

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par : BARKA ZEINEB & AIT BRAHIM NEHLA

---

---

# ETUDE DU COMPORTEMENT D'UNE MARNE ARGILEUSE TRAITÉE POUR VALORISATION DANS LES PROJETS ROUTIERS

---

---

Sous la direction de : Dr BOUTELDJA FATHE

---

Juin 2017

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## DEDICACE

---

*Je dédie ce mémoire de fin d'études*

*A*

*Ma chère grande mère qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier  
pour moi*

*Ma très chère mère et mon très cher père, pour leur soutien, et les  
sacrifices et tous leurs efforts consentis pour mon éducation et ma  
formation*

*A mon frère et ma petite sœur  
A toute ma famille*

*A ma chère sœur BarkaZeinebavec qui j'ai traversée toutes les  
épreuves de cette année inoubliable,*

*A ma copine BelkhaneOumaimatu as toujours été présente pour les  
bons conseils, malgré la distance.*

*A Monsieur le Doctorant BensaïfiSadekelaminqui nous apporta son  
soutien,*

*Je tiens a remercié également « Le Jasmin » pour sa petite  
contribution en étant le principal fournisseur « de la coquille d'œufs »  
qui m'a permis la réalisation de mon projet fin d'étude*

*Ait Brahim Nehla*

## DEDICACE

---

*Je dédie ce mémoire de fin d'études*

*A Ma très chère mère*

*Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi*

*A Le meilleur papa*

*Aucune dédicace ne se saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours pour vous*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être*

*A mes très chers frères HAMZA, ISLEM et ma petite sœur RAHMA  
Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous*

*A mon très cher oncle SIDALI BELAID et toute sa famille*

*Vous avez toujours été présents pour les bons conseils, Je vous aime*

*A mes copines*

*BELKHAÏNE OUMAIMA malgré la distance tu es toujours dans mon cœur*

*AIT BRAHIM NEHLA je te souhaite un avenir plein de joie et de bonheur*

*A Monsieur le Doctorant BENSALFI Elamin*

*Un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts fournis.*

*BARKA Zeineb*

## REMERCIEMENTS

---

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir permis d'aller jusqu'à la fin de notre travail et de pouvoir le mettre en forme dans le présent manuscrit.

Nous tenons à exprimer tout d'abord nos remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer notre travail de fin d'étude.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur Dr BOUTELDJA Fathe, qui a su nous laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de nos travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé, aussi pour son dévouement au bon déroulement de notre travail notamment nos essais réalisés en laboratoire et aussi pour tous ses conseils avisés dans de nombreux domaines : scientifiques, techniques, rédactionnels.....

Nous tenons à remercier Monsieur le Doctorant BensaifiSadekElamin, dont l'aide sur le plan expérimental, notamment nos essais réalisés en laboratoire, qui ont nécessité beaucoup de rigueur, d'assiduité et de patience. Et aussi pour sa gentillesse et sa disponibilité qui ont permis de mener à bout ce projet fin d'étude.

Nous remercions aussi Dr BENYAGHLA Hacène, le responsable des stages au Département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université 08 Mai 1945 de Guelma.et le Laboratoire des Travaux Publics de l'EST / Direction Régionale d'Annaba, de nous avoir accueillis pendant notre période de stage.

Nous remercions aussi Pr NOUAOURIA Mohamed saleh, le directeur de laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université de 08 Mai 1945 de Guelma de nous avoir accueilli au sein Laboratoire.

Nous tenons à exprimer nos reconnaissances et nos gratitude à toutes celles et tous ceux qui nous ont aidés dans la Préparation de ce modeste travail.

## RESUME

---

De nombreux projets routiers souffrent de manque de matériaux adéquats à proximité du chantier pour son réemploi dans la construction des routes. Dans ce travail, nous avons étudié le comportement d'une marne originaire de la région de Nechmayadans la wilaya de Guelma, après avoir subi un traitement avec un nouveau co-produit (laitier de haut fourneau+Coquille d'œuf) ce qui permis de valoriser ce type de matériau dans les constructions routières et résoudre ainsi les problèmes environnementaux liés aux énormes dépôts de marne sur site.

Dans ce contexte nous sommes arrivés à travers des essais de compactage, de plasticité et de résistance à compression simple sur différents échantillons de marne traitée à différents pourcentages de ciment et LHF+Coquille d'œuf, à améliorer les caractéristiques de ce matériau naturelle usuellement mis en dépôt à cause de ces caractéristiques initialement médiocres.

**Mots clés :** marne argileuse, traitement, compactage, plasticité, compression

## ABSTRACT

---

Many road projects suffer from the material lack proximity adequate for its Re-use in the roads constructions, In this discussion we have study the marl behavior form 'NECHMAYA)' Region in Guelma city, after being treated with new Co-product (blast furnace slag+the egg shell) which allowed the valorization of this type of material in road constructions and also solve the environment problems related to the huge deposite of marl on the site

In this context we arrivedthrough by the compaction and plasticity as well as the resistance to the simple compression tests on different marl specimens treated to different percentages of cement and (Blast furnace slag+the egg shell) to improve the natural characteristic of this material usually deposited because of these initially mediocre characteristics.

**Keywords:** clay marl, treatment, compaction, plasticity, compression

## ملخص

---

تعاني مختلف الورشات من نقص التربة الصالحة للاستعمال في انجاز مشاريع الطرقات لهذا يتطلب جلبها من الأماكن البعيدة مما يؤدي إلى ارتفاع كلفة المشاريع. إن الهدف من قيامنا بدراسة طين بلدية النشماية و معالجته بالاسمنت و خبث الأفران العالية و قشر البيض لغرض استخدامه في مشاريع الطرقات و المحافظة على البيئة و ترك مساحة شاسعة من المكان.

من خلال التجارب التي قمنا بها على عدة عينات من الطين الممزوج بنسب مختلفة من الاسمنت و خبث الأفران العالية و قشر البيض و المحفوظة لمدة 28 يوم توصلنا إلى نتائج متمثلة في تحسين مقاومتها للقوة الضاغطة عند إضافة نسب محددة من المواد المعالجة.

**كلمات مفتاح :** الطين, معالجة, اللدونة, الضغط.

# SOMMAIRE

---

<b>DEDICACE</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>V</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTES DES FIGURES</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTES DES TABLEAUX</b> .....	<b>XII</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Les sols fins dans les terrassements</b> .....	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>2. TRAVAUX DE TERRASSEMENT</b> .....	<b>3</b>
<b>3. LES SOLS FINS ET LEURS CARACTERISTIQUES</b> .....	<b>4</b>
3.1. DEFINITION .....	4
3.2. CLASSIFICATIONS DES SOLS .....	5
<b>4. COMPOSITION MINERALOGIQUE DES SOLS FINS</b> .....	<b>8</b>
4.1. LES MINERAUX PRIMAIRES .....	8
4.2. LES MINERAUX SECONDAIRES.....	8
4.3. LES SELS SOLUBLES .....	8
4.4. LES MATIERES ORGANIQUES .....	9
<b>5. MICROSTRUCTURE DES SOLS FINS</b> .....	<b>9</b>
<b>6. DIFFERENTS TYPES DES SOLS FINS</b> .....	<b>11</b>
6.1. LES ARGILES .....	11
6.2. LES LIMONS .....	15
6.3. LES MARNES.....	16
6.4. LES VASES.....	18
6.5. LES TOURBES.....	18
<b>7. PROBLEMES LIEE AUX SOLS FINS DANS LES PROJETS ROUTIERS</b> .....	<b>19</b>
7.1. PROBLEMES DE STABILITE.....	19
7.2. PROBLEMES DE TASSEMENT .....	20
7.3. PROBLEME DE GONFLEMENT .....	22
7.4. PROBLEME D'EROSION .....	23
7.5. EFFORTS SUR LES OUVRAGES VOISINS.....	26
7.6. ECOULEMENT DES EAUX .....	26
<b>Chapitre II : UTILISATION DES SOLS FINS après traitement</b> .....	<b>27</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>27</b>
<b>2. STRUCTURE ET CONSTRUCTION D'UNE ROUTE</b> .....	<b>27</b>
2.1 LA TECHNIQUE DES EMPRUNTS GRANULAIRES.....	28
2.2 LA TECHNIQUE DE TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES.....	28
<b>3. PRODUITS DE TRAITEMENT</b> .....	<b>29</b>
3.1. PRODUITS TRADITIONNELS.....	29
3.2. PRODUITS NON TRADITIONNELS.....	31
<b>4. LES PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES INCITES PAR UN LIANT HYDRAULIQUE</b> .....	<b>43</b>
4.1. ACTIONS IMMEDIATES .....	43

4.2. ACTION A LONG TERME.....	45
<b>5. PERTURBATEURS DE TRAITEMENT[L. SAUSSAYE 2013].....</b>	<b>46</b>
5.1. PROBLEMES LIES AUX CHLORURES .....	46
5.2. PROBLEMES LIES AUX SULFATES.....	47
5.3. PROBLEMES LIES AUX NITRATES.....	48
5.4. PHOSPHATES .....	49
<b>6. OBJECTIFS DU TRAITEMENT DES SOLS.....</b>	<b>51</b>
<b>7. TECHNIQUE DE REALISATION DES TRAITEMENTS.....</b>	<b>51</b>
7.1. TECHNIQUE COURANTE .....	51
7.2. MELANGE PAR LA TECHNIQUE DITE DU DEPOT REPRISE.....	52
7.3. TRAITEMENT DANS LE DEBLAI OU SUR LE REMBLAI.....	53
<b>8. MATERIELS DE TRAITEMENT.....</b>	<b>54</b>
<b>9. CONCLUSION .....</b>	<b>54</b>
<b>CHAPITRE III : Procédures expérimentales et caractéristiques des matériaux utilisés</b>	<b>55</b>
1. INTRODUCTION .....	55
2. OBJECTIFS DE L'ETUDE EXPERIMENTALE .....	55
3. DEMARCHE EXPERIMENTALE .....	55
4. PREPARATION ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES.....	57
4.1. MARNE NATURELLE.....	57
4.2. PRODUITS DE TRAITEMENT UTILISES .....	67
5. PREPARATION DES EPROUVETTES POUR ECRASEMENT .....	73
5.1. PREPARATION DES MELANGES.....	74
5.2. CONFECTION DES EPROUVETTES POUR ECRASEMENT .....	74
<b>CHAPITRE IV : Comportement de la marne traitée .....</b>	<b>75</b>
1. INTRODUCTION .....	75
2. EFFETS DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE.....	75
3. EFFETS DU TRAITEMENT SUR LA CONSISTANCE .....	78
3.1. LIMITE DE LIQUIDITE .....	79
3.2 LIMITE DE PLASTICITE .....	79
3.3 INDICE DE PLASTICITE .....	80
4. EFFETS DU TRAITEMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION .....	82
4.1. INFLUENCE DU DOSAGE ET DU TEMPS DE CURE .....	83
4.2. COMPARAISON ENTRE LES DEUX PRODUITS DE TRAITEMENT .....	86
4.3. COMPARAISON DES RESULTATS AVEC D'AUTRES TRAVAUX.....	87
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>89</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>90</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>91</b>

## LISTES DES FIGURES

---

FIGURE 1 : REALISATION DES TRAVAUX DE TERRASSEMENT .....	3
FIGURE 2 : FIGURE DESCRIPTIVE D'UN REMBLAI ET D'UN DEBLAI (PROFIL EN LONG D'UNE ROUTE) .....	4
FIGURE 3 : DIAGRAMME DES PHASES D'UN SOL.....	4
FIGURE 4 : CLASSIFICATION DES SOLS FINS SELON LE SYSTEME USCS/LCPC .....	6
FIGURE 5 : CLASSIFICATION ROUTIERE SELON LE GTR .....	7
FIGURE 6 : CONFIGURATIONS D'ARRANGEMENTS DE PARTICULES ELEMENTAIRES .....	10
FIGURE 7 : REPRESENTATIONS SCHEMATIQUES DES ASSEMBLAGES DES PARTICULES .....	11
FIGURE 8 : STRUCTURE D'UNE COUCHE TETRAEDRIQUE .....	12
FIGURE 9 : STRUCTURE D'UNE COUCHE OCTAEDRIQUE .....	12
FIGURE 10 : STRUCTURE PARTICULAIRE DE L'ILLITE .....	13
FIGURE 11 : STRUCTURE PARTICULAIRE DE LA KAOLINITE .....	14
FIGURE 12 : STRUCTURE PARTICULAIRE DE LA MONTMORILLONITE.....	14
FIGURE 13 : STRUCTURE D'UNE VERMICULITES .....	15
FIGURE 14 : STRUCTURE DES CHLORITES.....	15
FIGURE 15 : SCHEMA REPRESENTANT DES COLONNES LITHOLOGIQUES SIMPLIFIEES .....	16
FIGURE 16 : SCHEMA DE RUPTURE DU REMBLAI PAR POINÇONNEMENT DU SOL DE FONDATION.....	20
FIGURE 17 : SCHEMAS DE RUPTURES DE TYPE CIRCULAIRE .....	20
FIGURE 18 : SCHEMA DU TASSEMENT ET DU DEPLACEMENT LATERAL DU SOL DE FONDATION .....	21
FIGURE 19 : EROSION DES FOSSES .....	24
FIGURE 20 : EROSION LONGITUDINALE DE LA SURFACE DE ROULEMENT.....	24
FIGURE 21 : EROSION DU TALUS DE DEBLAI .....	25
FIGURE 22 : EROSION DU TALUS DE REMBLAI.....	25
FIGURE 23:EROSION DU PARTERRE DU REMBLAI .....	26
FIGURE 24 : COUPE D'UNE ROUTE D'APRES LE GTR .....	27
FIGURE 25 : LES CYCLES DE CARBONATATION/DECARBONATIONS DE LA CHAUX.....	29
FIGURE 26 : DIFFERENTS TYPES DE CHAUX.....	30
FIGURE 27 : OBTENTION DE CIMENT .....	31
FIGURE 28 : OBTENTION DE LAITIER DE HAUT FOURNAUX.....	32
FIGURE 29 : LAITIER GRANULE (A GAUCHE) ET LAITIER CRISTALLISE (A DROITE).....	32
FIGURE 30 : COQUILLE D'ŒUF .....	34
FIGURE 31 : OBTENTION DE LA CENDRE VOLANTE .....	35
FIGURE 32 : FUME DE SILICE.....	35
FIGURE 33 : POUZZOLANE NATURELLE.....	36
FIGURE 34 : POUZZOLANE NATURELLE.....	36
FIGURE 35 : DOLOMIE (CEVITAL) .....	37
FIGURE 36 : MAGNESIUM INDUSTRIEL .....	38

FIGURE 37 : OBTENTION DES DERIVES DE MARBRE (CARRIERE EL CHAT-SKIKDA) .....	38
FIGURE 38 : CARBURE DE CALCIUM .....	39
FIGURE 39 : PHOSPHOGYPSE (ASMIDAL) .....	40
FIGURE 40 : BOUES DE PAPETERIES .....	40
FIGURE 41 : BOUES D'EPURATION D'EAU .....	41
FIGURE 42 : BALLE DE RIZ .....	41
FIGURE 43 : GRIGNON D'OLIVE .....	42
FIGURE 44 : BAGASSE DE SUCRE.....	42
FIGURE 45 : INFLUENCE DE TRAITEMENT SUR LA CONSISTANCE DU SOL [GTS 2000] .....	43
FIGURE 46 : INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE [GTS 2000] .....	44
FIGURE 47 : INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LA PORTANCE DU SOL [GTS 2000] .....	44
FIGURE 48 : LA STRUCTURE MICROSCOPIQUE DES COMPOSES CIMENTERAIRES DANS UNE ARGILE TRAITEE.....	45
FIGURE 49 : SCHEMA DE LA REALISATION DU MELANGE PAR LA TECHNIQUE DITE DU « DEPOT-REPRISE ».....	53
FIGURE 50: LOCALISATION DU LIEU DE PRELEVEMENT (NECHMAYA).....	58
FIGURE 51 : DIFFRACTION AU RAYON X DE LA MARNE .....	59
FIGURE 52 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE ET PAR SEDIMENOMETRIE .....	60
FIGURE 53 : COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA MARNE.....	61
FIGURE 54 : DIFFERENTS ETATS D'UN SOL .....	62
FIGURE 55 : LA COUPELLE DE CASAGRANDE (A GAUCHE) L'ESSAI DE ROULEAU (A DROITE) .....	63
FIGURE 56 : GRAPHE DE DETERMINATION DE LA LIMITE DE LIQUIDITE .....	63
FIGURE 57 : DISPOSITIF POUR L'ESSAI VBS.....	64
FIGURE 58 : RESULTATS BRUTS DES TESTS A LA TACHE.....	65
FIGURE 59 : COURBE PROCTOR NORMAL DE LA MARNE NATURELLE.....	66
FIGURE 60 : CLASSIFICATION GTR DE NOTRE MARNE ARGILEUSE.....	67
FIGURE 61 : CIMENT CHAMIL DU GROUPE LAFARGE.....	68
FIGURE 62 : DIFFRACTION AU RAYON X DU CIMENT .....	68
FIGURE 63 : PRELEVEMENT DU LAITIER GRANULE .....	69
FIGURE 64 : COURBE GRANULOMETRIQUE DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU GRANULE.....	69
FIGURE 65 : PHOTOS DU BROYAGE DU LAITIER DANS L'APPAREIL MICRO DEVAL.....	70
FIGURE 66 : LE LAITIER GRANULE AVANT ET APRES BROYAGE.....	70
FIGURE 67 : DIFFRACTION AU RAYON X DU LAITIER .....	70
FIGURE 68 : COQUILLE D'ŒUF A L'ETAT NATUREL .....	71
FIGURE 69 : PHOTOS DE LA COQUILLE AVANT (A GAUCHE) ET APRES (A DROITE) CALCINATION.....	71
FIGURE 70 : PHOTOS DE LA COQUILLE CALCINEE AVANT (A GAUCHE)ET APRES (A DROITE)BROYAGE .....	72
FIGURE 71 : DIFFRACTION AU RAYON X DE LA COQUILLE CALCINEE ET BROYEE.....	72
FIGURE 72 : PHOTO DU BLAINE-METRE .....	73
FIGURE 73 : PHOTOS DU MOULE ET DE QUELQUES EPROUVETTES PREPAREES .....	74
FIGURE 74 : COURBE PROCTOR CORRESPONDANTES AUX DIFFERENTS DOSAGES DE LHF+COQUILLE .....	76
FIGURE 75 : COURBE PROCTOR CORRESPONDANTES AUX DIFFERENTS DOSAGES DE CIMENT.....	76
FIGURE 76 : LA VARIATION DES TENEURS EN EAU OPTIMALES EN FONCTION DES DOSAGES .....	77

FIGURE 77 : LA VARIATION DES POIDS VOLUMIQUES SEC EN FONCTION DES DOSAGES.....	78
FIGURE 78 : VARIATION DE LA LIMITE DE LIQUIDITE EN FONCTION DES DIFFERENTS DOSAGES DE LIANTS.....	79
FIGURE 79 : VARIATION DE LA LIMITE DE PLASTICITE EN FONCTION DES DIFFERENTS DOSAGES DE LIANTS .....	80
FIGURE 80 : VARIATION DE L'INDICE DE PLASTICITE EN FONCTION DES DIFFERENTS DOSAGES DE LIANTS .....	81
FIGURE 81 : LA VARIATION DE RC EN FONCTION DE DIFFERENTS DOSAGES ET TEMPS DE CURE POUR LHF+COQUILLE .....	83
FIGURE 82 : EVOLUTION DES ECARTS EN FONCTION DU TEMPS DE CURE ET DES DOSAGES .....	84
FIGURE 83 : LA VARIATION DE RC EN FONCTION DE DIFFERENTS DOSAGES ET TEMPS DE CURE POUR LE CIMENT .....	85
FIGURE 84 : EVOLUTION DES ECARTS EN FONCTION DU TEMPS DE CURE ET DES DOSAGES (CIMENT).....	85
FIGURE 85 : COMPARAISON DES RESISTANCES A LA COMPRESSION A 3 JOURS .....	86
FIGURE 86 : COMPARAISON DES RESISTANCES A LA COMPRESSION A 7 JOURS .....	86
FIGURE 87 : COMPARAISON DES RESISTANCES A LA COMPRESSION A 28 JOURS .....	87
FIGURE 88 : COMPARAISON AVEC DES TRAITEMENTS TRADITIONNELS.....	88
FIGURE 89 : COMPARAISON AVEC DES TRAITEMENTS NON TRADITIONNELS.....	88

## LISTES DES TABLEAUX

---

TABLEAU 1 : DENOMINATION DES SOLS FINS CALCAIRES .....	6
TABLEAU 2 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LAITIER DE HAUT FOURNAUX .....	32
TABLEAU 3 : OBJECTIFS DU TRAITEMENT DES SOLS APPLIQUE A LA REUTILISATION DES SOLS TROP HUMIDES EN REMBLAI [GTS].....	51
TABLEAU 4 : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE .....	61
TABLEAU 5 : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE .....	61
TABLEAU 6 : RECAPITULATIF DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE .....	62
TABLEAU 7 : RESULTATS BRUTS DES ESSAIS DE LIMITES DE LIQUIDITE .....	63
TABLEAU 8 : VALEUR DE LA LIMITE DE LIQUIDITE .....	64
TABLEAU 9 : RESULTATS DE LA LIMITE DE PLASTICITE.....	64
TABLEAU 10 : VALEUR DE L'ESSAI VBS .....	65
TABLEAU 11 : GRANULOMETRIE PAR TAMISAGE DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU GRANULE .....	69
TABLEAU 12 : FINESSE DES PRODUITS DE TRAITEMENT .....	73
TABLEAU 13 : LES TENEURS EN EAU ET LES DENSITES OPTIMALES CORRESPONDANTES AUX DIFFERENTS DOSAGES .....	77
TABLEAU 14 : LIMITES DE LIQUIDITE POUR DIFFERENTS DOSAGE DE LHF+COQUILLE ET CIMENT .....	79
TABLEAU 15 : LIMITES DE PLASTICITE POUR DIFFERENTS DOSAGE DE LHF+COQUILLE ET CIMENT.....	80
TABLEAU 16 : L'INDICE DE PLASTICITE EN FONCTION DES DOSAGES DE LIANTS .....	81
TABLEAU 17 : LES RESULTATS DE L'EFFET DU LHF+COQUILLE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION .....	82
TABLEAU 18 : LES RESULTATS DE L'EFFET DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION.....	82

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Le traitement des sols est apparu la première fois dans plusieurs pays tropicaux dans les années 1950. Ces pays dépourvus de ressources naturelles en granulats et des moyens financiers limités, ont utilisé cette technique pour constituer des assises de chaussée dans des zones spécifiques. Actuellement et pour construire et entretenir nos infrastructures routières et ferroviaires, on puise annuellement en Algérie plusieurs centaines de tonnes de granulats présentes dans les réserves naturelles. L'utilisation de cette richesse naturelle n'est pas une spécificité Algérienne mais on la retrouve dans tous les pays du monde. Les impacts négatifs de cette utilisation sur le milieu naturel ne sont pas négligeables, on peut citer à titre d'exemple la réduction des réserves en granulats, l'extraction, le transport et la mise en décharge des matériaux impropres à l'utilisation en technique routière, la perturbation des écosystèmes sur les sites d'extraction des matériaux, ... Cependant, il est possible de limiter ces impacts tout en réalisant des économies considérables en utilisant les matériaux déblayés jugés préalablement peu favorables comme un gisement que l'on peut valoriser par un traitement à la chaux ou/et ciments ou encore aux liants hydrauliques routiers.

L'utilisation des sols fins et particulièrement les marnes dans les remblais routiers est souvent assujettie à de nombreuses problématiques liées à leur caractère évolutif, leur sensibilité à l'eau (argilosité et état hydrique) et elles sont moins accessibles dans les gisements qui sont plus en moins irréguliers (hétérogène et variable). Ces marnes sont usuellement mises en dépôts car leurs caractéristiques sont peu favorables au réemploi dans les chantiers routiers.

Le traitement à la chaux et au ciment ainsi que aux liants hydrauliques routiers est une technique communément utilisée sur terrain permettant de pallier les faibles caractéristiques mécaniques et la mauvaise maniabilité présentées par ce type de sols. Mais la production et l'utilisation de ces liants hydrauliques est responsables d'une part significative de l'impact environnemental, en terme de consommation de ressources énergétiques et de réchauffement climatique.

L'actuelle prise de conscience environnementale a poussés les industriels à valoriser d'autres produits tels que les laitiers granulés moulus de haut fourneau, qui sont des sous-produits de l'industrie sidérurgique, dotés d'une activité hydraulique latente. Leur apport aux matrices cimentaires de points de vue chimiques et mécaniques est connu mais leur utilisation nécessite un activant qui est souvent une source d'oxyde de calcium, ce minéral peut se trouver dans la composition chimique de la coquille d'œuf. Toutefois, une grande partie des déchets de la coquille d'œuf sont jetés dans les décharges publiques qui vont constituer une source de pollution pour l'environnement

mais avant tout, un gaspillage d'un matériau qui peut être utile dans plusieurs domaines.

Dans cette optique, nous chercherons à travers ce travail de fin cycle à valoriser une marne argileuse de la région de Guelma de caractéristiques géotechniques initialement médiocres dans les remblais routiers, par l'incorporation d'un nouveaux liants hydrauliques, formulés entièrement à base de laitiers de haut fourneau granulé et les déchets de coquille d'œuf. L'évaluation de l'amélioration apportée par ce nouveau produit de traitement est faite par des essais réalisés au laboratoire. L'intérêt de ce type de traitement est triple, d'abord il contribue à sauvegarder les ressources naturelles, comme il peut donner une solution efficace pour la gestion des déchets et les sous-produits industriels ainsi que les énormes dépôts des matériaux en déblai, tout en gardant un aspect technique est économique supérieur aux solutions traditionnels.

Cette étude est faite moyennant des essais de laboratoire, elle a permis d'évaluer l'amélioration apportée par ce nouveau liant formulé à base de laitier de haut fourneau granulé et le déchet de la coquille d'œuf calcinée. La comparaison des résultats des performances mécaniques obtenus par ce nouveau traitement de sols avec ceux obtenus par un traitement classique à base de ciment Portland, nous a permis de dégager des conclusions et des recommandations sur la pertinence du nouveau traitement.

# **CHAPITRE I**

## **Les sols fins dans les terrassements**

## CHAPITRE I : LES SOLS FINS DANS LES TERRASSEMENTS

---

### 1. Introduction

En mécanique des sols, on attache une grande importance à la rigueur dans la définition des caractéristiques des sols car elles serviront par la suite à décrire les propriétés mécaniques et hydrauliques ou expliquer certains de leurs comportements comme le tassement. Certains de ces caractéristiques se mesurent aisément sur le terrain ou en laboratoire, d'autres sont déduites des premières à l'aide de relations mathématiques. Nous mentionnons dans ce chapitre les caractéristiques des sols ainsi que les systèmes de classification USCS et GTR.

### 2. Travaux de terrassement

Les opérations de terrassement visent à modifier le relief d'un terrain pour permettre la réalisation d'ouvrage de génie civil tel que les routes, voies ferrées ou bâtiments. Ces opérations consistent à déplacer des quantités importantes de matériaux (sols, roches, sous-produits...). Le remaniement des terrains naturels entraîne une modification généralement définitive de la topographie et du paysage, en créant des ouvrages en terre soit en remblai soit en déblai.

On appelle remblai, l'ajout de terres pour combler des cavités afin d'élever le niveau naturel du sol. Les remblais techniques seront réalisés avec des matériaux sélectionnés des déblais ou des matériaux d'apport extérieurs au chantier. Ces matériaux devront être conformes aux prescriptions des guides techniques. En revanche, le déblai consiste à extraire des terres en vue de niveler ou baisser le niveau naturel du sol. Les matériaux extraits seront, après leur tri, soit utilisés en remblai, soit mis en dépôt définitif pour constituer des modelés paysagers ou en stocks provisoires, soit évacués en décharge en fonction de leur nature.



*Figure 1 : Réalisation des travaux de terrassement*

Les travaux de terrassement sont basés sur trois actions principales à savoir : l'extraction, le transport et la mise en œuvre [O. Boudlal 2013]. Ainsi, pour la construction d'une route, les travaux de terrassement sont des travaux de grande ampleur car les volumes de terre déplacés sont importants. Ces travaux représentent une grande partie du coût global des travaux de construction d'une route (de l'ordre de 30 à 60% dans certains projets routiers). Dans le cas où les déblais seront utilisés pour combler les cavités, il est important d'essayer d'avoir un volume de déblai égal au volume de remblai en trouvant une bonne ligne cote projet.

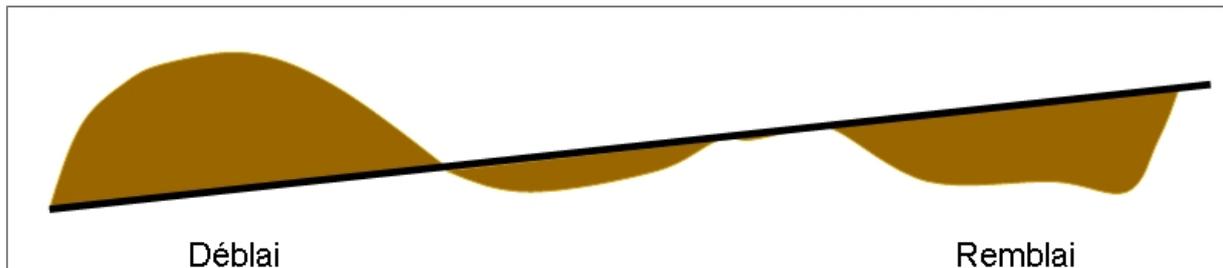


Figure 2 : Figure descriptive d'un remblai et d'un déblai (profil en long d'une route)

Les sols fins excavés dans les opérations de déblaiement sont souvent exclus d'utilisation dans les remblais routiers à cause des difficultés de mise en œuvre de ce type de matériau tel que le compactage, ouvrabilité, portance à l'état humide, ... Ces matériaux sont aussi évités d'utilisation à cause des nombreux désordres qui peuvent apparaître après la mise en service de la route. Ces désordres seront présentés en détail dans ce chapitre après avoir fourni une bibliographie sur les sols fins.

### 3. Les sols fins et leurs caractéristiques

#### 3.1. Définition

Le sol est un complexe multiphasique, il est composé principalement de trois phases (Fig. 3) ; **solide** (grains solides de différentes tailles), **liquide** (eau), **gazeuse** (air).

