci. 6 (11) (2015) 3002-3014..
- [29] L. R. S. J. Dupain R., Granulats, sols, ciments et bétons caractéristiques des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition Casteilla. Paris 2000..
- [30] E. G. K. H. M. M. B. A. 9. Senhadji Y., European Journal of Environmental and Civil Engineering. 16 (1) (2012) 77-96..
- [31] D. BROCHARD, Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux, 1 éd., Ile , 2003, pp. 12-18.
- [32] A. K. V. Sudarshan D. Kore, «Conception rentable d'un béton durable en utilisant des déchets de marbre comme agrégats grossiers», *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES*, 16 11 2016.
- [33] Spécification pour le ciment de pouzzolane Portland - IS:1489(part-1)-1991,, New Delhi: Bureau of Indian Standards (BIS)., 1991.
- [34] F. F. N. S. F. C. S. For, Spécification des granulats grossiers et fins de sources naturelles pour le béton,, . New Delh, Bureau of Indian Standards (BIS), 1970..
- [35] S. S. J. N. S. P. M. Kisan, Specification for Concrete Admixture, New Delhi, Bureau of Indian Standards (BIS)., 1999.
- [36] Spécification pour les granulats grossiers et fins provenant de sources naturelles de béton,, Bureau of Indian Standards.,
- [37] S. P. S. a. ., B. S. b. K. Kapoor a, «Évaluation des propriétés de durabilité du béton autocompactant fabriqué avec des agrégats de béton recyclés», *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES*, 26 06 2016.

- [38] *. A. M. a. J. C.-G. b. Tourkia Guerzou a, «Etude des propriétés des bétons à base d'agrégats recyclés pré-saturés,» *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES*, 07 10 2018.
- [39] M. e. A. M. Al-Sharif, «Utilisation de boues brûlées comme nouvel agent stabilisant des sols,» pp. 378-388, 2000.
- [40] R. e. K. E. Parsons, «Utilisation de la poussière de four à ciment pour la stabilisation des sols,» pp. 1124-1131, 2004.
- [41] j. L. J. e. C. J. Seda, «Utilisation bénéfique du caoutchouc de pneu de rebut pour l'atténuation du potentiel de gonflement dans les sols expansifs,» pp. 1-9, 2007.
- [42] C. Okagbue, «Stabilisation de l'argile à l'aide de cendre de bois,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, pp. 14-18.
- [43] A. J. J. e. G. K. Choudhary, «Utilisation des déchets plastiques pour améliorer les sous-grades dans les chaussées flexibles,» pp. 320-326, 2010.
- [44] A. e. S. G. Rao, «Utilisation des déchets industriels dans les chaussées posées sur des couches d'argile expansives,» pp. 4418-4427, 2011.
- [45] M. K. Y. e. E. F. Saltan, «Utilisation des déchets de pierre ponce pour le sol argileux des chaussées,» *Journal des matériaux en génie civil*, 2011.
- [46] B. e. Y. X. Zhang, «Évaluation expérimentale de la performance des boues de chaux dans la stabilisation de la plate-forme,» pp. 3775-3785, 2012.
- [47] G. K. P. A. A. e. S. Ransinchung, «Evaluation de l'efficacité des amendes obtenues à partir de dalles de béton démolies comme stabilisateur de sol,» *Journal de recherche sur les routes IRC.*, 2013.
- [48] J. e. W. P. Thomas, «Gestion des déchets de construction en Inde,» *American Journal of Engineering Research*, vol. 2, 2013.
- [49] G. C. M. e. d. M. L. Vizacarra, «Applicabilité des cendres d'incinération de déchets solides municipaux sur les couches de base de la chaussée,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014.
- [50] N. Rifai. et Yasufuku, «Effet de l'utilisation des cendres volcaniques comme matériau de substitution pour la stabilisation des sols du point de vue du géo-environnement",» pp. 138-147, 2014.
- [51] J. A. I. e. T. A. Edeh, «Évaluation du sol latéritique stabilisé par des cendres de sciure comme matériau de revêtement routier,» *Journal des matériaux en génie civil*, 2014.
- [52] P. R. AE, GESTION DES DECHETS EN ALGERIE, 06 FEVRIER 2016.
- [53] I. BOUROKBA, VALORISATION DES DECHETS BETON DANS LES RENFORCEMENTS DES SOL SOUMIS OU PHENOMENE DE POUSSEE, SIDI BELABBES: DJILLALI LIABES, 2019.
- [54] O. Chabane et M. Z. Chelghaf, Influence de l'ajout des déchets de brique sur la réponse d'un remblai derrière les ouvrages de soutènement, Sidi Bel Abbes: Université Djillali Liabes, 2019.
- [55] K. TAHARI, RENFORCEMENT D'UN SOL GRENU PAR AJOUT DE DECHETS DE MARBRE, SAIDA: DR.TAHER MOLAY, 2018.

- [56] DECHETS INRETS /CHANTIER, www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/verre.
- [57] DECHETS INERTS/CHANTIER, www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/ceramique.
- [58] A. MICHEALA et L. MARIO, RECYCLAGE DE L'ASPHALTE, reinhard-wirtgen-str.2:
53578WINDHAGEN.