

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 : AISSAOUI Nesrine, BENCHEIKH Mohammed & OUADJA Gbati Malick

Thème :

**TRAITEMENT DES SOLS FINS EN VUE DE
LEUR UTILISATION DANS LES REMBLAIS
ROUTIERS**

Sous la direction de : Dr BOUTELDJA Fathe

Juin 2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACE

A mon père, qui m'a aidé en m'orientant pour le choix de ma filière universitaire,

A ma mère qui est pour moi une source de réconfort,

A ma petite sœur.

Malick OUADJA.

DEDICACE

A la mémoire de mon défunt père qui reste toute ma vie dans mon cœur Inchallah,

A ma mère El Hadja, que Allah continue de veiller sur elle parce qu'elle est toujours présente pour nous,

A Khaled Amar, Hajira, Nadia, Jahida, Imane mes frères et sœurs et toute la famille BENCHEIKH et mes oncles et tantes qui m'ont encouragé pendant toutes mes études sans oublier les 2 anges Salah et Mariem,

A mon frère et mon binôme et mon pote Malick OUADJA, avec qui on traversa toutes les épreuves de cette année inoubliable,

A Saddek BENSALFI, un frère, un ami qui nous apporta son soutien,

A tous mes cousins et mes amis.

BENCHEIKH Mohammed.

DEDICACE

Je dédie ce projet de fin d'étude en premier lieu à mes parents qui m'ont aidée et soutenue durant toutes ces longues années d'étude,

A mes frères et mes sœurs,

A toute la famille,

A toute la promotion Master 2 V OA 2014 – 2015,

Surtout mon trinôme et le doctorant BENSALFI Saddek,

A tous mes tantes et oncles,

Nesrine AISSAOUI.

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 remercier notre encadreur, Dr BOUTELDJA Fathe, pour son dévouement au bon déroulement de notre travail notamment nos essais réalisés en laboratoire, qui ont nécessité beaucoup de rigueur, d'assiduité et de patience.

Nous remercions également l'Université 08 Mai 1945 de nous avoir donné l'accès aux laboratoires de recherche et pédagogique de l'Université où nous avons pu effectuer nos essais pendant toute la durée de notre travail.

Nous remercions aussi Dr BENYAGHLA Hacene, 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 tous ceux qui de près ou de loin nous ont aidés directement ou indirectement durant ces longs mois de labeur.

RESUME

Nos préoccupations modernes nous poussent à entretenir et développer nos voies de communication tout en préservant les ressources naturelles. Dans cette optique, l'emploi de produits de traitement lors des travaux de terrassement permet l'usage des matériaux en place aux comportements géotechniques initialement médiocres.

Dans ce travail, nous avons cherché à montrés les effets d'un produit de traitement composé de chaux et d'un liant hydraulique sur un sol argileux.

Mots clés : remblai, traitement des sols, chaux, liant hydraulique, argile, indice portant immédiat.

ABSTRACT

Our modern concerns push us to maintain and develop our transportation routes while preserving the natural resources. Accordingly, use of pesticides at the time of the earthworks allows use materials places from there at the initially poor behaviors geotechnics.

In this work, we sought for shown the purposes of a pesticide made up of lime and of a hydraulic binder on a clay soil.

Keywords : banc, treatment, lime, hydraulic binder, clay, immediate value bearing capacity.

ملخص

ملخص

انشغالنا العصرية تدفعنا الى تطوير طرقاتنا وذلك مع الحفاظ على الثروات الطبيعية في هذا المنظور يكون استعمال مواد معالجة في خلال اعمال الطرقات تمكنا من استخدام المواد الموجودة في المكان و التي تكون في بداية الامر غير صالحة للاستعمال في هذا العمل اردنا اظهار اثار مواد المعالجة باستعمال خليط مكون من الجير و الاسمنت.

كلمات مفتاح معالجة التربة, الجير, الاسمنت, الطين, مؤشر قدرة الحمولة الحالية.

SOMMAIRE

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS.....	IV
RESUME	V
ABSTRACT	V
ملخص.....	VI
LISTES DES FIGURES	X
LISTES DES TABLEAUX.....	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DES SOLS	2
1. INTRODUCTION	2
2. CARACTERISTIQUES DES SOLS.....	2
2.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS.....	2
2.2. CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES DES SOLS	3
3. PRINCIPAUX TYPES D'ARGILE.....	5
3.1. KAOLINITE	5
3.2. ILLITE:.....	6
3.3. MONTMORILLONITE :.....	7
4. CARACTERISTIQUES DES ARGILES	7
5. CLASSIFICATIONS DES SOLS.....	8
5.1. CLASSIFICATION GTR :.....	9
5.2. CLASSIFICATION USCS.....	15
Chapitre II : UTILISATION DES SOLS FINS DANS LES PROJETS ROUTIERS.....	19
INTRODUCTION	19
1. STRUCTURE D'UNE ROUTE.....	19
2. CONSTRUCTION D'UNE ROUTE.....	20
2.1 LA TECHNIQUE DES EMPRUNTS GRANULAIRES :	20
2.2 LA TECHNIQUE DE TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES	20
3. REGLES DE CONSTRUCTION D'UN REMLAI.....	21
4. LES MATERIAUX DE REMLAIS.....	21
4.1 LES SOLS.....	22
4.2 LES MATERIAUX ROCHEUX.....	22
4.3 LES SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS.	22
5. TERRASSEMENT	23
6. VALORISATION DES SOLS FINS EN REMLAI	24
6.1. LE COMPACTAGE DES SOLS.....	25
6.2. LE TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX.....	25

6.3. TRAITEMENT DES SOLS AU LIANT HYDRAULIQUE	25
6.4. AUTRES TRAITEMENTS.....	25
7. LES DESORDRES DANS UN REMBLAI ROUTIER.....	26
8. PROBLEMES LIES AUX SOLS FINS (ETAT NATUREL).....	26
8.1. PROBLEMES DE STABILITE	27
8.2 ÉVOLUTION DES RUPTURES.....	28
8.3 PROBLEMES DE TASSEMENT	28
8.4. CONSEQUENCES DES DESORDRES	29
8.5. EFFORTS SUR LES OUVRAGES VOISINS	30
8.6. ECOULEMENT DES EAUX.....	30
9. CONSEQUENCES LIES AUX PROBLEMES	30
9.1. FAISABILITE DE L'OUVRAGE	30
9.2. PHASAGE DES TRAVAUX.....	31
9.3. CONTRAINTES D'EXPLOITATION.....	31
9.3 LE TEMPS	31
9.4. LES COUTS	32
10. PROBLEMES LIES AUX SOLS FINS APRES TRAITEMENT	32
10.1. PROBLEMES LIES AUX CHLORURES.....	32
10.2 PROBLEMES LIES AUX SULFATES	33
10.3 PROBLEMES LIES AUX NITRATES.....	34
10.4. PHOSPHATES.....	35
CHAPITRE III : TRAITEMENT DES SOLS FINS.....	38
1. INTRODUCTION	38
2. LE TRAITEMENT DES SOLS.....	38
2.1. DEFINITION ET OBJET.....	38
2.2. AVANTAGES DE LA TECHNIQUE.....	38
3. LES PRODUITS DE TRAITEMENT	39
3.1. LA CHAUX AERIENNE	40
3.2. LES LIANTS HYDRAULIQUES.....	42
4. PRINCIPE D'ACTION DES PRODUITS DE TRAITEMENT	51
4.1. ACTION DE LA CHAUX.....	51
4.2 ACTION DES LIANTS HYDRAULIQUES	57
5. ETUDE DE FORMULATION	60
6. CARACTERISATION DES SOLS TRAITES.....	62
7. TECHNIQUE DE REALISATION DES TRAITEMENTS	62
7.1. TECHNIQUE COURANTE	62
7.2. MELANGE PAR LA TECHNIQUE DITE DU DEPOT REPRISE	63
7.3. TRAITEMENT DANS LE DEBLAI OU SUR LE REMBLAI	64
8. MATERIELS DE TRAITEMENT	64
8.1. MATERIELS DE STOCKAGE DES PRODUITS DE TRAITEMENT	64
8.2. MATERIELS D'EPANDAGE	65
8.3. MATERIELS DE PREPARATION DES SOLS.....	67
8.4. MATERIELS DE MALAXAGE DES SOLS EN PLACE	68
8.5. MATERIELS D'ARROSAGE.....	68
8.6. MATERIELS DE COMPACTAGE.....	69

CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE	74
1. INTRODUCTION	74
2. OBJECTIFS.....	74
3. DEMARCHE EXPERIMENTALE MISE EN PLACE.....	74
4. LOCALISATION DU LIEU DE PRELEVEMENT	75
5. ESSAIS D'IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION SELON LE GTR	77
5.1. ESSAIS D'IDENTIFICATION	77
5.2. CLASSIFICATION DU MATERIAU SELON LE GTR.....	81
6. PARAMETRES OPTIMAUX DE COMPACTAGE ET PORTANCE IMMEDIATE AVANT TRAITEMENT...82	
7. PORTANCE IMMEDIATE APRES TRAITEMENT.....	84
7.1. PRODUITS DE TRAITEMENT UTILISES.....	84
7.2. CHOIX DES DOSAGES.....	86
7.3. PROTOCOLE ADOPTEE.....	86
7.4. RESULTATS OBTENUS.....	86
8. TASSEMENT DES REMBLAIS CONSTITUES DE MATERIAUX FINS	89
8.1. ESSAI EFFECTUE : ESSAI ŒDOMETRIQUE	89
8.2. PROTOCOLE ADOPTE.....	89
8.3. RESULTATS DE L'ESSAI ET COURBES DE COMPRESSIBILITE.....	90
9. PARAMETRES DE STABILITE DES TALUS DE REMBLAIS ROUTIERS APRES TRAITEMENT	92
9.1. ESSAI EFFECTUE : ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE.....	92
9.2. PROTOCOLE ADOPTE.....	93
9.3 RESULTATS DE L'ESSAI :.....	94
CONCLUSION	96
CONCLUSION GENERALE.....	97
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	98

LISTES DES FIGURES

FIGURE 1 : COMPOSITION DES SOLS.....	3
FIGURE 2 : UNITE TETRAEDRIQUE	5
FIGURE 3 : STRUCTURE D'UNE COUCHE TETRAEDRIQUE	5
FIGURE 4 : UNITE OCTAEDRIQUE	5
FIGURE 5 : UNITE OCTAEDRIQUE	5
FIGURE 6 : STRUCTURE PARTICULAIRE DE LA KAOLINITE	6
FIGURE 7 : STRUCTURE PARTICULAIRE DE L'ILLITE.....	6
FIGURE 8 : STRUCTURE PARTICULAIRE DE LA MONTMORILLONITE	7
FIGURE 9 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE ET EQUIVALENT DE SABLE	10
FIGURE 10 : LIMITES D'ATTERBERG.....	11
FIGURE 11 : DIFFERENTS ETATS D'UN SOL	11
FIGURE 12 : ESSAI AU BLEU TACHES AUREOLEES.....	12
FIGURE 13 : ESSAI EQUIVALENT DE SABLE.....	13
FIGURE 14 : CLASSIFICATION DES MATERIAUX SELON LEUR NATURE.....	15
FIGURE 15 : ABAQUE DE CASAGRANDE	17
FIGURE 16 : CLASSIFICATION USCS	18
FIGURE 17 : COUPE D'UNE ROUTE D'APRES LE GTR.....	19
FIGURE 18 : FIGURE DESCRIPTIVE D'UN REMBLAI ET D'UN DEBLAI	23
FIGURE 19 : REALISATION DES TRAVAUX DE TERRASSEMENT.....	24
FIGURE 20 : SCHEMA DE RUPTURE DU REMBLAI PAR POINÇONNEMENT DU SOL DE FONDATION	27
FIGURE 21 : SCHEMAS DE RUPTURES DE TYPE CIRCULAIRE	28
FIGURE 22 : SCHEMA DU TASSEMENT ET DU DEPLACEMENT LATERAL DU SOL DE FONDATION.....	29
FIGURE 23 : CENTRALE DE FABRICATION DE LAIT DE CHAUX PAR EXTINCTION DE CHAUX VIVE.....	52
FIGURE 24 : EPANDAGE DE LAIT DE CHAUX POUR TRAITEMENT D'UN SOL ARGILEUX.....	52
FIGURE 25 : MODIFICATION IMMEDIATE DU COMPORTEMENT ARGILEUX D'UN SOL	53
FIGURE 26 : REPRESENTATION DES ACTIONS DE LA CHAUX SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE ET DE RESISTANCE AU POINÇONNEMENT DANS LE CAS D'UN SOL A2 TRAITE A 2% DE CHAUX VIVE	55
FIGURE 27 : EXEMPLE DE PRESENTATION DES RESULTATS D'UNE ETUDE DE FORMULATION	61
FIGURE 28 : SCHEMA DE LA REALISATION DU MELANGE PAR LA TECHNIQUE DITE DU « DEPOT-REPRISE »	63
FIGURE 29 : SILOS MOBILES DE 2 X 45 TONNES	65
FIGURE 30 : EPANDEUR DE PREMIERE GENERATION	66
FIGURE 31 : EPANDEUR NOUVELLE GENERATION	67
FIGURE 32 : CHARRUES A DISQUES DE 5 TONNES	68
FIGURE 33 : ARROSEUSE A PRECISION NON SUFFISANTE	69
FIGURE 34 : COMPACTEUR LOURD A PNEUS DE LA CLASSE P3	70
FIGURE 35 : UN COMPACTEUR VIBRANT MONOCYLINDRE LISSE	70

FIGURE 36 : UN COMPACTEUR VIBRANT TANDEM-TRANSVERSAL.....	71
FIGURE 37 : COMPACTEUR MIXTE	71
FIGURE 38 : COMPACTEUR VIBRANT A PIEDS DAMEURS DE LA CLASSE VP1	72
FIGURE 39 : UN COMPACTEUR STATIQUE A PIEDS DAMEURS DE LA CLASSE SP1.....	72
FIGURE 40: LOCALISATION DU LIEU DE PRELEVEMENT	76
FIGURE 41 : COURBE GRANULOMETRIQUE	78
FIGURE 42: DISPOSITIF POUR L'ESSAI VBS	79
FIGURE 43 : PHOTO DU CONE DE PENETRATION.....	80
FIGURE 44 : LIMITE DE LIQUIDITE, GRAPHE TENEUR EN EAU - PENETRATION	81
FIGURE 45 : CLASSIFICATION DE NOTRE SOL A PARTIR DU GTR	82
FIGURE 46: COURBES PROCTOR ET IPI	83
FIGURE 47 : PHOTOS DES ESSAIS PROCTOR ET IPI	84
FIGURE 48: PHOTOS MONTRANT L'APPLICATION DE LA CHAUX VIVE POUR LE TRAITEMENT.....	85
FIGURE 49: PHOTO MONTRANT L'APPLICATION DU CIMENT POUR LE TRAITEMENT	85
FIGURE 50: VALEURS DE L'IPI EN FONCTION DES DIFFERENTS DOSAGES APRES 24H.....	87
FIGURE 51 : VALEURS DE L'IPI EN FONCTION DES DIFFERENTS DOSAGES APRES 3 JOURS	87
FIGURE 52 : VALEURS DE L'IPI EN FONCTION DES DIFFERENTS DOSAGES APRES 8 JOURS	88
FIGURE 53: GRAPHE IPI EN FONCTION DE LA PERIODE DE CURE.....	88
FIGURE 54 : PRINCIPE DE L'ŒDOMETRE	89
FIGURE 55: PHOTOS REPRESENTANT LA CONFECTION DE L'EPROUVETTE POUR L'ESSAI ŒDOMETRIQUE.....	90
FIGURE 56 : COURBE ŒDOMETRIQUE DU SOL NATUREL AVANT TRAITEMENT	91
FIGURE 57 : COURBE ŒDOMETRIQUE DU SOL APRES TRAITEMENT	91
FIGURE 58: PRINCIPE D'UN ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE.....	93
FIGURE 59 : PHOTO DE NOTRE SOL APRES L'ESSAI DE CISAILLEMENT	94
FIGURE 60 : GRAPHE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT – DEPLACEMENT AVANT TRAITEMENT	95
FIGURE 61 : GRAPHE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT – DEPLACEMENT APRES TRAITEMENT	95
FIGURE 62 : GRAPHE CONTRAINTES DE CISAILLEMENT - CONTRAINTES APPLIQUEES AVANT TRAITEMENT ET APRES TRAITEMENT	96

LISTES DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : SYNTHETISE ET COMPARE LES CARACTERISTIQUES DE CES TROIS ARGILES	8
TABLEAU 2 : CLASSIFICATION GTR	9
TABLEAU 3 : DIFFERENTS TYPES DE CIMENTS COURANTS	45
TABLEAU 4 : SPECIFICATION MECANIQUES ET PHYSIQUES RELATIVES AUX DIFFERENTES CLASSES DE CIMENTS COURANTS	47
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES GENERALES DES CIMENTS NON COURANTS	48
TABLEAU 6 : RESISTANCES MECANIQUES REQUISES POUR LES LHR A DURCISSEMENT RAPIDE	50
TABLEAU 7 : RESISTANCES MECANIQUES REQUISES POUR LES LHR A DURCISSEMENT NORMAL.....	51
TABLEAU 8 : ADEQUATION DES CIMENTS COURANTS AVEC DIFFERENTS TYPES DE SOL.....	59
TABLEAU 9 : TABLEAU DES PARAMETRES MESURES AU COURS D'UNE ETUDE DE FORMULATION	61
TABLEAU 10 : OBJECTIFS DU TRAITEMENT DES SOLS APPLIQUE A LA REUTILISATION DES SOLS TROP HUMIDES EN REMBLAI	62
TABLEAU 11 : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE	77
TABLEAU 12 : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE	77
TABLEAU 13 : TABLEAU RECAPITULATIF DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	78
TABLEAU 14 : TABLEAU RECAPITULATIF DE L'ESSAI VBS.....	79
TABLEAU 15 : TABLEAU DES RESULTATS DE L'ESSAI AU CONE DE PENETRATION	80
TABLEAU 16 : RESULTATS LIMITE DE PLASTICITE	81
TABLEAU 17: RESULTATS PROCTOR ET IPI.....	83
TABLEAU 18: RESULTATS DE L'ESSAI OEDOMETRIQUE	90
TABLEAU 19 : PARAMETRES DE LA COURBE DE COMPRESSIBILITE OEDOMETRIQUE.....	92
TABLEAU 20 : RESULTATS DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT AVANT TRAITEMENT	94
TABLEAU 21 : RESISTANCE AU CISAILLEMENT AVANT ET APRES TRAITEMENT.....	96
TABLEAU 22 : ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE ET COHESION AVANT ET APRES TRAITEMENT.....	96

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les travaux de terrassement interviennent dans la construction de la plupart des ouvrages de génie civil ou de bâtiment. Cette activité recouvre l'ensemble des travaux de fouille, de transport, de mise en place de terre, pratiqués pour modifier le relief d'un terrain, permettre de réaliser ou renforcer certains ouvrages. Les sols sont ainsi extraits d'un déblai, puis transportés, et enfin mis en œuvre en remblai.

Les pratiques actuelles des terrassements sont une synthèse de techniques basées sur le retour d'expériences accumulées depuis plusieurs années. Celles-ci ont été formalisées dans des guides techniques, comme le Guide Technique de Réalisation des remblais et des couches de forme, qui conduisent à rechercher un certain type de matériau pour une certaine fonction dans l'ouvrage, ce qui exige le recours à des emprunts extérieurs aux projets lorsque la qualité et les propriétés géotechniques des matériaux rencontrés sur le site ne sont pas compatibles avec les performances recherchées. Cette approche n'est pas compatible avec les exigences du développement durable qui imposent d'employer au maximum les matériaux situés dans l'emprise des nouveaux projets d'infrastructure (zéro emprunt/zéro déchet). Dans ce contexte, le traitement à la chaux et/ou aux liants est considéré comme une solution qui permet d'augmenter considérablement les possibilités de valorisation des matériaux naturels en place ou le retraitement des anciennes chaussées. Ce type de traitement permet aussi de réduire les nuisances liées aux approvisionnements et les délais de chantier, et d'augmenter la durée de vie des structures.

Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, il a été choisi de travailler sur des matériaux fins en place, de manière à faire apparaître clairement les effets d'un traitement mixte chaux-ciment sur cette classe de sol. L'objectif du travail est d'étudier les performances d'un sol fin avant et après traitement. Ce travail contient quatre chapitres.

Le premier chapitre décrit les caractéristiques physiques et minéralogiques des différents sols et consacre une partie pour les sols argileux. Il contient aussi les systèmes de classification des sols (GTR et USCS).

Le deuxième chapitre, renseigne sur la structure des routes et il s'intéresse aussi à la technique de réalisation d'un remblai et les désordres qui peuvent se produire dans ce dernier, et la valorisation des sols fins dans les remblais routiers.

Le troisième est consacré au traitement de sols. Il parle des produits de traitement, choix des dosages et la technique et le matériel nécessaire pour un traitement.

Le dernier chapitre de notre travail est consacré à notre travail expérimental. Ce chapitre contient une étude du comportement mécanique et géotechnique d'un sol fin ayant subi un traitement mixte chaux-ciment et une comparaison avec le sol à son état initial.

CHAPITRE
I

CARACTERISTIQUES
DES SOLS

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DES SOLS

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. Caractéristiques des sols

L'étude fine des constituants des sols intéresse plusieurs domaines dont la géologie et la pédologie. La géotechnique routière valorise le sol comme matériau de construction et s'intéresse au sol dans ses interactions avec les agents chimiques de traitement. L'étude géotechnique comporte une identification du sol naturel et une détermination fine des caractéristiques.

2.1. Caractéristiques physiques des sols

Le sol est un complexe multiphasique, en général il est formé des trois phases suivantes :

Une phase solide :

L'assemblage des grains solides forme le squelette du sol, constitué par les minéraux présents sous forme de particules de différentes tailles, soudées entre-elles dans le cas des roches ou simplement en contact dans le cas des sols qui peut contenir des éléments organiques ou divers matériaux provenant de l'activité humaine.

Une phase liquide :

L'eau contenue au sein d'un sol se décompose en:

- eau de constitution entrant dans la composition chimique des minéraux du sol
- eau liée ou absorbée
- eau interstitielle se décomposant en eau capillaire et en eau libre.

Une phase gazeuse :

Les espaces qui existent entre les grains constitutifs du sol sont occupés par de l'air, lorsque le sol est sec, souvent d'avantage chargé en CO₂ ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide.

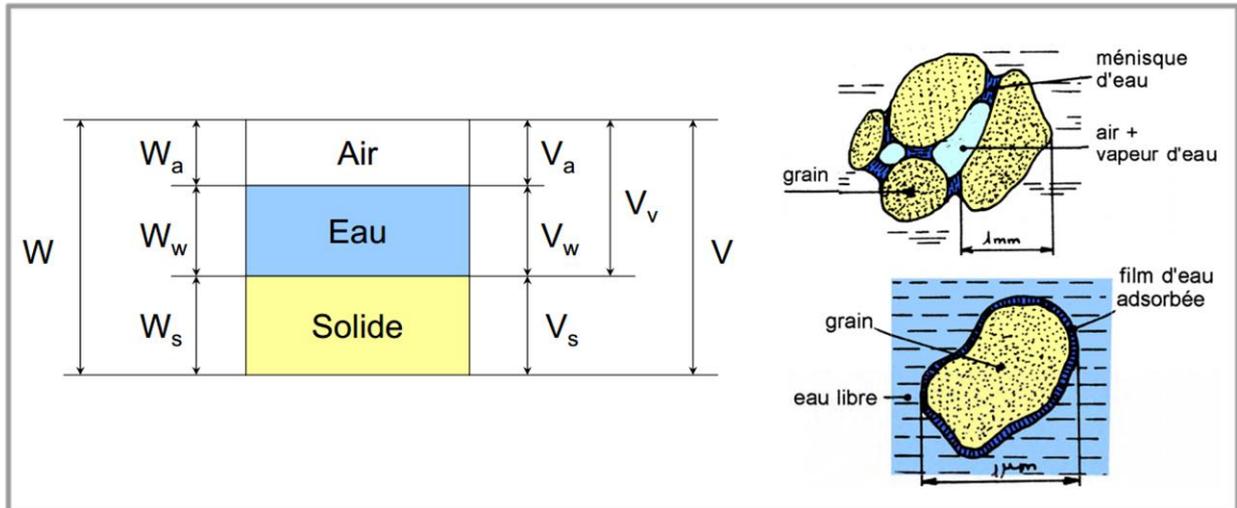


Figure 1 : Composition des sols

2.2. Caractéristiques minéralogiques des sols

Les sols sont constitués de particules de minéraux regroupées en agrégats. Ces minéraux sont stables ou en train d'évoluer dans les conditions thermo barométriques et climatiques de la surface de la terre. Généralement y sont rencontrés :

- le quartz,
- les argiles,
- les feldspaths (potassiques et plagioclases),
- les micas,
- les carbonates (calcite et dolomite),
- les oxydes et hydroxydes métalliques dont l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer.

Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme :

- de grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres.
- de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns.
- d'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituants.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol dépendent de la nature des assemblages minéraux. Ainsi les minéraux granulaires (quartz, carbonates) n'ont pas de cohésion propre. Seules les argiles présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau.

2.2.1. Structure cristalline

De nombreux minéraux se présentent sous une forme cristalline. Cette structure périodique est obtenue à partir d'un motif de base appelé maille. Il en existe six différentes qui se décomposent en quatorze réseaux.

- Pyrite

- Spinelle
- Quartz
- Calcite
- Gypse
- Kaolinite

Plusieurs espèces minérales peuvent exister à partir d'une même composition chimique et former ce qu'on dénomme des variétés polymorphes. La silice en est un bon exemple. Elle existe sous la forme de quartz (système hexagonal), de Tridynite (système orthorhombique pseudo hexagonal), de cristobalite (système tétragonal pseudo cubique), d'opale (amorphe).

La forme des grains des minéraux qui ont pu se développer sans entraves (minéraux automorphes) est conditionnée par la nature de la structure cristalline. Les grains ont une forme polyédrique limitée par des surfaces planes ; les faces opposées sont souvent parallèles et les angles entre les faces sont constants.

Mais le plus souvent la forme des cristaux est quelconque car le développement du minéral a été entravé par la présence d'autres cristaux se formant en même temps. On parle alors de minéral xénomorphe.

Les structures cristallines comportent des défauts :

- Les macles : ces défauts surfaciques correspondent à des défauts d'empilement et sont liés par exemple à la rencontre de deux cristaux qui grossissent. Elles conditionnent le faciès du grain ;
- Des défauts volumiques : ils correspondent à la présence de corps étrange.

Ces structures minérales peuvent être observées par des analyses au microscope polarisant de lames minces obtenues à partir d'échantillons découpés, meulés et polis jusqu'à obtenir une épaisseur d'environ 20 à 30 micromètres.

2.2.2 Structure minérale des argiles

Les argiles sont des sols très sensibles à la présence d'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions géotechniques. Nous donnons dans cette partie quelques informations sur ces matériaux.

Structure cristalline des feuillets

Les argiles sont de sols constitués de très petites particules minérales. Les minéraux argileux sont des silicates d'aluminium hydratés dans lesquels on distingue deux minéraux de base :

- Le tétraèdre de silice SiO_4 (Te): 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques.

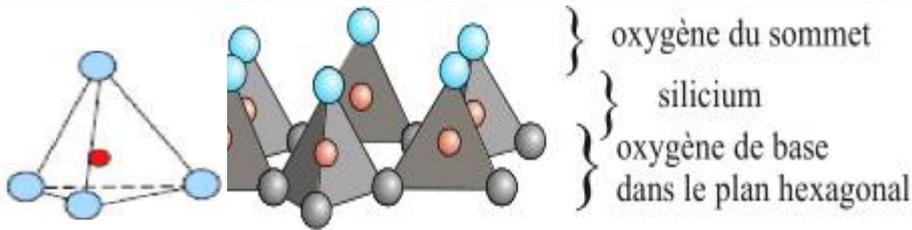


Figure 2 : Unité tétraédrique

Figure 3 : structure d'une Couche tétraédrique

- L'octaèdre d'alumine Al_2 : les 6 ions hydroxydes encerrent un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques

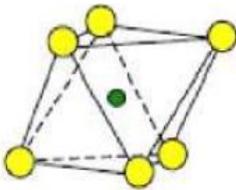


Figure 5 : Unité octaédrique

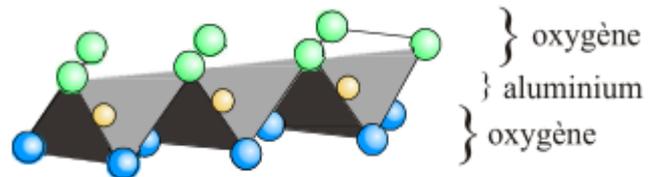


Figure 4 : Unité octaédrique

3. Principaux types d'argile

Parmi les deux cents types d'argile on rencontrera dans les travaux liés à la géotechnique essentiellement les argiles monominérales suivantes : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

3.1. 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'espace de base entre les ions d'oxygène dans l'unité tétraédrique et les ions hydroxydes dans l'unité octaédrique est presque identique, ainsi le feuillet l'épaisseur du feuillet élémentaire est d'environ 7\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.

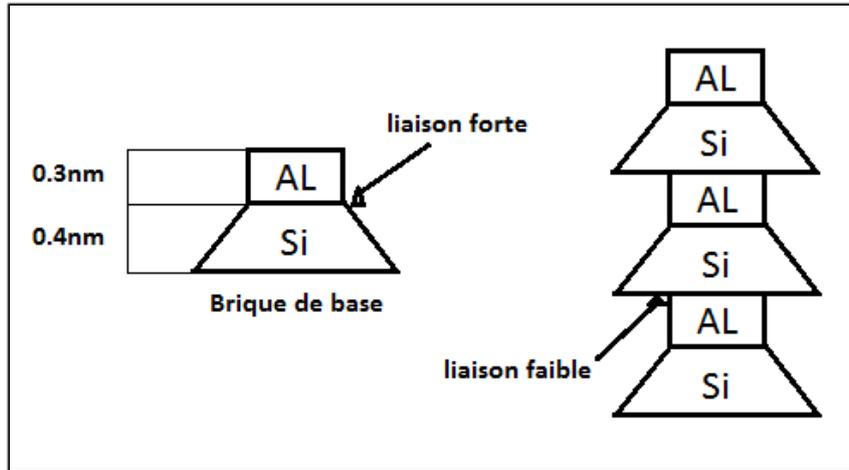


Figure 6 : Structure Particulare de la Kaolinite

3.2. Illite:

La structure du feuillet est composée d'une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques.

L'illite est un des minéraux argileux du groupe des micas le plus répandu dans la nature. La structure de l'illite ressemble à celle de la montmorillonite. La différence provient de ce que l'aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres et que des atomes de potassium venant rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement, assurent la liaison des couches tétraédriques et octaédriques. 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 μm , et d'une épaisseur de 100Å.

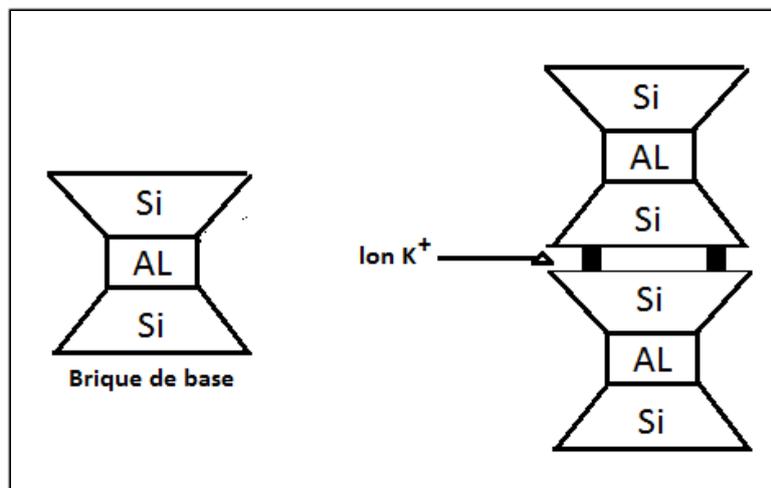


Figure 7 : Structure Particulare de l'illite

3.3. 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.

La montmorillonite 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 sont 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.

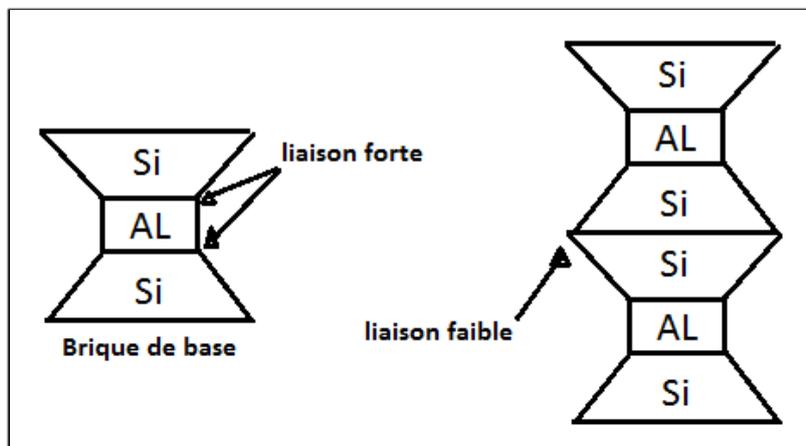
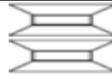


Figure 8 : Structure Particulière de la Montmorillonite

4. Caractéristiques des argiles

L'ion Al^{3+} présent dans les feuillets octaédriques peut être remplacé par d'autres ions comme Mg^{2+} principalement dans la montmorillonite et l'illite.

Tableau 1 : synthèse et compare les caractéristiques de ces trois argiles

Type d'argile	Feuillets élémentaire	Nombre de feuillets par particule	Dimension d'une particule	
			Largeur en μm	épaisseur en μm
<i>Kaolinite</i>		100 – 150	1	0,7
<i>Illite</i>		10	0,3	0,01
<i>Montmorillonite</i>		1	0,3	0,001

Il en résulte un déséquilibre électrique qui est compensé *par* la fixation sur la surface de cations Ca^{2+} , Li^+ , K^+ , Fe^{2+} . Aux extrémités de la particule il y a également des déséquilibres électriques et des fixations de cations dits « échangeables » jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

Les particules d'argiles sont très plates et leur surface spécifique est très grande. Des anions (OH^- et O_2^-) sont répartis sur la périphérie des particules, les bords sont fortement chargés négativement et attirent *des charges* positives. Comme les molécules d'eau sont polaires, il peut y avoir attraction et adsorption de molécules d'eau sur la surface des particules. Plusieurs couches de molécules d'eau peuvent être adsorbées.

Toutefois en de leur orientation particulière, ces molécules ont des propriétés physiques différentes de celles de l'eau normale (viscosité élevée élimination $200^\circ\text{C} < T < 300^\circ\text{C}$).

5. Classifications des sols

Les systèmes de classification des sols sont ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain.

Ces coupes sont précieuses pour l'ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n'entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement.

Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols :

- les uns sont basés sur l'aptitude du sol pour un emploi particulier du génie civil. Ces classifications présentent en général l'inconvénient de ne pouvoir être étendues à d'autres usages que celui pour lequel elles ont été établies ;
- les autres sont basés sur certains essais d'identification.

5.1. Classification GTR :

Le Guide des Terrassement Routier (GTR), classe les matériaux susceptibles d'être utilisés pour la réalisation de remblais ou de couches de forme. Cette classification vise à déterminer la nature du sol en fonction de certains paramètres.

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

Tableau 2 : Classification GTR

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	A ₁ à A ₄ selon VBS ou IP
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	B ₁ à B ₆ selon VBS ou IP et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	ou $D_{max} > 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 12\%$ Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ + VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS ou IP et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D ₁ à D ₃
R	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (Norme NF P 11-300)	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Teneur en éléments chimiques (Norme NF P 11-300)	

Les paramètres retenus pour la classification de sol se rangent en trois catégories :

- paramètres de nature
- paramètres de comportement mécanique,
- paramètres d'état hydrique.

Ils sont toujours déterminés sur la fraction 0/50 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels.

5.1.1. Paramètres de nature

Ils ne varient pas ou peu dans le temps, ce sont des caractéristiques intrinsèques.

- **La 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 les sols grossiers (ou grenus) et la sédimentométrie pour les sols fins. Il s'agit de mesurer le pourcentage des grains de sol passant au travers d'une série de tamis donnés (passant ou tamisât).



Figure 9 : Analyse granulométrique et équivalent de sable

L'expression classique de cette analyse est la courbe granulométrique caractérisée par les indices suivants (d_{60} est le diamètre correspondant à un passant de 60%) :

- le coefficient d'uniformité: $C_U = d_{60} / d_{10}$ ($C_U < 2$ uniforme, $C_U > 2$ étalée)
- le coefficient de courbure : $C_C = d_{30}^2 / d_{60} \times d_{10}$ (bien gradué si C_C entre 1 et 3)

Dmax : Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

Il détermine l'atelier de terrassement (c'est à dire le matériel employé), l'épaisseur des couches et les conditions de malaxage.

Le seuil retenu est 50mm, car cela permet de distinguer les sols fins, sableux ou graveleux des sols blocailleux. C'est aussi la valeur limite courante pour le malaxage des sols avec un liant pour une couche de forme de qualité.

Tamisât à 80 μ m : Pourcentage en fines du sol.

Les fines sont sensibles à l'eau, selon leur proportion elles vont donc influencer le comportement du sol. Seuils retenus (par le GTR):

- >35% : comportement du sol totalement régi par la fraction fine,
- <12% : seuil conventionnel pour dire si un sol est pauvre ou riche en fines.

Tamisât à 2mm : distinction entre sols sableux et sols graveleux. Seuil retenu (par le GTR) : 70%

- >70 % : sol tendance graveleuse
- < 70% : sol tendance sableuse

➤ **L'argilosité :**

Etats de consistance basée sur les limites d'Atterberg (norme NF P 943-51) : les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (<400 μ m), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol.



Figure 10 : Limites d'Atterberg

L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et à en 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.

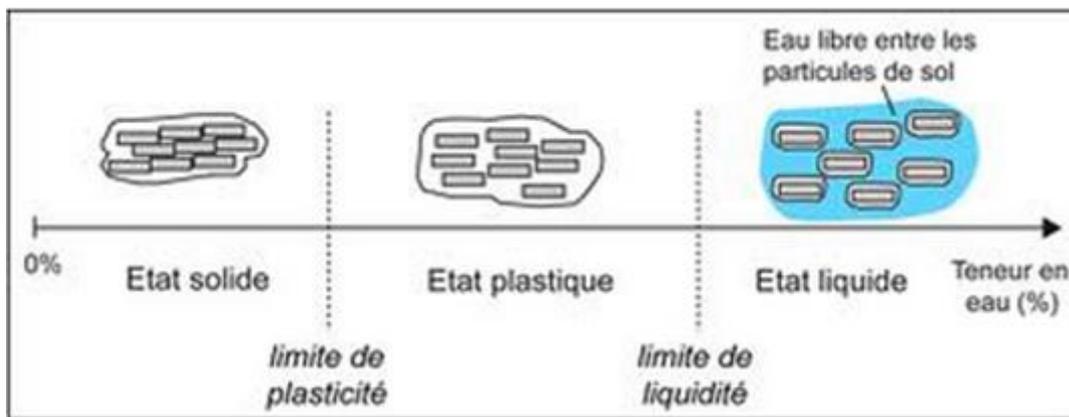


Figure 11 : Différents états d'un sol

L'indice de plasticité IP : caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique. $IP = W_L - W_P$

- W_P → teneur en eau à limite de plasticité du sol (%)
- W_L → teneur eau à limite de liquidité du sol (%)

Seuil retenus (par le GTR):

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

➤ **La valeur de bleu de méthylène VBS**

Il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol mais dont l'application à l'identification des sols remonte seulement à quelques années. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

La valeur de bleu d'un sol (VBS) est déterminée par l'essai au bleu de méthylène "à la tâche".