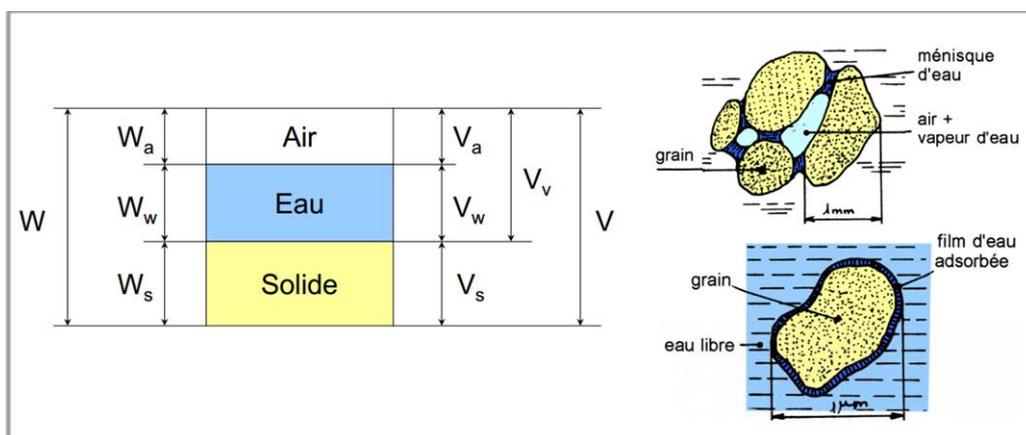


Figure 3 : Diagramme des phases d'un sol

Les sols ont deux origines principales qui sont :

- la désagrégation des roches : par altération mécanique et physico-chimique sous l'effet d'agents naturels: fissuration consécutive à la décompression, aux effets des chocs thermiques; action mécanique (chocs et frottements) dans un processus naturel de transport gravitaire glaciaire, fluvial, marin, éolien, attaque chimique sous l'effet des circulations d'eaux agressives (acides ou basiques)[Y. Tankpinou kiki 2016].
- la décomposition d'organismes vivants : végétaux (tourbes) ou animaux (craies).

### 3.2. Classifications des sols

Il existe trois principaux systèmes de classification des sols à savoir :

- la classification USCS/LCPC,
- les classifications routières,
- la classification triangulaire.

Nous allons présenter dans ce qui suit uniquement les deux premiers systèmes de classification car le troisième est utilisé notamment par les pédologues.

#### 3.2.1. Classification USCS/LCPC

C'est la classification est la plus utilisée en mécanique des sols. Elle a été développée aux Etats-Unis dans les années 1950 sous le nom **United Soil Classification System (USCS)** [Ch. Schon] puis francisée au début des années 1960 sous le nom de **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)**. La classification USCS/LCPC est basée sur les dimensions des particules (granulométrie) et leur comportement à l'eau (plasticité). Elle prend en compte également la teneur de la fraction organique dans le cas des sols fins en mesurant la teneur en matières organiques par la méthode de la perte au feu.

D'après cette classification, on peut distinguer :

- **les sols grenus** : plus de 50 % des éléments  $> 0,08$  mm.
- **les sols fins** : plus de 50 % des éléments  $< 0,08$  mm.

Pour les sols fins, la méthode de classification est basée sur les limites d'Atterberg (Fig.4).

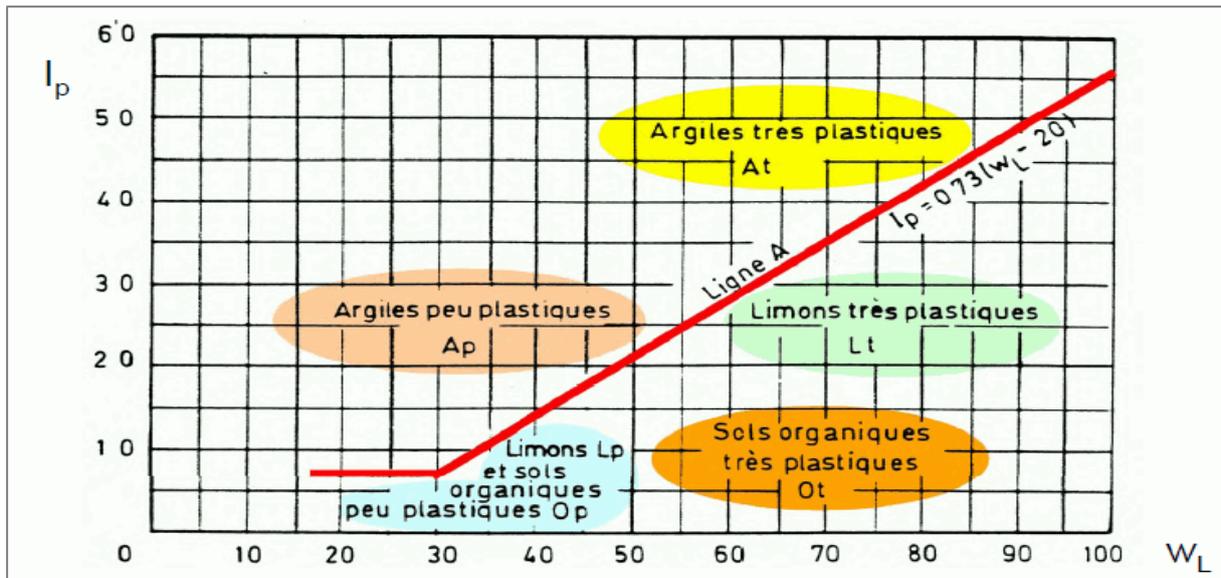


Figure 4 : Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC

Cette classification ne traite pas deux problèmes importants, qui sont celui des carbonates et celui des particules de nature argileuse, qui peuvent avoir une influence décisive dans certaines circonstances (géotechnique routière notamment).

*Pour les sols fins carbonatés*, on utilise en complément de la classification à base granulométrique, un vocabulaire exprimant la proportion des carbonates de calcium ( $\text{Ca CO}_3$ ) dans le sol (ou la roche), défini dans le tableau suivant.

Pourcentage de $\text{Ca CO}_3$	Dénomination
0 à 10	Argile
10 à 30	Argile marneuse
30 à 70	Marne
70 à 90	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire

Tableau 1 : Dénomination des sols fins calcaires

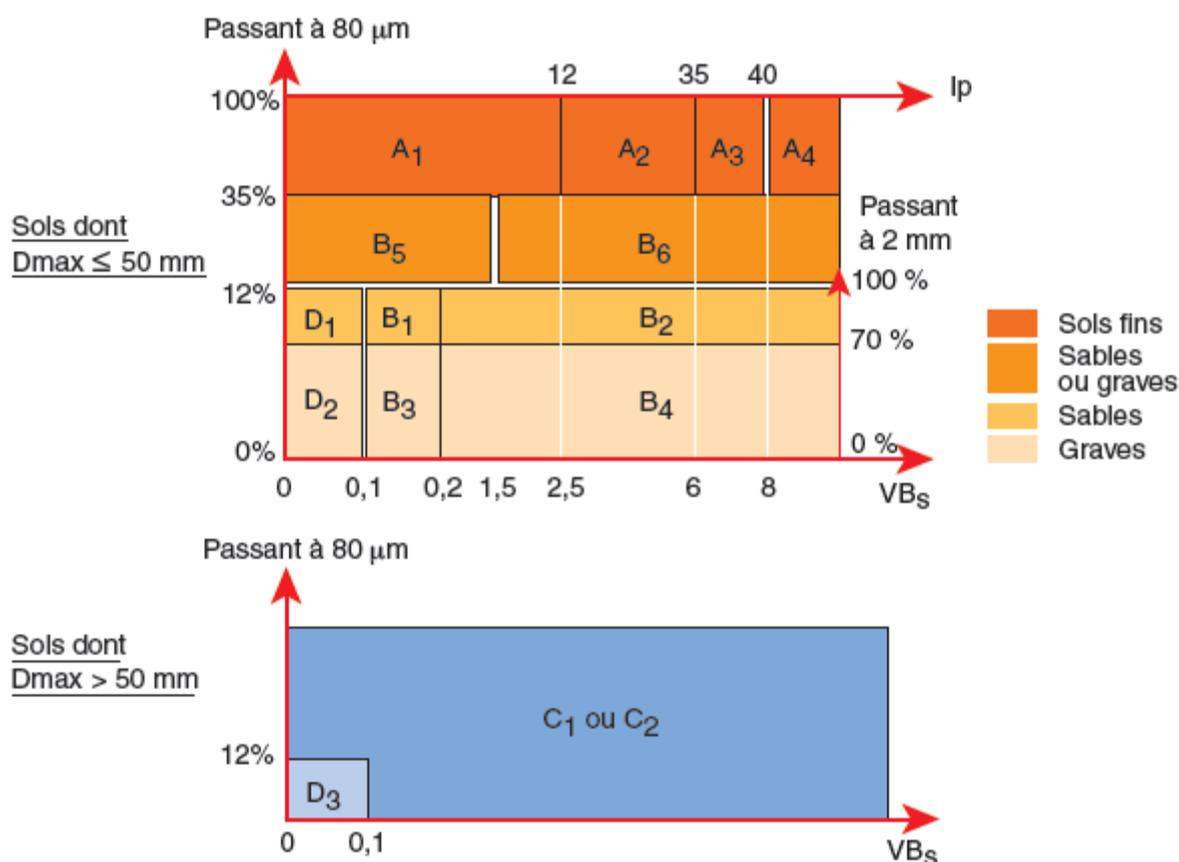
*Pour les particules argileuses*, qui ne sont pas décrites quantitativement par les courbes granulométriques (poudre de roche par exemple), on peut utiliser la notion de sensibilité à l'eau selon l'essai bleu de méthylène pour préciser l'argilosité minéralogique du sol.

### 3.2.2. Classification routière

Au États-Unis, le système **AASHTO** développé par **American Association of State Highway and Transportation Officials**, est utilisée pour classer les sols et les mélange sol-agrégat employés dans la construction des routes et des autoroutes.

En France, une classification particulière pour les sols a été établie afin de prendre en compte l'aptitude au compactage des matériaux en fonction des conditions de chantier et leur comportement mécanique ultérieur. Cette classification tient compte des mêmes caractéristiques de base de la classification USCS/LCPC mais elle est beaucoup plus précises pour les particules argileuses et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps (matériaux évolutifs). Cette classification est appelée GTR (Guide des Terrassement Routier LCPC-SETRA, 1992 : norme NF P 11-300).

Ce guide identifie les sols en 6 grandes classes : **A, B, C, D, R** et **F**. (Fig.5).



<b>Matériaux rocheux</b>	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Crâes	R <sub>1</sub>
			Calcaires	R <sub>2</sub>
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R <sub>3</sub>
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R <sub>4</sub>
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R <sub>5</sub>
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R <sub>6</sub>
<b>Matériaux particuliers</b>	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Figure 5 : Classification routière selon le GTR

## 4. Composition minéralogique des sols fins

Le vocable sols fins désigne en général les argiles et les limons. Cessols fins sont généralement le résidu de l'altération de différents types de substrats rocheux ou meubles, leur composition minéralogique dépend donc directement de celle de la roche mère. Ils sont souvent classés en quatre catégories (minéraux primaires, minéraux secondaires, sels et matières organiques) suivant leur composition, leur mode de formation et leur cause de formation.

### 4.1. Les minéraux primaires

Ce sont les minéraux résiduels qui ont échappé à l'altération, ils sont stables (ils conservent alors la signature minéralogique et géochimique des matériaux source), ou instables (n'ayant pas subi suffisamment les effets de l'altération). Le **quartz**, les **feldspaths** et les **micas** qui se retrouvent dans diverses fractions granulométriques sont les minéraux primaires les plus abondants dans les sols. Ils peuvent résulter d'une simple érosion des substrats avec tris granulométrique au cours du transport, surtout par l'eau, et au cours de la sédimentation. Cette catégorie de minéraux se retrouve souvent dans les **sols grenus** (sables grossiers, graviers, etc.)

### 4.2. Les minéraux secondaires

Ils résultent de la transformation (ou dégradation) géochimique des minéraux primaires, ce qui implique donc un changement de statut minéralogique accompagné d'une réduction de taille. Ils comprennent divers types de minéraux argileux (simples ou interstratifiés), ainsi que des hydroxydes ou oxydes généralement de fer, parfois de Manganèse ou d'Aluminium. Les minéraux argileux se cantonnent dans une gamme granulométrique comprise entre le micron et quatre microns.

### 4.3. Les sels solubles

Les solutions qui résultent de l'altération par hydrolyse, transportent des éléments chimiques actifs tels que potassium K, sodium Na, calcium Ca, magnésium Mg. Soit ces éléments quittent définitivement les sites de l'altération, soit ils y demeurent en constituant des phases minérales neuves (carbonates, sulfates, sels). Les carbonates peuvent jouer un rôle de ciment temporaire ou définitif scellant les minéraux argileux. Le potassium et le sodium peuvent aussi subsister dans ou à proximité des minéraux argileux. Par conséquent, ces sels peuvent influencer fortement le comportement hydromécanique des sols.

#### 4.4. Les matières organiques

Elles résultent de la transformation hydrolytique ou biologique des résidus végétaux à la surface des sols. Ces résidus peuvent être réincorporés plus bas dans le matériau argileux du sol. La matière organique, à raison de quelques pour-cent peut être présente dans les sédiments. Elle se caractérise par une forte capacité de rétention d'eau, ainsi, agit sensiblement sur le comportement géomécanique d'un matériau argileux [O. Boudlal 2013].

#### 5. Microstructure des sols fins

Les sols fins sont des matériaux dans lesquels les particules de nature argileuse occupent une place prédominante (particules  $< 2 \mu\text{m}$ ). Les particules élémentaires (les plaquettes dans le cas des argiles) peuvent être arrangées dans une gamme de configurations géométriques extrêmement étendue, et même chaotique. Dans certaines circonstances de sédimentation, les plaquettes d'argile peuvent se combiner et former des agrégats. Ces agrégats se comportent comme des unités individuelles. En conséquence, des groupes de plaquettes d'argiles combinées sous des formes diverses sont courants. Des assemblages à plusieurs niveaux existent dans certains sols fins non homogènes. La microstructure d'un sol fin résulte essentiellement des conditions suivantes :

- mode de dépôt et caractéristiques électrochimiques de l'électrolyte au moment de dépôt du sol (concentration, etc.),
- dimension, forme des particules,
- minéralogie des sols,
- caractéristiques et charge électrique des ions échangeables,
- acidité,
- quantité de matière organique,
- vitesse de dépôt,
- état d'agitation de l'eau,
- histoire des sollicitations : cycles de séchages et de mouillages, charges mécaniques, etc.

Les modes d'arrangements des particules sont basés sur l'observation réalisée au microscope électronique à balayage sur des sols naturels. Les chercheurs suggèrent qu'on décrive la microstructure d'un sol à l'aide de trois types d'unités de base :

- l'arrangement des particules élémentaires (plaquettes),
- l'assemblage des particules (agrégats),
- les espaces vides.

*L'arrangement des particules* dépend des interactions entre les particules élémentaires individuelles, par exemple de l'interaction entre les plaquettes individuelles ou entre de petits groupes des plaquettes. Lorsque les particules de limon ou de sable sont présentes dans le sol fin, de multiples possibilités de contacts entre les particules solides existent. On constate que, dans une argile limoneuse, les particules de limon ou de sable sont souvent recouvertes par des plaquettes d'argile ou d'autres matières. De nombreux modèles ont été employés pour décrire l'arrangement des particules élémentaires(Fig.6).



a) Interaction entre les plaquettes individuelles



b) Interaction entre les groupes des plaquettes



c) Particules de silt ou sable recouvert de plaquettes d'argile

Figure 6 : Configurations d'arrangements de particules élémentaires

*De nombreuses plaquettes se groupent* souvent et forment de grandes particules ayant une frontière physique plus ou moins claire. On les appelle des agrégats. Leur forme dépend essentiellement de la concentration en électrolyte. On observe par exemple des ponts (ou des chaînes), des agrégations, des faisceaux entrelacés, des matrices, etc[Y. Tankpinou kiki 2016].

Les ponts (ou des chaînes) sont des assemblages de particules formés entre des grains de limon et de sable. Ils relient les grains de limon ou de sable. Les agrégations sont des agrégats qui se comportent comme des unités individuelles. Les matrices sont essentiellement de deux sortes : matrice argileuse et matrice des particules granulaires (Fig.7).

*Les espaces vides* existent dans les sols fins sous diverses formes. En général, ils sont classés en trois types :

- les pores inter-élémentaires,

- les pores inter-agrégats,
- les pores intra-agrégats.

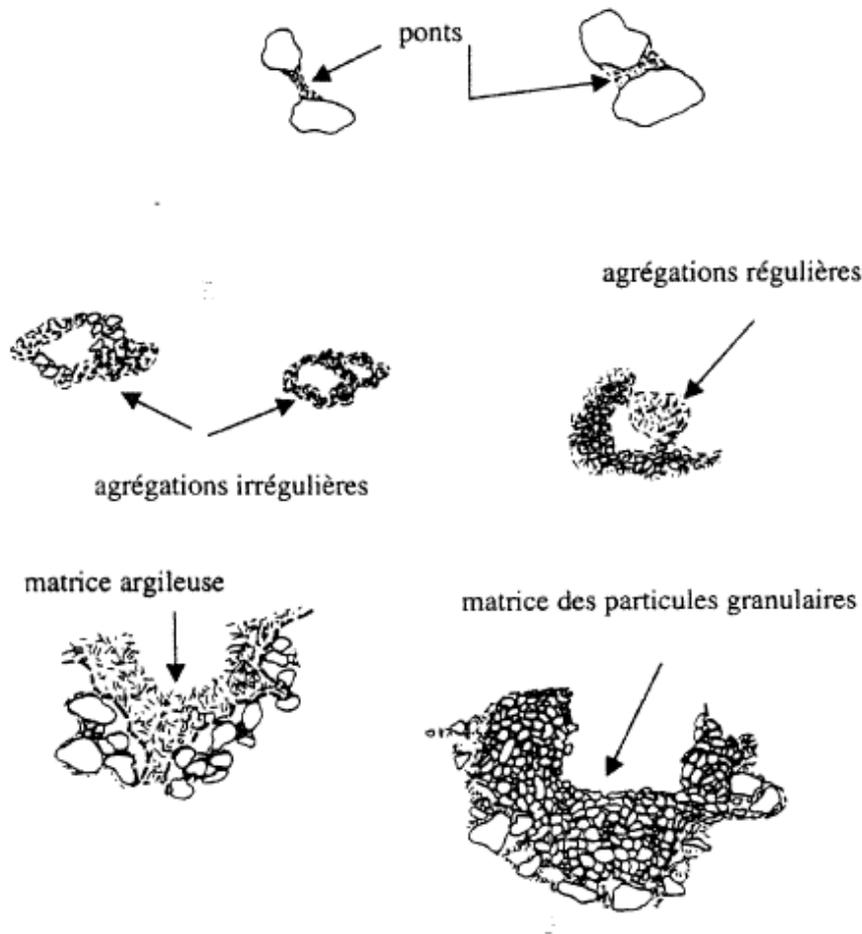


Figure 7 : Représentations schématiques des assemblages des particules

## 6. Différents types des sols fins

### 6.1. Les argiles

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre, obtenus par dégradation et altération par l'hydrolyse des minéraux des roches éruptives et magmatiques sous l'action physique et chimique des eaux de surface.

Le terme argile possède différents sens qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner des minéraux de structures et propriétés particulières, des roches argileuses composées pour l'essentiel de ces minéraux ou bien la partie la plus fine d'une analyse granulométrique d'un sol meuble inférieur à 2  $\mu\text{m}$ . Cependant ces dernières sont des minéraux argileux résultant de la destruction des roches (les roches sédimentaires

contiennent 50 %, les schistes 50 à 80 % et les roches éruptives donnent, par décomposition, des argiles). On dit qu'un sol est argileux s'il contient plus de 50% de minéraux argileux.

### 6.1.1. Structure des minéraux argileux

Les minéraux argileux appartiennent à la famille des phyllosilicates. Leur structure est un empilement de couches tétraédriques et octaédriques qui forme les feuillets. Les tétraèdres sont liés les uns aux autres par des atomes d'oxygène. Ils forment ainsi un réseau planaire d'hexagones d'atomes d'oxygène. Les octaèdres sont liés par un côté. L'agencement des couches permet de distinguer trois principaux types de minéraux :

Type 1 : 1 ou T-O (1 couche octaédrique et 1 couche tétraédrique) équidistance voisine de 7Å,

Type 2 : 1 ou T-O-T (1 couche octaédrique entre 2 couches tétraédriques) équidistance variable entre 9 et 15 Å, suivant le remplissage ou non de l'espace interfoliaire,

Type 3 : 1 ou T-O-T-O est similaire au type précédent mais l'espace interfoliaire est occupé par une couche d'octaèdres. L'équidistance caractéristique est alors de 14 Å environ.

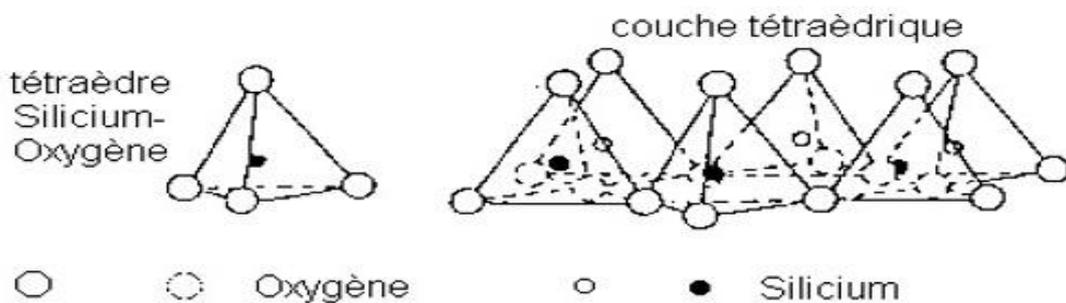


Figure 8 : Structure d'une couche tétraédrique

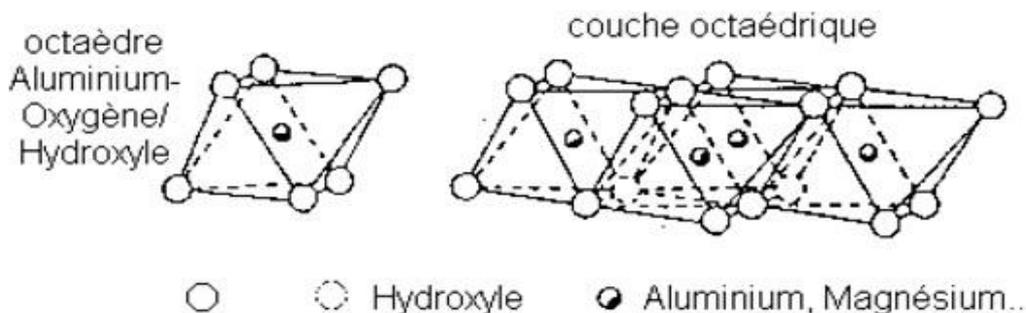


Figure 9 : Structure d'une couche octaédrique

### 6.1.2. Classification Des minéraux argileux les plus fréquents

#### a) L'illite

Les illites appartiennent à la famille des phyllosilicates. Le feuillet élémentaire est composé d'une couche octaédrique d'aluminium comprise entre deux couches tétraédriques de silicium. Dans les couches tétraédriques de silicium un ion  $\text{Si}^{4+}$  sur quatre est remplacé par un ion  $\text{Al}^{3+}$ . Le déficit de charge qui en résulte est compensé dans l'espace interfoliaire par des ions potassium  $\text{K}^+$  qui assurent des liaisons fortes entre les feuillets (Fig.10). Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter-couche et l'illite n'est pas donc une argile très gonflante. Les illites sont des particules de dimensions plus petites que la kaolinite de diamètre équivalent moyen de  $0,3 \mu\text{m}$ , et d'une épaisseur de  $100\text{\AA}$ .

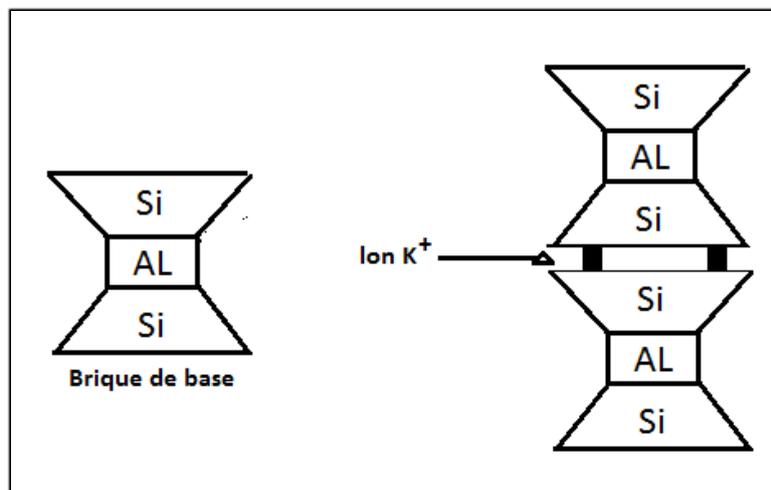


Figure 10 : Structure Particulaire de l'illite

#### b) La kaolinite

Dans la kaolinite les couches d'octaèdres et les couches de tétraèdres sont parallèles, et s'intercalent de telle façon que les atomes supérieurs et inférieurs de chacune des couches appartiennent à un même plan. L'espacement de base entre les ions d'oxygène dans l'unité tétraédrique et les ions hydroxyles dans l'unité octaédrique est presque identique, ainsi le feuillet l'épaisseur du feuillet élémentaire est d'environ  $7\text{\AA}$  mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies. Ces particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau (Fig.11).

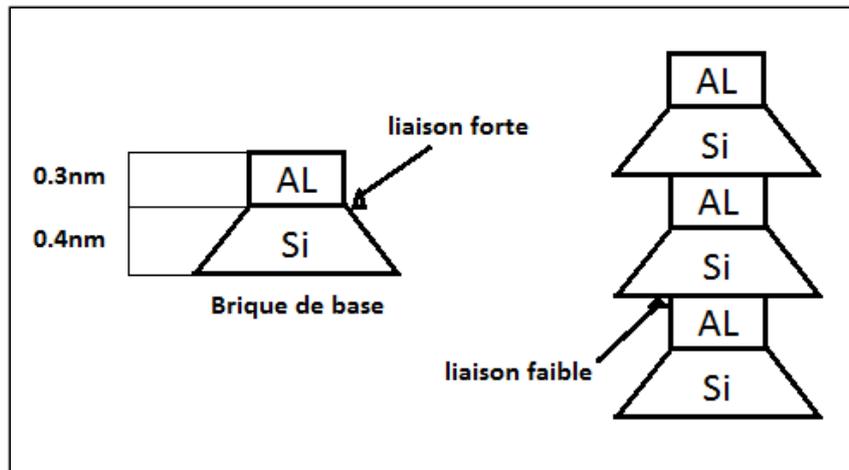


Figure 11 : Structure Particulare de la Kaolinite

c) La montmorillonite

Ce sont des argiles du même type que le mica (une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques), mais les liaisons entre feuillets sont plus faibles. Les substitutions isomorphiques sont principalement localisées en couches octaédriques. Les montmorillonites possèdent ainsi des propriétés de gonflement qui se produisent surtout en présence d'eau et peuvent provoquer la dissociation complète des feuillets. Elle se caractérise par l'existence entre deux feuillets d'un certain nombre de couches d'eau contenant des cations échangeables (libres) généralement des cations sodiques et calciques, ce qui entraîne un écartement des feuillets variables suivant les conditions du milieu. Dans la montmorillonite, il y a un remplacement partiel de l'aluminium des octaèdres par du magnésium (presque un sur six), le déficit de charge est composé par des cations généralement  $Na^+$  ou  $Ca^{++}$  situés entre les feuillets et qui sont échangeables. Les montmorillonites sont des minéraux où les liaisons entre les feuillets ont affaiblies, si bien que de l'eau se glisse entre ces feuillets en quantité variable. C'est ce qui explique que les montmorillonites sont sujettes au gonflement (Fig.12).

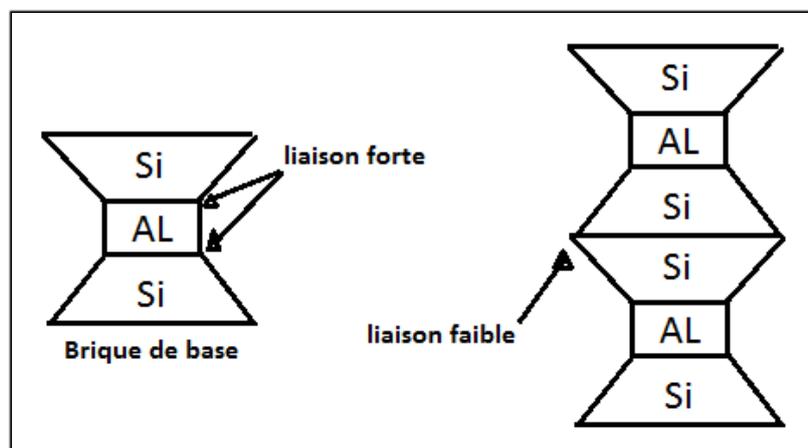


Figure 12 : Structure Particulare de la Montmorillonite

**d) Les vermiculites**

Les vermiculites appartiennent à la famille des phyllosilicates. Elles constituent une famille proche de celle des smectites, mais elles sont caractérisées par un déficit de charge plus important. Elles sont majoritairement trioctaédriques. Le déficit de charge est essentiellement dû aux substitutions tétraédriques et la compensation est assurée dans l'espace interfoliaire par des cations ( $Mg^{2+}$  principalement) et des couches d'eau (Fig.13).

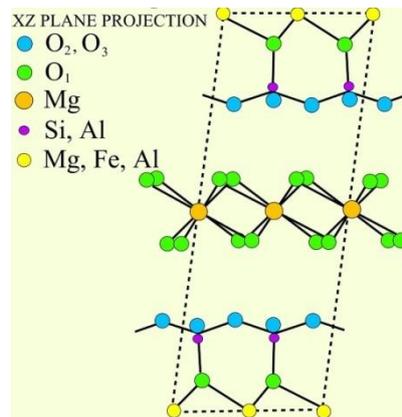


Figure 13 : Structure d'une vermiculites

**e) Les chlorites**

Les chlorites appartiennent à la famille des phyllosilicates. Il est nécessaire de citer les chlorites du fait que leurs propriétés se rapprochent de celles des argiles et que ce minéral peut être présent en quantité non négligeable dans les sols. Leur structure est cependant plus complexe, et se compose d'un feuillet entre lequel s'insère un feuillet de brucite (Fig.14).

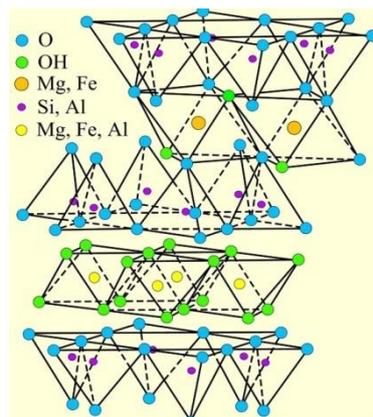


Figure 14 : Structure des chlorites

**6.2. Les limons**

Un limon est une formation sédimentaire constitués de silt, de lœss et de loehm, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins dont la taille des grains est intermédiaire entre les argiles et les sables (entre environ 2 et 50 micromètres), la teneur

en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles.

### 6.3. Les marnes

La marne c'est roche sédimentaire contenant du carbonate de calcium ( $\text{Ca CO}_3$ ) et de l'argile. On la définit comme étant un matériau de transition entre le calcaire et l'argile; c'est une roche carbonatée contenant de 30 à 70% d'argile. Ainsi, elle tient de la fraction carbonatée une structure plus au moins résistante et de la fraction argileuse une possibilité d'évolution par destruction de la structure par suite de l'action de l'eau sur l'argile, conduisant à un matériau plastique [D. Delahaye et al]. Cette définition purement pétrographique, a été sensiblement élargie sur le plan du pourcentage d'argile. En pratique, en génie civil, le nom marne peut être attribué pour toutes roches carbonatées contenant de 10 à 90 % d'argile(Fig.15).