Figure 12 : Essai au bleu tâches auréolées

Etant donné que dans un sol c'est avant tout la surface des particules contenues dans sa fraction argileuse ($\leq 2 \mu\text{m}$) qui détermine sa surface spécifique, on peut considérer que la valeur de bleu de méthylène VBS (valeur de bleu du sol) exprime globalement la quantité et la qualité (ou activité) de l'argile contenue dans ce sol. En pratique, on détermine la VBS à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tâche sur la fraction 0/2 mm. La valeur trouvée est alors rapportée à la fraction 0/50 par une règle de proportionnalité. C'est cette dernière valeur qui est appelée valeur au bleu de méthylène du sol (cf. norme P 94-068).

La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol.

Seuils retenus :

- 0,1 : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau (au sens défini précédemment). Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisât à $80 \mu\text{m}$ qui doit être $\leq 12 \%$,
- 0,2 : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau,
- 1,5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux,
- 2,5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
- 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
- 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

➤ **L'équivalent de sable ES**

Cet essai caractérise la pollution d'un sable par de l'argile ou du limon en mesurant la quantité des particules colloïdales que l'on fait flocculer. L'essai permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu.



Figure 13 : Essai équivalent de sable

L'équivalent de sable s'exprime en pourcentage, cela correspond à la proportion du flocculat de sol fin (h_2) par rapport au dépôt solide (h_1), les deux étant mesurés sur éprouvette contenant l'échantillon de sol et une solution normalisée pour disperser les particules de sol.

$$Es = [h_1 / (h_1 + h_2)] \times 100$$

- ES = 0 Argile pure
- ES = 20 Sol plastique
- ES = 40 Sol non plastique
- ES = 100 Sable pur et propre

5.1.2. Paramètres de comportement mécanique

Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et sont donc utilisables en couche de forme, et les matériaux qui risquent de se fragmenter et nécessiteront des dispositions particulières de traitement.

Les paramètres suivants sont retenus pour la classification des matériaux rocheux.

- Coefficient de **Los Angeles LA** (norme P 183573)
- Coefficient **micro Deval en présence d'eau MDE** (norme P 183572)
- Coefficient de friabilité des sables FS (norme P 18-576).

LA et MDE (mesurés sur la fraction granulaire 10/14 et 6,3/10) concernent les roches dures comme le granit, le gneiss, le calcaire et le grès et leur possibilité de réemploi en couche de forme ou couche de chaussée. FS (mesuré sur la fraction 0/1 ou 0/2 mm)

Seuils retenus :

- 45 pour les valeurs LA et MDE
- 60 pour les valeurs FS.

5.1.3. Paramètres d'état hydrique

Ils sont fonction de l'environnement, l'état hydrique est particulièrement important pour les sols meubles sensibles à l'eau.

On distingue 5 états hydriques différents :

- L'état "très humide" (th)
- L'état "humide" (**h**)
- L'état d'humidité "moyen" (**m**)
- L'état "sec" (s)
- L'état très sec (**ts**)

➤ **Masse volumique sèche ρ_a**

L'état de compacité en place se détermine par la mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de sol déshydraté. Elle constitue une des caractéristiques du compactage, l'autre étant la teneur en eau. Sa valeur est un paramètre de vérification de la qualité du compactage et du traitement de sol.

La masse volumique sèche des craies et calcaires est étroitement liée à leur fragmentabilité, elle informe donc sur les conditions de malaxage. En effet, dans ce cas, moins le matériau est dense plus il se désagrège facilement. Le malaxage peut engendrer un phénomène d'attrition pour les craies et calcaires, car lors du mélange, le matériau se frotte et s'effrite.

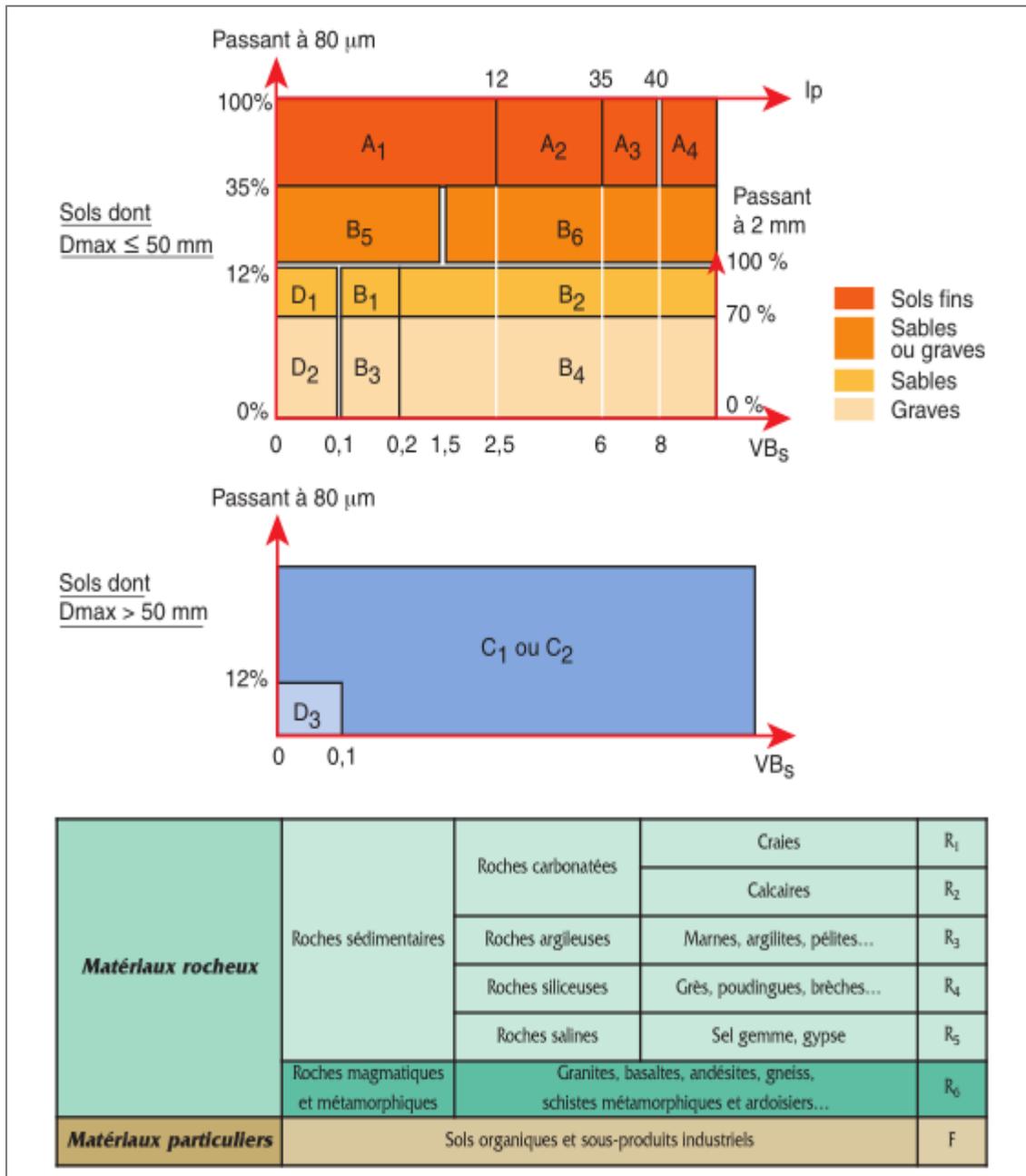


Figure 14 : Classification des matériaux selon leur nature

5.2. Classification USCS

Cette classification a été mise au point en 1942 par Casagrande, reprise et modifiée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussée de France (L.P.C). Elle retient 15 types fondamentaux de sols chacun d'eux étant identifié par un symbole composé de deux lettres qui désignent par convention le préfixe et le suffixe

Cette classification possède plusieurs avantages

- Son utilisation, est relativement simple,

- Il est assez complet ; en effet, 15 sols types sont retenus, affectés chacun d'un symbole composé de deux lettres. Par ailleurs, plusieurs combinaisons sont possibles, par l'emploi de doubles-symboles, pour classer les sols dans lesquels la granularité autant que la plasticité des éléments fins jouent un rôle, et pour classer les sols n'appartenant pas franchement à l'un des 15 sols types. Le système est donc « souple »,
- Il est « parlant » car ses symboles sont les abréviations d'une terminologie couramment utilisée par l'ingénieur par exemple Gb = grave bien graduée.

Ce système est basé uniquement sur des caractéristiques granulométriques pour les sols contenant un pourcentage de fines suffisamment faible pour ne pas affecter le comportement géotechnique du matériau. Il est basé au contraire uniquement sur des caractéristiques de plasticité pour les sols dans lesquels les fines jouent un rôle prépondérant. Le recours simultané aux caractéristiques granulométriques et de plasticité se fera pour les sols compris entre ces deux catégories.

Les caractéristiques granulométriques retenues sont :

- les pourcentages de graviers, de sable et de fines ;
- la forme de la courbe granulométrique.

Les caractéristiques de plasticité retenues sont :

- la limite de liquidité et l'indice de plasticité.

Eléments du sol

G = Grave, le gravier est la fraction principale

S = Sable, le sable est la fraction principale

L = Limon ou limoneux

A = Argile ou argileux

T = Tourbe

O = Organique, le sol contient des matières organiques.

Granulométrie du sol

b = bien gradué, toutes les dimensions de grains sont représentées — aucune ne prédomine

m = mal gradué — une (ou plusieurs) dimension de grains prédomine.

Plasticité du sol

t = très plastique (limite de liquidité élevée)

p = peu plastique (limite de liquidité faible)

5.2.1. Démarche de la classification

Subdivision préliminaire

Une première subdivision, d'après la proportion des grains inférieurs et supérieurs à 0,08 mm, permet de 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 laboratoire est basée sur les limites d'Atterberg.

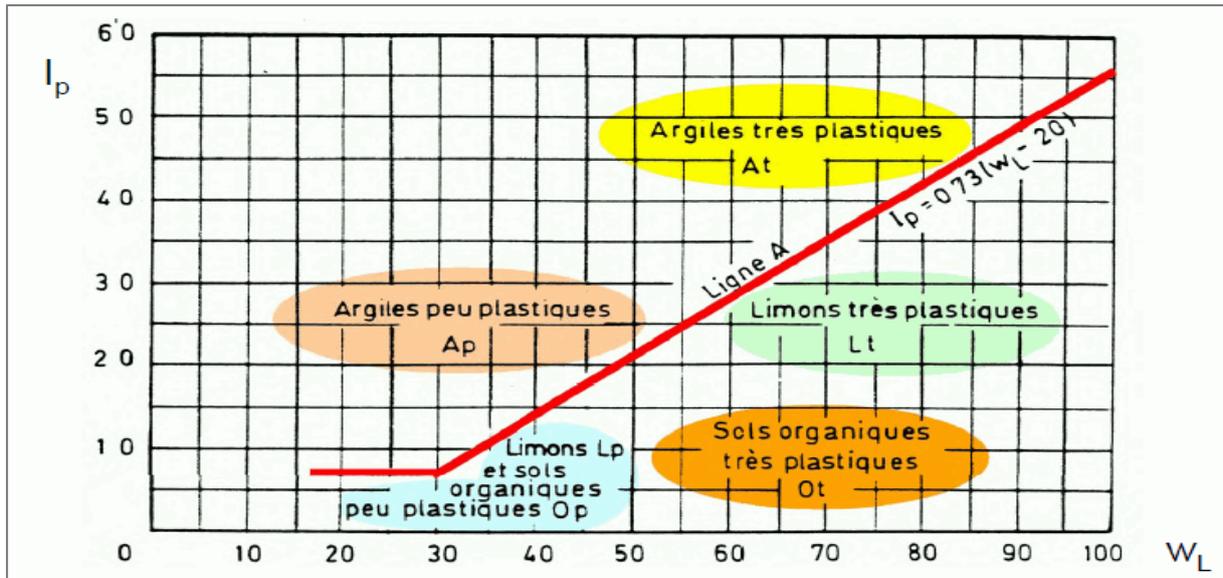


Figure 15 : Abaque de Casagrande

Pour les sols grenus

Les sols grenus sont eux-mêmes divisés en deux grandes catégories :

- les graves : plus de 50 % des éléments supérieurs à 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm.
- les sables : plus de 50 % des éléments supérieurs à 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm.

Les tableaux suivants indiquent la suite de la classification :

Définitions			Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	GL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
			GA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
			SA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

Figure 16 : Classification USCS

En conclusion donc, du point de vue granulométrique, la classification utilisera :

- le pourcentage de tamisât à 0,08 mm ;
- le pourcentage de tamisât à 2 mm ;
- le coefficient d'uniformité C_u et le coefficient de courbure C_c définis par

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ où } D_{60} \text{ représente les diamètres des grains à 60\% de tamisât et}$$

D_{10} représente les diamètres des grains à 10% de tamisât.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ où } D_{30} \text{ représente les diamètres des grains à 30\% de tamisât.}$$

CHAPITRE
II

UTILISATION
DES SOLS FINS
DANS LES
PROJETS ROUTIERS

CHAPITRE II : UTILISATION DES SOLS FINS DANS LES PROJETS ROUTIERS

Introduction

Dans ce chapitre, nous parlons de la structure d'une route, des techniques utilisés pour sa construction, des règles de construction d'un remblai, des matériaux utilisés dans les remblais routiers ainsi que des problèmes relatifs aux sols constituant ces remblais notamment les sols fins trouvant en place.

1. Structure 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 présente une coupe type d'une route sur la figure suivante.

On distingue ainsi :

- Le corps de remblai qui est un ouvrage en terre construit pour modéliser la topographie naturelle du terrain de manière à assurer la géométrie imposée à la plate-forme sur laquelle la chaussée sera construite.
- la couche de forme qui recouvre la partie supérieure du terrassement. Elle sert « à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux en remblai ou en déblai du site, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée ». Le GTR précise les types de matériaux retenus (limoneux, rocheux, sableux, sous-produits industriels) et donne les caractéristiques indispensables à leur utilisation ainsi que les mesures à prendre pour y parvenir.
- la chaussée proprement dite qui se subdivise en plusieurs couches : fondation, base, liaison et roulement.

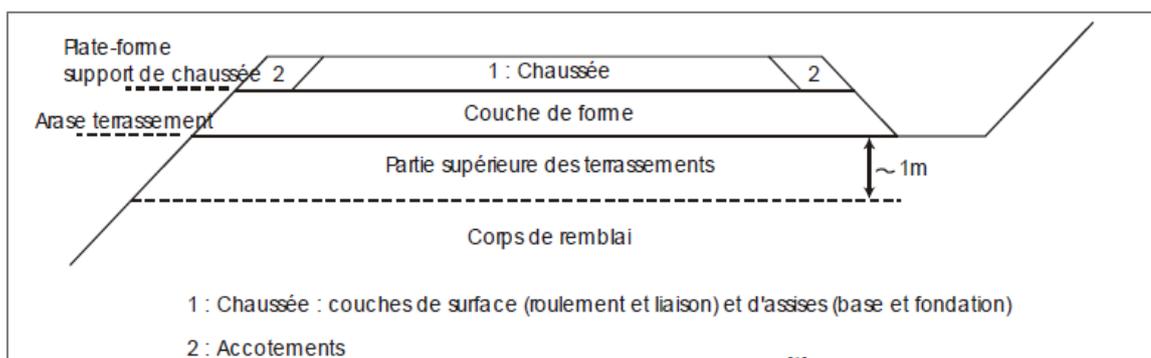


Figure 17 : Coupe d'une route d'après le GTR

2. Construction d'une route

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 l'une des deux techniques suivantes :

- **La technique des emprunts granulaires**, qui consiste à utiliser des matériaux granulaires en provenance de ballastières ou de carrières,
- **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.

Ces deux techniques présentent des avantages et des inconvénients, tant sur le plan économique qu'environnemental.

2.1 La technique des emprunts granulaires :

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

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 CO₂) 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. REGLES DE CONSTRUCTION D'UN REMBLAI

Exécuter un remblai consiste à coordonner chronologiquement les opérations suivantes : extraction, chargement, transport, déchargement, réglage en couches élémentaires et compactage.

Le matériau mis en remblai doit être mis en place en couches. L'un des problèmes permanent de la mise en remblai est d'adapter l'épaisseur de couche à la nature, à l'état hydrique du matériau et aux performances de la classe du compacteur utilisé.

Pour les sols fins, le problème est relativement simple car l'épaisseur de la couche peut être aisément réalisée à la demande mais, pour les matériaux rocheux et blocailleux, elle dépend de la dimension des plus gros éléments.

La décision de réutiliser un sol en remblai de hauteur donnée est prise par référence aux indications du GTR. Le sol doit être identifié de manière à connaître sa classe définie en nature et en état hydrique, ensuite on détermine la classe du compacteur utilisé. Ces deux renseignements permettent de trouver dans le GTR les éléments opérationnels de son utilisation, à savoir s'il faut agir sur :

- ses conditions d'extraction E ;
- sa granularité G ;
- sa teneur en eau W ;
- son traitement T ;
- et quelles sont les modalités de réglage R et
- de compactage C.

en fonction des conditions météorologiques au moment de sa mise en œuvre et de la hauteur de l'ouvrage.

4. LES MATERIAUX DE REMBLAIS

Les matériaux utilisés pour les corps de remblai se répartissent en trois catégories : les sols, les matériaux rocheux et les sous-produits industriels.

4.1 Les sols

Les sols sont des matériaux naturels provenant de la destruction mécanique et / ou physico-chimique des roches. Ils sont constitués de grains de dimensions très variables, de quelques micromètres à quelques décimètres, pouvant être séparés aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Les sols sont de nature et d'origines géologiques très diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, éboulis de pentes.

Les possibilités d'emploi d'un sol pour la construction des remblais sont contrôlées par deux éléments essentiels : la nature et l'état hydrique, qui constituent le support de base de la classification des sols utilisée en France [GTR, septembre 1992].

On entend par nature du sol les caractéristiques du sol qui ne varient pas, ou très peu, lorsqu'on le manipule, que ce soit à l'extraction, au transport, à la mise en remblai ou au compactage. C'est le cas par exemple pour la granularité d'une grave et l'argilosité d'un sol fin.

Par contre, les caractéristiques d'état d'un sol sont celles qui peuvent être modifiées par l'environnement dans lequel il se trouve. C'est le cas en particulier pour l'état hydrique.

4.2 Les matériaux rocheux

Dans cette catégorie nous pouvons distinguer deux types de matériaux : les matériaux sains, qui se caractérisent par le fait que leur granularité peut être considérée comme définitive une fois l'extraction réalisée, et les matériaux rocheux évolutifs. Le caractère évolutif du matériau est caractérisé par le changement de structure sous l'effet des engins au cours des travaux ou au cours de la vie de l'ouvrage. Comme matériaux rocheux non évolutifs, nous pouvons citer le granite et le basalte, et comme matériaux évolutifs, nous pouvons citer les marnes et la craie. Il faut toutefois être conscient qu'il existe le plus souvent une transition continue entre matériaux sains et matériaux évolutifs.

La classification des matériaux rocheux utilisés pour les corps de remblais, [GTR, septembre 1992], s'appuie en premier lieu sur des paramètres tels que la nature pétrographique de la roche (roches sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques) et en second lieu, sur l'état de la roche et ses caractéristiques mécaniques (fragmentabilité, dégradabilité, coefficients Los Angeles et Micro Deval).

4.3 Les sous-produits industriels.

Ce sont des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois, les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi sont à la fois divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée. Les principaux sous-produits industriels utilisés dans la construction des remblais routiers en France [GTR, septembre 1992] sont les cendres volantes, les schistes houillers, les mâchefers d'incinération des ordures ménagères....

5. Terrassement

Le terrassement est le travail consistant à déplacer des quantités importantes de matériaux (sols, roches, sous-produits...) dans divers buts. 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 au GTR 92. Contrairement au remblai, le déblai consiste à enlever (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. Les déblais des matériaux impropres, excédentaires ou rocheux, seront à évacuer aux décharges publiques.

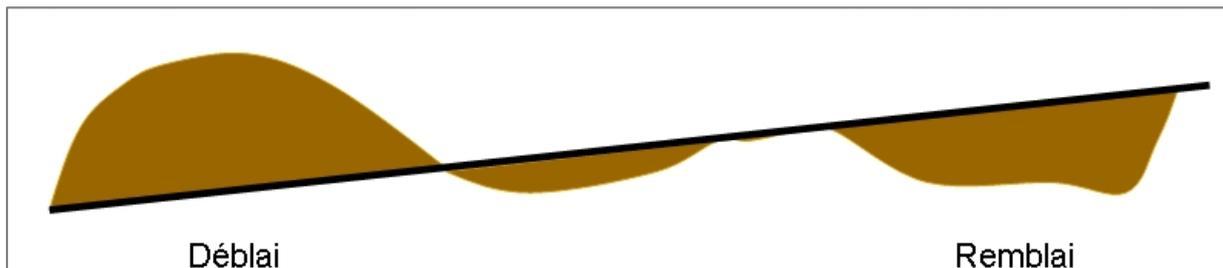


Figure 18 : Figure descriptive d'un remblai et d'un déblai

Les travaux de terrassement sont basés sur trois actions principales :

- l'extraction,
- le transport,
- la mise en œuvre.

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 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 côte projet.

Les engins pouvant être utiles au terrassement sont la pelle, le râteau, la mini pelle et surtout le niveau laser. Le niveau laser est une machine qui permet de mettre le sol à niveau (c'est-à-dire à la même hauteur). Un laser est projeté de cette machine dans n'importe quel sens, à un mètre du sol. C'est grâce à cet engin que l'on peut après avec une pelle ou une niveleuse remettre à niveau.



Figure 19 : Réalisation des travaux de terrassement

6. Valorisation des sols fins en remblai

Il existe plusieurs techniques permettant de valoriser les sols possédant des caractéristiques médiocres. Il s'agit de la stabilisation :

- Mécanique (densification par compactage, pré chargement, ...)
- Hydraulique (drainage, rabattement de la nappe, ...)
- Électrique (électro-osmose)
- Thermique (congélation, cuisson, ...)
- Chimique (ajout de produits : chaux, ciment, ...).

Ces techniques permettent de densifier le sol, de réduire la teneur en eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement.

Lorsque ces sols s'avèrent être des sols de bonne portance. Comme avantage de l'utilisation des matériaux en place, on peut citer :

- L'utilisation des sols trouvés en place pour réaliser des remblais ne posent pas de problèmes suppression des coûts supplémentaires liés au transport d'apports granulaires venants de carrières lointaines
- diminution des risques de pollution de par la diminution du nombre d'engins sur chantier.
- diminution des risques de pollution

Par contre lorsque ces sols sont médiocres (cas des sols fins), leur utilisation pour réaliser des remblais n'est pas toujours évidente. Dans notre étude, le but est de pouvoir valoriser les sols fins trouvés en place afin qu'ils puissent être utilisés dans les corps de remblais. L'utilisation des matériaux en place peuvent être très bénéfiques sur le plan économique. Ces sols sont en général de nature médiocre de par leur faible portance. Afin de régler ce problème et les problèmes liés aux sols fins à l'état naturel, on peut avoir recours à un traitement à la chaux ou

à base d'un liant hydraulique ou encore un traitement mixte chaux-liant hydraulique, le but étant d'améliorer les capacités du sol en place.

6.1. Le compactage des sols

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique, il vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols. Il permet l'amélioration de la résistance, la diminution de la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité. Il peut ainsi réduire ou éliminer le risque de tassement, également augmenter la stabilité des talus, mais aussi améliorer la capacité portante. Le compactage permet aussi de limiter les variations de volumes indésirables causés, par exemple, par l'action du gel, par le gonflement et par le retrait du sol, ou bien de prévenir la liquéfaction des sols.

6.2. Le traitement des sols à la chaux

La technique du traitement des sols à la chaux est utilisée en France depuis les années 1960. Dans un premier temps, elle a essentiellement intéressé la réutilisation en remblais des sols sensibles et / ou humides. Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de formes, en commençant par la réutilisation des sols fins, puis progressivement une gamme de plus en plus étendue de matériaux. Dès 1972, un premier guide est élaboré par le LCPC et le SETRA : « Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux ». Le guide technique GTS « Traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » est le guide le plus complet en la matière (LCPC-SETRA, 2000). Ce guide complète le guide des terrassements routiers (LCPC-SETRA, 1992).

6.3. Traitement des sols au liant hydraulique

Il fallut attendre la fin du XVIII^e siècle pour que la science et la technique naissante entrevoyent le mécanisme de la prise et jettent les bases de l'industrie cimentière. Dès 1825, le ciment Portland artificiel, ainsi appelé car, après durcissement, son aspect rappelait celui de la pierre calcaire de l'île de Portland, était fabriqué industriellement en Angleterre et vers 1850 en France grâce aux travaux réalisés par Louis Vicat. Par la suite, ces liants ont été utilisés pour le traitement des sols, dès les années 1960 en France. Dans le prochain chapitre nous décrivons la grande diversité de types de liants hydrauliques utilisés lors de travaux de terrassement puis le principe d'action des liants hydrauliques sur les.

6.4. Autres traitements

Il existe d'autres méthodes de traitement, qui sont plus marginales et utilisées dans des cas particuliers. Ces méthodes consistent à ajouter un composé chimique au sol.

Ce composé va soit permettre au sol d'augmenter ses caractéristiques mécaniques, soit d'éviter des gonflements trop importants. Cette stabilisation va également améliorer le comportement mécanique du sol.

Ingles et Metcalf (1970) ont montré que les sols peuvent être traités à l'aide d'acide phosphorique ou hydrofluorique. Les minéraux argileux réagissent avec l'acide phosphorique et l'action dispersive du phosphate sur les ions des argiles améliore la densification du sol.

L'acide phosphorique donne de bons résultats sur les jeunes sols des régions volcaniques.

Cette méthode est utilisée seulement sur les sols acides et est inefficace sur les sols alcalins.

Ceci est dû au fait que l'action de ce liant dépend de l'attaque acide, dissolvant les minéraux argileux, et sur la reprecipitation en phosphate d'alumine hydraté. L'acide hydrofluorique peut stabiliser les sols, sauf les sols riches en aluminium. Cet acide va attaquer les silicates du sol et former des silicates de fluor insolubles et fortement résistants. Cette méthode, marchant bien en laboratoire, ne peut être appliquée en chantier car l'acide hydrofluorique est trop corrosif et coûteux.

7. Les désordres dans un remblai routier

Les désordres principaux constatés dans les corps de remblai sont les suivants [Mieussens et *al.*, 1974] :

- 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.

Les causes majeures de ces désordres sont les suivantes :

- la nature des matériaux (en particulier, l'utilisation de matériaux évolutifs) ;
- l'eau ;
- les conditions de réalisation.

8. Problèmes liés aux sols fins (état naturel)

Les dépôts de sols fins mous et compressibles (argiles, vases) sont fréquents dans les vallées et en bordure des côtes. Ces zones ont été longtemps considérées comme peu propices à la construction, mais on y construit maintenant fréquemment tous les types d'ouvrages (routes, bâtiments, réservoirs, piscines, usines, etc.), au prix d'un traitement préalable des sols de fondation. Ces sols fins ont trois caractéristiques essentielles :

- ils subissent des déformations importantes sous les charges qui leur sont appliquées ;
- leurs déformations ne sont pas instantanées, mais peuvent durer pendant des mois, voire des années ;
- leur capacité portante est souvent trop faible pour supporter les charges prévues dans les projets.

Les problèmes que l'on rencontre en pratique sont tous liés aux trois caractéristiques précédentes : tassements excessifs, tassements différentiels, déformations à long terme, instabilité de l'ouvrage.

8.1. 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» (cylindrique), 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 :

8.1.1. 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.

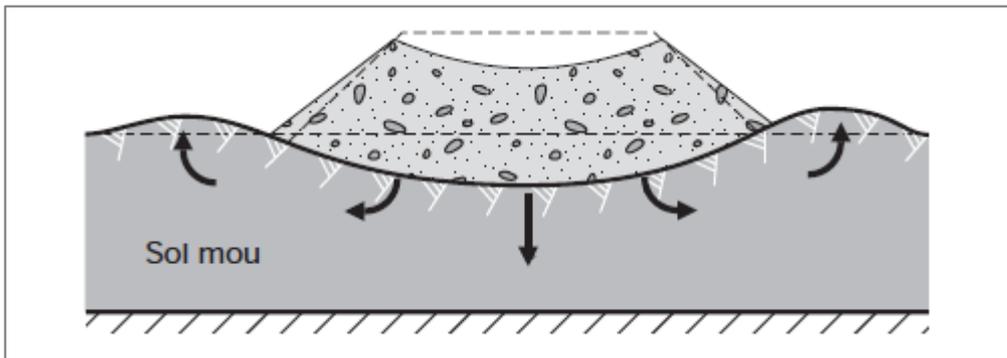


Figure 20 : Schéma de rupture du remblai par poinçonnement du sol de fondation

8.1.2. 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. Les désordres provoquent, en tête du remblai, une ou plusieurs dénivelées abruptes ou « escarpements », dont l'amplitude peut atteindre plusieurs mètres.

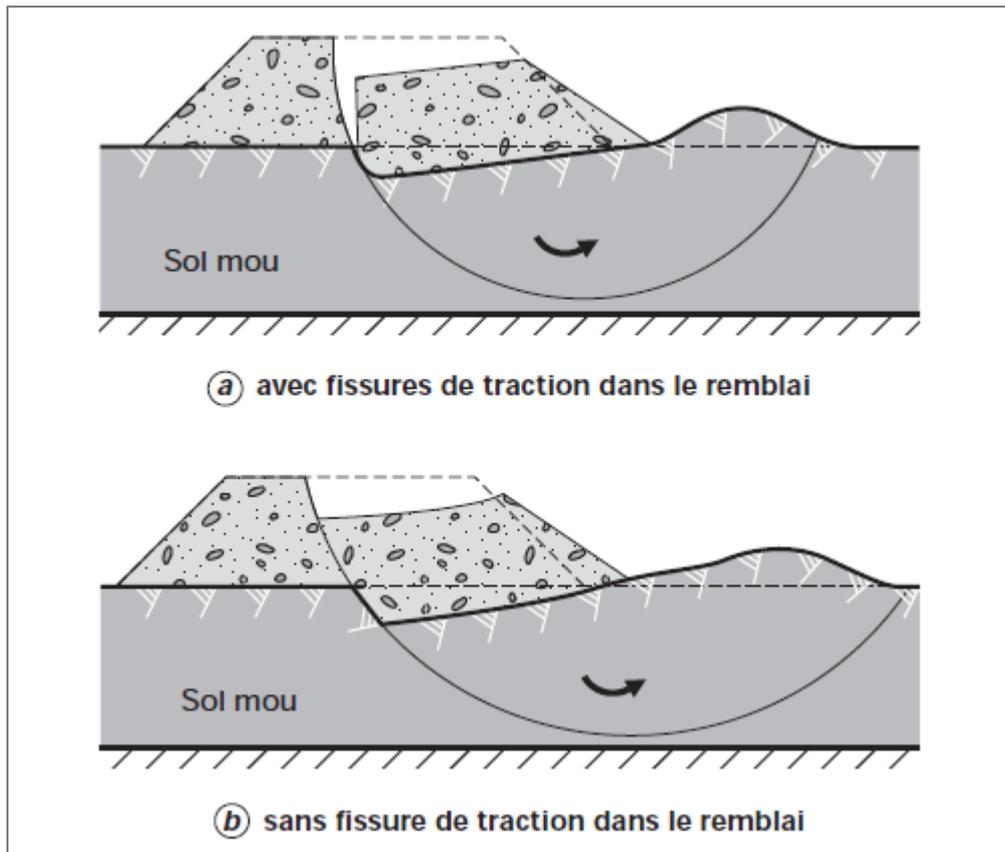


Figure 21 : Schémas de ruptures de type circulaire

8.2 Évolution des ruptures

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.

8.3 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.

8.4. Conséquences des désordres

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.

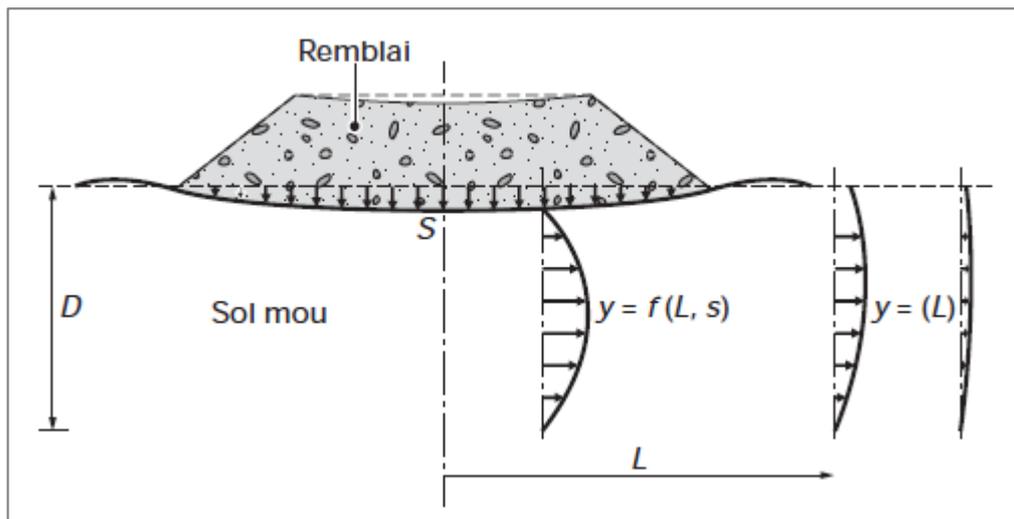


Figure 22 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation

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.

8.5. 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.

8.6. 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.

9. Conséquences liés aux problèmes

La présence de sols compressibles introduit des contraintes particulières dans la conduite des projets.

9.1. Faisabilité de l'ouvrage

Un remblai sur sols fins peut être inconstructible sans travaux complémentaires (traitement du sol compressible, renforcement du remblai) ou nécessiter une construction en plusieurs phases. Les études de stabilité revêtent pour cette raison une importance particulière et doivent être effectuées aussitôt que possible, pour déterminer la hauteur maximale qu'il est impossible de dépasser sans contraintes particulières pour le projet.

La construction des remblais sur sols compressibles ne doit pas perturber la stabilité ni les conditions d'exploitation des ouvrages voisins préexistants.

Les techniques de construction prévues dans le projet doivent tenir compte des contraintes propres au site et à l'organisation du chantier.

9.2. Phasage des travaux

Pour limiter l'influence de la construction des remblais sur les ouvrages d'art et bâtiments qui seront édifiés dans le cadre d'un même projet, il est très souhaitable de construire d'abord les remblais et d'attendre qu'une partie des déformations du sol se soit produite avant de commencer les fondations des autres ouvrages. Cet ordre des travaux permet notamment de simplifier la conception de la transition entre les ponts et leurs remblais d'accès sur sols compressibles, de limiter les coûts, de mieux contrôler les délais d'achèvement des travaux et de limiter les tassements différentiels à long terme.

9.3. Contraintes d'exploitation

Les exigences du maître d'ouvrage sur le comportement du remblai terminé influent directement sur le dimensionnement de l'ouvrage, le choix des méthodes de construction et les informations qu'il faut obtenir sur les sols lors de la reconnaissance géotechnique. En particulier, le maître d'ouvrage doit préciser:

- Les contraintes géométriques du projet : modifications admissibles du profil en long après la mise en service, compte tenu des coûts de l'entretien, mais aussi déformations du profil en travers, qui sont importantes pour les voies ferrées, le drainage des chaussées routières, les voies de grues portuaires, les terre-pleins portuaires, etc. Ces contraintes doivent tenir compte de l'impossibilité pratique de construire des remblais sur sols compressibles sans déformations à long terme. La géométrie de la plateforme, notamment les pentes pour l'écoulement des eaux de surface, doit pour cette raison être relativement indépendante des tassements différentiels du sol ;
- les contraintes environnementales (impact sur l'environnement et notamment sur l'écoulement des eaux souterraines et de surface ; maîtrise de l'érosion pendant les travaux, etc.).

9.3 Le temps

La durée des études, des travaux et de la stabilisation des sols sous les remblais sur sols fins est un facteur déterminant pour la programmation des études et de la réalisation de ces ouvrages. Il convient en général de prévoir plusieurs mois pour les reconnaissances géotechniques et les études de dimensionnement, quelques mois à quelques années pour les travaux selon leur nature et plusieurs années de suivi de la stabilisation des déformations des sols après la fin de la

construction. Pour beaucoup de solutions techniques, le temps est la contrepartie de la limitation des coûts de la construction.

9.4. Les coûts

Le coût des remblais sur sols fins dépend très fortement des exigences du maître d'ouvrage en matière de niveau de service et de durée du chantier. Le surcoût dû aux sols fins est souvent important et n'est en fait plafonné que par le coût de l'ouvrage d'art qui permettrait de s'affranchir du problème en supprimant la construction du remblai. D'autre part, la persistance des déformations après la construction du remblai peut entraîner des contraintes pour l'entretien ultérieur de l'ouvrage. Le maître d'ouvrage doit être prévenu des provisions financières à prévoir dans ce cas.

10. Problèmes liés aux sols fins après traitement

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.

10.1. Problèmes liés aux chlorures

10.1.1. Origine des chlorures dans les sols

10.1.1.1. Origine naturelle

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⁻¹ à 20°C).

10.1.1.2. Origine anthropique

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 CaCl₂, 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 [CETE de l'Est 2009].

10.1.2. Comportement dans les sols traités

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-.kg⁻¹ 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.

10.2 Problèmes liés aux sulfates

10.2.1. Origine des sulfates dans les sols

10.2.1.1. Origine naturelle

Les deux sources naturelles les plus communes du sulfate sont :

- La pyrite, 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 Fe_2O_3 , hydroxyde de fer $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et des sulfates (acide sulfurique H_2SO_4 , sulfate ferreux 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°C , ce qui en fait le moins soluble des sulfates présents dans le sol. En comparaison, les sels solubles K_2SO_4 et Na_2SO_4 , fréquemment présents dans les milieux sédimentaires, ont des solubilités de 109 et 209g.L^{-1} à 20°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 30mg.kg^{-1} de sol sec. Elles peuvent atteindre 150mg.kg^{-1} dans un limon sableux [Mathieu et Pieltain 2003].

L'existence et la stabilité des différents dérivés du soufre (pyrite FeS_2 , sphalérite ou blende ZnS , galène 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; Harris *et al.* 2004].

10.2.1.2. Origine anthropique

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 K_2SO_4), de composts, de fumiers et/ou de pesticides [Pansu et Gautheyrou 2003].

10.2.2. Comportement dans les sols traités

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.

Xing *et 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 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 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.

10.3 Problèmes liés aux nitrates

10.3.1. Origine des nitrates dans les sols

10.3.1.1. Origine naturelle

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.*

10.3.1.2. Origine anthropique

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 NH_4NO_3 . La

solubilité du nitrate d'ammonium, importante, est de 1183g.L-1 à 20°C. Le sulfate d'ammonium (NH₄)₂SO₄, l'urée (NH₂)₂CO, le nitrate de calcium Ca(NO₃)₂ ou le nitrate de potassium KNO₃ 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 [Pansu et Gautheyrou 2003 ; Mathieu et Pieltain 2003]. 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.

10.3.2. Comportement dans les sols traités

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 ; Gryschko *et al.* 2004 ; Pueyo *et 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 NH₄NO₃ :

- 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 (1212g.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 (156mg NO₃ -.kg-1 et 1,56g NO₃ -.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.

10.4. Phosphates

10.4.1. Origine des phosphates dans les sols

10.4.1.1. Origine naturelle

Le phosphore est un élément majeur de la pédosphère (1000mg.kg-1) dont 60% se trouve sous forme inorganique. Les teneurs totales retenues en phosphate pour la plupart des sols sont de 200 à 4000mg.kg-1 de sol sec. Toutefois, des valeurs extrêmes de 10 000mg.kg-1 ont été enregistrées

pour les sols développés à partir de roches volcaniques ou à partir de certaines craies [Mathieu et Pieltain 2003]. Ce type de sols est présent en région Basse-Normandie.