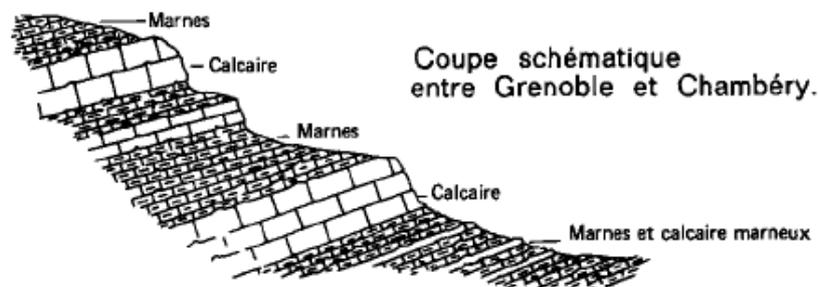


Figure 15 : Schéma représentant des colonnes lithologiques simplifiées

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuse, friable quand elles sont sèches, plastique lorsqu'elles sont mouillées. Mais à la différence des argiles, elles effervescent avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des particules constitutives (minéraux argileux, carbonates et parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans les groupes des lutites (ou pélites).

En effet, comme le calcaire, la marne renferme de très nombreux éléments accessoires, visibles uniquement au microscope et dont le rôle peut être prépondérant, tels que : grains de quartz, paillettes de micas, cristaux de gypse, micro-organismes, etc. À côté de ces éléments, visibles uniquement au microscope, on peut trouver des éléments volumineux tels que : nodules de pyrite, quartz, gypse fer de lance ou encore en rose des sables, macrofossiles, etc. Ces différents éléments responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir la marne rencontrée par une appellation. On parle ainsi, si l'on s'intéresse à la couleur :

- des marnes vertes,
- des marnes bleues,
- des marnes rouges,

- des marnes bariolées.

Si l'accent est porté sur un constituant remarquable, on parlera :

- de marnes dolomitiques,
- de marnes micacées,
- de marnes sableuses,
- de marnes glauconieuses,
- de marnes bitumineuses,
- de marnes gypseuses, etc.

Enfin, l'intérêt stratigraphique et paléontologique peut être dominant ; dans ce cas, on aura :

- des marnes à foraminifères,
- des marnes à pholadomyies,
- des marnes à spongiaires,
- des marnes à radiolaires, etc.

Les marnes apparaissent constituées de trois phases : phase carbonatée, phase sableuse et phase argileuse. Elles sont en effet réputées pour avoir souvent un comportement particulièrement gênant et dangereux parce qu'elles peuvent être à la fois très dures à l'extraction et très altérables, les blocs extraits perdant spontanément toute résistance au bout de quelque temps d'exposition aux intempéries. Les caractéristiques mécaniques sont liées à l'importance respective de chacune des phases, mais aussi à la nature minéralogique de la phase argileuse. La présence d'argiles montmorillonitiques ou encore d'argiles fibreuses induit des caractéristiques mécaniques mauvaises. Cependant, cette influence particulière des argiles peut être tempérée ou au contraire exacerbée suivant les types de textures. Si les liaisons entre carbonates sont abondantes et fortes, le matériau aura un comportement de roche. Au contraire, si les carbonates sont noyés dans une matrice argileuse, le matériau aura un comportement de sol. Pour cela, il n'est pas nécessaire que le pourcentage d'argile soit différent ; des études sur les marnes du Tertiaire parisien montrent parfaitement ces différences de comportement entre deux matériaux minéralogiquement identiques, fraction carbonatée voisine et nature des argiles semblables.

Un autre exemple est donné par l'étude des formations marneuses du secondaire du Vaucluse où le pourcentage de carbonate est sensiblement identique entre des matériaux non altérables d'aspect rocheux et des matériaux altérables. D'autres exemples étudiés antérieurement ont montré l'intérêt de l'étude des textures dans le cas de matériau à comportement évolutif, comme c'est le cas des marnes.

#### **6.4. Les vases**

Les vases sont des dépôts formés par les marées ou que l'on rencontre dans les lits des lacs et des rivières. Leur composition est extrêmement variable et dépend plus ou moins de leur mode de formation. Elles se composent en grande partie de roche broyée, d'argile et de sable, avec de coquillages (en partie rompus) et des débris organiques (restes végétaux et animaux) en quantités variables. Il existe plusieurs types de vases à savoir :

- vases marines : les vases marines ou de marée ; aussi connues sous les noms de tangué, vases marais, vases salines et parfois de vases rivières sont déposées par la marée à l'embouchure des rivières et des ruisseaux qui se jettent dans la mer et sur les bords peu élevés des baies et des anses. Elles se composent principalement de particules rocheuses broyées, sous forme d'un sable très fin, et de limon et d'argile en différentes proportions.
- vases de moules et de coquillage d'huitres : les vases de coquillages sont importantes en raison du carbonate de chaux qu'elles renferment.
- vases d'étangs, de lacs et de rivières : ces catégories de vases sont généralement formées par le dépôt des fines substances portées par les eaux des rivières et des ruisseaux. Ce sédiment, qui se compose surtout de particules rocheuses finement broyées, contient souvent une quantité considérable de débris organiques, aussi ces vases sont généralement plus riches en matières organiques que les vases de marées ou d'eau salée

#### **6.5. Les tourbes**

La tourbe se définit comme le produit de la fossilisation de débris végétaux par des microorganismes (bactéries, anthropodes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène que l'on appelle tourbière sur un intervalle de temps compris entre 1 000 et 7 000 ans. Si la tourbe est soumise à des conditions particulières de pression et de température causées par son enfouissement, elle se transforme, au bout d'une période de l'ordre du million d'années, en charbon. Il existe plusieurs types de la tourbe à savoir :

- la tourbe blonde : qui provient de la transformation des sphaignes. Elle est riche en fibre de cellulose et en carbone. Sa texture est fibrique. Ses autres traits essentiels sont sa faible densité, sa forte teneur en eau et sa pauvre teneur en cendre minérale car elle est souvent jeune (2 000 ans).
- la tourbe brune : qui provient de la transformation de débris végétaux ligneux (arbres) et d'éricacées. Elle est composée de fibres mélangées à des éléments plus fins, provenant d'une dégradation plus poussée des végétaux, lui donnant une texture mésique. Elle est plus âgée (5 000 ans) que la précédente.

- la tourbe noire : qui provient de la transformation des cypréracées. Elle est riche en particules minérales et organiques fines. Sa texture est saprique, c'est-à-dire que la tourbe est plastique et moins fibreuse. Visuellement, la tourbe noire se distingue facilement de la tourbe blonde par sa couleur foncée. Une tourbe blonde très ancienne tend à se rapprocher, par certains caractères, de la tourbe noire[A. Matynia2009].

## **7. Problèmes liée aux sols fins dans les projets routiers**

La mise en dépôt de sols fins mous et compressibles (argiles, limons, marnes,...) est fréquente dans les vallées et en bordure des côtes pour des raisons liées à leurs caractéristiques médiocres (faible portance, tassement et gonflement important, faible résistance au cisaillement, plasticité importance,...). Les désordres principaux constatés dans les corps de remblai sont les suivants:

- formation de fissures longitudinales avec ou sans dénivellation et affaissement du profil en long,
- glissement de talus, éventuellement superficiel,
- rupture généralisée du remblai, avec rupture de la fondation,
- interaction avec un ouvrage d'art,
- rupture du remblai pendant la construction, par génération de pressions interstitielles,
- fissurations dues à des tassements différentiels,
- tassements nuisibles pour l'exploitation.

### **7.1. Problèmes de stabilité**

Les sols fins sont en général peu résistants. Lorsqu'ils sont rencontrés en surface, il peut se produire des ruptures, en général de type rotationnel (circulaire), lors de l'édification du remblai. Par contre, si l'on ne modifie pas ultérieurement la charge appliquée au sol par le remblai, il n'y a pas de risque de rupture différée. Les ruptures observées prennent généralement deux formes : par poinçonnement et par rotation.

#### **7.1.1. Rupture par poinçonnement**

L'ensemble du remblai s'affaisse en pénétrant le sol support tandis que des bourrelets de terre se forment de part et d'autre des talus en raison de la réaction par soulèvement du terrain naturel (Fig.16).

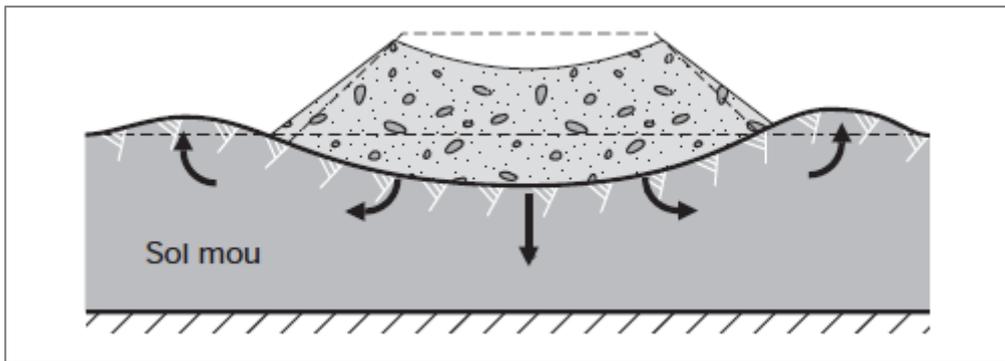


Figure 16 : Schéma de rupture du remblai par poinçonnement du sol de fondation

### 7.1.2. Rupture de type circulaire

Il s'agit du type de rupture le plus couramment rencontré dans le domaine routier. Il se manifeste par un enfoncement localisé du remblai, par opposition à l'affaissement généralisé d'une rupture par poinçonnement. Cet enfoncement est la conséquence d'un déplacement d'une partie du remblai et du sol support le long d'une surface de rupture dont la forme est assimilable à une courbe circulaire et la cinétique à celle d'un mouvement rotationnel (Fig.17). Les désordres provoquent, en tête du remblai, une ou plusieurs dénivelées abruptes ou escarpements, dont l'amplitude peut atteindre plusieurs mètres.

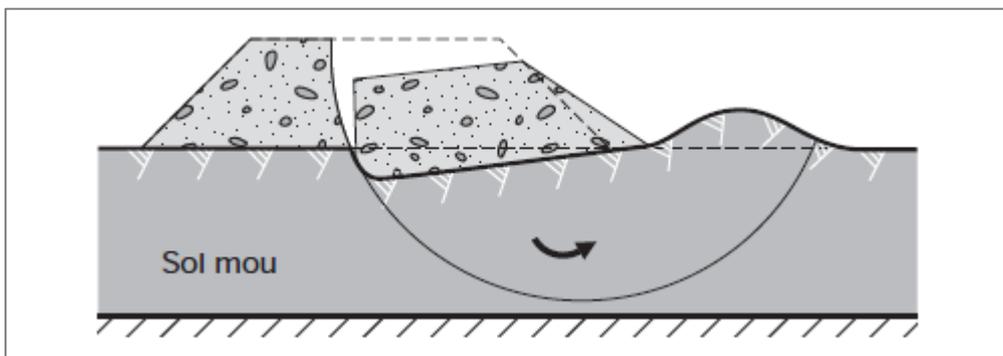


Figure 17 : Schémas de ruptures de type circulaire

Les ruptures par poinçonnement ou glissement rotationnel sont des événements rapides qui se produisent généralement en cours de la construction des ouvrages. Cependant, il arrive que l'on assiste à des ruptures différées (quelques mois, voire quelques années après les travaux de construction) dues, dans la plupart des cas, à des nouveaux chargements ou à des travaux de surcreusement en pied d'ouvrage.

### 7.2. Problèmes de tassement

Les sols fins se déforment verticalement (tassement) et horizontalement sous les remblais. Ces déformations ne sont pas instantanées. Elles commencent pendant la construction et peuvent durer pendant des mois, voire des années ou des dizaines d'années suivant les propriétés des sols et l'épaisseur des couches. Les tassements ne

sont pas uniformes à cause de la section trapézoïdale des remblais, de leur épaisseur variable et de l'hétérogénéité des sols supports. Le tassement d'un sol est une déformation généralement lente de ce dernier sous le poids du remblai qui se traduit :

- au centre du remblai par un enfoncement vertical,
- sous l'emprise du remblai, par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral du sol de fondation,
- hors de l'emprise du remblai, par un déplacement latéral de sol de fondation jusqu'à une distance directement liée aux épaisseurs du remblai et du sol compressible.

Les déplacements verticaux peuvent être d'épaisseur métrique si les sols mous sont très épais, alors que les déplacements horizontaux sont généralement plus faibles et de l'ordre de dizaines de centimètres dans les cas les plus importants. La vitesse des tassements est très variable et fonction du degré de consolidation des sols d'assise, degré de consolidation évalué à l'aide de l'essai œdométrique. Il n'est pas rare de mesurer des tassements résiduels de plusieurs centimètres sur des périodes de plusieurs années (Fig.18).

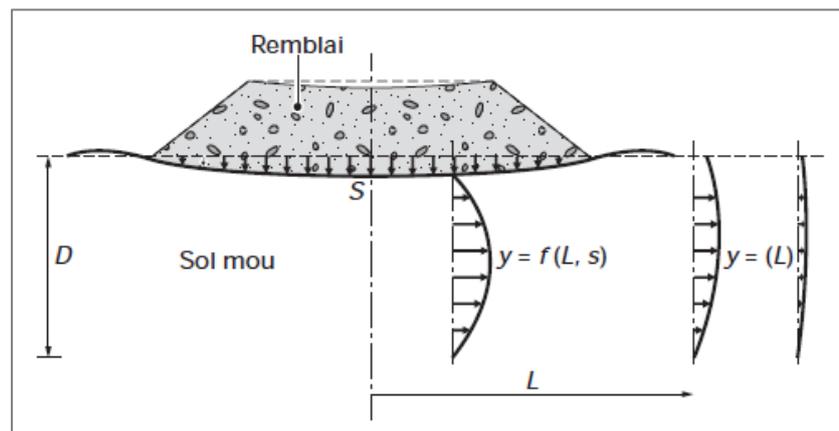


Figure 18 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation

Les phénomènes de rupture ou de tassement des sols mous en assise de remblais peuvent avoir des développements plus ou moins importants et rapides qu'il convient de redouter et d'anticiper au mieux, notamment lorsque ces remblais sont à proximité d'autres ouvrages. Ces derniers peuvent être :

- des éléments externes au remblai comme des remblais contigus, murs de soutènements, bâtiments, culées d'ouvrages et différentes fondations ;
- des éléments internes au remblai comme des buses, cadres fermés, canalisations, etc.

Les exemples les plus courants des conséquences des ruptures des sols sur des ouvrages avoisinants sont des ruptures de pieux de fondations des ouvrages d'art, des

déversements de culées ou de murs de soutènement, des dégradations d'ouvrages enterrés, etc.

Les conséquences des effets dus aux tassements sont surtout sensibles aux abords des ouvrages d'art, notamment dans le cas de remblais d'accès après la réalisation de pieux de fondations des appuis, surtout s'il y a des chargements successifs. Les surcharges verticales proches de zones de pieux peuvent entraîner le phénomène bien connu de frottement négatif opéré par le sol qui se tasse le long du pieu en l'entraînant vers le bas.

Les mouvements horizontaux induisent des phénomènes de flexion des pieux qui peuvent provoquer leur rupture ou le déplacement progressif des appuis susceptibles de créer des phénomènes de butées (blocage des dilatations, fissurations, joints inopérants, etc.).

Par ailleurs, la présence de sols compressibles en fond de vallée est un indicateur de sensibilité du milieu naturel. S'ils sont le siège d'un écoulement de nappe, il peut y avoir risque de réduction de leur perméabilité sous leur consolidation propre avec constitution d'un barrage souterrain freinant l'écoulement de la nappe et modifiant éventuellement son niveau. Dans ce cas, des études géotechniques spécifiques doivent être lancées pour surveiller les évolutions de ces paramètres.

### **7.3. Problème de gonflement**

Le phénomène de gonflement affecte chaque année diverse types de constructions à fondations superficielles (bâtiments et infrastructures routières,...) causant des désordres considérables qui imposent des reprises en sous œuvre très coûteuses et dont la réalisation n'est souvent pas maîtrisée. Par leur structure particulière, certaines argiles gonflent lorsque leur teneur en eau augmente et se rétractent en période de sécheresse. Ces variations de volume, rarement uniformes, se traduisent par des tassements différentiels entre les secteurs qui sont soumis à l'évaporation et à la succion des racines d'arbres et ceux qui en sont protégés. Ces mouvements de terrain peuvent avoir un impact sur les constructions.

Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau sont les sols argileux naturels, les marnes, les roches argileuses et les roches composées d'anhydrite. Le processus de gonflement du taux d'absorption de l'eau. Il met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Il dépend aussi de la texture du matériau. C'est-à-dire de l'organisation des plaquettes entre elles.

Des essais de gonflement-retrait peuvent apporter une idée de ce risque dans les remblais routiers. Les essais de gonflement CBR sont réalisés pour les matériaux susceptibles de développer un gonflement après leur mise en œuvre. Les mesures de

gonflement sont effectués après une immersion de plusieurs jours voir plusieurs semaines d'éprouvettes de sols.

#### **7.4. Problème d'érosion**

L'érosion est un domaine important en génie civil qui prend en compte l'érosion des remblais d'infrastructures linéaires de transport comme les routes et les chemins de fer. Ce phénomène de dégradation et de transport des matériaux solides sont causés par l'eau.

L'érosion se définit comme un déplacement de sol attribuable à l'action érosive de l'eau, qui entraîne un apport récurrent de sédiments, même en faible quantité, dans le réseau hydrographique situé sur ou en bordure immédiate des parterres de coupe ou du tronçon de route faisant l'objet de l'évaluation.

Il doit être récurrent, c'est-à-dire qu'il doit se répéter dans le temps lors des averses de pluie ou de la fonte des neiges. Il peut être direct ou indirect, via le réseau routier ou le drainage naturel. La présence d'une langue de sédiments active, c'est-à-dire qui augmente avec le temps et s'allonge vers le bas de la pente à chaque pluie, peut indiquer qu'elle atteindra éventuellement le réseau hydrographique et que l'apport est récurrent.

En contrepartie, une langue de sédiments stable, c'est-à-dire qui n'est plus alimentée par l'eau de ruissellement, ne doit pas être associée à un cas d'érosion, même si elle a atteint le réseau hydrographique, car elle ne constitue pas un apport récurrent. Généralement, un tel dépôt de sédiments non récurrent se forme pendant la construction des infrastructures routières avant que les travaux de stabilisation ou le gravelage de la surface de roulement ne corrigent la situation. Les causes de l'érosion sont :

- mise à nu des sols pendant les travaux,
- exposition du sol dénudé aux précipitations et aux vents,
- entreposage de sol excavé à haut potentiel érosif au bord des routes, des fossés et des cours d'eau, sans protection adéquate,
- modification du relief (profil et du niveau du sol),
- modification du patron naturel de drainage des terrains,
- absence de stabilisation des sites durant les périodes d'arrêt des travaux.

Lors de l'évaluation des cas d'érosion sur le réseau routier, le type d'érosion doit être identifié. Chacun des cas d'érosion observés correspond généralement à l'un des huit types présentés ci-après.

### 7.4.1. Érosion des fossés

Ce type d'érosion est causé par l'eau circulant dans les fossés et en bordure du chemin. On considère comme un fossé la superficie située au pied du remblai ou du déblai du chemin. Les fossés sont généralement très visibles, puisqu'ils sont creusés lors de la construction du chemin. Les cas d'érosion qui surviennent à l'extérieur de la surface de roulement d'une route sans fossé sont également classés dans cette catégorie.



*Figure 19 : Érosion des fossés*

### 7.4.2. Érosion longitudinale de la surface de roulement

Ce type d'érosion se produit sur la surface de roulement, dans le sens de la pente. Il s'agit généralement d'un ravinement causé par un mauvais profilage de la surface de roulement ou par la présence de bourrelets en bordure de celle-ci, qui ne permet pas l'évacuation régulière de l'eau. Il peut également s'agir d'un affaissement de la route au-dessus d'un ponceau causé par l'effondrement de ce dernier ou par un mauvais compactage.



*Figure 20 : Érosion longitudinale de la surface de roulement*

### 7.4.3. Érosion du talus de déblai du chemin

Ce type d'érosion est caractérisé par la présence de rigoles sur le talus de déblai du chemin, généralement causées par l'eau de ruissellement qui provient du parterre de coupe.



*Figure 21 : Erosion du talus de déblai*

#### **7.4.4. Érosion du talus de remblai du chemin**

Ce type d'érosion survient lorsque l'eau de ruissellement de la surface de roulement s'écoule sur le talus de remblai du chemin. Il est à noter que si l'eau provient du fossé, et non de la surface de roulement, le cas d'érosion doit être classé dans la catégorie « érosion des fossés ».



*Figure 22 : Erosion du talus de remblai*

#### **7.4.5. Érosion du parterre de coupe**

Ce type d'érosion survient lorsque le ruissellement de l'eau sur le parterre de coupe creuse d'importantes rigoles qui transportent des sédiments directement ou indirectement (via le chemin) vers le réseau hydrographique. Ces rigoles se forment généralement dans un sentier de débardage en pente plus ou moins prononcée où l'eau de ruissellement a été canalisée par les ornières.



*Figure 23: Erosion du parterre du remblai*

### **7.5. Efforts sur les ouvrages voisins**

Les déformations du sol sous le poids d'un remblai s'étendent au-delà des limites de la zone chargée en surface. La construction d'un remblai peut pour cette raison provoquer des tassements sous des ouvrages voisins existants (voies ferrées, autres voies, voie dont le remblai constitue un élargissement, fondations superficielles de bâtiment ou d'ouvrage d'art, etc.).

Les déformations verticales et horizontales des sols compressibles peuvent d'autre part induire des efforts très importants sur les ouvrages fixes ou incapables de suivre les déplacements des sols qui les entourent (fondations profondes d'ouvrages d'art, de bâtiments ou de quais, par exemple).

Cette interaction des remblais et des ouvrages existants ou à construire peut avoir des conséquences importantes sur les conditions d'exploitation des ouvrages. Elle doit être examinée avec soin lors de l'élaboration du projet et du phasage des travaux de construction.

### **7.6. Ecoulement des eaux**

Les sols fins sont souvent situés en fond de vallée. La construction d'un remblai en travers de la vallée d'un cours d'eau ou le long de cette vallée perturbe l'écoulement des eaux dans la vallée en période de crues. Les écoulements de crues peuvent éroder le pied du remblai, qui doit alors être protégé. Ils nécessitent aussi souvent de prévoir des ouvertures à travers le remblai pour laisser passer l'eau. La déformation des sols compressibles sous le poids du remblai réduit d'autre part légèrement la perméabilité de ces sols, ce qui peut influencer l'écoulement de l'eau dans la nappe.

## **CHAPITRE II**

# **UTILISATION DES SOLS FINS APRES TRAITEMENT**

## CHAPITRE II : UTILISATION DES SOLS FINS APRES TRAITEMENT

### 1. Introduction

Ce chapitre présente les divers aspects de la stabilisation des sols à caractéristiques médiocres à partir d'une revue de la littérature. Celle-ci permet de prendre connaissance des applications possibles de la stabilisation ainsi que des différents types d'ajouts généralement utilisés. En rapport avec les types d'ajouts, les réactions et les composés qu'ils développent avec les sols sont expliqués de même que les facteurs qui influencent ces réactions et les modifications qu'ils apportent aux sols. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'influence de quelques perturbateurs de traitement ainsi que les différentes techniques de traitement sur chantier.

### 2. Structure et construction d'une route

L'établissement d'une route procède d'une succession d'étapes d'élaboration qui varient en fonction de la topographie et de la nature du sol et du sous-sol. Le Guide technique des Terrassements Routiers [GTR 1992] présente une coupe type d'une route sur la figure suivante.

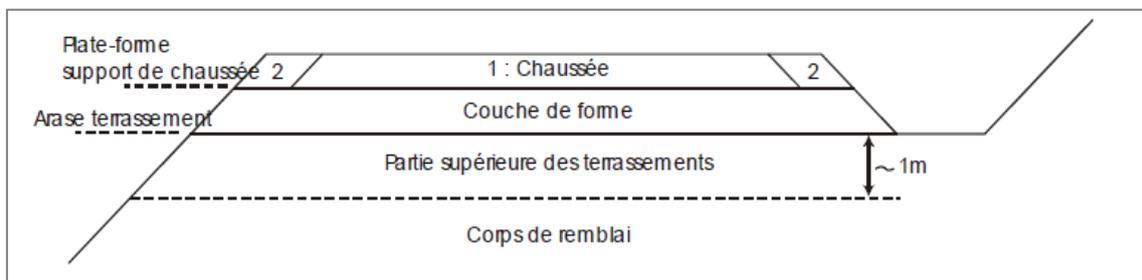


Figure 24 : Coupe d'une route d'après le GTR

Pour construire des routes, il est nécessaire de concevoir et de réaliser, au préalable, une plate-forme support de capacité portante minimale, permettant la construction de la structure de chaussée proprement dite.

La réalisation de la plate-forme support, qui fait partie du domaine des terrassements routiers, consiste à effectuer des travaux de nivellement (remblais) et à exécuter une couche structurale qu'on désigne par « couche de forme ».

Les travaux de remblais et de couche de forme peuvent faire appel à **la technique des emprunts granulaires** et/ou **la technique de traitement des sols en place aux liants hydrauliques**. Ces deux techniques présentent des avantages et des inconvénients, tant sur le plan économique qu'environnemental.

### **2.1 La technique des emprunts granulaires**

Qui consiste à utiliser des matériaux granulaires en provenance de ballastières ou de carrières. Faisant appel à des granulats dont l'extraction et la fabrication n'ont que peu d'impact en matière économique et environnementale, peut être handicapée par les impacts générés :

- par le transport des granulats (un produit pondéreux), dès que la distance carrière-chantier dépasse un certain seuil.
- par le transport des sols excédentaires, du chantier jusqu'à la décharge.

### **2.2 La technique de traitement des sols en place aux liants hydrauliques**

Qui consiste à valoriser les sols naturels (existant à l'endroit du chantier) en les mélangeant avec un liant hydraulique et de l'eau. Cette technique nécessite l'utilisation d'un liant hydraulique, dont la fabrication représente un impact non négligeable tant sur le plan économique qu'environnemental, mais ce liant est utilisé en faible dosage et les quantités à fabriquer et à transporter sont faibles, comparées à celles des emprunts granulaires.

Ainsi, en fonction du contexte propre à chaque projet (distance carrière-chantier, distance chantier-décharge, dosage du liant et distance usine-chantier), l'une ou l'autre technique peut s'imposer sur le plan économique et/ou sur le plan environnemental.

Il existe des méthodes graphiques qui permettent l'évaluation et la comparaison d'ordre économique ou environnemental (Énergie et CO<sub>2</sub>) entre la technique de Traitement des sols et la technique des Emprunts granulaires.

Ces méthodes présentent un double avantage :

- elles permettent à l'utilisateur de choisir, en fonction des données locales de ses projets, les valeurs des paramètres à chaque étape de l'étude,
- elles aident à estimer et à comparer, rapidement et visuellement, selon une progression cumulative, laquelle des deux techniques Traitement des sols ou Emprunts granulaires est la plus adaptée sur le plan économique ou environnemental.

Elles prennent en compte les impacts de fabrication (liant, granulats), de transport (liant, granulats, sols excédentaires) et de mise de œuvre des matériaux (Sol traité, Emprunts granulaires).

Elles n'intègrent pas certains facteurs qui auraient avantage la technique de Traitement des sols et qui sont : le coût de mise en décharge des sols excédentaires, le coût d'entretien du réseau routier qui aurait été dégradé par le trafic occasionné par le chantier (transport des matériaux) et le coût sociétal pour les riverains lié à ce trafic (risques d'accidents, nuisances...).

### 3. Produits de traitement

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) est une technique qui offre plusieurs types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

#### 3.1. Produits traditionnels

Les ajouts les plus utilisés pour la stabilisation des sols sont le ciment, la chaux et le mélange ciment/chaux.

##### 3.1.1. Chaux

La chaux est obtenue par calcination de pierres calcaires très pures à haute température ( $\pm 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  $\text{CaCO}_3 + \text{Chaleur} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

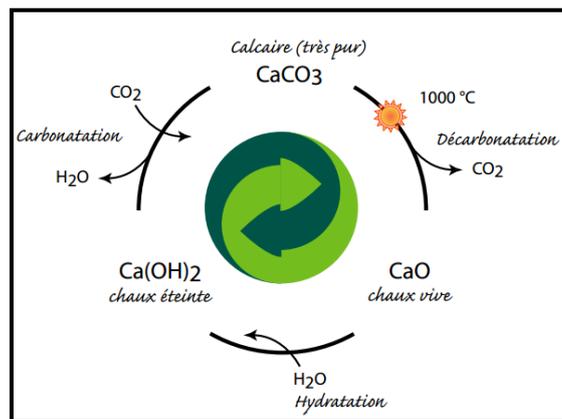


Figure 25 : Les cycles de carbonatation/décarbonations de la chaux

La chaux peut exister sous les trois formes suivantes :

- **Chaux vive**: elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90 %). Une chaux vive pour le traitement des sols définie dans le GTS.
- **Chaux éteinte**: elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub>. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique :



- **Lait de chaux**: Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement de sols présente l'avantage de supprimer la poussière et

d'humidifier les sols secs, alors que la chaux vive achève au contraire de les dessèche.



*Figure 26 : différents types de chaux*

Les multiples études menées sur le traitement des sols par la chaux ont la rendue une technique maîtrisée et largement utilisée dans le domaine des terrassements. Parmi ces études on distingue les travaux de [F. Bell 1989 ; 1996] qui a parvenu a détaillé les interactions qui se produisent entre la chaux et les éléments silico-alumineux du sol qui sont d'après ces recherches les responsables de l'augmentation de la résistance du sol et la réduction de sa sensibilité a l'eau. Il mentionne aussi qu'il existe un dosage en chaux minimal, nommé « Point de Fixation de la Chaux », pour initier les réactions pouzzolaniques. Selon lui, à partir de ce dosage, la chaux devient disponible pour les réactions pouzzolaniques.

### **3.1.2. Le ciment**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés dans le mélange.

La fabrication proprement dite du ciment consiste à doser et à mouler finement les différents constituants dans des proportions bien déterminées. En broyant le clinker Portland avec un régulateur de temps de prise

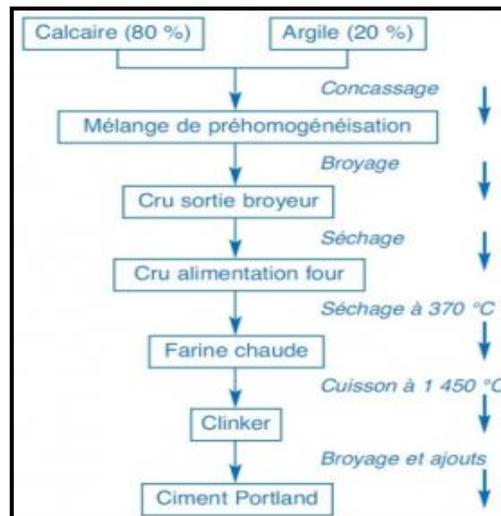


Figure 27 : Obtention de ciment

On distingue cinq types de ciments courants:

- CEM I Ciment Portland
- CEM II Ciment Portland composé
- CEM III Ciment de haut-fourneau
- CEM IV Ciment pouzzolanique
- CEM V Ciment composé.

Dans la gamme étendue disponible, le choix du type de ciment se fera sur différents critères:

- temps de prise assez long, pour la mise en œuvre;
- bonne résistance à moyen et long terme;
- compatibilité avec le sol à traiter;
- bon rapport qualité/prix.

En principe, toutes les classes de ciments peuvent convenir pour le traitement des sols. Mais on peut dire que les ciments les plus utilisés pour la stabilisation des sols dans plusieurs travaux antérieurs, sont généralement des ciments Portland ou des Portland au laitier de haut fourneau. Ce matériau contient comme la chaux l'oxyde de calcium CaO, mais aussi une très grande quantité de Silicates SiO<sub>2</sub>.

### 3.2. Produits non traditionnels

De très nombreux produits non traditionnels sont ou ont été utilisés en traitement de sols. Certains, du fait des faibles quantités disponibles, de leur dangerosité, de leur coût, n'ont fait l'objet que d'études restreintes. D'autres produits de traitement, au contraire, ont été plus largement étudiés et ont fait l'objet d'utilisations *in situ* et de développements au cours des dernières années.

### 3.2.1. Laitier de haut fourneau (LHF)

Le laitier de haut fourneau, coproduit de l'élaboration de la fonte, est constitué par la partie non ferreuse du minerai (la gangue), la cendre du coke et le fondant. Un refroidissement rapide, comme la granulation, confère au laitier des propriétés hydrauliques. Il ne réagit pas à l'eau, au contraire du ciment, mais peut induire des réactions pouzzolaniques s'il est utilisé en combinaison avec un autre liant afin d'être activé.

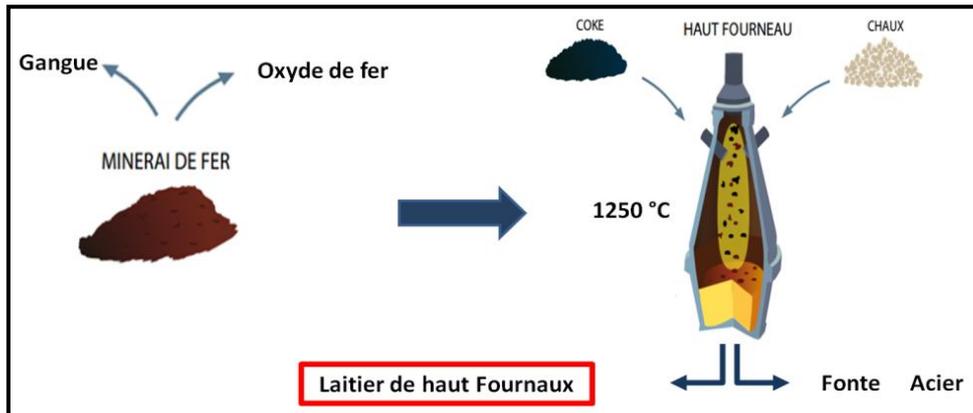


Figure 28 : obtention de laitier de haut Fournaux



Figure 29 : laitier granulé (à gauche) et laitier cristallisé (à droite)

On distingue deux sortes de laitiers par le processus et la vitesse de refroidissement, laitiers cristallisé et laitiers vitrifiés. Le laitier vitrifié obtenu par un refroidissement brutal à l'eau, lui confère une structure vitreuse. Cela lui permet de développer des propriétés hydrauliques. Ce laitier refroidi à l'eau est appelé « laitier granulé ».

Le laitier est essentiellement composé des quatre oxydes CaO, MgO,  $A_2O_3$ ,  $SiO_2$  dont des proportions varient selon les valeurs indiquées dans le Tableau 2, qui correspondent à la composition moyenne des laitiers.

Composition	Laitier	Clinker
CaO	28-46	60-70
SiO <sub>2</sub>	31-36	19-25
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9-18	2-9
MgO	4-10	0-3
Na <sub>2</sub> o+k <sub>2</sub> O	0.5-2	1-1.5

Tableau 2 : Composition chimique de laitier de haut Fournaux

Grâce à sa propriété hydraulique latente, le laitier vitrifié (granulé) est susceptible de donner par activation basique, des produits d'hydratation stables. En effet, le laitier granulé, contrairement au ciment qui s'hydrate par simple addition d'eau, ne peut réagir avec l'eau que grâce à l'intervention des sulfates ou des bases fortes telles que les hydroxydes de sodium, de potassium, de calcium, ou d'autres produits. Ce phénomène est appelé "activation".

On caractérise l'activation par le mode d'action chimique qu'elle met en œuvre. L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate.

Il existe trois modes d'activation :

- L'activation alcaline par la soude ou la chaux
- L'activation sulfatique par les sulfates
- L'activation sulfato-calcique

De nos jours les laitiers ont une large utilisation, ils entrent dans la composition de nombreux types de ciment (CHF, CLX, CLK...etc.) ou bien dans la formulation des liants hydrauliques routiers, plusieurs études sont intéressées à améliorer l'activité des laitiers par la combinaison d'autres produits.

- Laitiers + Chaux [Y. Yi 2013; P. Venda Oliveira 2013]
- Laitiers + Ciment [Y. Yi 2014]
- Laitiers + Magnésium [Y. Yi 2014]
- Laitiers + Dolomie [K. Gu 2014]
- Laitiers + Carbure de calcium
- Laitiers + Phosphogypse [M. Samar 1998]

Les liants formulés à base de LHF possèdent plusieurs avantages, ils gardent leurs résistances dans les milieux agressifs comme ils peuvent limiter efficacement le gonflement [R. Nidzam 2010] indique que des substances gonflantes se forment après un traitement du sol par le ciment à cause du sulfate existant dans sa composition et se forme aussi après la réaction entre le sulfate présent dans l'argile et la chaux mais sa formation de ces substance est très limité dans le cas de traitement par les LHF.

### **3.2.2. La coquille d'œuf calcinée**

La coquille d'œuf est un biominéral naturel composé d'un réseau de fibres protéiques associé à des cristaux de carbonate de calcium (96% du poids de la coquille) de carbonate de magnésium (1%) et de phosphate de calcium (1%), ainsi que de les substances organiques et l'eau. Le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), le constituant majeur de la coquille, est un cristal amorphe qui se produit naturellement sous forme

de calcite (cristal hexagonal). En 2008, la production mondiale d'œufs est près de 62 millions de tonnes, la Chine étant le leader avec 37,6%. La production avicole aussi entraîne des déchets de la coquille d'œuf avec des quantités considérables et considérées comme n'ayant aucune valeur économique. La coquille représente environ 11% du poids total des œufs, donc les déchets générés peuvent être estimés à environ 6,82 millions de tonnes par an dans le monde [D.A. Oliveira et al 2012].



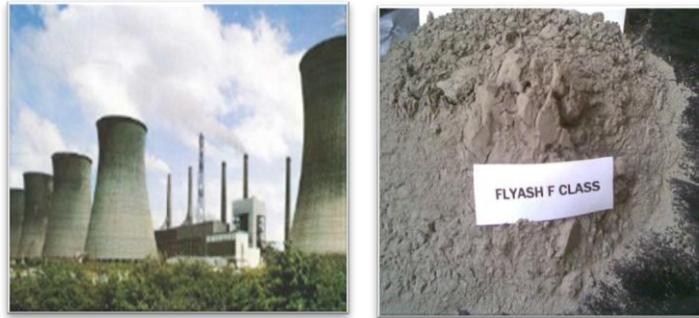
*Figure 30 : Coquille d'œuf*

Les coquilles d'œufs ont largement été utilisées comme catalyseur efficace dans la conversion de l'huile de soja et alcool méthylique dans la production de biodiesel. En analysant différentes conditions de processus, [Wei et al 2009] a conclu que CaO était la phase active de la coquille d'œuf dérivée.

L'utilisation de la coquille comme source alternative de CaCO<sub>3</sub> (carbonate de calcium) peuvent réduire l'impact sur les réserves naturelles de calcaire, une source naturelle non renouvelable. [O. AMU 2005] a effectué une étude comparative entre l'effet de chaux et la poudre d'œuf sur le gonflement d'une argile, la quantité de chaux était remplacée partiellement par la poudre d'œuf, il a trouvé que la chaux reste la plus efficace mais la poudre a réussi à réduire le gonflement et augmenter la résistance au cisaillement.

### **3.2.3. Centres volantes**

Les cendres volantes sont les particules non combustibles recueillies entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les installations de dépoussiérage électrostatique ou mécanique. Elles se présentent sous forme de grains sphériques de diamètre compris entre moins de 1 µm et 100 µm. Elles sont classées selon la norme [ASTM C618] par leurs compositions chimiques, les cendres provenant de la combustion des charbons bitumineux sont caractérisées par une faible teneur en oxyde de calcium (CaO) et de fortes teneurs en silice et alumine (classe F)



*Figure 31 : Obtention de la cendre volante*

Elles nécessitent souvent l'addition d'un activant. Au contraire, les cendres issues de la combustion de lignite possèdent une teneur en oxyde de calcium supérieure à 10%, de faibles teneurs en silice et alumine et de fortes teneurs en alcalins et sulfates (Classe C). [X. Kang 2014] a approuvé que les cendres volantes sont parmi les produits les mieux adaptés pour le traitement des sols argileux. [P. Venda Oliveira 2013] ont montré que l'incorporation des cendres volantes à un sol limoneux améliore ces caractéristiques de compressibilité, en augmentant sa pression de préconsolidation et diminuant ces indices de compression de gonflement.

#### 3.2.4. Fumée de silice

Est un sous-produit de la fabrication d'alliages de silicium ou de ferro-silicium obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon. Le monoxyde de silicium entraîné par les gaz depuis la zone de combustion des fours s'oxyde et se condense sous forme de particules de silice amorphe ( $\text{SiO}_2$ ), sphériques et extrêmement fines.



*Figure 32 : Fumée de silice*

La silice amorphe constitutive de la fumée de silice est très réactive et la petitesse des particules accélère la réaction pouzzolanique avec l'hydroxyde de calcium. En Algérie, le fumé de silice est commercialisé par la société **GRANITEX**. Des études antérieures ont montré que l'incorporation de fumé de silice se révèle intéressante pour la stabilisation des sols. Les travaux menés par [E. Kalkan 2004 ; 2011] ont montré que l'incorporation du fumé de silice limite les gonflements des sols fins et augmente leurs perméabilités, elle peut aussi réduire les effets nocifs du phénomène gel-dégel ainsi que des cycles séchage-mouillage sur la résistance des sols traités.

### 3.2.5. Pouzzolane naturelle

Sont des roches constituées par des projections volcaniques possédant une texture scoriacée et alvéolaire. Leur formation peut résulter de l'expansion rapide d'un magma en surface accompagnée d'un dégazage ou d'une interaction entre le magma et de l'eau.



*Figure 33 : Pouzzolane naturelle*

On les distingue des basaltes qui ont un aspect massif alors que les matériaux pouzzolaniques sont poreux, leur refroidissement rapide assimilé à une trempe provoque la présence d'une phase amorphe. Les pouzzolanes naturelles sont souvent utilisées dans la fabrication du ciment.

Les pouzzolanes naturelles sont souvent utilisées dans la fabrication du ciment. [P. Segui 2011] a élaboré un liant hydraulique à base de pouzzolane naturelle combiné avec de la chaux et du gypse, les performances de ce liant ont été testées sur des mortiers et utilisées aussi comme un produit de traitement sur une argile, les résultats trouvés sont très satisfaisants. [K. Harichane 2011] a réussi à améliorer la résistance d'une argile par l'incorporation de la pouzzolane naturelle de Beni Saf activée par la chaux.

### 3.2.6. Sable de dune broyé

Le sable broyé est une poudre, de diamètre moyen entre 10 et 15 Nm, issue du broyage d'un sable très riche en silice ( $\text{SiO}_2 > 98\%$ ) généralement utilisé dans la verrerie. La méthode la plus connue de production de poudre de silice est le broyage à sec dans des broyeurs à galet ou boulet d'alumine. Il est employé principalement dans la formulation des Bétons ultra haute performance. L'utilisation de sable de dune qui contient de forte teneur en silice serait donc comme une proposition pour l'amélioration des sols.



*Figure 34 : Pouzzolane naturelle*

Il est employé principalement dans la formulation des Bétons ultra haute performance. L'utilisation de sable de dune qui contient de forte teneur en silice serait donc comme une proposition pour l'amélioration des sols.

### 3.2.7. Dolomie

La dolomie est un minéral double de carbonates de calcium et de magnésium ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ), elle est formée par imprégnation des roches calciques par des eaux très salines riches en magnésium à l'état naturel. La dolomie est associée à des impuretés, dont les principaux sont :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Elle est considérée réfractaire si elle contient au minimum 20% de MgO avec un taux d'impuretés  $\leq 2.5\%$ , et elle d'aucune utilité industrielle si ce taux est  $\geq 7\%$  [H. Bounib 2013]. La décomposition solide de la dolomie se produise selon la réaction suivante :  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2$



Figure 35 : Dolomie (CEVITAL)

Cette réaction est complète pour une température comprise entre  $600^\circ\text{C}$  et  $800^\circ\text{C}$ . [K. Gu 2014] a vu que la dolomie calciné a une plage de températures qui s'étale de  $800^\circ\text{C}$  jusqu'à  $1000^\circ\text{C}$  peut être un activant potentiel pour les laitiers de haut fourneau. L'efficacité de ce nouveau produit a été testée sur une argile et un sable limoneux, les résultats ont été très encourageants.

### 3.2.8. Magnésium

Du fait que la protection d'environnement est devenu un sujet d'actualité la production du Magnésium est considérée moins nocive par apport a d'autres produits qui sont de large utilisation tel que le ciment, qui projette  $0.95$  tonne de  $\text{CO}_2$  par une tonne de ciment produite, ainsi que la calcination du clinker se fait a  $1450^\circ\text{C}$ , la calcination de la magnésite se fait a  $800^\circ\text{C}$  donc il demande moins d'énergie. Une fois mélangé avec le sol, il est capable de formé des composé cimentaire. Vu que son prix est plutôt élevé. Il est souvent combiné avec d'autre produit.

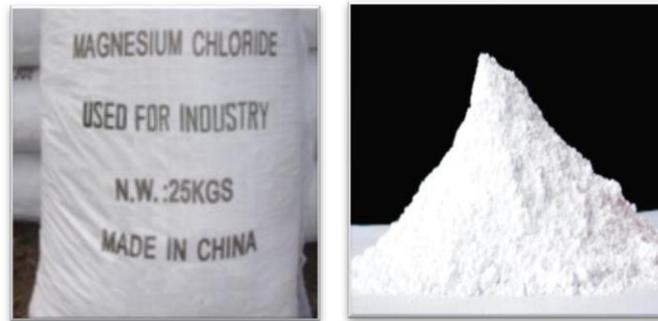


Figure 36 : Magnésium industriel

[Y. Yi 2014] a trouvé que l'activation des laitiers de haut fourneau par le Magnésium était plus performant qu'au celui activé par la chaux pour la stabilisation d'une argile limoneuse.

### 3.2.9. Poudre de marbre calciné

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris. Il désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux. Le marbre en Algérie est exploité par l'entreprise nationale du marbre «ENAMARBRE». La production de la carrière de Fil Fila (Skikda) laisse des déchets qui sont recyclés comme des granulats ou d'une poudre de marbre.



Figure 37 : obtention des dérivés de marbre (carrière El Chat-Skikda)

La valorisation des déchets de marbre était le sujet de quelques études. [I. Zorluer 2014] a utilisé la poudre de marbre pour activer des cendres volantes qui sont initialement pauvres en oxyde de calcium afin d'améliorer les performances mécaniques d'une argile de Turquie. [P. Julphunthong 2015] a employé un mélange de marbre et de bagasse calcinés à  $1000^{\circ}\text{C}$  pour la stabilisation d'un sol limoneux, le mélange était très efficace concernant l'augmentation de la résistance et la réduction de la plasticité.

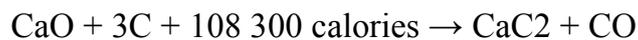
### 3.2.10. Poussière des fours à ciment (CKD)

Un co-produit de la fabrication du ciment qui est responsable de 10% de la pollution en Algérie. La poussière de ciment est collectée du gaz d'échappement des fours, elle contient d'après [S. Jegandan 2012] du clinker des grains crues partiellement calcinés et de la cendre combustible, elle possède les mêmes caractéristiques d'un liant

hydraulique, comme elle peut jouer le rôle d'un activant si en l'associe a un autre produit latent. Afin de minimiser les effets néfastes de cette poussière la majorité des cimenteries en Algérie ont été équipés par un système de dépoussiérage en utilisant les tissus filtrants au lieu des électrofiltres, qui sont moins efficaces, le cas de la cimenterie HammaBouziene [S. Rebouh 2012]. La valorisation de cette poussière a été le sujet de plusieurs travaux. On peut citer les travaux [K. Hossain 2011] qui a essayé de stabiliser un sable argileux par l'ajout des quantités de poussière qui arrivent jusqu'à 20% ces ajouts ont été les responsables de l'augmentation de la résistance à la compression et la traction indirecte et aussi l'amélioration de l'indice CBR.

### 3.2.11. Carbure de calcium

Ce composé se présente sous la forme de cailloux gris, qui ne sont pas extraits du sol comme l'imaginent certains : ils résultent d'une opération de synthèse industrielle à partir de la chaux et du charbon pour la fabrication de l'acétylène. La fabrication du carbure de calcium nécessite deux éléments : la chaux vive et le carbone, selon la réaction suivante :



(Chaux vive) + (carbone) + (énergie)  $\rightarrow$  (carbure) + (monoxyde de carbone)



Figure 38 : Carbure de calcium

La valorisation des carbures de calcium est apparue dans les travaux de [Y. Yi 2014] qui a utilisé ce matériau pour activer les laitiers de haut fourneau pour un traitement d'une argile par le procédé *dry jet mixing*. Dans l'étude [S. Horpibulsuk 2012] une argile a été traitée par un mélange de cendre volante activé par le carbure de calcium, la résistance à la compression et les caractéristiques de compactage après traitement ont connu une amélioration importante.

### 3.2.12. Le Phosphogypse

Est un sous-produit issu de la fabrication de l'acide phosphorique lors des traitements des phosphates naturels par l'acide sulfurique, il est considéré toxique et très polluant. Produit par ASMIDAL, le traitement de 4 tonnes du phosphate naturel par 2 tonnes d'acide sulfurique engendrent 5 tonnes de Phosphogypse qu'ils sont soit rejetés en mer, soit mis en terri. [M. Samar 1998] a cherché d'utiliser ce déchet local dans l'élaboration d'un liant hydraulique. Pour cela le Phosphogypse était un activant sulfurique pour les laitiers de haut fourneau, les résultats ont montré que ce nouveau liant procède une activité hydraulique intéressante.



Figure 39 : Phosphogypse (ASMIDAL)

### 3.2.13. Cendre des boues de papèteries

Un sous-produit qui vient de la fabrication et le recyclage des papiers. En effet, la combustion est parmi les solutions permettant de diminuer le volume des boues de papeterie produites et ainsi d'en limiter la mise en décharge.



Figure 40 : boues de papèteries

Les cendres de papeterie sont essentiellement composées de calcium, de silicium et d'aluminium : à eux trois, ils représentent entre 70 et 90 % des matériaux.

La formulation d'un liant hydraulique routier à base de cendre de boue de papeterie, de gypse et de chaux était le sujet des travaux réalisés par [P. Segui 2011] les résultats ont montré que ce liant procède une réactivité qui est conforme aux normes françaises. [A. Bouamrane 2014] a trouvé que l'incinération de la boue des déchets de papeteries à des températures élevées qui arrivent à 800<sup>0</sup> C améliore sa réactivité.

### 3.2.14. La cendre de boues d'épuration d'eau

Est un sous-produit de la combustion des boues déshydratées dans un incinérateur, l'incinération correspond à un traitement thermique à haute température (900 °C) en présence d'un excès d'air. Cette opération permet de réduire le volume des boues jusqu'à 90 % et la réduction massique a environ 60 %. Les cendres d'incinération ont une teneur en matière organique et une humidité très faibles, voire nulles. Elles sont principalement composées de silice, de fer, de calcium, d'alumine, d'oxyde de magnésium, et de pentoxyde de phosphore.



*Figure 41 : boues d'épuration d'eau*

### 3.2.15. Cendre de la balle de riz

Issue de la combustion d'un co-produit dérivé de la transformation du riz. Cette balle est constituée de l'ensemble des bractées qui renferment le grain après avoir protégé la graine pendant sa croissance. La composition chimique de cette cendre se constitue essentiellement par une forte teneur en silice.



*Figure 42 : balle de riz*

Les travaux de [K. Hossain 2011] ont montré qu'un mélange de cendre de la balle de riz et de la poussière de ciment étaient capable d'améliorer les caractéristiques mécanique d'une argile, la Portlandite dégagé de l'hydratation de la poussière de ciment a permis d'activé les composés de silicate de la cendre du balle de riz, donnant à ce sol une forte résistance a la compression, durable même après des périodes d'imbibition.

### 3.2.16. Cendre de grignon d'olive

Est un sous-produit résultant de l'extraction de l'huile d'olive. Il est constitué du la chaire et l'amande de noyau de l'olive. Le grignon d'olive est considéré un combustible de valeur calorifique moyenne (2950Kcal/kg) [F. Boudissa 2011], les cendres qui se produisent de cette combustion possède une réactivité hydraulique.



*Figure 43 : grignon d'olive*

[M. Attom 1998] a trouvé qu'un dosage optimal 2.5% de cendres de déchets d'olive était capable d'augmenter la résistance à la compression d'une argile plastique, et au-delà de cette valeur le gonflement devient nul, mais la chute de la densité sèche influe d'une façon négatif sur la résistance à la compression.

### 3.2.17. Cendre de Bagasse

Ce sont des cendres issues de la combustion des résidus fibreux de la canne à sucre qu'on a passée par le moulin pour en extraire le sucre. [M. Kamon 1991] ont associé la bagasse a d'autres déchets qui ont été calciné a des températures arrivant jusqu'à 1500<sup>0</sup> C pour produire un ciment a base de déchets pour l'amélioration d'une argile plastique du japon, les résultats obtenu ont été proche à celles obtenu par le ciment ordinaire.



*Figure 44 : Bagasse de sucre*

## 4. Les processus physico-chimiques incités par un liant hydraulique

L'incorporation d'un liant hydraulique dans un sol provoque des actions, dites « immédiates », qui se produisent dès l'instant où le mélange sol-liant est constitué ; des actions, dites « à long terme », qui se poursuivent durant plusieurs mois, voire plusieurs années après la mise en œuvre du sol traité. Il faut mentionner qu'un liant hydraulique routier peut avoir des effets similaires à celle de ciment, mais aussi il peut agir comme de la chaux s'il contient une forte proportion de CaO, ce qui est souvent le cas.

### 4.1. Actions immédiates

#### 4.1.1. Abaissement de la teneur en eau naturelle

L'hydratation du Liant hydraulique est une réaction exothermique qui provoque une consommation/évaporation de d'une partie de la teneur en eau du sol pour une quantité de liant apportée par rapport à la masse sèche. Un abaissement de teneur en eau de 0,3 à 0,5% lors de l'apport de 1% de liant hydraulique par rapport à la masse sèche du sol est constaté [GTS 2000].

#### 4.1.2. Floculation de la matrice argileuse

L'agglomération par floculation des particules argileuses sous l'action de la chaux modifie très rapidement les paramètres géotechniques du sol considéré :

- Diminution de l'indice de plasticité

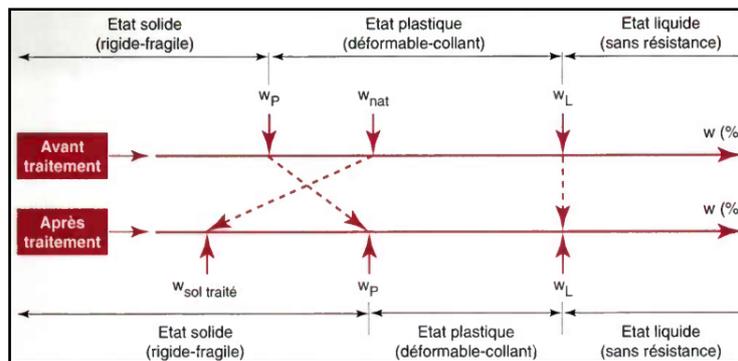


Figure 45 : Influence de traitement sur la consistance du sol [GTS 2000]

Si une certaine quantité de liant est introduite dans un sol argileux dont la teneur en eau naturelle se situe dans le domaine plastique, la réduction de l'indice de plasticité qui se produit en concomitance avec celle de la teneur en eau modifie radicalement le comportement du sol. Celui-ci passe brutalement de l'état plastique, c'est-à-dire déformable, collant, à l'état solide, c'est-à-dire rigide, frottant et fragile. Dans cet état, il devient alors facile à travailler. Augmentation de l'indice portant immédiat.

- **Diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale**

L'ajout de chaux mène en une modification des caractéristiques de compactage. En effet, les sols traités présentent une densité à l'optimum plus faible que celle des sols naturels, et leur teneur en eau de compactage optimale est décalée vers des teneurs en eau plus fortes (fig.46). Les auteurs attribuent la diminution de densité à la réorganisation des particules argileuses causée par le phénomène de floculation/agrégation. Enfin, l'ampleur de ces modifications dépend de la quantité de liant ajoutée. Il est ainsi admis que plus la quantité de liant ajoutée est grande, plus la teneur en eau optimale sera décalée vers les fortes teneurs en eau, et plus leur densité sèche optimale sera faible (fig.46).

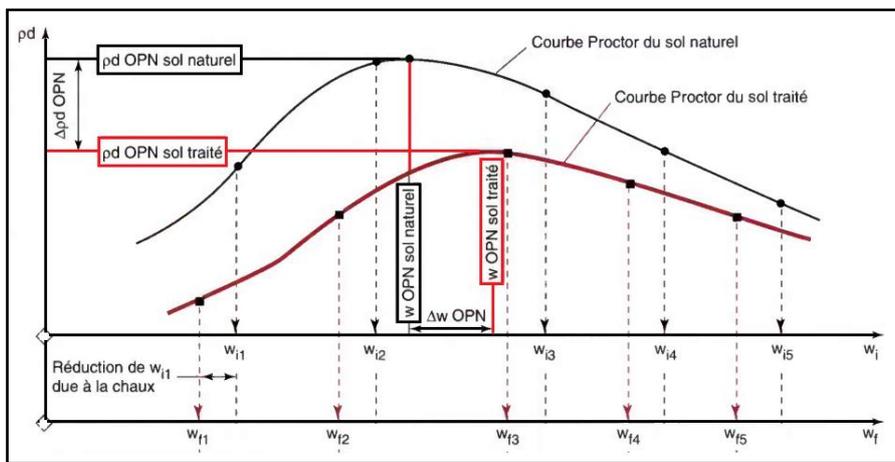


Figure 46 : Influence du traitement sur les caractéristiques de compactage [GTS 2000]

- **Augmentation de la portance du sol**

Une amélioration après traitement de l'indice portant immédiat (IPI) et de l'indice CBR (California Bearing Ratio ou indice portant californien) qui définissent la portance du sol c'est-à-dire sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées.

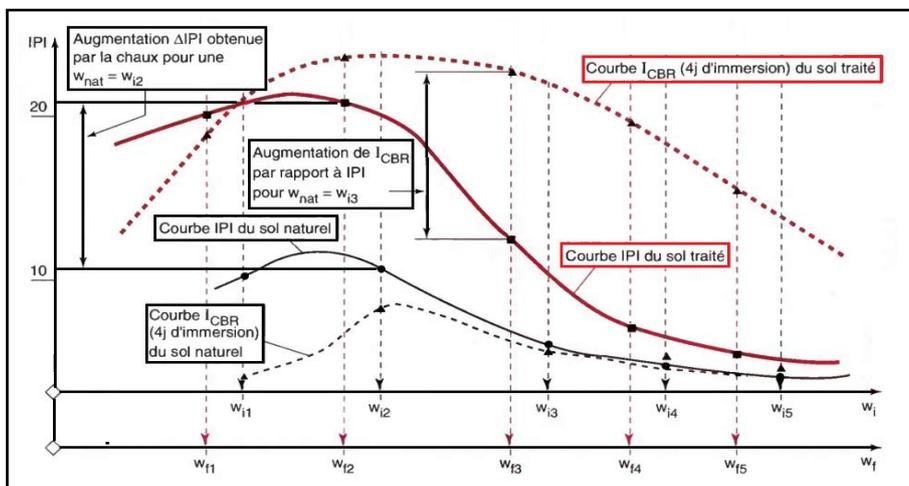


Figure 47 : Influence du traitement sur la portance du sol [GTS 2000]

## 4.2. Action à long terme

### 4.2.1. Effet pouzzolanique

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, l'alumine et la silice qui sont originaire de l'argile ou du liant hydraulique réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments :

- Hydrate de silicate calcique (CSH),
- Hydrate d'aluminate calcique (CAH)
- Hydrate alumino-silicate calcique (CASH)

Ce sont des réactions d'hydratation plus ou moins lentes (pouvant se déclencher quelques semaines après le début de l'hydratation et se déroulant sur des périodes de quelques jours à quelques années) qui peuvent se produire en fonction de la minéralogie du matériau à traiter, du pH et/ou de la quantité de calcium disponible dans le milieu.

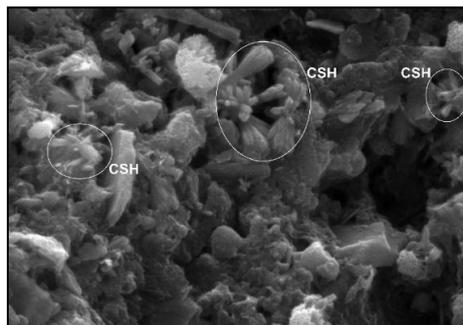


Figure 48 : la structure microscopique des composés cimentaires dans une argile traitée

### 4.2.2. Action de syntaxie

Cette action concerne uniquement la chaux et les liants hydrauliques routiers. Elle se produit avec les craies et les calcaires tendres saturés (ou proches de la saturation). Son principe peut être décrit simplement de la manière suivante :

- la chaux vive, mélangée à des granulats de matériaux calcaires poreux humides, s'hydrate en provoquant simultanément un abaissement de la teneur en eau libre des granulats et la formation de chaux éteinte,
- la chaux éteinte, ayant une surface spécifique très élevée, peut se répartir à la surface de chaque granulat, à la manière d'une sorte de « pralinage »,
- l'abaissement de teneur en eau produit par l'extinction de la chaux vive et par l'évaporation provoque la précipitation, sous forme de calcite, des carbonates présents en solution saturée dans l'eau libre du granulat. Cette calcite obture les pores des grains augmentant ainsi leur résistance.

- le maintien du milieu à un pH élevé, du fait de la chaux de pralinage en excès, garantit
- l'insolubilité des bouchons de calcite ainsi formés et donc la pérennité de la résistance des grains,
- la chaux de pralinage en se recarbonatant sous l'action du gaz carbonique forme une sorte de prise « aérienne » qui agglomère durablement les granulats dans la partie superficielle de la couche en contact avec l'atmosphère (ce dernier aspect est, cependant, négligeable dans l'application au traitement des sols pour remblai ou couche de forme).