Le phosphore est surtout présent dans les sols à l'état d'orthophosphate (PO_4^{3-}), liés au calcium (apatite $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]\cdot\text{CaX}_2$ avec $\text{X} : \text{Cl}^-$, F^- , 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].

10.4.1.2. Origine anthropique

Les phosphates se trouvent sous formes d'engrais et de pesticides, de détergents, d'adoucisseurs 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 [Pansu et Gautheyrou 2003].

Dans les engrais, le phosphate se présente sous la forme d'acide phosphorique H_3PO_4 , de composés ammo-phosphatés $(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)$ et $(\text{NH}_4)_3(\text{PO}_4)$ 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 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 [Gay et Schad2000].

10.4.3. Comportement dans les sols traités

L'acide phosphorique H_3PO_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 PO_4^{3-} et réagissent avec les ions calcium pour former des phosphates de calcium (hydroxyapatite) insolubles retardant la prise [Guichard 2006].

CHAPITRE I
II

TRAITEMENT
DES SOLS FIN
S

CHAPITRE III : TRAITEMENT DES SOLS FINS

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons clairement le traitement des sols fins, son objectif, les avantages liés à cette technique. Nous parlons aussi des 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.

2. LE TRAITEMENT DES SOLS

2.1. Définition et objet

Le traitement des sols avec un liant est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer des propriétés nouvelles. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et du liant, par opposition au traitement mécanique, comme le compactage, qui peut se superposer au premier.

Le traitement des sols pour l'exécution des remblais, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise de chaussée, de parking ou de plate-forme.

Il a deux raisons d'être :

- soit pour améliorer des sols trop humides, qu'il s'agisse du sol en place pour permettre la progression du chantier ou de sols à réutiliser en remblai ;
- soit pour réaliser des plates-formes rigides et stables aux intempéries pour la circulation des engins chantier et la mise en œuvre de la fondation.

L'optique du traitement est différente selon le cas :

- dans le premier cas, on cherche un effet rapide et de niveau suffisant pour rendre la circulation des engins et la mise en œuvre possibles, mais sans chercher à obtenir des performances mécaniques élevées par la suite ;
- dans le second cas, on recherche une résistance mécanique pour la plate-forme. Le choix des opérations est alors étudié pour obtenir un matériau relativement noble par rapport au matériau naturel.

2.2. Avantages de la technique

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

2.2.1. Avantages techniques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique 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. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure.

Cette technique assure un bon comportement par temps chaud sans déformation, ni orniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

2.2.2. Avantages économiques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport.

L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier.

Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

2.2.3. Avantages écologiques et environnementaux

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

3. Les produits de traitement

Ce sont les chaux aériennes principalement calciques et les liants hydrauliques.

3.1. La chaux aérienne

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde.

La chaux aérienne est obtenue par décarbonatation du calcaire (CO₃ Ca) à une température d'environ 900°C suivant la réaction :



La réaction étant réversible, la chaux produite peut, après hydratation par l'humidité ambiante, se recarbonater lentement sous l'action du CO₂ atmosphérique avec formation d'une prise à l'air d'où la qualification de « chaux aérienne » par opposition à « chaux hydraulique ».

La chaux aérienne peut exister sous trois formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux, chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques. Il existe aussi un type de chaux dit chaux aérienne magnésienne. L'utilisation de chaux aériennes magnésiennes peut éventuellement être envisagée, mais l'efficacité de ces chaux est moindre que celle des chaux calciques en raison de leur faible réactivité. Par ailleurs, il est possible que, dans le cas de fortes cadences de mise en œuvre, ce retard d'hydratation puisse, pour les moins réactives d'entre elles, être à l'origine de gonflements différés.

Les chaux hydrauliques sont, quant à elles, à considérer en tant que liants hydrauliques, mais leur utilisation en traitement de sols n'a pas jusqu'à présent été significativement développée.

3.1.1. La chaux vive

a. Caractéristiques

Les caractéristiques considérées sont :

- La teneur en CaO (oxyde de calcium) libre global, mesurée par la méthode « Leduc » selon la norme NF P 15-461,
- La teneur en MgO, mesurée par l'une des méthodes décrites dans les normes NF U 44-145, 44-146, 44-147 ou 44-148
- La réactivité à l'eau, mesurée par l'essai de réactivité défini par la norme NF P 98-102,
- Les passants à 0,08, à 0,2 et à 2 mm, mesurés selon la norme P 18-560.

Les spécifications relatives aux chaux vives utilisables pour le traitement des sols, retenues dans la norme NF P 98-101, sont par ailleurs les suivantes :

- teneur en CaO libre global : $\geq 80 \%$
- teneur en MgO : $\leq 8 \%$
- passant à 0,08 mm : $\geq 50 \%$
- passant à 0,2 mm : $\geq 80 \%$,
- passant à 2 mm : 100%.

b. Fabrication

Le calcaire constituant le carbonate de base est généralement extrait à l'explosif. Il est ensuite concassé puis criblé pour éliminer la fraction fine (0/10 mm dans le cas des fours verticaux et 0/5 mm dans le cas des fours rotatifs). En moyenne, on considère qu'il faut extraire 2,5 t de calcaire pour produire 1 t de chaux vive. Les fours de calcination sont soit verticaux, soit rotatifs.

3.1.2. La chaux éteinte

Son action est limitée à la neutralisation des argiles et à la correction de la granulométrie. Elle ne diminue pratiquement pas la teneur en eau. Elle est donc utilisée pour le traitement de matériaux à faible teneur en eau, des matériaux argileux secs par exemple.

a. Caractéristiques

Les caractéristiques considérées sont :

- les teneurs en oxyde de calcium (CaO) libre et en oxyde de magnésium (MgO) mesurées selon les normes indiquées précédemment (norme NF P 15-461, normes NF U 44-145, 44-146, 44-147 et 44-148)
- Le passant à 0,08 mm mesuré selon la norme indiquée précédemment (P 18-560),
- La teneur en eau libre mesurée selon la norme NF P 94-050.

Les spécifications relatives aux chaux éteintes utilisables pour le traitement des sols, retenues dans la norme NF P 98-101, sont par ailleurs les suivantes :

- teneur en CaO libre global : ≥ 50 %
- teneur en MgO : ≤ 6 %,
- passant à 0,08 mm : ≥ 90 %
- teneur en eau libre : ≤ 2 %.

b. Fabrication

La chaux éteinte est fabriquée par hydratation de la chaux vive dans un hydrateur. Dans cet équipement, la chaux et l'eau sont intimement mélangées, la quantité d'eau doit être exactement calculée de manière à être nécessaire et suffisante pour assurer l'hydratation complète de la chaux vive tout en fournissant un produit sec (en tenant compte, par ailleurs, de l'évaporation produite par l'exothermicité de la réaction d'hydratation). À la sortie de l'hydrateur, la chaux éteinte se présente sous la forme d'une poudre très fine, pouvant néanmoins contenir certains éléments plus grossiers (incuits ou surcuits) n'ayant pas participé à l'hydratation. Ces éléments constituant le « grappier » sont éliminés par tamisage.

Son action est limitée à la neutralisation des argiles et à la correction de la granulométrie. Elle ne diminue pratiquement pas la teneur en eau. Elle est donc utilisée pour le traitement de matériaux à faible teneur en eau, des matériaux argileux secs par exemple, notamment dans les domaines agricoles. Son coût est élevé.

3.1.3. Lait de chaux

C'est une forme plus concentrée et plus liquide et sa prise est très lente. Elle est utilisée dans des cas spécifiques de traitement de matériaux secs, uniquement pour la réalisation de remblais.

Cette forme assure une meilleure diffusion, notamment dans les roches argileuses. Les laits de chaux sont peu utilisés. Ils le sont beaucoup plus dans les pays arides [notamment aux États-Unis (Texas par exemple)].

3.2. Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des produits qui, en présence d'eau, s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol. Ce phénomène, dénommé couramment « prise hydraulique », confère au sol une cohésion permanente dont l'importance dépend :

- de la nature du matériau,
- du type de liant,
- de la quantité introduite,
- de la compacité atteinte à la mise en œuvre,
- de la température du milieu et de l'âge du mélange.

Les liants hydrauliques sont des mélanges comportant, en proportion éminemment variables suivant les produits :

- des matériaux hydrauliques faisant prise en présence d'eau : clinker Portland, cendres volantes sulfocalciques de charbon, etc.,
- des matériaux pouzzolaniques faisant prise en présence d'eau à pH élevé (≥ 12) : laitiers de hauts-fourneaux, cendres volantes silico-alumineuses, pouzzolanes naturelles,
- si nécessaire, un ou plusieurs activants dont le rôle principal est l'élévation du pH du milieu pour déclencher la prise hydraulique des matériaux pouzzolaniques,
- différents ajouts éventuels destinés à leur conférer des propriétés spécifiques (sur la cinétique de prise, par exemple).

Les liants hydrauliques concernés par la technique du traitement des sols sont respectivement les ciments et les liants spéciaux routiers (LSR).

3.2.1. Les ciments

Le ciment est un liant, une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte homogène et plastique, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées appelées agrégat ou granulat. C'est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre, mélangée à de l'eau, pour agréger du sable fin, pour produire du mortier, des graviers, ou encore du béton.

Ce sont des liants hydrauliques conformes aux normes NF P 15-300 et NF P 15-301. Les modalités de leur identification sont précisées, notamment, dans les normes NF P 15-431 ; NF P 15-433 ; NF P 436; XP P 15-466 ; P 15-467 ; P 15-474 et NF EN 196-1 ; NF EN 196-2 ; NF EN 196-3 ; NF EN 196-6 ; NF EN 196-7.

Dans l'application au traitement des sols, seuls les « ciments courants », au sens des normes précitées, sont utilisés. Il est probable, toutefois, que d'autres ciments (ciment à maçonner, ciment naturel, chaux hydrauliques naturelle et artificielle, etc.) soient techniquement également utilisables, mais les conditions économiques dans lesquelles ils sont fabriqués n'ont pas encore permis d'envisager leur emploi à une échelle significative.

Les caractéristiques des ciments courants sont définies dans la norme NF P 15-301 (révisée en 1994) et leurs valeurs sont certifiées (l'AFNOR constituant l'organisme certificateur). Cette norme propose une classification des différents ciments établie, d'une part, selon leur composition et, d'autre part, selon leurs performances mécaniques.

L'utilisation de ciments apporte donc une garantie notable sur leurs propriétés et leur homogénéité.

Les ciments sont constitués généralement d'une proportion plus ou moins importante de clinker Portland (appellation courante : clinker) et de différents autres constituants.

Le clinker est obtenu par cuisson, aux environs de 1 450 °C, d'un mélange dénommé « cru » composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile. Au cours de la cuisson, le cru est tout d'abord déshydraté (jusqu'à 550 °C), puis décarbonaté (de 550 à 900 °C) et enfin clinkerisé (de 900 jusqu'à 1450 °C). Au terme de la clinkerisation qui a produit une fusion partielle du cru, ce dernier est transformé en silico-aluminates et ferro-aluminates de calciums anhydres, facilement solubles dans l'eau.

Après refroidissement, et ajout des éventuels constituants d'apport, le mélange est finement broyé et homogénéisé (D_{max} des grains inférieur à 0,08 mm, surface spécifique « Blaine » comprise entre 2 800 et 5 000 cm^2/g). Le produit final est composé de constituants qui, en présence d'eau, se dissolvent quasi instantanément avec formation de précipités de gel de silicates et de ferro-aluminates de calcium. Ce gel s'hydrate progressivement et se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les éléments grenus du sol.

Les constituants ajoutés au clinker au moment du broyage sont notamment : des laitiers de hauts-fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon, des fumées de silice etc., ainsi qu'une proportion de l'ordre de 3 % de gypse destiné à régulariser la cinétique de la prise hydraulique. Une préoccupation essentielle dans la fabrication des ciments est la recherche de la plus grande homogénéité dans la fabrication du cru tout d'abord, puis dans celle de l'ajout des différents autres constituants qui s'opère lors du broyage.

a. Origine du ciment

Bien que des liants hydrauliques, fabriqués à partir de chaux et de matériaux pouzzolaniques, aient été utilisés depuis l'Antiquité, notamment par les romains, la découverte du ciment, au sens strict du terme, ne date que du début du XIXe siècle.

C'est le français Louis-Joseph Vicat qui, en 1817, à partir de l'analyse des liants hydrauliques utilisés à l'époque, élabore la première théorie de l'hydraulicité qui va conduire à l'invention du ciment artificiel.

En effet, quelques années plus tard (1824), l'écossais Joseph Aspdin reprend la théorie de Louis-Joseph Vicat, en précisant la valeur de 1450 °C comme étant la température produisant la clinkerisation, pour fabriquer un ciment qu'il dénomme « Portland », du nom de la localité anglaise où est extrait le calcaire argileux utilisé (ce nom est encore en usage pour dénommer les ciments comportant une proportion majoritaire de clinker).

À partir de 1885, l'emploi du ciment artificiel « Portland » dans les grands bâtiments et ouvrages de travaux publics est reconnu, ouvrant ainsi la voie à une industrie lourde nouvelle.

b. Fabrication

Elle passe tout d'abord par la fabrication du clinker puis se poursuit par l'adjonction de constituants divers introduits dans le clinker au moment de son broyage. Le clinker est fabriqué à partir de calcaire (80 %) et d'argile (20 %), extraits dans des carrières généralement distinctes (en général, il faut 1,6 à 1,8 t de ces produits de carrière pour fabriquer 1 t de clinker). Suivant le type de ciment recherché, on ajoute de l'alumine (sous forme de bauxite) et/ou des oxydes de fer pour obtenir la composition requise.

Après concassage fin, ces constituants sont intimement mélangés pour constituer le « cru » qui, après cuisson à 1 450 °C, deviendra le clinker.

Les différents procédés de fabrication du clinker se distinguent principalement par le mode de préparation du « cru ».

c. Fabrication par voie sèche

La fabrication par « voie sèche », la plus utilisée car moins consommatrice d'énergie, comprend :

- la pré-homogénéisation par dépôt, en couches horizontales alternées, des deux matériaux et leur reprise frontalement,
- le broyage, séchage, et homogénéisation finale dans un broyeur sécheur rotatif à boulets ou à rouleaux,
- le séchage final et le préchauffage dans des échangeurs « cyclones »,
- la cuisson à 1 450°C dans un four rotatif.

d. Fabrication par « voie humide » et « voie semi-humide »

La fabrication par « voie humide » procède tout d'abord par un concassage (comme dans la voie sèche) puis un délayage dans l'eau des constituants du « cru » jusqu'à obtention d'une pâte ayant la composition recherchée. Après homogénéisation, stockage et concentration sur filtre-presse, la pâte est envoyée dans le four rotatif soit directement, soit en passant préalablement sur une grille de séchage (voie « semi-humide »).

e. Fabrication par « voie semi-sèche »

La voie dite « semi-sèche » est identique à la voie sèche jusqu'à la sortie du broyeur-sécheur. Au-delà de cet organe, la poudre séchée est regranulée en boulettes de 10 à 12 mm de diamètre dans un granulateur (par adjonction de 10 à 15 % d'eau) avant d'être envoyée sur la grille de séchage comme dans la voie « semi-humide ».

Au terme de la cuisson et après refroidissement, le clinker est mélangé avec ses autres constituants (gypse, laitiers, cendres volantes, etc.), dans les proportions requises, puis finement broyé jusqu'à obtention d'une poudre dont la finesse, définie par la surface spécifique, mesurée par la méthode Blaine, est comprise entre 2 800 et 5 000 cm²/g et ne contenant plus de grains dont la dimension maximale excède 80 µm. Après broyage et refroidissement, le ciment ainsi fabriqué est dirigé vers les organes de stockage et de conditionnement en vue de sa commercialisation.

3.2.1.1. Les ciments courants

La possibilité, en particulier en jouant sur la nature et les proportions de leurs composants, de fabriquer des ciments ayant des propriétés, et donc des domaines d'application, très variables, a rendu indispensable l'élaboration d'une normalisation de ces produits. Cette normalisation est d'ailleurs en voie d'harmonisation au niveau européen et la norme française NFP 15-301 révisée en 1994 a déjà largement intégré l'ensemble des préoccupations de la Communauté Européenne.

Cette norme définit différents types de ciments courants, en fonction de la nature de leurs constituants et des proportions dans lesquelles ils doivent être combinés. Elle prescrit en outre les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques appliquées à ces types de ciment pour en définir les classes. Enfin, elle précise les règles permettant d'évaluer la conformité des produits à ces spécifications.

En particulier, les différents types de ciments courants sont caractérisés et désignés suivant la norme comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Différents types de ciments courants

Désignation du type de ciment	Notation	Composition
Ciment Portland	CPA/CEM I	Au moins 95 % de clinker et de 0 à 5 % de constituants secondaires

Ciment Portland composé	CPJ/CEM II/A	Entre 80 et 94 % de clinker et 6 à 20 % d'autres constituants
	CPJ/CEM II/B	Entre 65 et 79 % de clinker et 21 à 35 % d'autres constituants
Ciment de haut-fourneau	CHF/CEM III/A	Entre 35 et 64 % de clinker et 36 à 65 % de laitier de haut-fourneau
	CHF/CEM III/B	Entre 20 et 34 % de clinker et 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau
	CLK /CEM III/C	Entre 5 et 19% de clinker et 81 à 95% de laitier de haut-fourneau
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	Entre 65 à 90% de clinker et 10 à 35% de pouzzolanes, de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10% pour ces dernières)
	CPZ-CEM IV/B	Entre 45 et 64% de clinker et 36 à 55% de pouzzolanes, de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10 % pour ces dernières)
Ciment au laitier et aux cendres	CLC/CEM V/A	Entre 40 et 64% de clinker. 18 à 30 % de laitier et 18 à 30 % de cendres volantes ou pouzzolanes
	CLC/CEM V/B	Entre 20 et 39 % de clinker, 31 à 50 % de laitier et 31 à 50 % de cendres volantes ou pouzzolanes

Chaque type de ciment est ensuite classé d'après ses propriétés mécaniques et physiques. Les propriétés mécaniques considérées sont :

- la résistance normale sur pâte de ciment. C'est la résistance en compression, mesurée à 28 j selon la norme NF EN 196-1 (trois classes de résistance normale sont définies : classe 32,5 N/mm² classe 42,5 N/mm² classe 52,5 N/mm²) ;
- les résistances au jeune âge. Ce sont les résistances en compression mesurées à 2 j selon la norme NF EN 196-1 (deux classes de résistance au jeune âge sont définies : une résistance ordinaire et une résistance élevée notée R).

Les propriétés physiques considérées sont :

- le temps de début de prise, déterminé selon la norme NF EN 196-3,
- la stabilité, déterminée selon la norme NF EN 196-3,
- le retrait à 28 j, déterminé selon la norme NF P 15-433 pour les ciments CPA-CEM I et CPJ-CEM II de certaines classes de résistance.

Les valeurs des caractéristiques mécaniques et physiques, évoquées précédemment, qui définissent une classe de ciment d'un type donné sont prescrites dans la norme NF P 15- 301 et rappelées dans le prochain tableau. Ce sont des limites statistiques qui tiennent compte d'un fractile de risque auquel doivent satisfaire les résultats du contrôle du producteur. Les critères de conformité de la norme NF P 15-301 définissent le mode de calcul de la résistance normale.

Enfin, certains types ou classes de ciments doivent être caractérisés par les paramètres chimiques suivants : la perte au feu, les teneurs en oxyde de magnésium, en résidu insoluble, en sulfates, en chlorures et la pouzzolanité.

Tableau 4 : Spécification mécaniques et physiques relatives aux différentes classes de ciments courants

Classe	Résistance à la compression (N/mm ²)				Retrait des CPA/CEM I CPJ/CEM II 28 j (µm/m)	Temps de prise (min)	Stabilité (mm)
	Jeune âge		Normale				
	2 j	7 j	28 j				
	Limite inférieure	Limite inférieure	Limite inférieure	Limite supérieure			
32,5	-	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 800	≥ 90	
32,5 R	≥ 13,5	-					
42,5	≥ 12,5	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≤ 1 000		≤ 10
42,5 R	≥ 20	-				≥ 60	
52,5	≥ 20	-	≥ 52,5	-	-		
52,5 R	≥ 30	-					

3.2.1.2. Les autres ciments

Les autres liants hydrauliques normalisés, donc recevables de ce fait de l'appellation «ciment», sont rappelés dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Caractéristiques générales des ciments non courants

Désignation du type du ciment	Notation	Norme	Commentaires
Ciment de laitier à la chaux	CLX	NF P 15-306	C'est un mélange constitué de soixante-dix parties de laitiers granulé et de (100 -N) parties de chaux hydrauliques + 3 % (maxi) de cendres volantes ou de fillers
Ciment à maçonner	CM		Mêmes constituants actifs que dans le ciment CPA CEM I mais performances mécaniques moindres
Ciment naturel	CN	NF P 15-308	Ciment dont le clinker est obtenu par la cuisson d'un calcaire marneux (au lieu d'une recombinaison calcaire + argile)
Chaux hydraulique naturelle	NHL	NF P 15-310	Liant hydraulique résultant de la cuisson de roches calcaires plus ou moins argileuses mais dont la pulvérisation est principalement obtenue par extinction
Chaux hydraulique artificielle	XHA	NF P 15-312	Liant hydraulique à base de clinker additionné de fillers calcaires et de différents ajouts choisis de manière à lui conférer une grande plasticité, une faible fissurabilité et des résistances moyennes
Ciment prompt naturel	CNP	NF P 15-314	Ciment à prise et durcissement rapides, obtenu par cuisson à température modérée d'un calcaire argileux homogène broyé très finement
Ciment alumineux fondu	CA	NF P 15-315	Ciment obtenu par cuisson jusqu'à fusion d'un mélange principalement composé d'au moins 30 % d'alumine
Ciment pour travaux à la mer	PM	NF P 15-317	Il s'agit de ciments de types CPA-CEM I, CPJ CEM II, CHF CEM III, CLK CEM IIIC, CLC CEM V, présentant des teneurs en aluminates tricalciques modérées et de certains ciments prompts et alumineux ayant démontré leur bon comportement dans les ouvrages maritimes
Ciment à faible chaleur d'hydratation et à teneur en sulfures limitée	CP	NF P 15-318	Ce sont des ciments du type CPA CEM I, CPJ CEM II, CLC CEM V dont l'exothermicité de l'hydratation est limitée à 230 J/g à 12 h et dont la teneur en sulfure est plafonnée
Ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates	ES	P 15-319	Ces ciments sont de types CPA-CEM I, CPJ-CEM II, CHF-CEM III, CLK-CEM II/, CLC-CEM III/V, avec des des critères chimiques légèrement différents de ceux des ciments PM

3.2.2. Les liants spéciaux routiers LSR ou liants hydrauliques routiers LHR

En complément des ciments normalisés, se sont développés, depuis maintenant de nombreuses années, des liants dénommés « liants hydrauliques routiers » mis au point spécialement pour une utilisation en traitement des sols en place ou en centrale et pour la confection de matériaux d'assises de chaussées.

Dans l'attente d'une norme, ils font l'objet d'avis techniques délivrés par le Comité français pour les techniques routières (CFTR). Ces avis techniques se limitent, toutefois, à garantir que le LSR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage donnés, un comportement satisfaisant, mais toute extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

a. Définition

Un liant hydraulique routier est un produit fini, fabriqué en usine et distribué prêt à l'emploi. Il se présente sous forme d'une poudre minérale qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement, aussi bien à l'air que sous l'eau.

La prise et le durcissement sont dus à la formation de composés hydratés stables, très peu solubles dans l'eau, présentant une forte adhérence entre eux et aux sols ou granulats destinés au traitement, et créant ainsi progressivement une cohésion croissante des pâtes et des mélanges.

Une prénorme européenne ENV 13-282 a été adoptée en 1999. Cette prénorme, dont l'utilisation n'est pas obligatoire, marque un consensus européen sur la définition des liants hydrauliques routiers.

b. Principe des LSR et leurs avantages

Les principes d'action des LSR ne sont pas fondamentalement différents de ceux des ciments car on y retrouve, mais en proportion différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des cinétiques spécifiques.

Les LSR peuvent présenter certains avantages et notamment :

- leur coût de fabrication plus faible, car leur composition est en forte proportion à base de constituants ne nécessitant pas de cuisson spécifique (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.) ;
- leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier. En effet, leur fabrication pouvant être gérée de manière plus souple que celle des ciments, il peut être envisagé, si les enjeux du projet le justifient, de fabriquer un produit optimisé à un sol particulier et ayant une cinétique de prise ajustée à l'époque des travaux et/ou aux contraintes d'organisation du chantier.

En contrepartie, l'absence, jusqu'à présent, de normalisation de procédure de certification gêne en partie le développement de ces produits (du fait, notamment, de la nécessité de pratiquer des études plus détaillées qu'avec des ciments).

c. Domaine d'emploi des LSR :

Les domaines d'emploi des LSR sont :

- traitement des sols : remblais, PST, plate-forme support de chaussée, couche de forme, conformément au GTR.
- La réalisation de couches d'assise de chaussée : avec des sables traités aux liants hydrauliques routiers, des graves traitées aux liants hydrauliques routiers, conformément à la norme NF P 98-122, ou des graves hydrauliques à hautes performances, selon la norme NF P 98-128, et ce suivant les indications données par la norme NF P 98-115 « Exécution des corps de chaussée ».

d. Constituants des LSR :

Les principaux constituants d'un liant hydraulique routier doivent être sélectionnés parmi les suivants :

- Constituants conformes à l'article 4 de la norme NF P 15-301 « Ciments courants - composition, spécifications et critères de conformité »
 - ✓ clinker Portland (K),
 - ✓ laitier granulé de haut-fourneau (S),
 - ✓ pouzzolanes naturelles (Z),
 - ✓ cendres volantes : cendres volantes siliceuses (V),
 - ✓ schistes calcinés (T),
 - ✓ calcaire (L).

- Autres constituants :
 - ✓ chaux conformes à la norme NF P 15-311.

e. Classification des liants hydrauliques routiers

La possibilité, en particulier en jouant sur la nature et les proportions de leurs constituants, de fabriquer des liants hydrauliques routiers ayant des propriétés, et donc des domaines d'application très variables, a rendu indispensable l'élaboration d'une normalisation de ces produits. Une première étape de normalisation est achevée au niveau européen avec la publication de la prénorme, et la norme française, qui s'en inspirera, est actuellement en cours d'élaboration.

La norme française définit différentes classes de liants hydrauliques routiers. Elle prescrit, en outre, les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques appliquées à ces classes de liants. Enfin, elle précise les règles permettant d'évaluer la conformité des produits à ces spécifications.

Le tableau suivant donne la classification des liants hydrauliques routiers :

Tableau 6 : Résistances mécaniques requises pour les LHR à durcissement rapide

Classe	Résistance à la compression (MPa)		
	à 7 jours	à 28 jours	
E2	≥ 5,0	≥ 12,5	< 32,5
E3	≥ 10,0	≥ 22,5	< 42,5
E4	≥ 16,0	≥ 32,5	< 52,5
E4 RS	≥ 16,0	≥ 32,5	-

Tableau 7 : Résistances mécaniques requises pour les LHR à durcissement normal

Classe	Résistance à la compression à 56 jours (MPa)	
N1	≥ 5,0	≤ 22,5
N2	≥ 12,5	≤ 32,5
N3	≥ 22,5	≤ 42,5
N4	≥ 32,5	≤ 52,5

f. Déclaration de composition

Les constituants d'un liant hydraulique routier, ainsi que leur proportion moyenne dans le produit fini, doivent être enregistrés et déclarés par le fabricant. Les constituants à déclarer sont les constituants principaux ainsi que le sulfate de calcium si la teneur en sulfates (803) du liant est supérieure à 4 %.

4. Principe d'action des produits de traitement

4.1. Action de la chaux

L'incorporation de chaux dans un sol provoque :

- des actions, dites « immédiates », qui se produisent dès l'instant où le mélange sol-chaux 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.

4.1.1. Actions immédiates

Elles portent sur l'état hydrique et, le cas échéant, sur l'argilosité du sol.

4.1.1.1. Modification de l'état hydrique

Ces modifications dépendent de la forme (vive, éteinte, lait) sous laquelle la chaux se trouve et de la quantité introduite.

Ainsi, **la chaux vive** provoque un abaissement de la teneur en eau du sol par l'action combinée des trois phénomènes suivants :

- Hydratation de la chaux vive selon la réaction :

$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 15,5 \text{ kcal},$$
- Vaporisation d'une certaine quantité d'eau produite par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive (15,5 kcal/mole),
- apport de matière sèche (chaux éteinte) qui réduit le rapport :
Poids d'eau / Poids de solide définissant le calcul de la teneur en eau.

L'importance relative de ces trois phénomènes est sensiblement égale et on peut retenir que l'abaissement total de teneur en eau provoqué par l'incorporation de chaux vive dans un sol est approximativement de 1 % de teneur en eau par pour-cent de chaux vive introduite.

La chaux éteinte agit également sur la teneur en eau, mais cette fois uniquement par le phénomène d'apport de matière sèche, c'est-à-dire que l'abaissement total n'est plus que de l'ordre de 0,3 % de teneur en eau par pour-cent de chaux éteinte introduite.

Le lait de chaux produit à l'inverse une élévation de la teneur en eau qui est fonction de sa concentration (masse de CaO par litre d'eau) et de la quantité mélangée avec le sol.



Figure 23 : Centrale de fabrication de lait de chaux par extinction de chaux vive



Figure 24 : Epandage de lait de chaux pour traitement d'un sol argileux

Remarque : Le traitement sur le chantier étant souvent réalisé par conditions atmosphériques évaporantes, la réduction de teneur en eau constatée est souvent très supérieure à celle provoquée par la seule incorporation de la chaux. Dans ces conditions, des perles d'eau atteignant 4 à 6% sont souvent constatées sur les chantiers. Cet assèchement, qui se produit

principalement durant le malaxage, peut être bénéfique (cas de la réutilisation en remblai de sols trop humides) ou, au contraire, préjudiciable car devant être compensé par un arrosage complémentaire (cas fréquemment rencontré en traitement pour couche de forme).

4.1.1.2 Modification des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

Dès son incorporation dans un sol argileux humide, la chaux agit sur les charges électriques des particules fines et modifie les champs électriques inter-particulaires, ce qui entraîne leur floculation. Cette floculation se traduit géotechniquement par :

- **Une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification concomitante significative de sa limite de liquidité** : Il y a donc réduction de l'indice de plasticité. Ainsi, si une certaine quantité de chaux vive est introduite dans un sol argileux dont la teneur en eau naturelle w_{nat} , 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 (extraire, charger, décharger, circuler, régaler, compacter, etc.).

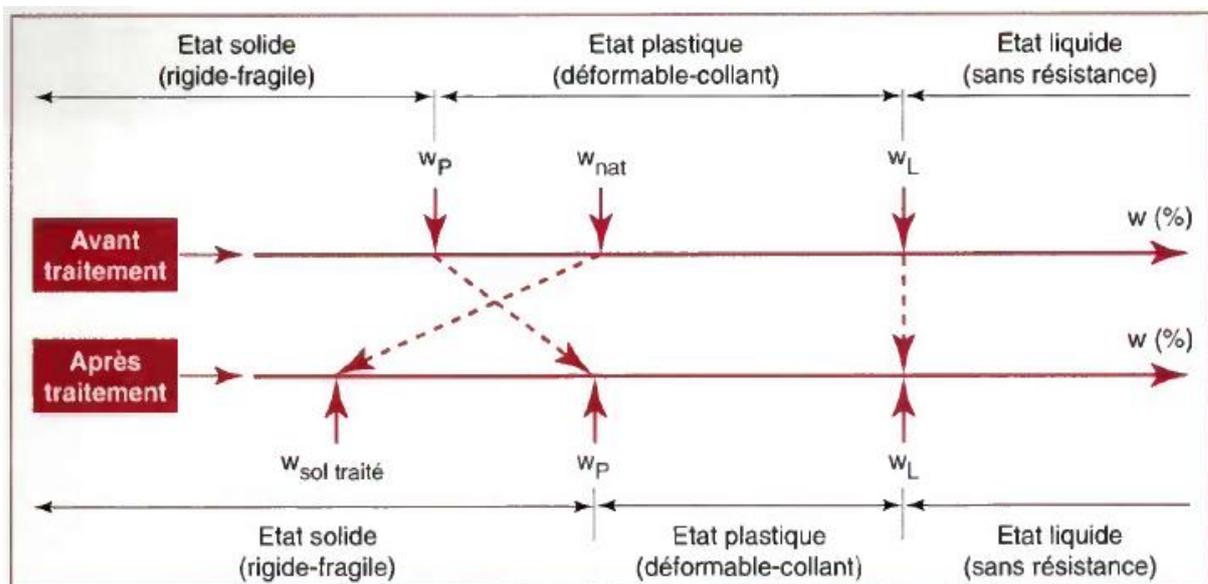


Figure 25 : Modification immédiate du comportement argileux d'un sol

- **Une augmentation de la résistance du sol au cisaillement** : Elle s'opère en même temps que le changement d'état décrit précédemment et se traduit par une élévation de l'IPI dont l'ampleur dépend, toutes choses égales par ailleurs, de l'état hydrique du sol avant traitement. Dans le cas du traitement à la chaux vive limité à la réutilisation de sols trop humides, on constate généralement que l'efficacité du traitement est maximale lorsque l'état hydrique du sol se situe aux alentours de 1,1 à 1,3 w_{opn} (ou, dans le cas de sols fins, lorsque la w_{nat} , est voisine de la w_p). En effet, dans ces conditions d'état, on peut en général réutiliser le sol avec des dosages n'excédant pas 1 %. Si l'humidité dépasse sensiblement ces valeurs, les dosages nécessaires croissent alors rapidement car il faut tout d'abord hydrater une quantité de chaux vive importante pour assécher le sol jusqu'à revenir à l'état hydrique évoqué précédemment. Si, au

contraire, l'état hydrique du sol est « moyen » et a fortiori « sec », situation qui peut se présenter principalement dans le cas du traitement mixte de sols pour utilisation en couche de forme, l'incorporation de chaux vive (mais aussi éteinte) va conduire également à une forte augmentation de l'IPI. Cette augmentation de la rigidité devient alors un handicap car elle rend le sol traité beaucoup plus difficile à compacter et nécessite de prendre des dispositions particulières telles que : arrosage, surcompactage, traitement au lait de chaux, etc. évoquées dans la suite.

- Une modification des caractéristiques de compactage du sol : Comme le montre la figure suivante, la courbe « Proctor » du sol traité s'inscrit en dessous et à droite de celle du sol naturel. Cette tendance s'observe quelle que soit l'énergie de compactage appliquée et est d'autant plus marquée que le sol est argileux. Autrement dit, le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche pouvant être atteinte pour l'énergie de compactage considérée et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

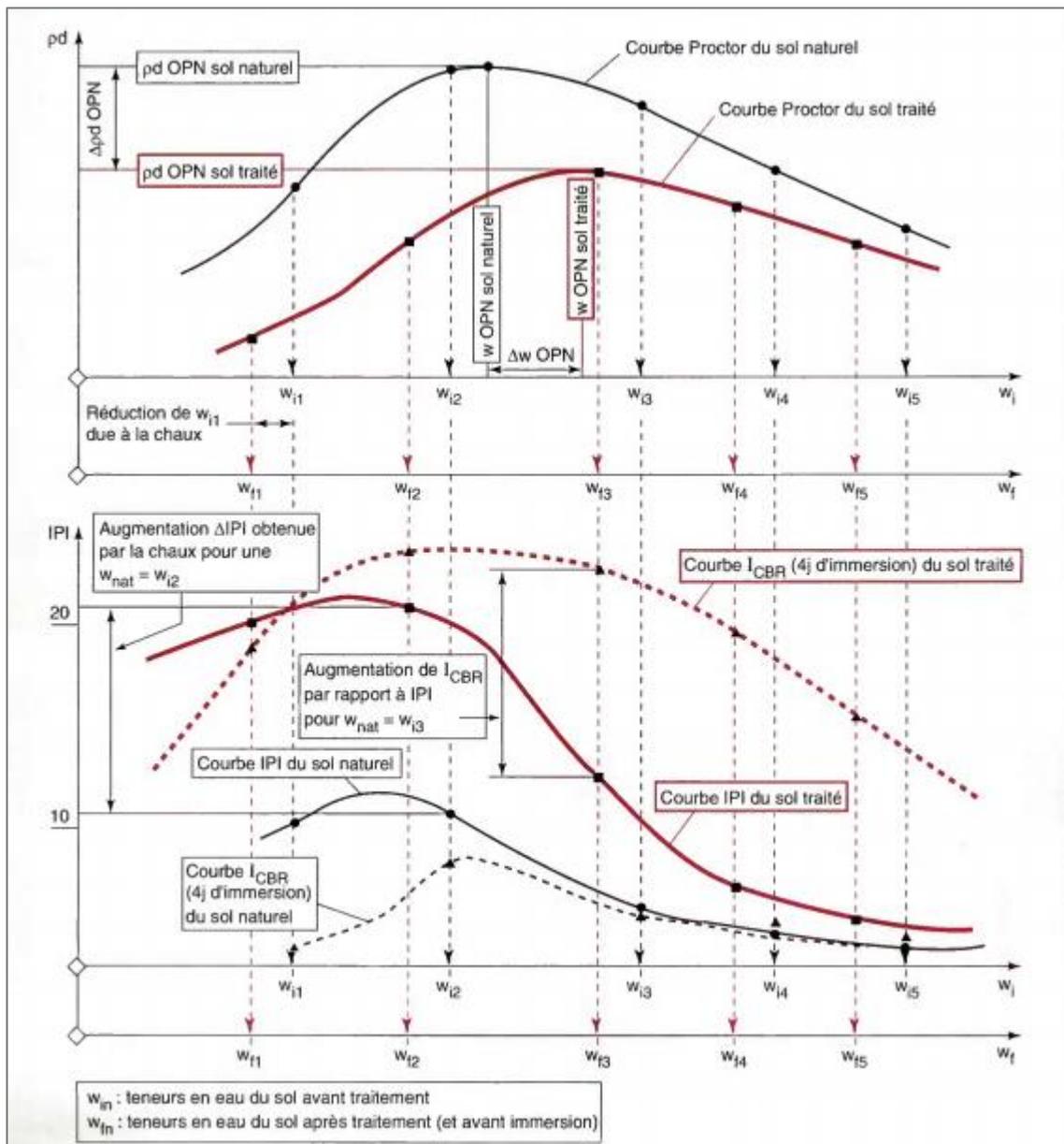


Figure 26 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol A2 traité à 2% de chaux vive

Remarque : Contrairement à ce qui est indiqué ci-après pour les actions à long terme, l'expérience actuelle a montré que la température n'avait pas d'influence sensible sur les actions immédiates. Ce paramètre n'a donc pas lieu d'être pris en compte dans les applications du traitement à la chaux pour la réutilisation des sols trop humides ou pour la réduction de l'argilosité des sols argileux potentiellement gonflants (sauf, évidemment, le cas de sols gelés pour lesquels le traitement à la chaux n'a, en première analyse, aucune raison d'être envisagé).