L'action de syntaxie explique, en particulier, l'intérêt du traitement à la chaux vive des craies humides en vue de leur utilisation en remblai et en PST. Par ailleurs, comme les actions immédiates, elle ne semble pas être significativement influencée par la température du milieu.

## **5. Perturbateurs de traitement[L. Saussaye 2013]**

La recherche permettant d'établir les mécanismes de perturbation d'un traitement à base de liants hydrauliques a mis en avant un nombre important d'études liées à la stabilisation/solidification de déchets, sédiments ou sols pollués. Elles traitent généralement de l'efficacité de la stabilisation d'éléments traces.

### **5.1. Problèmes liés aux chlorures**

Les chlorures sont largement répandus dans la lithosphère. Ainsi, la présence naturelle de chlorures dans les sols est attribuée généralement aux intrusions d'eau de mer dans les zones côtières et plus rarement aux émanations volcaniques. Ils sont généralement présents sous forme de sels solubles NaCl et KCl (solubilités dans l'eau respectives de 360 et 350g.L<sup>-1</sup> à 20°C).

Plusieurs sources anthropiques sont évoquées : épandage d'engrais sur les sols agricoles, épandage sur les routes, effluents industriels, eaux usées, eaux d'irrigation, eaux de lixiviation des déchets...

L'engrais potassique KCl représente le principal apport de chlorure au sol en agriculture. Les sels de déverglaçage, NaCl et CaCl<sub>2</sub>, ont une influence sur une distance de quelques mètres par rapport à la zone d'épandage. Les sols argilo-limoneux peuvent voir leur concentration en chlorure doubler voire décupler.

Le Borgne [2008] étudie l'influence des ions chlorure sur la solidification de deux sols, un sable et un limon. Chacun de ces sols a été dopé par 60 et 1200mg Cl<sup>-</sup>.kg<sup>-1</sup> de sol sec, introduits en solution sous la forme NaCl. Ensuite, le sable est traité à 6% de ciment CEMI et le limon est traité à 1,5% de chaux et 6% de ciment CEMI. Les concentrations en chlorure représentent alors 0,1 à 2% par rapport à la masse de liants.

Pour le sable, une accélération de la prise et de l'hydratation est observée. Elle est d'autant plus importante que la concentration en chlorure est élevée. En revanche, pour le limon, il semble que le dopage en chlorure n'influe pas sur le développement des Rc, les niveaux de performances restant équivalents à ceux du sol témoin. Le Borgne [2008] met ainsi en avant la dépendance des réactions physico-chimiques à la nature du sol. Il est en outre probable qu'il existe une réaction chlorure-chaux dans le cas du limon.

## 5.2. Problèmes liés aux sulfates

Les deux sources naturelles les plus communes du sulfate sont :

- La pyrite,  $\text{FeS}_2$  : présente en particulier dans les marnes, elle s'altère rapidement dans les conditions de surface (en milieu oxydant) et forme des oxydes et hydroxydes métalliques (oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , hydroxyde de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  et des sulfates (acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , sulfate ferreux  $\text{FeSO}_4$ , gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ...);
- Le gypse,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : il peut être présent initialement (par exemple dans les formations tertiaires du Bassin Parisien) ou provenir de l'altération de la pyrite. En milieu aqueux, le gypse est soluble à la concentration de  $2,4\text{g.L}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$ , ce qui en fait le moins soluble des sulfates présents dans le sol. En comparaison, les sels solubles  $\text{K}_2\text{SO}_4$  et  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , fréquemment présents dans les milieux sédimentaires, ont des solubilités de  $109$  et  $209\text{g.L}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$ .

L'autre source naturelle identifiée est le milieu marin : les embruns sont une source de sulfates.

Hormis quelques sols particuliers, les teneurs en composés soufrés, sulfurés ou sulfatés décelées dans la plupart des sols sont généralement faibles, de l'ordre de  $15$  à  $30\text{mg.kg}^{-1}$  de sol sec. Elles peuvent atteindre  $150\text{mg.kg}^{-1}$  dans un limon sableux [Mathieu et Pieltain 2003].

L'existence et la stabilité des différents dérivés du soufre (pyrite  $\text{FeS}_2$ , sphalérite ou blende  $\text{ZnS}$ , galène  $\text{PbS}$ , gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ...) dépendent des conditions physico-chimiques du milieu, en particulier de l'état d'oxydoréduction et du pH des sols [Benzaazoua *et al.* 1999].

Certaines activités agricoles, industrielles ou domestiques contribuent à l'enrichissement des sols en produits soufrés, sulfures ou sulfates, en particulier avec l'utilisation d'amendements, d'engrais (tel que le sulfate de potassium  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), de composts, de fumiers et/ou de pesticides [Pansu et Gautheyrou 2003].

Les sulfates sont recensés dans le GTS pour induire une accélération de la prise et de l'hydratation des liants hydrauliques, "sous certaines conditions". Cependant, aucune forme chimique ou concentration n'est mentionnée.

[Xinchenet *al.* 2009] étudient le comportement en compression simple à 28 jours des sols riches en sulfate. Le matériau traité contient 392, 700 et 1000mg de  $\text{SO}_4^{2-}$ .kg-1, soit 0,20, 0,30 et 0,50% par rapport à la masse de liant.

Les auteurs recherchent les quantités d'hydrates CAH et CSH formés à 7, 28 et 60 jours. Ils montrent que lorsque la résistance mécanique est plus faible, la proportion d'hydrates décelée est moindre. Il ressort que :

- Des perturbations sont visibles pour de très faibles teneurs en soufre total et en sulfate soluble (dès 0,01% équivalent  $\text{SO}_3$ ) [*ex.* : schiste de la Roche-sur-Yon] ;
- Pour des teneurs en soufre identiques, des sols de minéralogie, texture et microstructure différentes ne sont pas affectés par les mêmes taux de gonflements [*ex.* : limon de Meaux par rapport au schiste d'Angers ; argiles de Mt-St-Martin par rapport aux marnes du Mans];
- Pour des teneurs élevées en soufre total, certains sols ne gonflent pas [*ex.* : gneiss de Tulle par rapport au schiste de la Roche-sur-Yon] ;

S'il n'existe pas de relation directe entre les concentrations en soufre total et les Gv (indices de gonflements), Cabane [2004] émet l'hypothèse que Gv augmenterait lorsque les concentrations en sulfate soluble augmentent.

### 5.3.Problèmes liés aux nitrates

La fixation de l'azote atmosphérique et la minéralisation de la matière organique mènent, par une succession de réactions biochimiques, à la production d'ions ammonium, nitrite et nitrate, formes principales de l'azote dans les sols. Les sources de nitrates sont naturellement présentes en faible quantité, de l'ordre de 10mg.kg-1 jusqu'à 200mg.kg-1 dans un limon sableux [Calvet 2003].

Les ions nitrate sont très facilement lessivables. Leur rétention physico-chimique est faible voire nulle. Les quantités solubilisées dépendent alors de nombreux facteurs tels que les précipitations, la nature du sol, du couvert végétal, le mode d'utilisation des terrains, *etc.*

Les apports en fertilisants chimiques et organiques modifient la chimie du sol. Les agriculteurs apportent les nutriments nécessaires aux plantes et une partie de ces produits se minéralise dans les sols. L'engrais chimique azoté le plus employé est le nitrate d'ammonium  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . La solubilité du nitrate d'ammonium, importante, est de 1183g.L-1 à 20°C. Le sulfate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , l'urée  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ , le nitrate de calcium  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ou le nitrate de potassium  $\text{KNO}_3$  sont d'autres formes courantes d'apport d'azote aux sols agricoles.

Les sels ammoniacaux, les nitrates, les nitrites, se trouvent alors répartis dans les sols avec une grande variabilité]. Les concentrations peuvent atteindre localement 1000mg.kg-1. Les sels de nitrate sont très solubles dans l'eau de sorte que leur passage

dans la solution de sol se produit immédiatement après leur application, générant de forts gradients d'azote.

Dans le cadre du traitement des sols, les composés azotés sont signalés par le GTS [LCPCSETRA 2000] comme retardateurs voire inhibiteurs de la prise des liants.

L'agressivité du nitrate d'ammonium est utilisée en géochimie afin de définir la mobilité et la biodisponibilité des éléments traces dans les sols lors d'extractions simples [Hall *et al.* 1998 ; Cornu et Clozel 2000 ; Gryschkoet *al.* 2004 ; Pueyoet *al.* 2004 ; Zhu *et al.* 2012].

Cabane [2004], par analogie avec les matériaux cimentaires, propose un scénario de perturbation de la solidification des sols en présence de nitrate d'ammonium  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  :

- la réaction entre l'ion ammonium et la chaux entraîne des retards de prise. Elle provoque le dégagement d'ammoniac et probablement une baisse de pH du milieu jusqu'à la disparition des ions ammonium. La prise du ciment peut ensuite s'effectuer;
- l'ion nitrate favorise la stabilité en solution de l'ion calcium si les conditions de pH (12,4) et de saturation du milieu le permettent. Il en résulte la formation de minéraux expansifs de nitroaluminate de calcium et une fissuration du matériau traité à terme.

Cabane signale par ailleurs que la forte solubilité du nitroaluminate de calcium ( $1212\text{g.L}^{-1}$ ) comporte un risque pour la durabilité de la solidification sous lixiviation.

Le Borgne [2008] dope le limon du Val d'Europe au nitrate d'ammonium ( $156\text{mg NO}_3^{-}.\text{kg}^{-1}$  et  $1,56\text{g NO}_3^{-}.\text{kg}^{-1}$ ) avant son traitement à 1,5% de chaux et 6% de ciment CEMII (0,26 et 2,60 % de nitrate). Il montre ainsi que les ions nitrate ne sont pas perturbateurs de la prise et de l'hydratation des liants. En effet, il constate qu'avec cet élément chimique, les résistances mécaniques et le gonflement volumique du matériau solidifié restent acceptables pour une réutilisation en technique routière. En outre, Le Borgne [2010] n'observe pas de modification particulière de la microstructure du sol traité avec l'addition de nitrate d'ammonium.

#### **5.4. Phosphates**

Le phosphore est un élément majeur de la pédosphère ( $1000\text{mg.kg}^{-1}$ ) dont 60% se trouve sous forme inorganique. Les teneurs totales retenues en phosphate pour la plupart des sols sont de 200 à  $4000\text{mg.kg}^{-1}$  de sol sec. Toutefois, des valeurs extrêmes de  $10\ 000\text{mg.kg}^{-1}$  ont été enregistrées pour les sols développés à partir de roches volcaniques ou à partir de certaines craies [C. Mathieu et al 2003]. Ce type de sols est présent en région Basse-Normandie.

Le phosphore est surtout présent dans les sols à l'état d'orthophosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), liés au calcium (apatite  $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaX}_2$  avec  $\text{X} : \text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{OH}^-$  ou  $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaX}$  avec  $\text{X} : \text{CO}_3^{2-}$ ), quelquefois sous forme adsorbée à la surface des minéraux argileux voire associé à des oxydes et des hydroxydes de fer et d'aluminium [Mathieu et Pieltain 2003]. Ces différentes formes de phosphates sont très peu solubles dans l'eau, leur solubilité étant maximale en milieux alcalin ou neutre [Pansu et Gautheyrou 2003 ; Mathieu et Pieltain 2003].

Les concentrations moyennes en ions ortho phosphate dans la solution de sol sont comprises entre 0,01 et 0,10ppm, démontrant une faible solubilité des composés phosphatés [Calvet2003].

Les phosphates se trouvent sous formes d'engrais et de pesticides, de détergents, d'adoucisateurs d'eau, de retardateurs d'incendie, d'additifs pour carburants, de plastiques...

Certaines techniques culturales comme le brûlis ou l'écobuage génèrent des pyrophosphates tandis que l'épandage de boues de décantation apporte des polyphosphates et des formes organiques qui n'existent pas dans le milieu naturel.

Dans les engrais, le phosphate se présente sous la forme d'acide phosphorique  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , de composés ammono-phosphatés  $(\text{NH}_4)_2 \cdot (\text{HPO}_4)$  et  $(\text{NH}_4)_3 \cdot (\text{PO}_4)$  et de superphosphates simple  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  ou triple  $3(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2)$ . Le superphosphate simple peut contenir jusqu'à 12% de sulfate sous la forme  $\text{CaSO}_4$ . Le phosphore des engrais minéraux est en général issu de phosphates naturels traités à l'acide afin d'en améliorer la solubilité. Certaines formulations d'engrais minéraux sont ainsi très solubles dans l'eau et sujettes au lessivage.

L'acide phosphorique  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (2 à 3% par rapport à la masse sèche de sol) est utilisé comme agent chimique stabilisateur des sols en l'absence de liant hydraulique. Ghazali *et al.* [1991] montrent qu'un traitement à l'acide phosphorique induit la préconsolidation d'une kaolinite, une diminution de sa compressibilité, une augmentation de sa cohésion et de son angle de frottement interne ainsi qu'une amélioration de sa résistance à la compression simple. Ces mêmes conclusions ont été rapportées pour un apport de chaux vive ce qui impose l'acide phosphorique comme un produit alternatif.

D'autres phosphates (phosphates tricalciques, phosphates de calcium mono et di hydrogénés) sont utilisés pour stabiliser les argiles. Seule la présence de calcite, en très faible teneur, peut devenir pénalisante en terme de résistance. La diminution des performances mécaniques est alors due à la formation de phosphate de calcium qui consomme la chaux.

C'est sur cette base que le GTS signale les phosphates comme retardateurs voire inhibiteurs de prise : les ions phosphate, à un pH de 12,4, se trouvent sous la forme

PO43- et réagissent avec les ions calcium pour former des phosphates de calcium (hydroxyapatite) insolubles retardant la prise [Guichard 2006].

## 6. Objectifs du traitement des sols

Pour caractériser quantitativement, au stade de l'étude d'un projet, les conditions définissant un sol fin humide, on se réfère principalement à l'indice portant immédiat (IPI) du sol mesuré à sa teneur en eau naturelle sur une éprouvette compactée à l'énergie «Proctor Normal».

Les valeurs de l'IPI en deçà desquelles le traitement :

- peut s'avérer nécessaire,
- doit être interrompu ou poursuivi avec réduction du dosage,

sont indiquées dans le tableau suivant :

IPI	Classes de matériaux (selon classification GTR 92)							
	A <sub>1</sub> C <sub>1</sub> A <sub>1</sub> C <sub>2</sub> A <sub>1</sub> *	A <sub>2</sub> B <sub>6</sub> C <sub>1</sub> A <sub>2</sub> C <sub>2</sub> A <sub>2</sub> * C <sub>1</sub> B <sub>6</sub> C <sub>2</sub> B <sub>6</sub> R <sub>34</sub>	A <sub>3</sub> C <sub>1</sub> A <sub>3</sub> C <sub>2</sub> A <sub>3</sub> *	B <sub>4</sub> C <sub>1</sub> B <sub>4</sub> C <sub>2</sub> B <sub>4</sub> *	B <sub>2</sub> B <sub>5</sub> C <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> B <sub>2</sub> * C <sub>1</sub> B <sub>5</sub> C <sub>2</sub> B <sub>5</sub> *	R <sub>12</sub> ☼	R <sub>13</sub> ☼	F <sub>2</sub>
Valeurs en dessous desquelles un traitement peut être envisagé (cf. GTR)	8	5	3	15	12	15	10	15
Valeurs à obtenir sur le matériau traité ◊	10 à 20	7 à 15	5 à 10	20 à 40	15 à 30	15 à 30	10 à 20	15 à 20
Valeurs au-delà desquelles le traitement peut être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage)	15 à 25	10 à 20	8 à 15	30 à 50	20 à 40	25 à 35	15 à 25	25 à 30
<p>* Les matériaux de ces classes comportent une fraction importante d'éléments anguleux supérieurs à 20 mm. De ce fait, l'estimation de leur portance à partir de la valeur de l'IPI mesuré sur leur fraction 0/20 mm peut ne pas être suffisamment représentative. Une évaluation plus précise nécessiterait de pratiquer des essais en place (essais à la plaque ou à la dynaplaque, etc.)</p> <p>☼ Pour les classes R, les valeurs proposées ne sont pas issues du GTR, mais seulement indicatives. Pour les classes de matériaux sensibles à l'eau non envisagées dans le tableau, les valeurs de l'IPI à considérer doivent résulter d'une étude spécifique</p> <p>◊ Pour le traitement des PST, des valeurs majorées de 10 à 20 % doivent être considérées, étant entendu qu'il est en plus nécessaire de vérifier la condition <math>I_{CBR}/IPI \geq 1</math> (cf. § B-2.2.)</p>								

Tableau 3 : Objectifs du traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols trop humides en remblai [GTS]

## 7. Technique de réalisation des traitements

### 7.1. Technique courante

Le traitement appliqué à la réutilisation des sols sensibles à l'eau trop humides est quasiment toujours réalisé par traitement « en place ». La technique courante consiste à épandre la masse de produit de traitement, calculée pour l'épaisseur de sol malaxée prévue, à la mélanger avec le sol, le plus souvent à l'aide de charrues (à disques ou à socs), jusqu'à obtention d'une mouture présentant de visu un aspect homogène. Ensuite, suivant les cas, soit on charge et transporte le mélange à son lieu de mise en

œuvre (traitement au déblai), soit on le compacte directement après malaxage (traitement au remblai).

Des modalités différentes, décrites ci-après, peuvent parfois s'imposer pour s'adapter aux particularités de certains chantiers.

### **7.2. Mélange par la technique dite du dépôt reprise**

Cette technique permet de mélanger des sols comportant des éléments blocailleux de  $D_{max} > 250$  à 350 mm (valeur considérée comme limite pratique pour le malaxage avec des charrues). Elle est réservée toutefois quasi exclusivement au traitement à la chaux car incompatible en principe avec le phénomène de prise hydraulique.

La quantité de produit de traitement correspondant au dosage choisi, calculée pour l'épaisseur de la couche qu'il est prévu d'extraire  $Q$ , est épandue sur le sol. L'ensemble constitué par le matériau de cette couche et le produit de traitement épandu est chargé, transporté puis mis en dépôt provisoire. Celui-ci est profilé et légèrement compacté pour minimiser les entrées d'eaux pluviales. Au moment voulu (qui peut être plusieurs jours, semaines, voire plusieurs mois plus tard), le dépôt est repris, en extraction frontale, pour réaliser le remblai.

Cette technique améliore l'homogénéité du sol du déblai (en nature et en état) en même temps qu'elle réalise un mélange de qualité généralement suffisante pour une mise en remblai, et ceci, sans utiliser de matériel de malaxage spécifique. Elle est cependant propice aux émissions de poussières de produit de traitement, notamment durant les séquences d'épandage et de chargement.

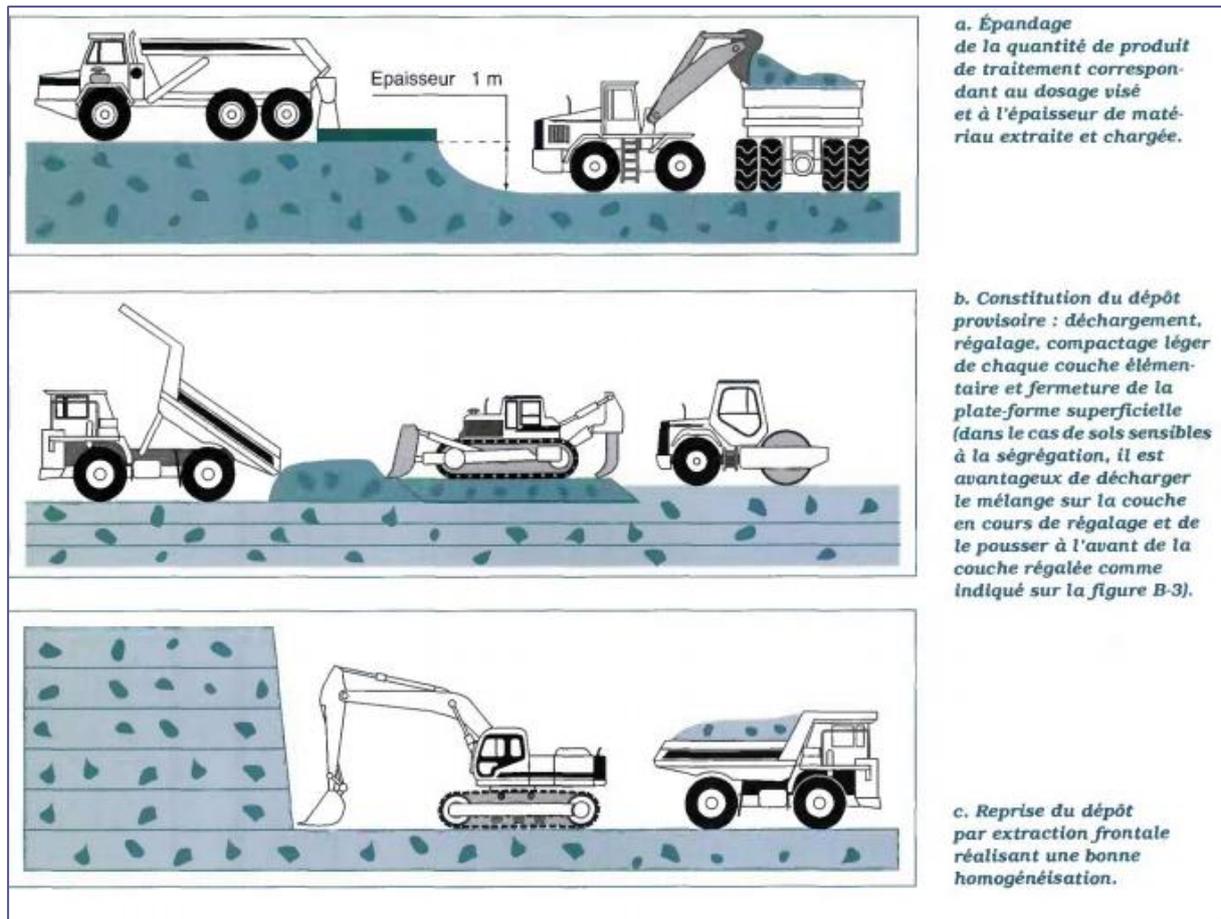


Figure 49 : Schéma de la réalisation du mélange par la technique dite du « dépôt-reprise »

### 7.3. Traitement dans le déblai ou sur le remblai

L'intérêt de traiter dans le déblai est de tirer profit des manipulations que l'on fait subir au sol au cours des phases successives de chargement, déchargement, régaling, etc., pour améliorer l'homogénéité du mélange sol-chaux et pour produire l'assèchement maximal en conditions météorologiques évaporantes. En procédant ainsi, on améliore également la traficabilité des engins dans le déblai.

Un autre Intérêt est de limiter, le cas échéant, la diffusion des poussières de produit de traitement en confinant le chantier de traitement à l'Intérieur des talus du déblai. L'Intérêt d'exécuter le traitement sur le remblai est de pouvoir minimiser les quantités de matériaux à traiter. En effet, en opérant au stade ultime de la mise en œuvre, il est possible de sélectionner les zones exigeant réellement un traitement à partir de l'observation du comportement du sol (ornières de plus de 10 à 15 cm sous les roues des engins de transport) ou à partir de mesures (portance à la plaque ou à la dynaplaque, IPI ou teneur en eau du sol).

## **8. Matériels de traitement**

Suivant les chantiers, les travaux de traitement des sols peuvent nécessiter des ateliers comprenant tout ou une partie des matériels suivants :

- matériels de stockage des produits de traitement,
- matériels d'épandage,
- matériels de préparation des sols,
- matériels de malaxage des sols en place,
- matériels d'arrosage,
- centrales de fabrication,
- matériels de compactage,
- matériels de réglage et de protection superficielle.

## **9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le traitement des sols fins, son objectif, les produits de traitement, leur fabrication, domaines d'emploi, les principes d'action de ces produits, les performances à attendre d'un sol traité, les techniques de réalisation des traitements et les matériels utilisés pour le traitement des sols.

Le traitement des sols en place aux liants hydrauliques est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux. Techniquement, le traitement des sols en permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. Sur le plan économique, le traitement réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. Enfin, les avantages écologiques et environnementaux peuvent se résumer dans la réduction de la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère, la diminution des impacts indirects comme par exemple les gênes à l'usager et aux riverains au chantier et limitation l'exploitation des gisements de granulats des carrières qui sont des ressources naturelles non renouvelables ce qui contribue à préserver l'environnement.

## CHAPITRE III

# Procédures expérimentales et caractéristiques des matériaux utilisés

## **CHAPITRE III : PROCEDURES EXPERIMENTALES ET CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES**

---

### **1. Introduction**

L'objectif de cette partie expérimentale est d'étudier le comportement mécanique et géotechnique de la Marne argileuse traitée avec deux liants hydrauliques à savoir le ciment et le co-produit laitier de haut fourneau broyé et la coquille d'œuf proposé dans le cadre de ce travail. Nous allons dans un premier temps rappeler les objectifs de notre travail. Ensuite nous présentons la démarche expérimentale mise en place pour répondre aux objectifs fixés. Enfin les résultats des essais de caractérisation réalisés au laboratoire des différents matériaux utilisés sont présentés.

### **2. Objectifs de l'étude expérimentale**

Le but de cette expérimentation est d'étudier le comportement de la marne utilisée afin de connaître son aptitude à l'utilisation dans les remblais routiers. Ce matériau très peu favorable à l'utilisation dans les terrassements à l'état naturel, peut après un traitement adapté et efficace, améliorer ses caractéristiques mécaniques et régler pas mal de pathologies liées à son utilisation à l'état naturel comme par exemple le gonflants, plasticité élevée, faible résistance mécanique,.... C'est dans ce but qu'on a choisi de traiter cette marne avec un nouveau produit équivalent aux liants hydrauliques spécifiques routiers qui sont généralement utilisés en géotechnique routière. Il s'agit du laitier de haut fourneau broyé mélangé avec la coquille d'œuf calcinée. Les avantages de ce type de traitement sont multiples ; d'abord il contribue à sauvegarder les ressources naturelles, comme il peut donner une solution efficace pour la gestion des déchets et les co-produits industriels ainsi que les énormes dépôts des matériaux en déblai, tout en gardant un aspect technique est économique supérieure aux solutions traditionnels.

### **3. Démarche expérimentale**

Notre démarche expérimentale est basée sur des essais de laboratoire réalisés sur notre marne argileuse qui a été prélevée dans la région de Guelma. Les essais effectués visent à mieux comprendre le comportement de ce sol avant et après traitement pour voir son aptitude à l'utilisation dans les remblais routiers. De plus, il est nécessaire d'étudier l'efficacité du nouveau co-produit de traitement (laitier + coquille) à réagir avec notre marne afin d'améliorer ces performances mécaniques. Enfin, la comparaison des résultats obtenus par le nouveau co-produit avec ceux obtenus par un

traitement classique au ciment va permettre de juger le niveau d'efficacité où nous sommes arrivés avec ce traitement. Pour cela, nous avons travaillé sur trois aspects :

**D'abord**, nous avons fait une identification géotechnique de notre marne dans son état naturel et sur les produits de traitement dans leur état brut. Nous avons commencé par les paramètres de nature (la granulométrie, sédimentométrie, limite d'Atterberg, valeur de bleu de méthylène, la finesse et la diffraction par rayon X), puis nous avons passé aux paramètres d'état (Proctor).

**Ensuite**, nous avons effectué des essais de Proctor et de consistance (limites) sur la marne traitée afin de déterminer les teneurs en eau optimales pour les différents dosages pour l'essai Proctor et comprendre le comportement de la marne traitée vis-à-vis de la plasticité.

**Finalement**, nous avons réalisé des essais de comportement mécanique de la marne traitée à différents dosages : essais de compression simple. Ces essais permettent de déterminer la résistance de la marne après traitement (portance).

Notre nouveau co-produit (laitier de haut fourneau broyé + coquille d'œuf calcinée comme activant) est similaire à un liant hydraulique routier. Nous avons donc choisi différents dosages pour observer l'évolution de l'OPN en fonction de ces dosages et déterminer ainsi les densités OPN pour le confectionnement des éprouvettes des essais de compression. Ces mêmes dosages serviront à observer l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour différentes périodes de cure afin d'estimer la période de mise en circulation des engins de chantier dans la pratique.

En synthèse, nous pouvons résumer les essais effectués comme suit :

- Nature minéralogique de la marne, ciment, laitier broyé et coquille calcinée et broyée (DRX),
- Granulométrie par tamisage et par sédimentométrie sur la marne naturelle et le laitier granulé à l'état brut,
- Limites d'Atterberg sur la marne naturelle et traitée,
- Valeur de bleu sur la marne naturelle,
- Proctor sur marne naturelle et traitée,
- Finesse sur laitier broyé, coquille calcinée et broyée et ciment,
- Compression simple sur la marne naturelle et traitée à différents dosages.

## **4. Préparation et identification des matériaux utilisés**

### **4.1. Marne naturelle**

#### **4.1.1. Localisation et prélèvement**

Dans un premier temps, nous avons effectué des recherches sur la marne argileuse disponible au voisinage près de la ville de Guelma. Ces recherches ont permis d'aboutir à localiser une marne argileuse dans la zone de NECHMAYA sur un chantier en cours (travaux de terrassement pour réaliser une nouvelle pénétrante Guelma-Annaba). L'entreprise EPTP responsable de ce projet nous a facilité l'accès au chantier pour effectuer un prélèvement de ce matériau. Par la suite, nous sommes passés aux essais d'identification afin de confirmer la classe de matériaux que nous avons ciblés c'est-à-dire un sol fin.