4.1.2 Actions à long terme

4.1.2.1 Action pouzzolanique

Cette action se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol, lorsque leur proportion est significative (IP mesurable ou VBS > 0,5 grammes). On rappelle que le principe de l'action pouzzolanique repose sur la possibilité, en milieu de pH élevé (supérieur à 12), de mise en solution de la silice, de l'alumine, des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de chaux insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques. La manifestation de cette action se traduit sur par l'augmentation de l' I_{CBR} après 4 j d'immersion par rapport à l'IPI pour la teneur en eau du sol traité considérée. Son importance dépend, toutes choses égales par ailleurs, de cette teneur en eau. Toutefois, les vitesses de solubilisation des constituants de la fraction argileuse d'un sol étant nettement plus faibles qu'en présence de matériaux pouzzolaniques traditionnels (laitiers, pouzzolanes, cendres volantes, etc.), les phénomènes de cimentation se développent, en général, très lentement (plusieurs mois, voire des années, dans les conditions climatiques françaises moyennes). Les facteurs intervenant dans la cinétique de la prise hydraulique des mélanges sol-chaux sont notamment :

- **La température du milieu** : On peut retenir que les résistances atteintes au bout d'un an de conservation à 20 °C peuvent souvent déjà être obtenues en moins de 30 j, si la température est de l'ordre de 40 °C et qu'inversement, la prise s'arrête lorsque la température descend en dessous de 5 °C (elle reprend toutefois dès que la température s'élève à nouveau). La prise en compte de cet aspect est très importante dans le cas du traitement appliqué à la réalisation de couche de forme par exemple. En particulier, à défaut d'éléments justificatifs (étude spécifique, sols argileux très réactifs à la chaux, travaux terminés avant la fin de l'été, etc.), il n'est pas conseillé de réaliser une couche de forme en sol traité à la chaux seule dans les régions pouvant être soumises à une période de gel significative.
- **La quantité et la nature de la fraction argileuse présente dans le sol** : Plus cette quantité est élevée et plus les édifices cristallins des minéraux argileux concernés sont altérés (smectites, montmorillonites), plus la mise en solution de la silice et de l'alumine est rapide et les cristallisations importantes (dans la mesure où les quantités de chaux et d'eau libre nécessaires sont disponibles). Il faut toutefois signaler que certains sols, bien que définis comme argileux au sens géotechnique habituel (par la valeur de leur I_p ou de leur VBS), ne donnent pas naissance à des réactions pouzzolaniques (argiles sériciteuses à forte teneur en mica provenant de l'altération des schistes, par exemple). C'est aussi le cas lorsque le sol renferme certains constituants (matières organiques, nitrates, sulfates, etc.).
- **L'état hydrique du sol** : La présence dans le sol d'une quantité d'eau libre suffisante est indispensable pour assurer tout d'abord l'ionisation à pH élevé du milieu nécessaire à la solubilisation, puis l'hydratation de ces composés conduisant à la cimentation des particules granulaires. L'expérience a souvent montré que, sous les climats tempérés, les meilleures conditions de développement des réactions pouzzolaniques étaient observées lorsque l'état du sol avant traitement se trouvait au centre de la plage délimitant l'état « humide » (au sens défini dans la classification NF P 11-300). Les valeurs des performances mécaniques escomptables à long terme des mélanges sol-

chaux sont donc très variables d'un sol à un autre et difficilement évaluables avec précision au stade des études, en raison des délais nécessaires et des conditions d'exécution difficilement prévisibles à ce stade (saison des travaux, techniques et moyens de réalisation, etc.). Par ailleurs, contrairement aux liants hydrauliques, il existe un dosage en chaux maximal (fonction de la quantité maximale de chaux « consommable » par l'argile présente dans le sol) au-delà duquel les performances mécaniques ne peuvent plus croître et risquent même de chuter du fait que la chaux non consommée renforce la sensibilité à l'eau du matériau. Toutefois, sous les climats chauds et humides (tels que les climats tropicaux) et avec des matériaux suffisamment argileux, il est possible, par traitement à la chaux seule, de tirer profit des effets immédiats de la chaux (qui sont indispensables avec ces types de matériaux) et d'atteindre en quelques semaines des niveaux de performances mécaniques comparables à ceux obtenus avec des liants hydrauliques.

4.1.2.2. Action de syntaxie

Cette action 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 (du moins sous les climats français).

4.2 Action des liants hydrauliques

Comme pour la chaux aérienne, on peut distinguer également des actions immédiates et des actions à long terme, mais, avec ces produits, ce sont principalement les modifications à moyen et long terme qui sont recherchées.

4.2.1 Actions immédiates

4.2.1.1 Modification de l'état hydrique

Les actions immédiates portent principalement sur l'état hydrique du sol qui subit un assèchement du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche et, dans une moindre mesure, de la perte d'eau consommée dans l'hydratation du liant. Cet assèchement qui, selon les dosages appliqués, reste théoriquement de l'ordre de 0,3 à 0,5 % de teneur en eau par pourcent de liant, ne prend cependant pas en compte l'évaporation plus ou moins importante pouvant se produire au cours du malaxage sur le chantier.

4.2.1.2 Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

Avec certains liants spéciaux routiers comportant une forte proportion de chaux (vive ou éteinte), il faut également inclure dans les modifications immédiates la floculation des minéraux argileux, comme cela a été décrit pour la chaux (mais sans être ni aussi rapide, ni aussi intense).

4.2.2. Actions à moyen et long terme :

Elles résultent de la prise hydraulique qui confère aux matériaux traités une résistance en traction qui devient alors prédominante dans leur comportement. La valeur de cette résistance peut être choisie dans un domaine extrêmement large en fonction principalement du liant hydraulique et du dosage retenus. On peut considérer, en simplifiant, que la prise hydraulique se développe en trois étapes.

La durée de chacune d'elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange.

- La **première étape** est celle du **démarrage de la prise** (également dénommée : phase dormante). Elle correspond au temps nécessaire à la mise en solution et à la précipitation sous forme de gel des silico-Ferro-aluminates de calcium dans l'eau libre du sol. Ce temps qui correspond au « délai de maniabilité » peut varier entre 2 et 24, voire 48 h après fabrication du mélange. Ce délai est très important dans les opérations de traitement de sols, car il fixe la durée possible des opérations de mise en œuvre.
- La **deuxième étape** correspond au **développement de la cristallisation du gel** et donc de la rigidification du mélange provoquant la prise hydraulique proprement dite. Elle s'étend de quelques jours pour les liants à forte proportion de clinker (ciments de type CPA-CEM I, par exemple) à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains liants spéciaux routiers.
- Enfin, une fois la prise terminée, c'est-à-dire après formation de la quasi-totalité des ferro-silico-aluminates hydratés, il y a une période dite de durcissement qui correspond à la troisième étape durant laquelle on observe une poursuite de la croissance des résistances mécaniques, sa durée peut s'échelonner, toujours suivant la nature des liants et pour les climats tempérés, entre quelques semaines et plusieurs mois.

En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement interviennent pour évaluer, d'une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier) et, d'autre part, les délais d'étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue.

On peut considérer, comme pour la prise d'origine pouzzolanique, que la prise des liants hydrauliques s'interrompt dès que la température du mélange descend en dessous de 5°C, toutefois, étant donné que, pour la plupart de ces liants, la cinétique de prise est beaucoup plus rapide, les sujétions pratiques d'origine climatique sont évidemment moins contraignantes que dans le cas de la chaux. Il convient, néanmoins, de prendre cet aspect en considération, notamment lorsqu'il s'agit d'évaluer la résistance du sol traité à l'âge correspondant à l'apparition probable du gel sur un chantier donné.

La particularité essentielle des liants hydrauliques étant de pouvoir, en jouant sur le liant et le dosage, fabriquer des matériaux dont le niveau de performances (défini généralement par une résistance en traction et un module) correspond au dimensionnement retenu pour l'ouvrage envisagé, il faut tout d'abord rechercher le type de liant adapté à la nature du sol à traiter et aux sujétions de mise en œuvre du chantier et, ensuite, déterminer la valeur du dosage de ce liant à mélanger avec le sol.

Pour ce qui concerne les ciments courants, ci-dessous traduit l'expérience actuelle de l'adéquation de ces produits avec différents sols désignés conformément à la classification NF P 11-300 0.

Quant aux liants spécifiques routiers, les connaissances actuelles ne sont pas encore suffisantes pour considérer l'adaptation d'un liant à un type de sol donné acquise a priori. Avancés produits, une étude spécifique de confirmation est donc, en principe, toujours nécessaire.

Tableau 8 : Adéquation des ciments courants avec différents types de sol

Types de sols	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III CLK-CEM III CLC-CEM V
Sols pas ou peu argileux (Classes A1, B1 à B5, D1)	* (1)	*	*
Sols argileux prétraités à la chaux (Classes A2, A3, B6)	* (1)	*	◇
Sols calcaires et marno-calcaires (Classes R2)	* (1)	*	*
Craies (Classes R1)	* (1)	◇	◇
* Adapté a priori.			
* (1) Adapté a priori mais, en l'absence de retardateur de prise, leur usage est à privilégier pour les travaux en arrière-saison (en raison du faible délai de maniabilité de ces liants).			
◇ Adaptation à confirmer par une étude spécifique.			

Pour ce qui concerne la nature du matériau et ses conditions de mise en œuvre, il faut savoir que :

- plus le sol est argileux, moins en général les résistances sont élevées, compte tenu de la faible proportion d'éléments grenus constituant l'édifice granulaire. En particulier, il n'est pas judicieux d'envisager a priori un traitement des sols des classes A2 et A3, avec un liant hydraulique seul. Toutefois, des liants dégageant une importante quantité de

chaux au cours de la prise (cas du ciment CPA-CEM I, par exemple) ou de liants comportant une forte proportion de chaux ou de clinker peuvent, dans certains cas, s'avérer efficaces sur ces matériaux, car leur phase hydraulique est renforcée par une prise de type pouzzolanique (de la chaux sur les argiles). En fait, la meilleure solution pour ces sols sera souvent de combiner les actions complémentaires de la chaux et du liant hydraulique en réalisant un « traitement mixte » ;

- la présence de constituants, tels que matières organiques, phosphates, nitrates, sulfates, sulfures, etc., induit des risques de réduction voire d'annulation des résistances par absence de prise ou destruction de prise par gonflements ettringitiques;
- plus la masse volumique apparente sèche obtenue après mise en œuvre est élevée, plus la résistance est importante (quelques pour-cent de compacité supplémentaires conduisent, toutes choses égales par ailleurs, à quelques dizaines de pour-cent d'augmentation des résistances). Ceci revient à dire que les matériaux les plus intéressants sont les matériaux permettant les édifices granulaires les plus denses (granularité continue et étalée) et dont la fraction fine se trouve dans un état légèrement « humide » permettant de conserver après traitement un état hydrique « moyen à humide ». En revanche, si le sol traité se trouve dans un état hydrique « sec » et si l'épaisseur de la couche dépasse 0,25 m, l'obtention d'une compacité élevée en fond de couche, comme cela est exigé pour une couche de forme, devient pratiquement impossible, même avec les compacteurs les plus puissants ;
- la transposition au chantier des performances obtenues à l'étude suppose l'obtention d'un mélange dont la qualité se rapproche significativement de celle réalisée en laboratoire.

5. Etude de formulation

Elle a pour objet d'établir, généralement sous forme d'abaques, les règles régissant les dosages à appliquer à un sol (ou une famille de sols situés dans une zone du profil géotechnique donnée), en fonction de l'état hydrique constaté à l'exécution [9]. Le cas échéant, si le contexte géologique laisse apparaître une probabilité significative de présence dans le sol d'éléments perturbateurs tels que : matières organiques, sulfates, nitrates, etc., une vérification de l'aptitude du sol à être traité avec le produit envisagé doit préalablement être réalisée à partir de l'essai décrit dans la norme NF P 94-100 en se limitant à la seule observation des gonflements. L'aptitude du sol au traitement peut être considérée comme acquise si le gonflement volumique reste inférieur ou égal à 10%.

La méthodologie de l'étude de formulation consiste à humidifier la fraction 0/20 mm des échantillons, constitués au cours de l'étude de qualification, à trois teneurs en eau (on retient autant que possible les valeurs extrêmes de la plage des états hydriques prévisibles pour la période d'exécution et la moyenne des valeurs mesurées lors des reconnaissances). Les échantillons ainsi préparés sont mélangés à des dosages croissants de produit de traitement (au moins trois dosages par teneur en eau) choisis dans un domaine économique réaliste (dans le contexte français actuel et pour le cas général où le produit de traitement est de la chaux vive, il est admis de ne pas conduire les études au-delà de dosages de 4 à 5 %). Chaque mélange est ensuite compacté selon les conditions opératoires définies dans la norme NF P 94-093 et on détermine la valeur de l'IPI de chacun d'eux conformément à la norme NF P 94-078. Les valeurs trouvées sont reportées sur des graphes.

Tableau 9 : Tableau des paramètres mesurés au cours d'une étude de formulation

Paramètres		Dosages en chaux (%)				
		0	0,5	1	2	4
W_{nat} du sol 18 %	IPI	3	15	23,5	35,5	27
	$W_{sol\ traité}$ (%)	18,1	17,6	17,1	16,4	14,7
	ρ_d (t/m ³)	1,73	1,73	1,70	1,67	1,57
W_{nat} du sol 20 %	IPI	2	5,5	14	23,5	23,5
	$W_{sol\ traité}$ (%)	19,7	19,6	19,3	18,7	17,4
	ρ_d (t/m ³)	1,67	1,69	1,69	1,68	1,61
W_{nat} du sol 24 %	IPI	0,5	1,5	2,5	5	13
	$W_{sol\ traité}$ (%)	24,1	23,7	23,1	21,7	20,5
	ρ_d (t/m ³)	1,56	1,57	1,59	1,63	1,63

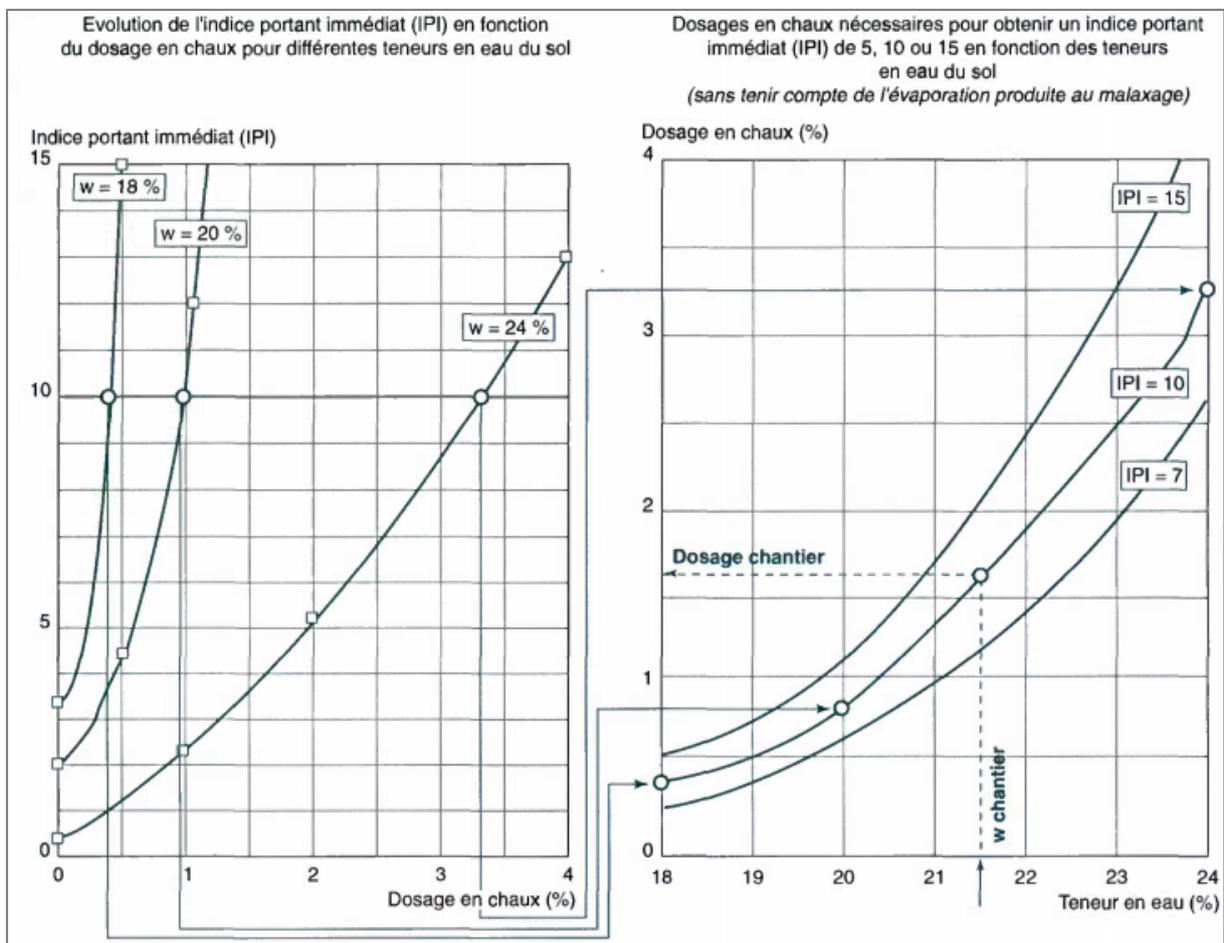


Figure 27 : Exemple de présentation des résultats d'une étude de formulation

6. Caractérisation des sols traités

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 :

Tableau 10 : Objectifs du traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols trop humides en remblai

IPI	Classes de matériaux (selon classification GTR 92)						R ₁₂ ☉	R ₁₃ ☉	F ₂
	A ₁ C ₁ A ₁ C ₂ A ₁ *	A ₂ B ₆ C ₁ A ₂ C ₂ A ₂ * C ₁ B ₆ C ₂ B ₆ R ₃₄	A ₃ C ₁ A ₃ C ₂ A ₃ *	B ₄ C ₁ B ₄ C ₂ B ₄ *	B ₂ B ₅ C ₁ B ₂ C ₂ B ₂ * C ₁ B ₅ C ₂ B ₅ *				
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	

* 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.)

☉ 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

◊ 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 $I_{CBR}/IPI \geq 1$ (cf. § B-2.2.)

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.

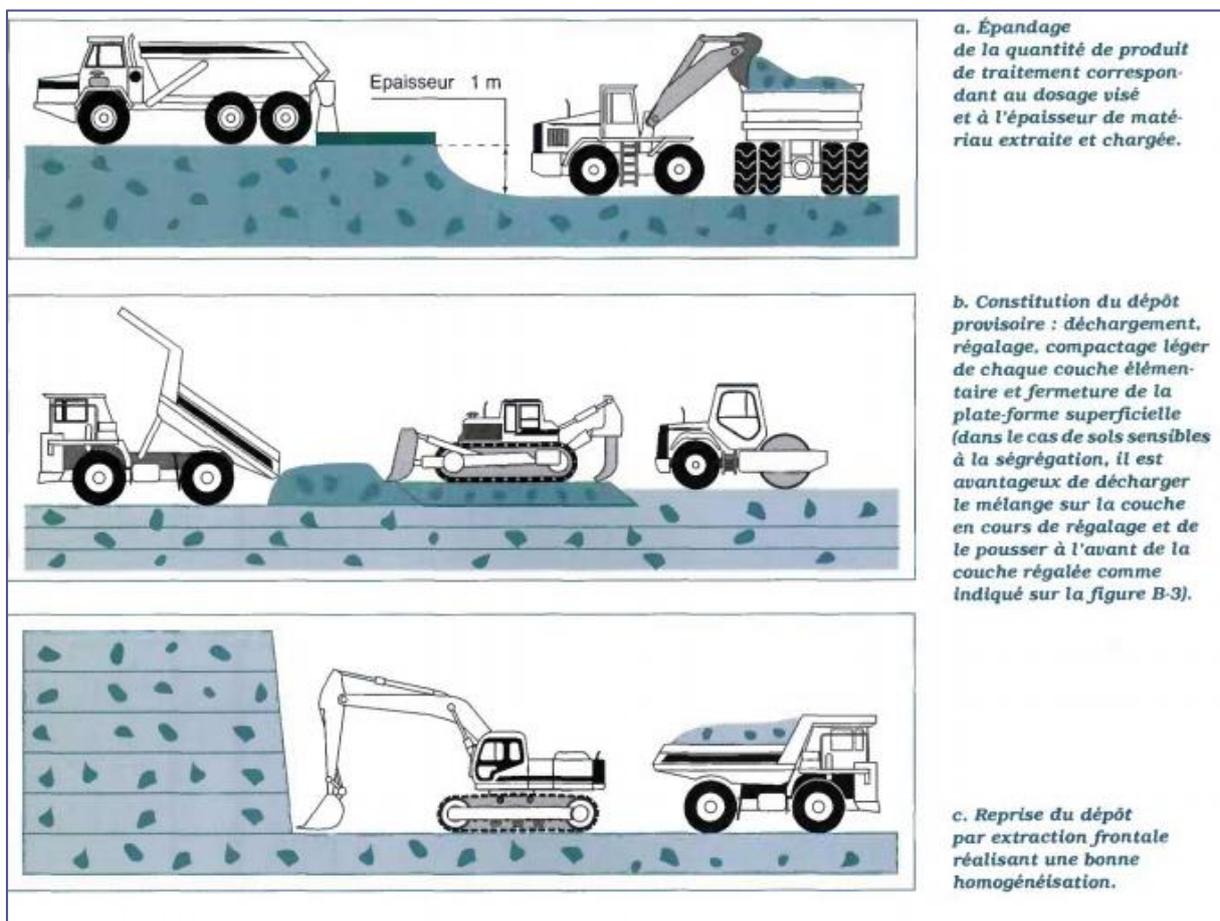


Figure 28 : Schéma de la réalisation du mélange par la technique dite du « dépôt-reprise »

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, régalaage, 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.