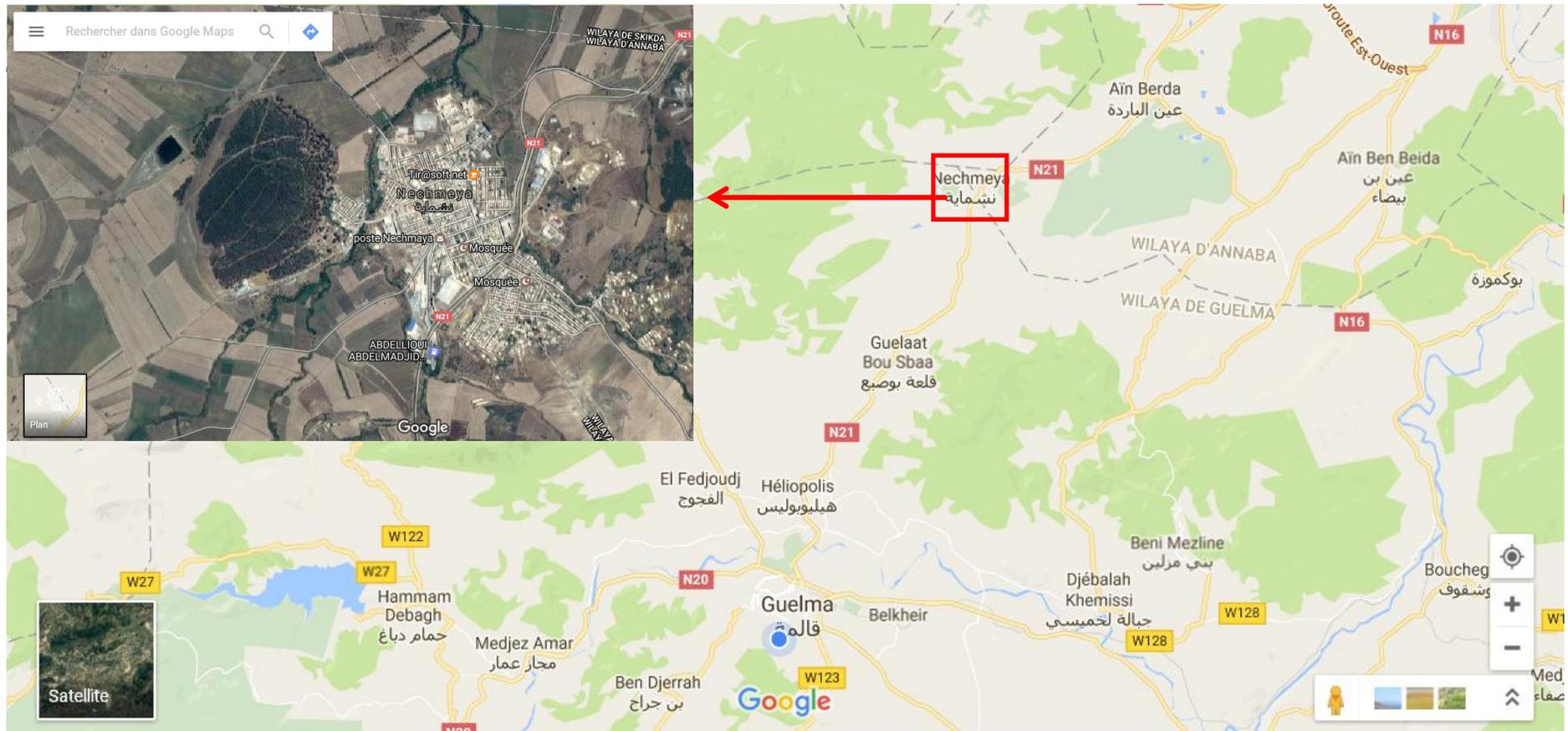


Figure 50: Localisation du lieu de prélèvement (Nechmaya)

### 4.1.2. Identification géotechnique de la marne et classification GTR

#### a) Minéralogie par diffraction au rayon X

Les essais de diffraction au rayon X ont été réalisés à l'université de Biskra sur des échantillons de marne, de laitier de haut fourneau granulé broyé, de ciment et de coquille d'œuf calcinée et broyée. Les résultats des DRX sur les produits de traitement son présentés un peu plus bas dans ce mémoire.

Grâce aux informations fournies par le spectre DRX des matériaux, nous pouvons avoir des renseignements concernant leur structure minéralogique. A chaque angle de diffraction «  $\theta$  » nous pouvons calculer la distance réticulaire «  $d$  » selon la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

Où :

$n$ : nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction (souvent considéré égal à 1)

$\lambda$ : longueur d'onde du rayonnement utilisé (1.54Å)

$d$ : distance réticulaire,

$\theta$  : angle de diffraction.

La distance réticulaire «  $d$  » peut nous informer sur la taille de la structure du matériau. Les résultats bruts sur la marne sont présentés sous forme de graphe comme indiquer dans la figure suivante (Fig.51).

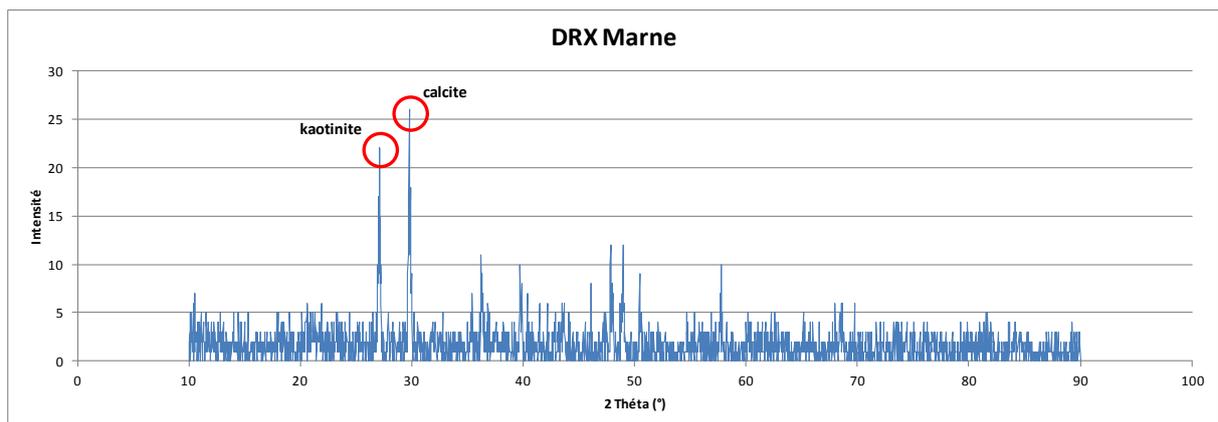


Figure 51 : Diffraction au rayon X de la marne

Les résultats montrent que la marne renferme dans sa structure la kaolinite à 2théta égal à 27° et la calcite à 29° (les pics sur le graphe). Le diffractogramme de la marne indique aussi la présence de quartz comme minéraux secondaires. D'autre part, le diffractogramme montre un amorphe dans la structure ce qui indique son désordre.

**b) Granulométrie (normes NF P 94-056 et NF P 94-057)**

La granularité est un paramètre qui permet de distinguer les sols grâce à la dimension de leurs grains. Une première analyse consiste à mesurer la répartition des quantités selon la dimension des grains. Les deux méthodes complémentaires sont le tamisage pour la fraction grossière du sol et la sédimentométrie pour la fraction fine. Il s'agit de mesurer le pourcentage des grains de sol passant au travers d'une série de tamis donnés (passant ou tamisât).



*Figure 52 : Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie*

La composition granulométrique influence de façon primordiale les comportements physique et mécanique du sol et toutes les propriétés liées à la teneur en eau et aux fluctuations de celle-ci (compacité, plasticité, portance, capacité de rétention, perméabilité, capillarité).

L'analyse granulométrique consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

La fraction fine de taille inférieure à  $80\mu\text{m}$  est reprise pour faire l'essai de sédimentométrie. Cet essai permet de fournir la distribution des tailles des particules fines par le biais de la vitesse de décantation qui est liée à leurs dimensions. La loi de Stokes donne dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules. Les particules de  $80\mu\text{m}$  séparés du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculant. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de la masse volumique de la solution qui évolue au fur

et à mesure qu'elle se décante. Les résultats de ces deux essais sur notre marne sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous.

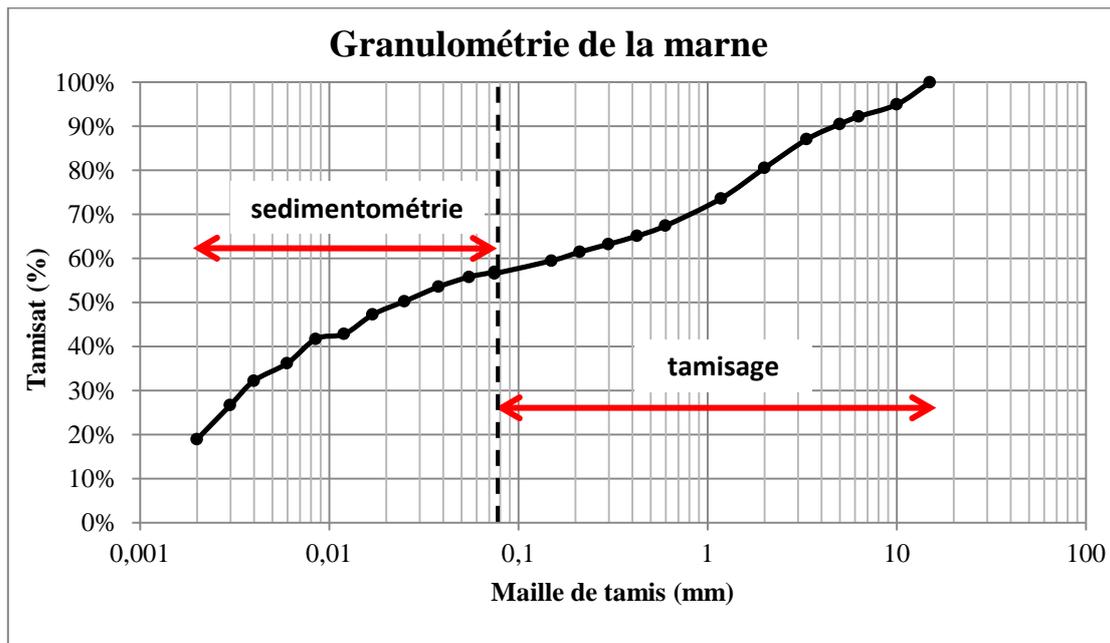
Taille particules (mm)	0,08	0,15	0,212	0,3	0,425	0,6
Passants (%)	58	59	61	63	65	67
Taille particules (mm)	1,18	2	3,35	5	10	15
Passants (%)	74	81	87	91	95	100

*Tableau 4 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage*

Diamètre (mm)	0,080	0,075	0,055	0,038	0,025	0,017	0,012	0,0085	0,006	0,004	0,003	0,002
Passants (%)	58	57	56	53,5	50,26	47,25	42,83	41,72	36,19	32,21	26,68	18,94

*Tableau 5 : Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie*

Les résultats en termes de courbe granulométrique sont présentés sur la figure :



*Figure 53 : Courbe granulométrique de la marne*

Les paramètres de granularité ( $D_{max}$  et tamisât à  $80 \mu\text{m}$ ) sont déterminés à partir de la répartition granulométrique.  $D_{max}$  est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le matériau. C'est un paramètre déterminant en terrassement, le seuil retenu dans le GTR est 50 mm pour la classification des sols fins. Le tamisât à  $80 \mu\text{m}$  permet de distinguer la richesse du matériau en fines et dans le sens le plus large, d'évaluer leur sensibilité à l'eau (GTR 2000).

Dmax (mm)	% Passants < 80µm
15	58

Tableau 6 : récapitulatif de l'analyse granulométrique

c) Essai des limites d'Atterberg(norme NF P 943-51)

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (diamètre<0,400mm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et à observer la consistance. Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide.

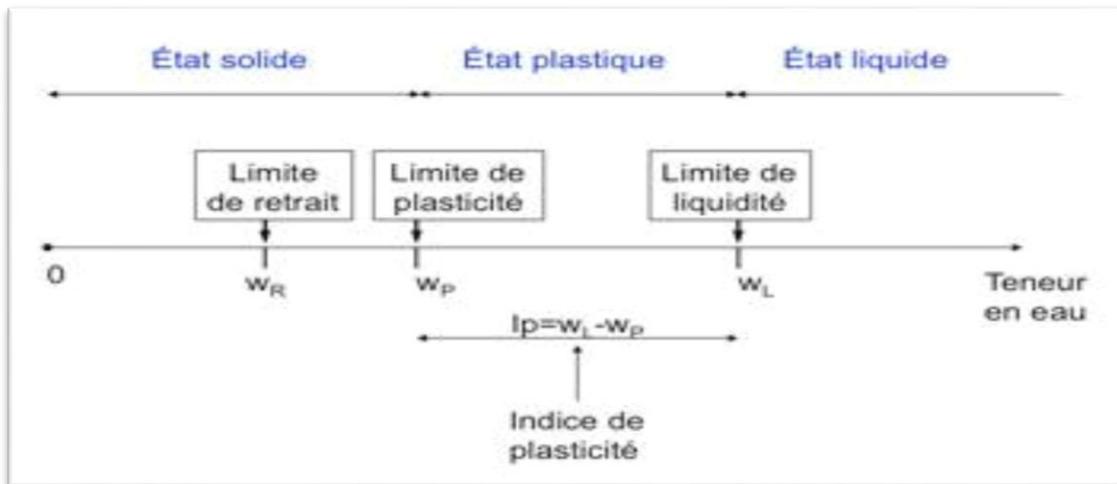


Figure 54 : Différents états d'un sol

Pour la limite de liquidité, on utilise la coupelle de Casagrande. Le principe de l'essai consiste à faire tomber une coupelle d'une hauteur de 10mm sur un socle. Chaque choc entraînant la fermeture progressive d'une rainure pratiquée dans l'échantillon de sol. Par définition,  $w_L$  est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur en 25 coups. Pour la limite de plasticité, le principe consiste à réaliser manuellement des cylindres avec l'argile sur une surface lisse et sèche. Par définition,  $w_P$  est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm. Les teneurs en eau ont été déterminées par étuvage à 105°C, la balance utilisée est de 0,1g de précision.



Figure 55 : la coupelle de Casagrande (à gauche) l'essai de rouleau (à droite)

Par la suite l'indice de plasticité  $I_p$  est calculer ( $I_p = w_L - w_P$ ). Cet indice permet de caractériser l'argilosité du sol étudié. Selon le GTR, les seuils retenus sont :

- 12 : Limite supérieure des sols faiblement argileux
- 25 : Limite supérieure des sols moyennement argileux
- 40 : Limite supérieure entre sols argileux et très argileux

Nous avons effectué des essais de limites sur notre marne naturelle. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau et la figure suivants.

Essai N°1		Essai N°2	
Nbre de coups	w (%)	Nbre de coups	w (%)
18	59.4	16	64.6
25	56.1	23	63.2
29	55.3	28	54.5
34	54.2	32	52.2

Tableau 7 : Résultats bruts des essais de limites de liquidité

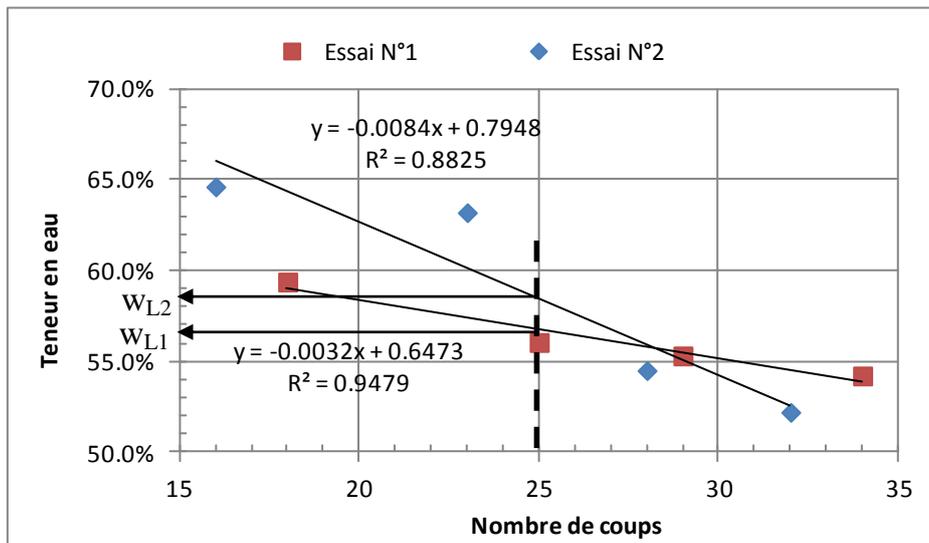


Figure 56 : Graphe de détermination de la limite de liquidité

D'après les graphes, le calcul de la limite de liquidité est synthétisé dans le tableau suivant.

$w_{L1}(\%)$	$w_{L2}(\%)$	<b><math>w_L</math> moyenne (%)</b>
56,7	58,5	<b>57,6</b>

*Tableau 8 : Valeur de la limite de liquidité*

Concernant la limite de plasticité  $w_p$ , l'essai consiste à la recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure, (norme NF P94-051). Il est effectué, comme pour la limite de liquidité, sur la fraction passant au travers du tamis d'ouverture 400 $\mu$ m.

Poids humide (g)	Poids sec (g)	Poids tare (g)	w (%)
5.457	5.182	4.25	<b>29.5%</b>
5.239	4.928	3.853	<b>28.9%</b>
5.084	4.766	3.631	<b>28.0%</b>

*Tableau 9 : Résultats de la limite de plasticité*

La moyenne des trois teneurs en eau nous donne :  $w_p = 28,8\%$

Le calcul de l'indice de plasticité nous donne :  $I_p = w_L - w_p = 28,8\%$

**d) Valeur de bleu de méthylène(norme NF P 94-068)**

L'argilosité du matériau est aussi déterminée par la valeur au bleu de méthylène qui permet d'apprécier globalement l'activité et la quantité d'argile dans le matériau. Le principe repose sur la capacité particulière qu'à la molécule de bleu de méthylène s'adsorber à la surface des particules. Etant donné que la surface spécifique des argiles est prépondérante par rapport à celle d'autres fines. Il y a une corrélation directe entre la quantité de bleu adsorbée par les particules d'un sol et son argilosité. L'essai au bleu de méthylène, encore appelé essai à la tache, consiste à déterminer la quantité maximale de bleu de méthylène qui peut être adsorbée par un échantillon de sol.



*Figure 57 : Dispositif pour l'essai VBS*

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation. On prélève périodiquement, à l'aide d'une burette de verre, une goutte de suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleue apparaît autour de la tache, on considère que l'absorption de bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. La valeur de bleu de méthylène VBS est déterminée à partir du volume du bleu de méthylène adsorbé et la quantité du matériau utilisé. Elle est exprimée en gramme par 100 gr de matériau et est donné par l'expression suivante :

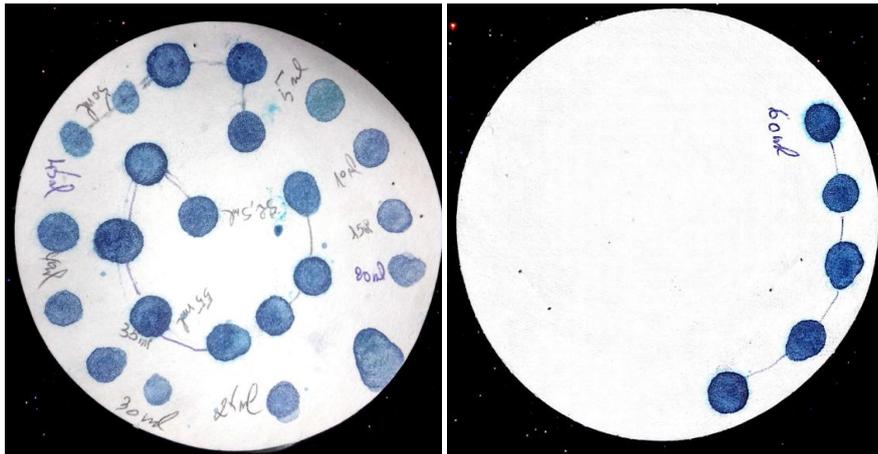
$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$$

$m_0$ : masse sèche de la prise d'essai (gr)

B : masse de bleu de méthylène introduit (gr),  $B = V \times 0.01$

V : volume totale de bleu introduit.

Les résultats obtenus pour notre sol fin sont présentés dans le tableau ci-dessous.



*Figure 58 : Résultats bruts des tests à la tache*

Poids sol (g)	30
Fraction 0/5 (mm)	90.88%
Volume bleu (cm <sup>3</sup> )	60
Masse bleu (g)	0.6
<b>VBS</b>	<b>2</b>

*Tableau 10 : Valeur de l'essai VBS*

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100 = \frac{1.22}{30} \times 100$$

**Donc VBS = 2**

e) Référence de compactage (Essai Proctor : norme NF P 94-093)

Le compactage est une réduction de volume du sol presque instantanée due à la réduction des vides remplis d'air. Plus les grains seront resserrés les uns contre les autres, meilleure sera la résistance du sol au cisaillement et meilleur sera le comportement des remblais et couches de chaussées; on recherche donc l'indice des vides le plus petit possible (correspondant au pic de la courbe Proctor). Le compactage améliore les propriétés mécaniques du sol remanié.

Le compactage se distingue de la consolidation car il s'agit de tassement du matériau sous un effet dynamique, alors que la consolidation s'effectue sous poids propre du matériau. Pour le compactage, il n'y a pas de variation de la teneur en eau lors du phénomène de tassement.

La teneur en eau a un effet notable sur le compactage des sols fins. En effet il existe une valeur maximale du poids volumique sec  $\gamma_d$  pour une teneur en eau dite à l'optimum  $w_{OPN}$ , Optimum Proctor Normal déterminée par l'essai Proctor.

Cet essai consiste à compacter le sol dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame, à énergie constante, et à déterminer la densité sèche selon la teneur en eau. L'optimum représente le sommet de la courbe  $\gamma_d / w$  obtenue par l'essai.

Pour les terrassements, on utilise en général l'essai Proctor Normal ; le compactage a alors pour but de limiter les tassements ultérieurs. Pour une couche de chaussée on utilise l'essai Proctor Modifié; le compactage effectuée avec une énergie supérieure de celle Proctor normale vise une augmentation de la résistance mécanique de la couche.

Pour notre travail un compactage normal dynamique a été réalisé. Nous avons utilisé moule CBR de forme cylindrique de 177 mm de hauteur et de 152 mm de diamètre. Une quantité de 7 kg de marne a été préparée pour cet essai. Le compactage dynamique de type Proctor a été réalisé en trois couches.

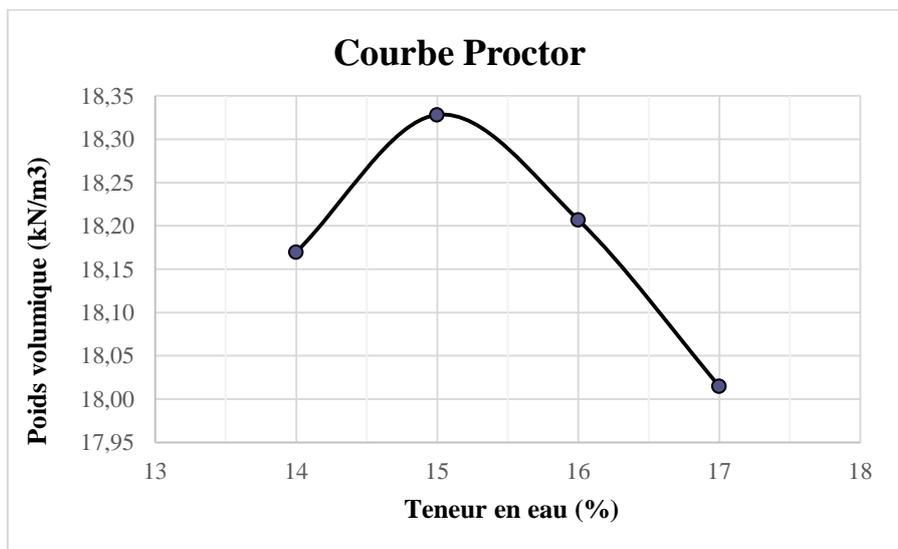


Figure 59 : Courbe Proctor normal de la marne naturelle

La courbe Proctor pour la marne argileuse a une forme pointue ce qui explique la sensibilité du sol à la teneur en eau. La valeur de la teneur en eau optimale est de **15%** correspondante à une densité maximale de **18,33kN/m<sup>3</sup>**.

**f) Classification GTR de la marne**

A partir de ces différents résultats d'essais, nous sommes arrivés à la classification de notre matériau.

$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$   
 Tamisât à 0,08 mm = 58%  
 → Sol de classe A.

$I_p = 28,8\% > 25 < 40$  → Sous classe **A3 (marne argileuse)**

Les sols de la classe **A3** sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance [GTR 1992].

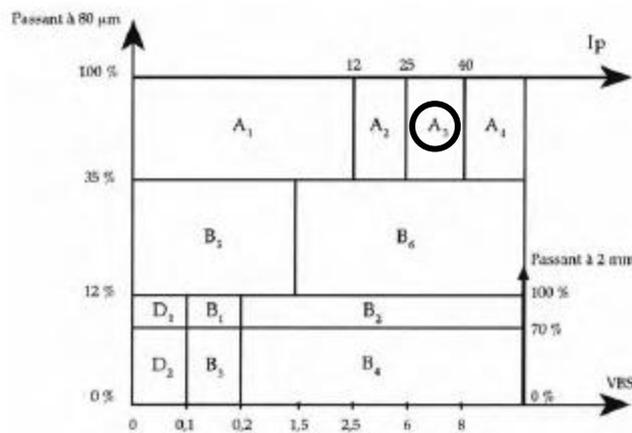


Figure 60 : Classification GTR de notre marne argileuse

**4.2. Produits de traitement utilisés**

**4.2.1. Le ciment**

Le ciment utilisé est un ciment CHAMIL CPJ-CEM II/B de classe de résistance 32,5. C'est un produit fabriqué par le groupe Lafarge Algérie originaire de Wilaya de M'Sila. C'est un ciment gris, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson

jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.



Figure 61 : Ciment CHAMIL du groupe Lafarge

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO<sub>2</sub>) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et le fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). LeDRX du ciment montre une bonne cristallinité, les deux pics correspondent à la calcite et à la silice (Fig.62).

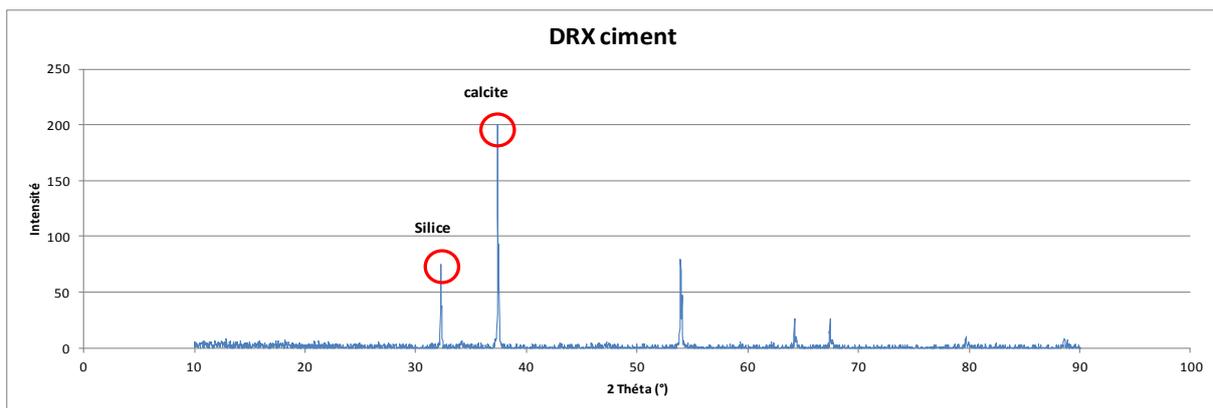


Figure 62 : Diffraction au rayon X du ciment

#### 4.2.2. Laitier de haut fourneau granulé

Le laitier granulé de haut fourneau d'El-Hadjar (Complexe Sidérurgie d'Annaba) est obtenu par refroidissement par un jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin. Il se présente sous forme de sable de couleur grise. Pour avoir ce matériau, nous avons parti à l'usine et nous avons récupéré une masse d'environ 100 kg.



Figure 63 : Prélèvement du laitier granulé

Après avoir ramené le laitier au laboratoire de l'université, nous avons mis une quantité à l'étuve pendant 24 heures. Le lendemain, nous avons fait la granulométrie par voie sèche et nous avons obtenus les résultats suivants :

Tamis (mm)	10	6,3	6	3,3	1,1	0,6	0,42	0,3	0,21	0,1	0,07	0,06
Passant (%)	99,2	98,3	97,4	94,9	58,9	24,7	16,0	10,6	8,0	6,2	3,8	3,1

Tableau 11 : Granulométrie par tamisage du laitier de haut fourneau granulé

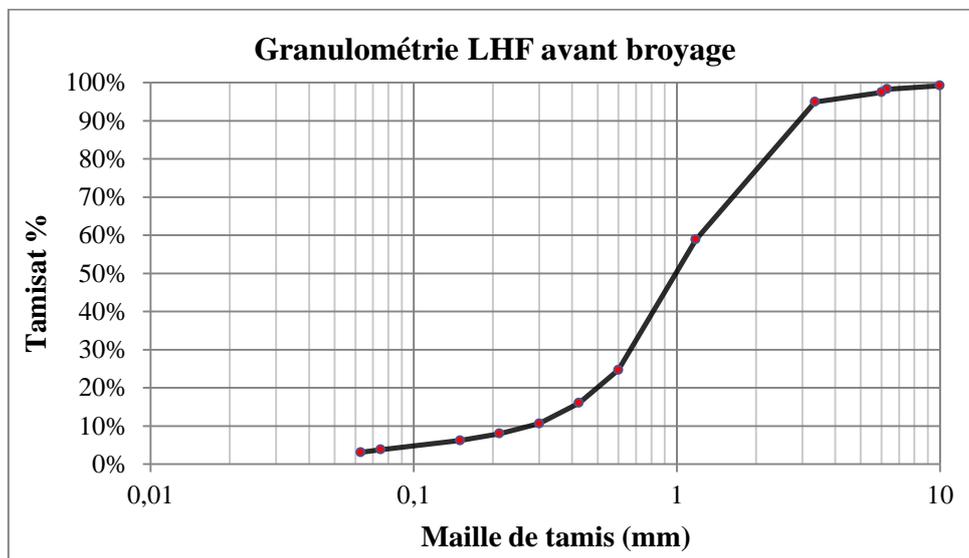


Figure 64 : Courbe granulométrique du laitier de haut fourneau granulé

Par la suite, le broyage a été fait avec la machine du Micro Deval qui est disponible au niveau de notre laboratoire de recherche. La procédure consiste à sécher le matériau à l'étuve pendant une période de 24 heures. Une fois sortie de l'étuve, nous avons mis 2kg de laitier avec 4 kg de billes dans chacun des 4 moules de l'appareil Micro Deval. Enfin, le broyage est fait durant 12 heures pour atteindre la finesse recherchée.



Figure 65 : Photos du broyage du laitier dans l'appareil Micro Deval



Figure 66 : Le laitier granulé avant et après broyage

Le diffractogrammeDRX du laitier révèle la présence de la calcite en minéral prépondérant et les autres pics correspondent au quartz. Le laitier est amorphe, raison de ne pas détecter les déplacements des pics avec fiabilité.

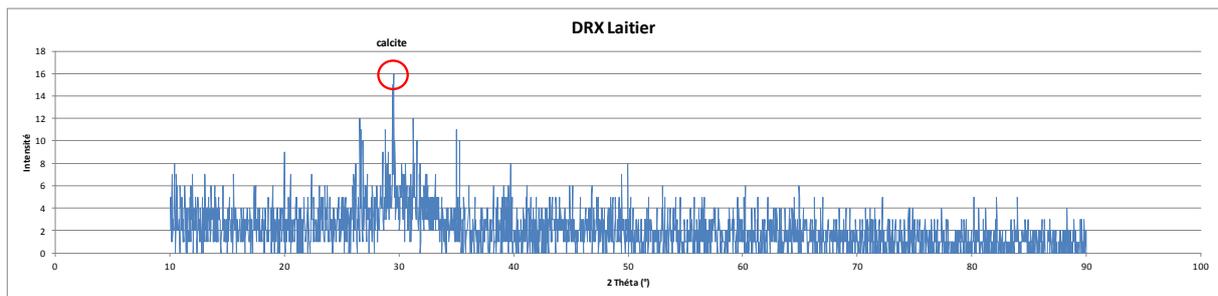


Figure 67 : Diffraction au rayon X du laitier

#### 4.2.3. La coquille d'œuf

La coquille d'œuf est considérée comme un déchet et elle est jetée directement sans recyclage. Il existe plusieurs sources potentielles de ce précieux déchet à savoir les usines de gâteaux comme par exemple Bifa, LU, Bimo, etc et les usines de production des poussins de poulet. Ces usines jettent chaque année des quantités non négligeable de coquille d'œuf.

Pour avoir ce matériau, nous avons exploré plusieurs pistes, d'abord nous avons repéré une usine de gâteaux à Tizi-ouzou qui fait le tri de la coquille dans le processus de fabrication. Mais malheureusement et pour des raisons d'éloignement, limitation du temps et difficulté de transportation nous avons préféré rechercher la coquille dans le voisinage de ville de Guelma. Et comme notre travail ne demande pas une grande quantité, nous avons décidé de faire des tournées régulières chez les pâtisseries et les fast-foods de la ville de Guelma pour leur demandé de nous conserver ce déchet. Après une quinzaine de jours nous avons pu récupérer presque 60 kg de coquille d'œuf à l'état brut.

Une fois récupérer la coquille a subi les opérations suivantes :

- lavage pour éliminer au maximum la matière organique du blanc d'œuf,
- calcination au four,
- broyage à l'appareil MDE.



*Figure 68 : Coquille d'œuf à l'état naturel*

La température de calcination a été choisie selon les travaux de [Wei et al 2009], donc nous avons calciné la coquille d'œuf à 900 °C pendant 2 heures. Cette calcination permet de transformer le composant principal de la coquille  $\text{CaCO}_3$  en  $\text{CaO}$ . Nous avons constaté après la calcination que le poids de la quantité de coquille brut a chuté d'environ 50%.



*Figure 69 : Photos de la coquille avant (à gauche) et après (à droite) calcination*

Le broyage a été fait dans la machine Micro Deval. Nous avons mis 4 kg de billes avec 2 kg de coquille calcinée pendant 4 heures pour atteindre la finesse souhaitée.



Figure 70 : Photos de la coquille calcinée avant (à gauche) et après (à droite) broyage

Des essais DRX ont été effectués sur la coquille broyée. Le résultat montre que la coquille contient dans sa structure la calcite en grande proportion avec un pic intense à  $29^\circ$  (fig.71).

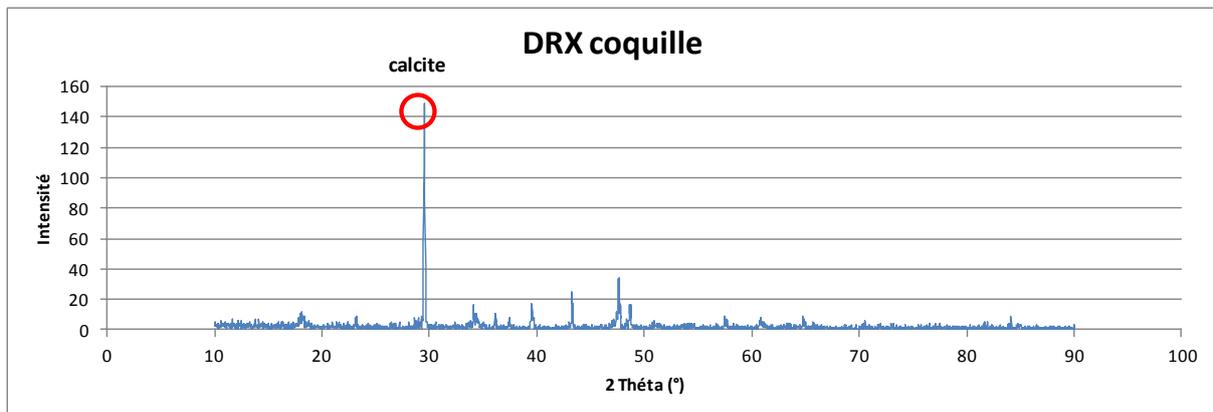


Figure 71 : Diffraction au rayon X de la coquille calcinée et broyée

#### 4.2.4. La finesse (Essai de Blaine)

La méthode de Blaine est utilisée pour déterminer la finesse d'un matériau ou sa surface spécifique exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Cette surface est calculée en mesurant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de matériau compact à une porosité spécifique. Plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. La méthode de Blaine est plus comparative qu'absolue ; c'est pourquoi un échantillon de référence de surface massique connue est nécessaire pour calibrer l'appareil.

La détermination de la surface Blaine a été réalisée au laboratoire de la cimentrie de Hamma Bouziane à Constantine. La figure ci-dessous présente une photo le Blaine-mètre utilisé.



*Figure 72 : Photo du Blaine-mètre*

La finesse de nos produits de traitement est fournie dans le tableau suivant. Nous précisons que les seuils minimaux de finesse recherchés pour les deux produits LHF et coquille doivent s’approcher au maximum des finesesses recommandées pour les ciments à savoir entre 3000 et 4000 cm<sup>2</sup>/g. A partir du tableau nous remarquons que les finesesses de LHF et de la coquille respectent cette recommandation.

<b>Matériau</b>	<b>Ciment</b>	<b>LHF</b>	<b>Coquille</b>
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	4837	3985	2954

*Tableau 12 : Finesse des produits de traitement*

### **5. Préparation des éprouvettes pour écrasement**

L’essai de compression (norme NF P94-077) consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l’éprouvette. La contrainte appliquée et la déformation observée servent à déterminer la résistance et le module élastique. La résistance en compression, notée R<sub>c</sub>, est égale à la contrainte atteinte au moment de la rupture, et s’effectue à plusieurs âges du matériau (3,7, 28, 56 et 90 jours).

La résistance à la compression simple définie par la contrainte maximale sous la forme :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S_{\max}}$$

Avec F<sub>max</sub> la force maximale appliquée sur l’échantillon et S<sub>max</sub> la section correspondante.

### 5.1. Préparation des mélanges

Les préparations ont été effectuées selon la norme NF P94-077. Les quantités respectives des différents matériaux (marne argileuse et produits de traitement) ont été préparées à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale de l'essai Proctor. Le sol a été mis en premier lieu à l'étuve pour séchage pendant une période de 24 heures. Puis, la marne a été mélangée à sec avec les produits de traitement à savoir le laitier et la coquille d'une part et le ciment d'autre part. Après avoir mélangé le tout à sec, nous avons ajouté une quantité d'eau qui correspond à la teneur en eau optimale Proctor normal qui a été déterminé préalablement pour chaque dosage. Cela permettra d'atteindre la densité optimum Proctor normal pour les éprouvettes d'écrasement. Le malaxage est réalisé jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène.

### 5.2. Confection des éprouvettes pour écrasement

Pour les essais de compression simple, des éprouvettes cylindriques ont été confectionnées dans un moule en PVC spécialement conçu pour nos essais. Le moule a les dimensions suivantes :  $H=16\text{cm}$  et  $\varnothing=8\text{cm}$  (Fig.73). Au total, 19 éprouvettes ont été confectionnées pour des différents dosages et temps de cure pour les deux produits (laitier + coquille, ciment). Les dosages ont été choisis à partir de quelques travaux de recherche qui ont été déjà réalisés sur les sols fins [P. Julphunthong 2015]. Nous avons choisi 3 différents dosages pour chaque produit de traitement à savoir :

- **mélange marne + laitier + coquille : 5%, 10% et 15%.**
- **mélange marne + ciment : 5%, 10% et 15%.**

Il faut préciser qu'on a choisi de mettre **75% de laitier de haut fourneau** comme produit latent et **25% de coquille d'œuf** comme un activant dans le mélange. Par la suite, les éprouvettes ont été immédiatement sellées à l'aide d'un papier film afin de prévenir l'évaporation de l'eau contenu dans le mélange marne et produits de traitement. Les éprouvettes ont été mises dans la chambre thermique.



Figure 73 : Photos du moule et de quelques éprouvettes préparées

# **CHAPITRE IV**

## **comportement de la marne traitée**

---

## CHAPITRE IV : COMPORTEMENT DE LA MARNE TRAITEE

---

### 1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons présenter les résultats des essais conduits en laboratoire sur la marne argileuse de Guelma. Les effets du traitement sur les différents paramètres de comportement de la marne sont présentés et discutés. Nous avons regroupé ces effets dans trois aspects :

- Effet du traitement sur les caractéristiques de la courbe Proctor normal ce qui permet de comprendre le comportement au compactage de la marne traitée.
- Effet du traitement sur la modification des paramètres de plasticité de la marne ce qui permet de comprendre le comportement à l'ouvrabilité de la marne traitée (limites d'Atterberg).
- Effet du traitement sur la résistance à la compression simple de la marne et donc sur la modification de la portance de la marne traitée.

L'ensemble des observations faites sur la variation de ces différents paramètres vont nous permettre de mieux comprendre comment réagi notre marne au traitement avec les deux produits (ciment, laitier+coquille).

### 2. Effets du traitement sur les caractéristiques de compactage

L'essai Proctor normal a été effectué sur la marne traitée à différents dosages des produits de traitement (5%, 10% et 15%). Ce type d'essai est considéré comme la référence de compactage des matériaux utilisés dans les terrassements routiers (sol support, remblai et couche de forme). Le but de ces essais est de mettre en évidence l'influence des différents dosages des produits de traitement sur les paramètres de compactage à savoir la teneur en eau optimale ( $w_{OPN}$ ) et densités sèches optimale ( $\gamma_{d_{OPN}}$ ) de la marne non traitée et la marne traitée au ciment et au co-produit composé de laitier+Coquille qui est similaire à un liant hydraulique routier.

La figure 74 présente les courbes Proctor de la marne avant et après traitement avec le LHF+Coquille, les courbes de compactage montrent la variation de la densité et de la teneur en eau en fonction des différents dosages de liants.

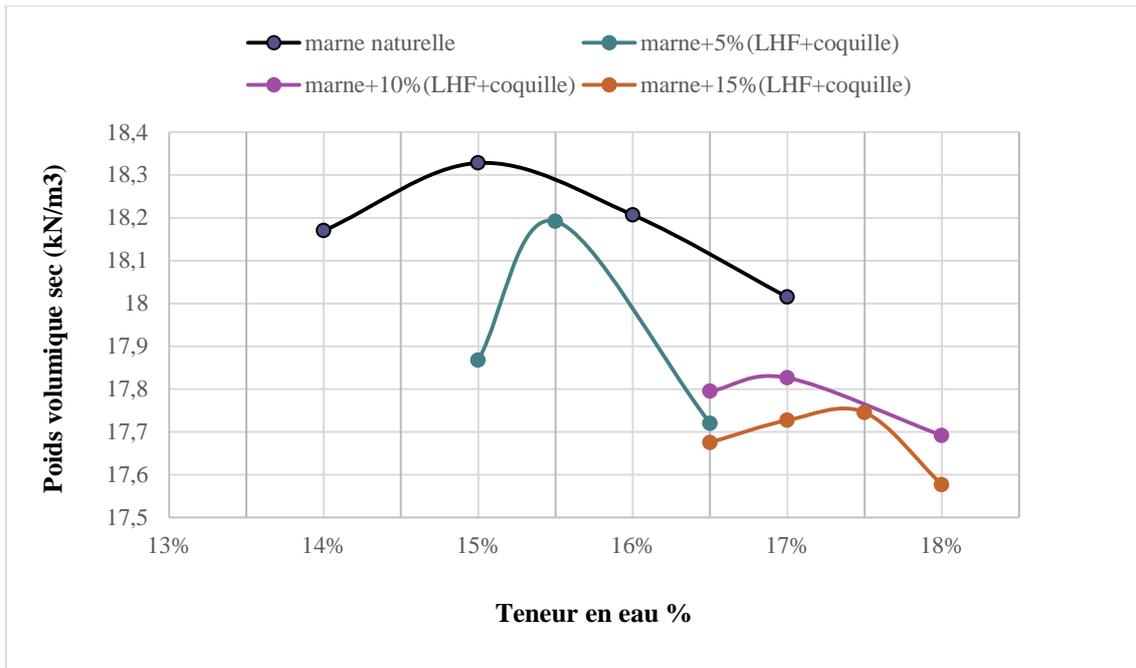


Figure 74 : Courbe Proctor correspondantes aux différents dosages de LHF+Coquille

La figure 75 présente les courbes Proctor de la marne avant et après traitement avec le ciment, les courbes de compactage montrent la variation de la densité et de la teneur en eau en fonction des différents dosages de liants.

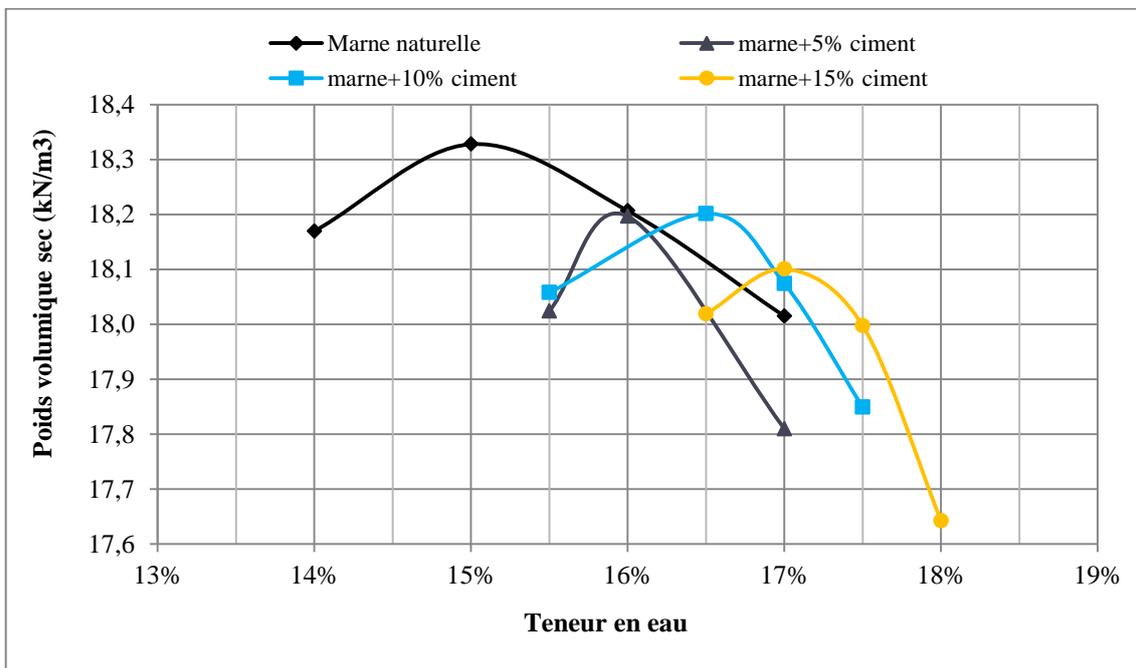


Figure 75 : Courbe Proctor correspondantes aux différents dosages de ciment

L'allure des courbes Proctor obtenues montrent une augmentation de densité sèche en fonction de la teneur en eau jusqu'à l'arrivée au point de la densité sèche maximale. Une fois arrivé à ce point, on remarque une diminution de la densité sèche (courbe en cloche). Cette allure est valable pour la marne naturelle et traitée. Ces résultats

montrent la sensibilité de la marne naturelle et traitée à la teneur en eau au moment du compactage.

Les valeurs des densités sèches et les teneurs en eau optimales sont synthétisées dans le tableau suivant. Les résultats montrent que les teneurs en eau optimales varient entre 15% et 17.5% et les densités sèches varient entre 18,33 (kN/m<sup>3</sup>) et 17,55(kN/m<sup>3</sup>) pour les différents dosages de traitement.

Dosages	Teneur en eau Optimale (%)	$\gamma_d$ OPN (kN/m <sup>3</sup> )
Sol naturel	15	18,33
Sol +5 % ciment	16	18,20
Sol +10 % ciment	16.5	18,20
Sol +15 % ciment	17	18,10
Sol +5 % (LHF+Coquille)	15.5	18,19
Sol +10 % (LHF+Coquille)	17	17,83
Sol +15 % (LHF+Coquille)	17.5	17,55

Tableau 13 : Les teneurs en eau et les densités optimales correspondantes aux différents dosages

Afin de mettre en évidence l'évolution de la teneur en eau optimale et la densité optimale en fonction des différents dosages pour les deux produits de traitement, on a présenté les résultats sous forme de graphes (figure ci-dessous). Le 1<sup>er</sup> graphe représente la variation des teneurs en eau optimales en fonction de différents pourcentages d'ajout de LHF+Coquilleet du ciment.

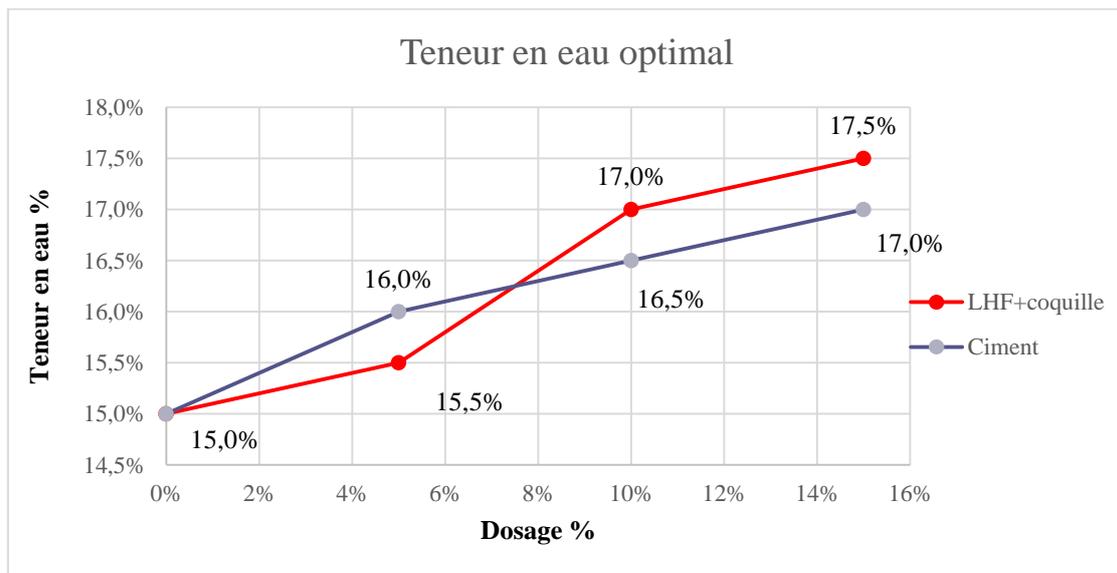


Figure 76 : La variation des teneurs en eau optimales en fonction des dosages

On remarque une augmentation de la teneur eau optimale en fonction des dosages. Ce constant est valable pour les deux produits de traitement (laitier+coquille et ciment). Cela peut être expliqué par l'action de l'hydratation des liants hydraulique qui provoque une consommation d'eau pour crée les composés cimentaires et aussi l'extinction de la chaux vive qui se trouve dans la composition de la coquille calciné.

En comparaison des deux traitements, on remarque que les teneurs en eaux optimales obtenues par traitement de la marne aulaitier+coquille dépassent les teneurs en eau obtenus par le traitement au ciment à partir d'environ 8% de dosage. Cela est peut être expliqué par le même argument précédent c'est-à-dire que le rôle de la chaux présente dans la coquille calcinée qui absorbe beaucoup plus d'eau que le ciment.

Le 2<sup>ème</sup> graphe représente la variation du poids volumique sec en fonction de différents pourcentages d'ajout du ciment et de laitier+coquille.

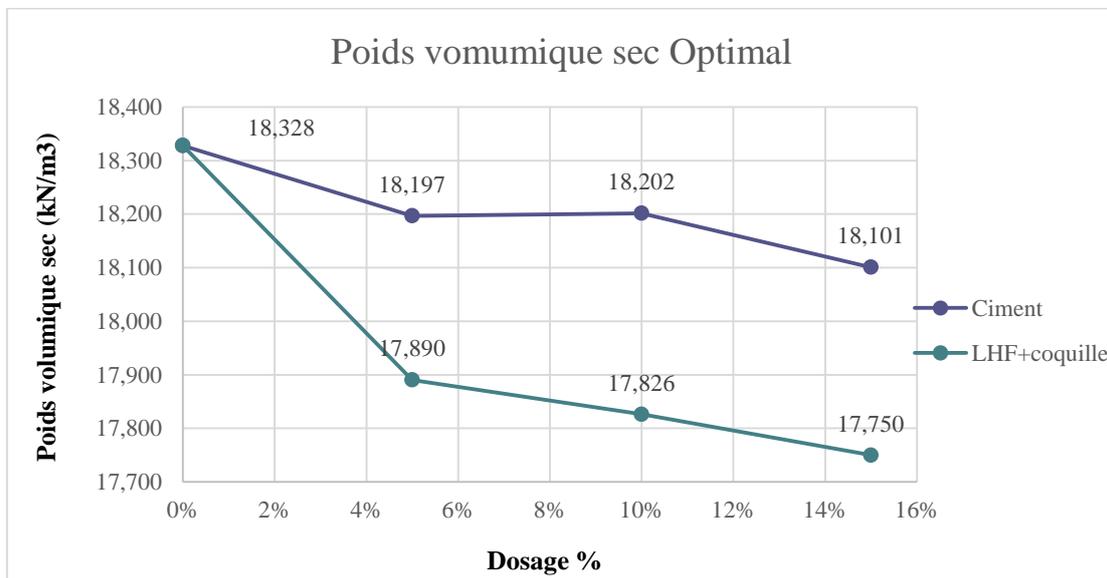


Figure 77 : La variation des poids volumiques sec en fonction des dosages

On remarque que l'accroissement du pourcentage d'ajout des liants entraine une diminution de la densité sèche OPN. Cette **diminution de la densité sèche montre une facilité de compactage de la marne après traitement ce qui permet de réduire le temps et le coût des terrassements. Cette diminution est beaucoup plus marquée avec LHF+Couille par rapport au ciment**

### 3. Effets du traitement sur la consistance

L'influence de l'ajout d'un certain pourcentage de ciment et de LHF+Coquille sur la limite de liquidité et la limite de plasticité et par conséquent sur l'indice de plasticité a fait l'objet d'une étude expérimentale. Les résultats obtenus lors des différents essais sont représentés successivement pour des pourcentages de : 5%, 10% et 15% d'ajout.

### 3.1. Limite de liquidité

Les résultats des limites de liquidité pour différents dosages de LHF+coquille et ciment sont synthétisés dans le tableau suivant. La représentation graphique de la variation de la limite de liquidité en fonction des différents pourcentages de produits de traitement est fournie dans la figure suivante.

Limite de liquidité w <sub>L</sub> (%)	Dosages (%)			
	0	5	10	15
LHF+coquille	57,61	53,96	53,02	48,24
Ciment	57,61	55,89	53,34	51,93

Tableau 14 : Limites de liquidité pour différents dosage de LHF+coquille et ciment

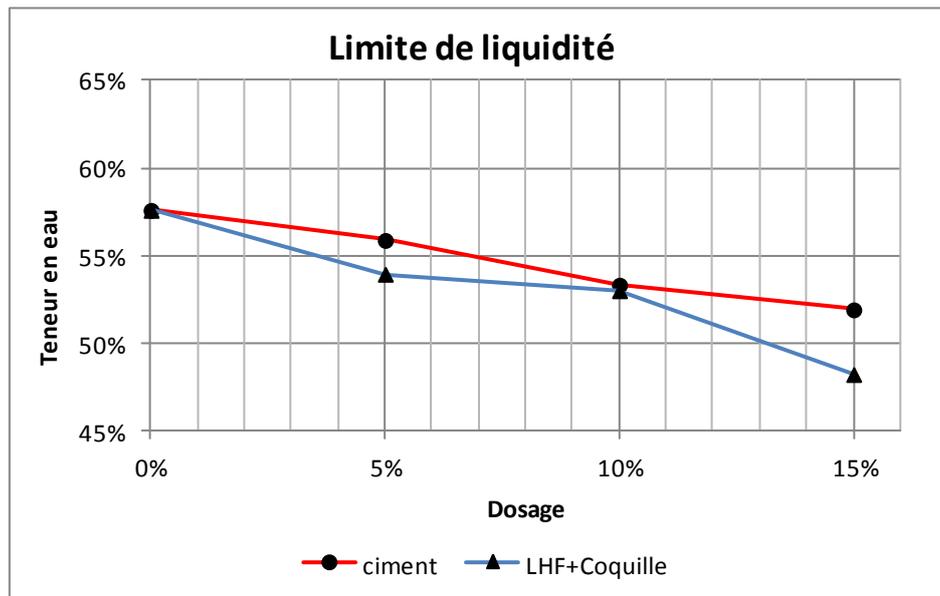


Figure 78 : variation de la limite de liquidité en fonction des différents dosages de liants

On remarque une décroissance de la limite de liquidité pour les deux traitements. Cette décroissance est plus grande pour le traitement de la marne avec LHF+ coquille. Cela montre la différence dans l'action pouzzolanique entre les deux produits de traitement sur ce paramètre.

### 3.2 Limite de plasticité

Les résultats de la limite de plasticité pour la marne sont synthétisés dans le tableau suivant pour différents dosages de LHF+Coquille et de ciment (5%, 10% et 15%).

Limite de plasticité $w_p$ (%)	Dosages (%)			
	0	5	10	15
LHF+coquille	28,8	33,5	31,8	30,9
Ciment	28,8	32,5	28,9	28,8

Tableau 15 : Limites de plasticité pour différents dosage de LHF+coquille et ciment

La représentation graphique de la variation de la limite de liquidité en fonction du pourcentage de LHF+Coquille et ciment est fournie dans la figure suivante.

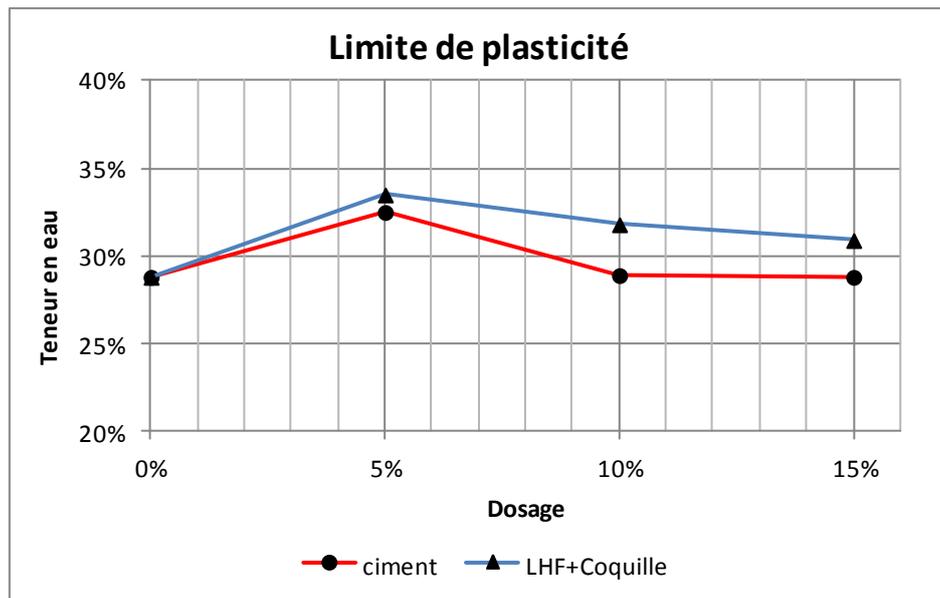


Figure 79 : Variation de la limite de plasticité en fonction des différents dosages de liants

Au contraire, on remarque une légère croissance de la limite de plasticité pour les deux traitements à 5% de dosage. Cette croissance est légèrement plus grande pour le traitement de la marne avec LHF+ coquille. Pour les deux autres dosages 10% et 15%, on remarque qu'il y a une baisse de la limite de plasticité de la marne traitée au ciment pour revenir à l'état initial. Pour le traitement au LHF+coquille les valeurs de  $w_p$  sont devenues plus bas par rapport à la valeur de 5% mais elles sont restées supérieures à la valeur initiale. Cela montre que le traitement au ciment agit de manière plus efficace sur ce paramètre par rapport au traitement ciment.

### 3.3 Indice de plasticité

Les limites de liquidité et de plasticité de la marne naturelle et traitée à différents pourcentages ont permis de calculer les indices de plasticité correspondants

( $I_p = w_L - w_p$ ). Les résultats de calcul de ce paramètre en fonction des différents dosages de LHF+Coquille et de cimentsont donnédans le tableau ci-dessous.

Indice de Plasticité $I_p$ (%)	Dosages (%)			
	0	5	10	15
LHF+coquille	28,8	20,5	21,46	17,3
Ciment	28,8	23,4	24,4	23,1

Tableau 16 : L'indice de plasticité en fonction des dosages de liants

La variation de ce paramètre en fonction du pourcentage de LHF+Coquille et de ciment est donnée dans les graphes de la figure ci-dessous.

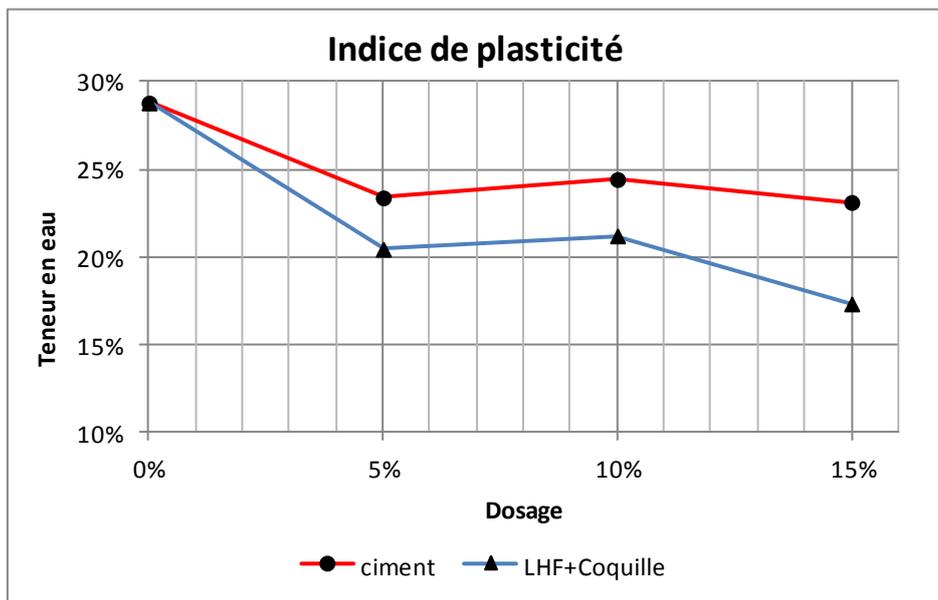


Figure 80 : Variation de l'indice de plasticité en fonction des différents dosages de liants

On observe que l'indice de plasticité diminue rapidement après l'ajout d'une quantité 5% de LHF+coquille, puis il se stabilise à 10% de dosages avec une petite augmentation qui est peut être due aux incertitudes des mesures délicates de ce paramètre. A 15% de dosage, indice de plasticité diminue encore plus pour atteindre une valeur de 17,3%.

On observe que l'indice de plasticité diminue rapidement après l'ajout d'une quantité 5% de ciment, puis il se stabilise pour les autres dosages (10% et 15%).

La comparaison des deux courbes de variation de l'indice de plasticité montre que notre nouveau co-produit de traitement (LHF+coquille) réduit beaucoup mieux la plasticité de notre marne argileuse (marne moins plastique par rapport au traitement au

ciment). Cela va se traduire sur chantier par une bonne ouvrabilité de notre marne argileuse traitée.

#### 4.Effets du traitement sur la résistance à la compression

Afin d'évaluer l'influence du traitement sur la portanced'un remblai routier réalisé par la marne, des essais de compression simple ont été menéesau laboratoire sur des éprouvettes cylindriques. Ces dernières sont confectionnées aux densités sèches et teneurs en eau optimales Proctor normal pour différents dosages et différents temps de cure (3,7 et 28 jours) afin de mettre en évidence l'influence de :

- dosage sur la résistance à la compression,
- temps de cure sur la résistance à la compression.

Les résultats de l'écrasement de ces éprouvettes à chaque temps de cure prévus sont résumés dans les tableaux suivants :

	3 jours		7 jours		28 jours	
	Force (kN)	Rc (MPa)	Force (kN)	Rc (MPa)	Force (kN)	Rc (MPa)
<b>Sol naturel</b>	518	0.111	518	0.111	518	0.111
<b>Sol naturel + 5% LHF+Coquille</b>	1090	0.234	2250	0.483	4080	0.877
<b>Sol naturel + 10% LHF+Coquille</b>	1370	0.294	2333	0.501	5049	1.085
<b>Sol naturel + 15% LHF+Coquille</b>	1876	0.403	3106	0.667	6273	1.348

Tableau 17 : Les résultats de l'effet du LHF+Coquille sur la résistance à la compression

	3 jours		7 jours		28 jours	
	Force (kN)	Rc (MPa)	Force (kN)	Rc (MPa)	Force (kN)	Rc (MPa)
<b>Sol naturel</b>	518	0.111	518	0.111	518	0.111
<b>Sol naturel + 5% ciment</b>	1973	0.424	2950	0.634	5096	1.095
<b>Sol naturel + 10% ciment</b>	4136	0.889	4669	1.003	7684	1.651
<b>Sol naturel + 15 %ciment</b>	4587	0.986	6299	1.353	8275	1.778

Tableau 18 : Les résultats de l'effet du ciment sur la résistance à la compression

## 4.1. Influence du dosage et du temps de cure

### 4.1.1. Traitement au LHF+coquille

Les résultats de la résistance à la compression simple «  $R_c$  » en fonction du dosage du co-produit LHF+coquille et le temps de cure sont présentés dans la figure ci-dessous.

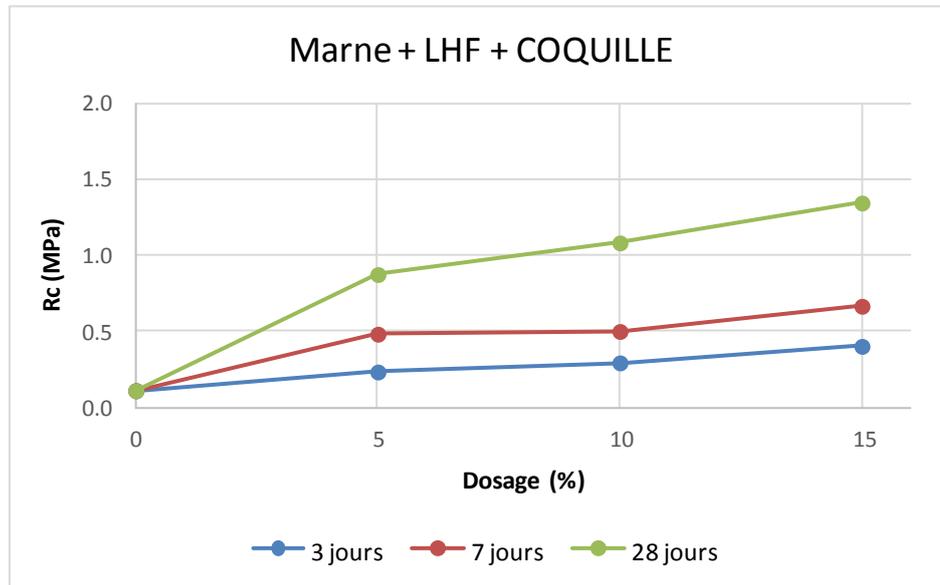


Figure 81 : La variation de  $R_c$  en fonction de différents dosages et temps de cure pour LHF+Coquille

On remarque une amélioration de la résistance à la compression après chaque pourcentage ajouté de LHF+Coquille (5%, 10% et 15%). Cette résistance s'améliore aussi après le passage de temps de cure 3, 7 et 28 jours. La résistance à la compression de la marne est passée de 0.111 MPa (état naturel) à 0,234, 0,483 et 0,887 MPa après respectivement 3, 7 et 28 jours pour 5% de dosage. Les autres dosages (10% et 15%), les résistances sont présentées dans le tableau 20.

L'augmentation de la résistance à compression simple est due à la réaction pouzzolanique du laitier qui a été activé avec la coquille d'œuf. Afin de mieux analyser les rapports entre les différentes résistances  $R_c$  et la résistance initiale de la marne naturelle, nous avons tracé l'évolution des rapports  $R_c/R_{c_0}$  en fonction du temps de maturation pour les différents dosages. Les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous.

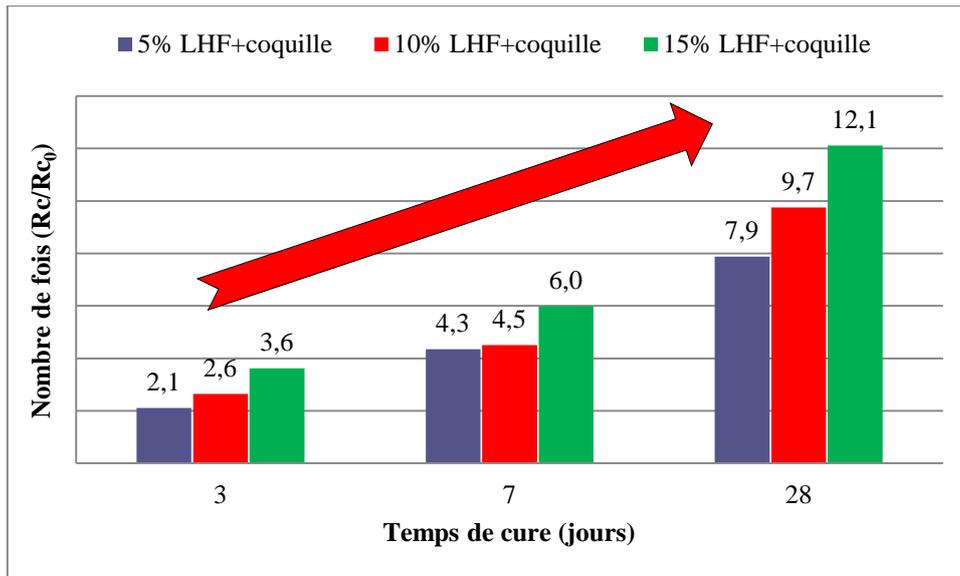


Figure 82 : Evolution des écarts en fonction du temps de cure et des dosages

Nous remarquons que la résistance à la compression double de valeur entre 3 et 7 jours et de même entre 7 et 28 jours et cela pour les trois dosages du co-produit (variation quasi-linéaire). Cela montre que l'action pouzzolanique est en cours de développement dans le mélange et au fur et à mesure du passage de temps la marne se stabilise encore mieux.

Nous constatons également qu'il y a une légère amélioration de la résistance à la compression entre les dosages 5% et 10% pour un temps cure donnée. Cela montre que l'action pouzzolanique du mélange marne+LHF+coquille a besoin plus de temps pour la stabilisation, ce qui est confirmé par les valeurs atteintes à 28 jours où on remarque une nette amélioration de la résistance par rapport à 7 jours.

Nous tenant à préciser que des éprouvettes de marne traitée sont en cours de maturation pour écrasement à 56 et 90 jours. Les résultats de ces tests permettront de mieux comprendre l'effet du nouveau co-produit sur le comportement de la marne traitée à long terme.

L'amélioration globale est passée de 2 à 8 fois par rapport à la résistance initiale de marne naturelle pour le plus faible dosage (5%) et jusqu'à 12 fois pour le plus grand dosage (15%). Cela montre une bonne prise hydraulique du nouveau co-produit utilisé.

#### 4.1.2. Traitement avec le ciment

La figure ci-dessous présente l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction du temps de maturation pour la marne traitée à 5%, 10% et 15% de ciment. On observe que la résistance mécanique du sol augmente progressivement avec l'augmentation du dosage pour les différents temps de maturation.

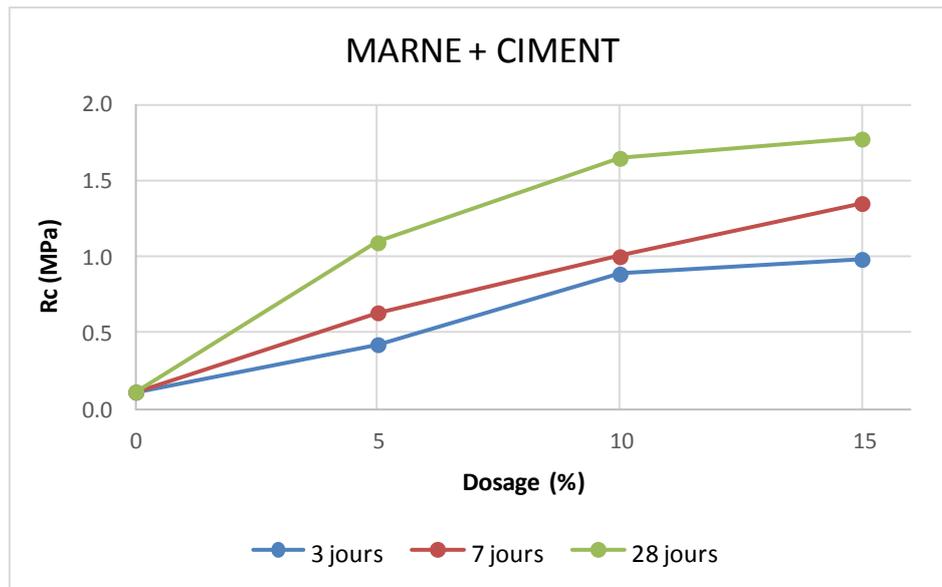


Figure 83 : La variation de Rc en fonction de différents dosages et temps de cure pour le ciment

On remarque une croissance quasi-linéaire de la résistance à la compression pour différents dosages à 7 jours de temps de cure. Pour les deux autres temps de cure (3 et 28 jours), on remarque une légère stabilisation entre 10% et 15% de dosage. Cela montre que l'action pouzzolanique du ciment est en cours de développement dans le mélange et au fur et à mesure du passage de temps la marne se stabilise encore mieux.

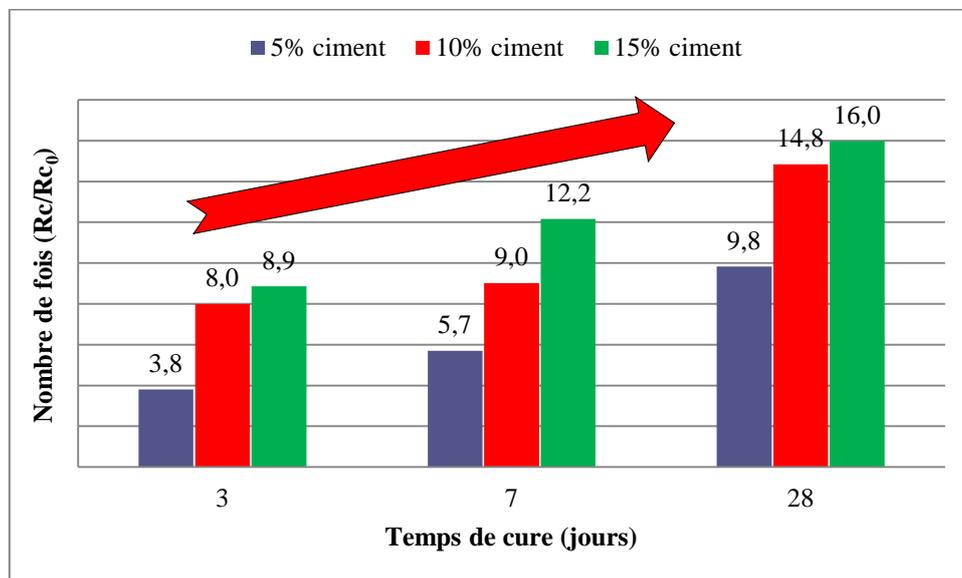


Figure 84 : Evolution des écarts en fonction du temps de cure et des dosages (ciment)

Nous constatons également qu'il y a une légère amélioration de la résistance à la compression entre les dosages 10% et 15% pour un temps cure donnée. Cela montre que l'action pouzzolanique du mélange marne+LHF+coquille est arrivée presque à sa

fin après 7 jours de maturation. Cela est expliqué par la prise hydraulique rapide du ciment et sa stabilisation finale à 28 jours.

L'amélioration globale est passée d'environ 4 à 10 fois par rapport à la résistance initiale de marne naturelle pour le plus faible dosage (5%) et jusqu'à 16 fois pour le plus grand dosage (15%).

#### 4.2. Comparaison entre les deux produits de traitement

Les histogrammes ci-dessous présentent la comparaison des résistances à la compression simple des éprouvettes de marne traitée par les des deux produits (LHF+coquille et ciment). Ces résistances sont comparées à des éprouvettes traitées au ciment et au LHF+coquille avec les mêmes dosages et les mêmes temps de cure.

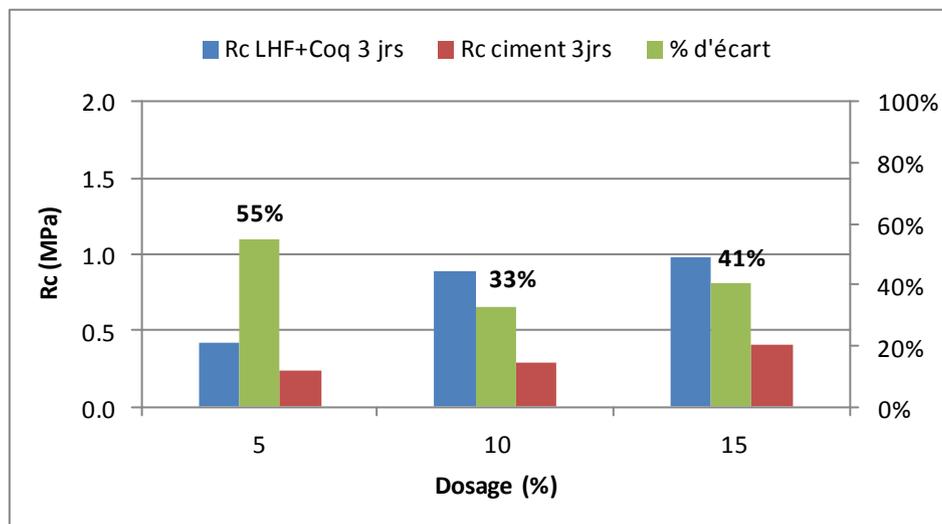


Figure 85 : Comparaison des résistances à la compression à 3 jours

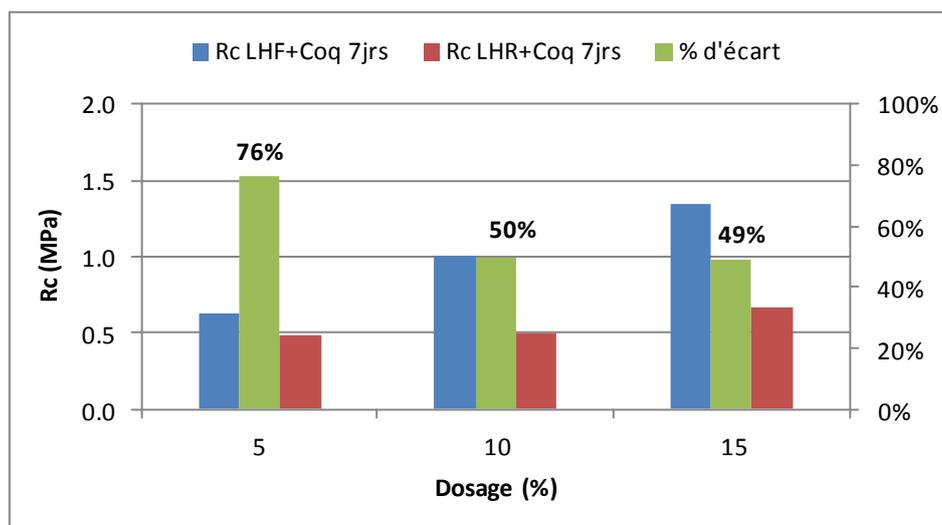


Figure 86 : Comparaison des résistances à la compression à 7 jours

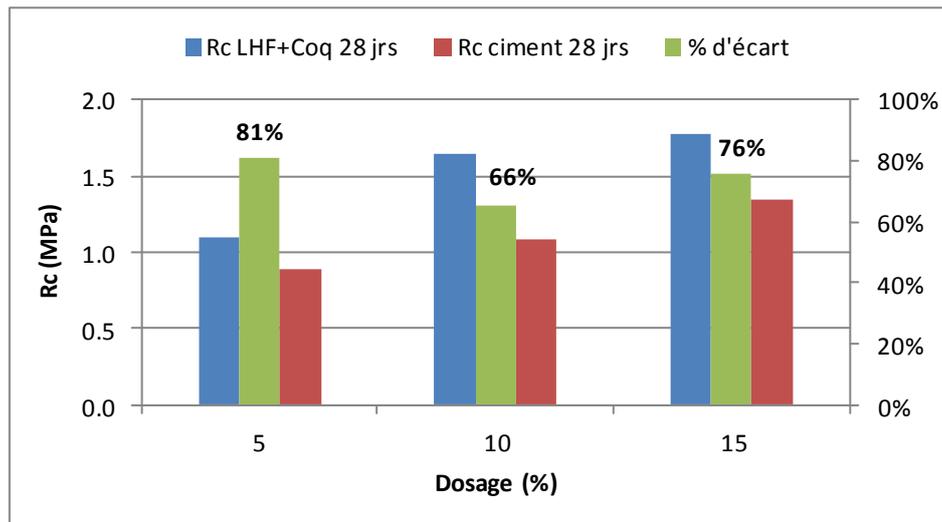


Figure 87 : Comparaison des résistances à la compression à 28 jours

Tout d'abord, on constate que les résistances de la marne traitée au LHF+coquille mesurées aux échéances 3, 7 et 28 jours après traitement, sont plus faibles que celle traitée au ciment. L'écart d'efficacité entre les deux traitements est variable pour les différents dosages (par exemple il varie entre 33 et 55% pour 3 jours de temps de cure). Cette écart suit une tendance croissante en fonction du temps de cure (par exemple : il varie entre 55% et 81% pour 5% de dosage). Cela peut être expliqué par la différence de vitesse de prise hydraulique entre les deux produits (prise du ciment plus rapide que le LHF+coquille).

#### 4.3. Comparaison des résultats avec d'autres travaux

Dans les deux figures ci-dessous, nous avons fait deux comparaisons avec des travaux de la littérature sur le traitement des marnes. La première figure présente une comparaison de nos résistances à la compression simple et celles de traitements traditionnels à la chaux et au ciment. La deuxième figure présente les mêmes résistances mais cette fois-ci comparées avec des traitements non traditionnels en cours de recherche.

On remarque que nos valeurs de résistance sont très proche des valeurs des travaux de Seco 2011 qui a traité sa marne avec de la chaux et un ciment spécifique appelé consolid system, et des travaux de Al-Amoudi 2010 qui a traité sa marne avec de la chaux. En revanche, nos résistances sont très éloignées par rapport au traitement avec le ciment dans les travaux de Al-Amoudi 2010 et Aiban 1998 car ils ont utilisé dans le traitement des ciments spécifiques de type I et de type V (ciment Portland CPA sans ajouts résistant au sulfates) qui dispose de bonne résistance à la compression et une bonne résistance au perturbateur de traitement.

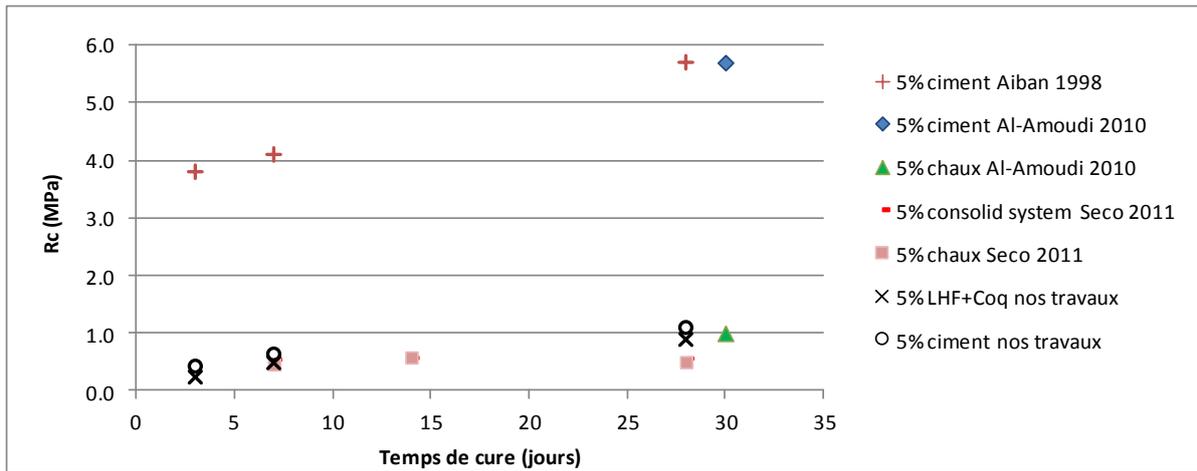


Figure 88 : Comparaison avec des traitements traditionnels

La deuxième comparaison avec les travaux de Seco et al 2011 sur le traitement d'une marne de l'Espagne avec des ajouts non traditionnels, montre que nos résistances obtenus avec le traitement LHF+coquille sont proche des plus faibles valeurs de résistance obtenus par un traitement de la marne avec l'oxyde de magnésium (PC-7) + filler d'aluminate (AF) qui sont des produits commerciaux (fig.88). Les autres traitements réalisés avec des mélanges de chaux + cendre volante de la balle de riz (RHFA) ou la cendre volante de charbon(CFA) ou encore de filler d'aluminate (AF), ont fournis des résistances à la compression simple nettement plus élevées par rapport à nos valeurs. Ces mélanges riches en oxyde de calcium et en silicone et/ou aluminium permettent d'accélérer la réaction pouzzolanique de la chaux ou du d'oxyde de magnésium ce qui augmente très rapidement la résistance à la compression et par conséquence la portance sur chantier de ces matériaux.

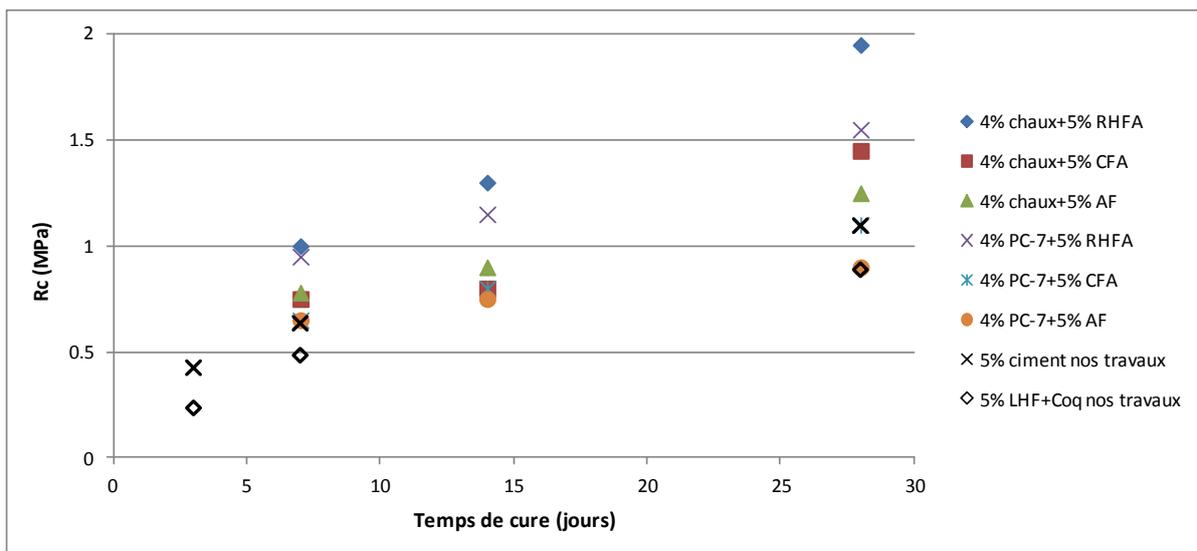


Figure 89 : Comparaison avec des traitements non traditionnels

## Conclusion

Les conclusions de ce chapitre sont résumées comme suit :

- on a constaté des modifications des caractéristiques de la courbe Proctor de la marne après traitement avec notre nouveau co-produit (LHF+coquille) à différents dosages ; réduction du poids volumique sec optimal et augmentation de la teneur en eau optimale. Ces modifications montrent un futur comportement de la marne dans le sens de faciliter le compactage et donc la réduction des temps et des coûts de cette opération très importante sur un chantier.
- le traitement de la marne avec notre co-produit (LHF+coquille) a permis de réduire la plasticité du matériau avec des performances supérieures à celles obtenues par le traitement au ciment. Cette réduction va permettre d'avoir une bonne ouvrabilité de la marne par les engins de chantier.
- on a constaté une amélioration des résistances à la compression de la marne après traitement au LHF+coquille ce qui montre une meilleure portance pour ce matériau traité.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

---

Nous avons présenté dans ce mémoire de fin cycle Master, un travail purement expérimental qui a duré près de 4 mois au sein des laboratoires pédagogique et de recherche de notre université. Ce travail est une contribution dans les travaux réalisés pour mieux comprendre le comportement des marnes traitées en vue de leur utilisation dans les remblais routiers. Ce matériau (marne argileuse) a été traité par le ciment et par un nouveau co-produit (LHF+coquille) similaire à un liant hydraulique routier.

A l'issue de cette étude, nous avons pu remarquer l'évolution des propriétés géotechniques et mécaniques de notre sol suite au traitement :

- l'ajout de notre nouveau co-produit de traitement à cette marne a beaucoup influencé ses caractéristiques de compactage ; la teneur en eau optimale a augmenté alors que la densité maximale sèche a été réduite. Ce qui va se traduire par une facilité de compactage.
- le traitement de la marne à différents pourcentages de notre nouveau co-produit de traitement a augmenté sa limite de plasticité et a réduit sa limite de liquidité. Cela a conduit à une diminution de l'indice de plasticité ce qui rend la marne traitée plus maniable durant les périodes humides.
- les résistances à la compression simple des éprouvettes de marne soumises à des essais d'écrasement non confinés, croissent avec l'augmentation du pourcentage de notre nouveau co-produit de traitement et le temps de maturation du mélange.

---

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

A

[A. Bouamrane et al 2014] Valorisation des boues de papeterie comme matières premières, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°20, Décembre 2014

[A. Matynia2009] mécanisme de rétention du cuivre sur de la tourbe végétalisée, thèse , université de Grenoble, France.

[A. Seco et al 2011] The use of non-conventional additives in Marls stabilization, Applied Clay Science 51 (2011) 419–423

C

[Ch. SCHON] Classification géotechnique des sols basée sur la classification U.S.C.S

[C. Mathieu et al 2003]. Analyse chimique des sols – Méthodes choisies

D

[D. DELAHAYE et al] Désordres sur des remblais en marne, thèse, université de Nice France  
[D.A. Oliveira et al 2012].A literature review on adding value to solid residues: egg shells, Journal of Cleaner Production Volume 46, May 2013

E

[E. Kalkan et al 2004] the positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners, Engineering Geology Volume 73, Issues 1–2, May 2004

[E. Kalkan 2011] Impact of wetting–drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume, Applied Clay Science Volume 52, Issue 4, June 2011

F

[F. Boudissa 2011] Influence des radiations micro-onde sur l'extraction de l'huile de grignon d'olive.

G

[GTS 2000] Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, SETRA.

[GTR 2000] LCPC SETRA, Réalisation des remblais et des couches de forme

H

[H. Bounib 2013] élaboration et caractérisation microstructurale et mécanique des réfractaires a base de kaolin dd3 et la dolomite, Annales de chimie ISSN 0151-9107, 2013, vol. 38

### I

[I. Zorluer et al 2012] The effects of marble dust and fly ash on clay soil, Sci Eng Compos Mater Volume 20, Issu 1 Feb 2012

### K

[K. Hossain et al 2011] Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes, Construction and Building Materials Volume 25, Issue 8, August 2011

### M

[M. Attom et al 1998] Soil stabilization with burned olive waste, Applied Clay Science Volume 13, Issue 3, September 1998

[M. Kamon et al 1991] Combining industrial waste s with lime for soil stabilization, **Journal of Geotechnical Engineering** Vol. 117, Issue 1 (January 1991)

[M. Pansu et al 2003].L'analyse du sol : minéralogique, organique et minérale, Paris : Springer, 2003, 1012 p. ISBN 2-287-59774-3

### N

NF P 94-051 Norme française, détermination des limites d'Atterberg

NF P94-056 Norme française, Analyse granulométrique par tamisage

NF P94-057 Norme française, Analyse granulométrique par sédimentométrie

NF P94-068, Norme française, Valeur au bleu de méthylène

NF P94-077 Norme française, Essai de compression simple.

NF P 94-093 Norme française, paramètres optimaux de compactage (Proctor)

### O

[O. Amu et al2005] Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil, journal of a applied sciences ISSN 1812-5654.

[O. Boudlal 2013] étude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations, thèse, université de Tizi Ouzou Algérie.

[O. Al-Amoudi et al 2010] Stabilization of a Saudi calcareous marl soil, Construction and Building Materials Volume 24, Issue 10, October 2010

### P

[P. Julphunthong 2015] Chemical Stabilization of Loess in Northeast Thailand Using the Mixture of calcined marble dust waste and sugarcane bagasse ash waste. Geotechnical Engineering

Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 46 No.1 March 2015 ISSN 0046-5828

[P. Segui 2011] Elaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie, thèse, université Toulouse III France.

[P. Venda Oliveira et al 2013] Effect of Stress Level and Binder Composition on Secondary Compression of an Artificially Stabilized Soil

### R

[R. Nidzam 2010] Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag—a review, Volume 163 Issue 3, August 2010

### S

[S. Horpibulsuk et al 2012] soil stabilization by calcium carbide residue and Fly Ash, journal of materials in civil Engineering, Volume 24 Issue 2.

[S. Jegandan et al 2010] Sustainable binders for soil stabilization, Volume 163 Issue 1.

[S. Rebouh 2012] impact de la pollution de l'air provoquée par la cimenterie tahardjouad sur la santé publique et le cadre bâti -cas de hammabouziane imprégné de margines.

[S. Aiban et al 1998] Performance of a stabilized marl base: a case study, Construction and Building Materials Volume 12, Issues 6–7, 1 September 1998

### W

[Wei et al 2009] Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production, Bioresource Technology Volume 100, Issue 11, June 2009

### X

[X. Kang et al 2014] Chemically Stabilized Soft Clays for Road-Base Construction, Volume 23, Issue 3 / September 2014

[Xinchen *et al.* 2009] A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light

### Y

[Y. Tankpinou kiki 2016] caractérisation minéralogique thermique et microscopique de sols fins en technique routière, thèse, Université de Bordeaux France.

[Y. Yi 2013] Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC, journal of materials in civil engineering, Volume 26 Issue 2.

[Y. Yi et al 2014] Resistance of MgO–GGBS and CS–GGBS stabilised marine soft clays to sodium sulfate attack, Geotechnique Volume 64 Issue 8, June 2014