8.1. Matériels de stockage des produits de traitement

Les produits de traitement utilisés se présentent quasi exclusivement sous forme pulvérulente et sont livrés en vrac. Exceptionnellement, l'utilisation de chaux ou de ciment, conditionné en sacs de 40 ou 50 kg palettisés, peut être envisagée dans le cas de petits chantiers (inférieurs à 2 000 m², en général). Leur stockage doit alors être réalisé à l'abri des eaux pluviales et de ruissellement. Dans les autres cas, le stockage, dans des silos, des produits de traitement livrés en vrac s'impose pour les deux raisons suivantes :

- nécessité de disposer d'une réserve suffisante de produit de traitement pour absorber les aléas normaux d'approvisionnement du chantier.
- laisser aux produits de traitement, très souvent livrés chauds, un temps de repos permettant leur refroidissement et la neutralisation des charges d'électricité statique, conditions nécessaires à un écoulement stable (non fusant) permettant la réalisation d'un épandage précis.

Exceptionnellement, le stockage peut être évité dans certains contextes de chantiers répondant à des conditions d'organisation particulières, prévoyant, par exemple, une consommation de produit de traitement ajustée au débit de livraison. Dans ces cas, le transporteur peut livrer sur le chantier un conteneur plein et repartir avec un vide. La terminologie relative aux matériels et dispositifs de stockage est définie dans la norme NF P 98-711. Les aspects à considérer dans le choix et l'organisation du stockage des produits de traitement sont :

- La capacité de stockage : Il est souhaitable en général, notamment dans le cas des gros chantiers, de disposer d'une capacité de stockage correspondant à au moins un jour d'activité moyenne de l'atelier de traitement. Les silos habituels ont une capacité variant suivant les modèles entre 25 et 100 tonnes. Dans le cas de traitement mixte, des silos réservés à chaque produit sont évidemment à prévoir.
- La qualité de conservation des produits stockés : Il faut que les silos conservent les produits de traitement à l'abri de l'eau et d'une ventilation permanente pour les protéger de l'hydratation et, dans le cas de la chaux, de la recarbonatation.
- La mobilité : Cet aspect concerne surtout le traitement en place réalisé sur des chantiers linéaires (routes, voies ferrées, etc.), pour lesquels il est impératif de réduire les distances de remplissage des épandeurs



Figure 29 : Silos mobiles de 2 x 45 tonnes

8.2. Matériels d'épandage

Le traitement en place des sols se fait quasiment toujours à l'aide d'épandeurs alimentés avec des produits livrés en vrac. L'épandage « au sac » sur des plateformes préalablement quadrillées, pour délimiter la surface correspondant à la masse de produit contenue dans un sac, est néanmoins acceptable au plan technique, mais ne peut s'envisager économiquement que sur des petits chantiers de géométrie complexe.

8.2.1. Quantité de produit à épandre

Elle est calculée d'après l'expression :

$$Q = e \times \rho_d \times d / (100 - d) \text{ où}$$

e : épaisseur de la couche traitée,

ρ_d : masse volumique apparente sèche du sol en place,

d : dosage recherchée exprimée en %,

Q : masse de produit à épandre.

8.2.2 Les engins d'épandage

Épandeur à doseur volumétrique « horaire » : ce sont les types d'épandeur les plus anciens. Ils délivrent, au moyen d'une trappe ou autre système comparable, une quantité de produit proportionnelle au temps). C'est le conducteur qui règle la masse épandue sur le sol en modifiant la vitesse de l'engin. Ils présentent l'intérêt de pouvoir épandre des masses de produit dans une gamme de valeurs aussi large que voulue (en jouant sur la vitesse d'avancement), ce qui peut s'avérer utile pour traiter des zones ponctuellement très humides, par exemple. Toutefois, en raison de leur faible précision, ces épandeurs ne devraient être admis que sur les chantiers pour lesquels le traitement ne représente qu'un enjeu secondaire ou lorsque le marché a prévu que l'entrepreneur proposerait un prix de matériau mis en œuvre, toutes sujétions comprises.



Figure 30 : Épandeur de première génération

Les épandeurs à doseurs volumétriques asservis à la vitesse de déplacement : Ce sont actuellement les engins les plus répandus. Leurs doseurs sont constitués généralement d'un tambour alvéolaire ou d'un tapis extracteur, dont le débit est asservi à la vitesse de l'engin, ce qui permet l'épandage d'une masse surfacique de produit indépendante de cette vitesse. Leur plage de débit, notamment pour les tambours alvéolaires, est assez limitée, ce qui, dans le cas

de traitement à fort dosage, présente l'inconvénient d'imposer la réalisation de l'épandage par superposition de plusieurs passes.



Figure 31 : Epandeur nouvelle génération

8.3. Matériels de préparation des sols

Certains sols ou matériaux rocheux peuvent nécessiter une préparation avant de procéder à leur traitement, principalement pour les applications autres que la réutilisation en remblai de sols trop humides. Celle-ci peut nécessiter tout ou partie des opérations suivantes.

8.3.1. Décohésion des matériaux en place

Elle est destinée à faciliter l'action des engins de malaxage ou la pénétration de l'eau dans le cas où une humidification s'impose. Dans l'application à la réalisation des remblais, elle peut également s'avérer nécessaire pour des matériaux particuliers comme les craies peu denses, humides voire très humides (R12 et R13 dans les états « h » voire « th »).

Les engins adaptés sont des défonceuses multi-dents (trois au minimum), appelés scarificateurs, décohésionneurs ou décompacteurs de sols, portés par des tracteurs ou des niveleuses. Leur profondeur d'action varie suivant les équipements entre 30 et 70 centimètres.

8.3.2. Elimination des éléments blocailloux

Cette opération concerne essentiellement les applications du traitement en couche de forme qui exigent un malaxage dans une centrale ou à l'aide de pulvérisateurs de sols à arbre horizontal n'admettant pas de blocs dont le D_{max} est supérieur ou égal à 100 mm en général. Dans le cas de l'application à la réutilisation en remblai des sols trop humides, c'est davantage la méthode de malaxage qui doit être adaptée à la granularité du matériau

8.4. Matériels de malaxage des sols en place

Ils sont constitués principalement par deux familles d'engins.

- les malaxeurs à outils fixes, représentés par les charrues et, éventuellement, les engins à lame (niveleuses, boteurs équipés de lames traditionnelles ou de lames spécialement conçues pour cet usage, etc.) ;
- les malaxeurs à outils animés, représentés par les pulvérisateurs de sols (dénommés pulvi-mixers dans le passé) et les bêches mécaniques et, dans une certaine mesure, les décapeuses élévatoires (ou auto-chargeuses).



Figure 32 : Charrues à disques de 5 tonnes

8.5. Matériels d'arrosage

Ces matériels ne sont concernés que par les applications du traitement autres que la réutilisation en remblai des sols trop humides, mais, pour ces applications, leur action est souvent déterminante pour le succès de la technique. Ils sont constitués par des engins de conception très variable, souvent issus du machinisme agricole ou fabriqués dans les ateliers des entreprises, mais qui, le plus souvent, ne permettent pas de réaliser la maîtrise des ajustements de l'état hydrique avec la précision souhaitable (ou du moins cohérente avec celle déjà atteinte par les épandeurs et les pulvérisateurs de sols).

Par ailleurs, il faut insister sur la nécessité, pour chaque chantier, de vérifier l'ajustement des moyens d'arrosage aux besoins prévisibles, car l'expérience a montré que l'importance de cette opération n'était souvent pas comprise et qu'elle avait tendance à être négligée.



Figure 33 : Arroseuse à précision non suffisante

8.6. Matériels de compactage

Le compactage des sols traités ne fait pas appel à des engins spécialisés. Les différentes familles d'engins considérées ici sont :

- les compacteurs à pneus : Pi
- les compacteurs vibrants à cylindres lisses : Vi
- les compacteurs vibrants à pieds dameurs : VPi
- les compacteurs statiques à pieds dameurs : SPi
- les plaques vibrantes : PQi

8.6.1. - Les compacteurs à pneus (Pi).

Le classement est fait selon la charge par roue CR :

P1 : CR entre 25 et 40 kN

P2 : CR entre 40 et 60 kN

P3 : CR supérieure à 60 kN



Figure 34 : compacteur lourd à pneus de la classe P3

8.6.2. Les compacteurs vibrants à cylindres lisses (Vi)

- **Monocylindres**



Figure 35 : Un compacteur vibrant monocylindre lisse

- Tandems



Figure 36 : Un compacteur vibrant tandem-transversal

8.6.3. Les compacteurs mixtes

Ils sont constitués d'un cylindre vibrant et d'un train de pneus dont le nombre peut être considéré comme suffisant pour contribuer au compactage en recouvrant l'ensemble de la largeur de génératrice du cylindre (intervalle entre surfaces de contact \leq largeur d'un pneu).



Figure 37 : compacteur mixte

8.6.4. Les compacteurs vibrants à pieds dameurs (VPi)

Ce sont généralement des versions dérivées des compacteurs vibrants à cylindres lisses. On distingue : les VP1, VP2, VP3, VP4, VP5.



Figure 38 : compacteur vibrant à pieds dameurs de la classe VP1

8.7.4 Les compacteurs statiques à pieds dameurs (SPi)

Le classement est fait selon la charge statique moyenne par unité de largeur du ou des cylindres à pieds (M1/L).

SP1 : M1/L entre 30 et 60 kg/cm

SP2 : M1/L supérieur à 60 kg/cm et inférieur à 90 kg/cm

Pour les compacteurs avec lestage possible, le classement est celui correspondant à la situation rentrée sur chantier.



Figure 39 : Un compacteur statique à pieds dameurs de la classe SP1.

La vitesse maximale possible est à utiliser : en particulier, la fin du compactage doit pouvoir être effectuée à une vitesse de 10 à 12 km/h. Les premières passes ont généralement une vitesse nettement plus réduite, sans devenir inférieure à 2 à 3 km/h.

Pour les compacteurs équipés d'une lame, la part de temps consacrée au poussage et au réglage des sols n'est pas prise en compte dans le compactage.

Au cas où la vitesse moyenne observée sur chantier (qui ne devrait pas être en dessous de 6 km/h) est inférieure à la vitesse moyenne lue dans les tableaux de compactage, il convient d'en tenir compte pour réévaluer le débit.

Les compacteurs tandems (cas fréquents) ont le même Q/S et le même nombre d'applications de charge que les monocylindres (valeurs des tableaux). Le nombre de passes est à diviser par deux.

8.6.5 - Les plaques vibrantes (PQi)

L'ensemble des plaques est classé PQ1 à PQ4 dans la Note Technique pour le compactage des remblais de tranchées (SETRA-LCPC).

Elles sont classées à partir de la pression statique sous la semelle Mg/S exprimée en kPa (Mg représente le poids de la plaque).

Les plus petites plaques (PQ1 - PQ2) ne sont pas prises en compte. Celles considérées ici sont

- PQ3 : Mg/S entre 10 et 15 kPa
- PQ4 : Mg/S supérieur à 15 kPa

S est la surface de contact plaque/sol et non la surface hors tout. Pour les modèles équipés d'élargisseurs, S varie et il convient d'en tenir compte pour la classification qui peut alors changer.

CHAPITRE I
V

PARTIE
EXPERIMENTAL
E

CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE

1. Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats du travail que nous avons effectué en laboratoire. Notre travail consiste à effectuer des essais d'identification sur le sol qui a fait l'objet de notre étude, en l'occurrence un sol fin. Les essais d'identification nous ont ensuite permis de classer notre sol et choisir des dosages de produits de traitement pour ce sol. Enfin, nous avons observé les variations de l'indice portant immédiat pour différents dosages ainsi que la variation des paramètres de stabilité de talus et le tassement du sol entre le sol fin non traité et le sol fin traité.

2. Objectifs

L'objectif de cette partie expérimentale est d'étudier le comportement mécanique et géotechnique d'un sol fin ayant subi un traitement mixte chaux-ciment et le comparer avec le sol à son état initial. Nous avons entre autre :

- observé la variation de l'indice portant immédiat (IPI) suite à un traitement mixte chaux-ciment en fonction des dosages choisis et en fonction du temps,
- observé l'effet du traitement mixte chaux-ciment sur le tassement du corps du remblai constitué d'un sol fin traité,
- fait une comparaison entre la stabilité des talus de remblai constitué de sol fin à l'état naturel et celle des talus de remblai constitué de sols fins ayant subi un traitement mixte chaux-ciment.

3. Démarche expérimentale mise en place

Pour atteindre ces objectifs, nous avons mis en place une démarche expérimentale articulée sur des essais de laboratoire réalisés sur un sol fin de 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 pour les remblais routiers.

Dans un premier temps, nous avons effectué des recherches des différents matériaux fins disponibles au voisinage près de la ville de Guelma. Ces recherches ont permis d'aboutir à localiser un sol fin dans la zone sud de la ville sur un chantier en cours (travaux de terrassement pour réaliser des maisons d'habitation dans le pôle sud). Puis, nous avons effectué un prélèvement de près de 200 kg de matériau et nous sommes passés aux essais d'identification afin de confirmer la classe de matériaux que nous avons ciblé c'est-à-dire un sol fin.

Dans un second temps, nous avons effectué des essais de performances mécaniques pour ce sol notamment la détermination de l'IPI avant et après traitement. Le choix a été opté pour un traitement mixte chaux-ciment car c'est la solution la mieux adaptée pour ce type de sol d'après

la littérature le GTS. Nous avons donc choisi d'une part différents dosages pour observer l'évolution de l'IPI en fonction de ces dosages, et d'autre part différentes périodes de cure pour observer l'évolution de l'IPI en fonction du temps (période de mise en circulation).

Notre travail s'est poursuivi par l'étude du tassement de notre sol fin à l'état naturel et après traitement. Pour se faire, nous avons réalisé des essais œdométriques grâce auxquelles nous avons obtenu la courbe de compressibilité et la courbe de consolidation.

Pour finir, nous avons étudié la stabilité des talus de remblai constitué de sol fin avant et après traitement à travers la détermination de la cohésion et de l'angle de frottement interne. Ces paramètres ont été déterminés à partir des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande.

Il faut préciser que le dosage optimal obtenu lors des essais IPI après traitement, a été retenu pour effectuer les essais œdométriques ainsi que les essais de cisaillement.

4. Localisation du lieu de prélèvement

Les prélèvements d'échantillons de sol ont été effectués à l'aide d'une pelle et une pioche sur la route de Ben Djerrah à 700 mètres environ de la faculté centrale de l'Université 08 Mai 1945 de Guelma (voir figure ci-dessous). Cette zone est caractérisée par une dominance des formations marno-calcaire renfermant des sols argileux aux caractéristiques géotechniques médiocres. Nous avons pris des échantillons d'argile le plus homogène possible en éliminant les gros éléments rocheux.

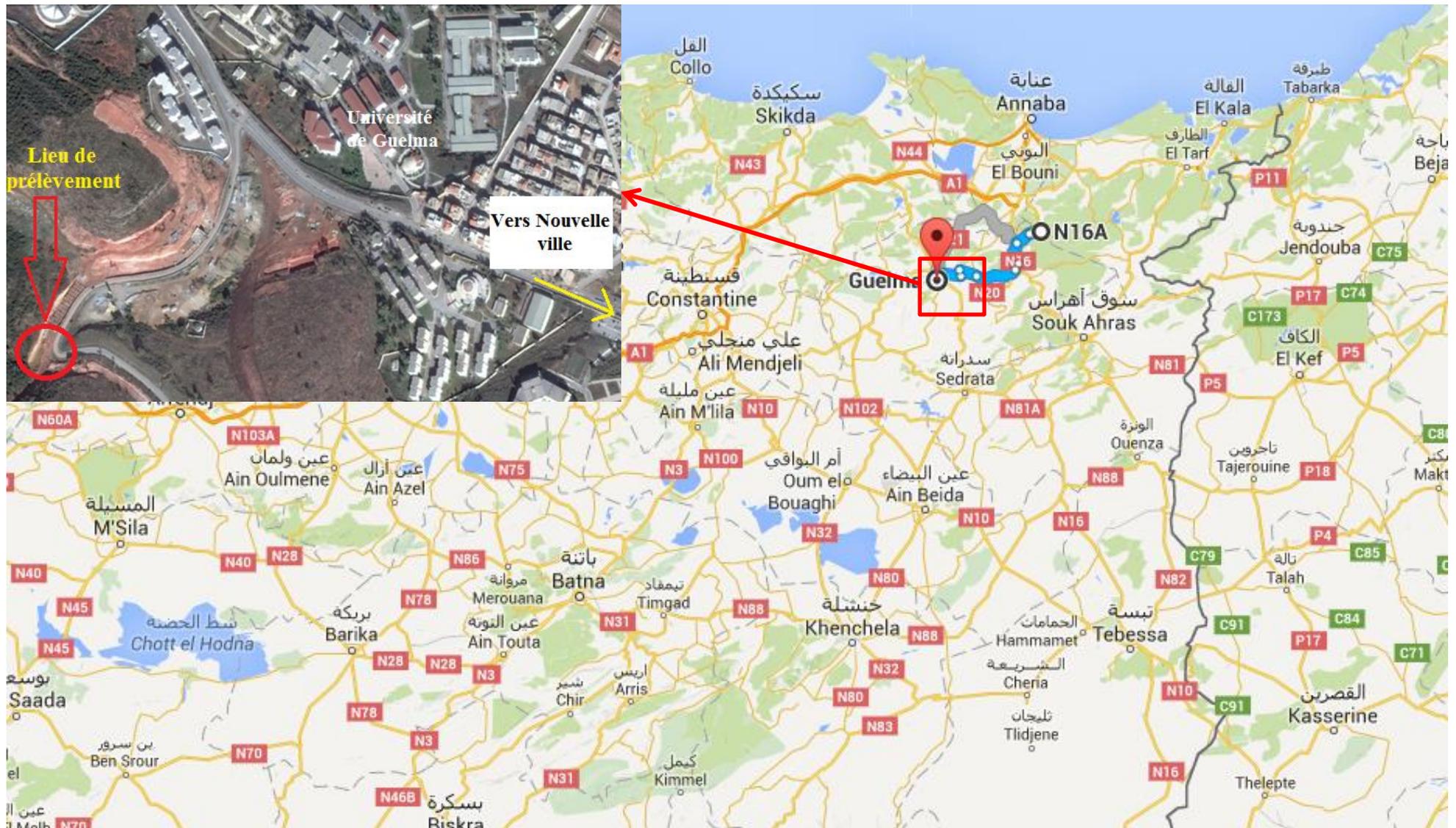


Figure 40: Localisation du lieu de prélèvement

5. Essais d'identification et classification selon le GTR

5.1. Essais d'identification

5.1.1. Granularité

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 80µm 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 80µm 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 sont synthétisés dans les tableaux et la figure ci-dessous.

Tableau 11 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage

Taille particules (mm)	0,080	0,09	0,125	0,18	0,25	0,355	0,5	0,71	1
Passants (%)	75,00	75,29	76,19	77,91	79,32	80,79	81,92	82,96	84,00
Taille particules (mm)	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11,2	20	30
Passants (%)	85,18	86,83	88,86	90,88	93,23	95,32	97,35	98,42	100

Tableau 12 : Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Diamètre (µm)	80	30,48	22,15	15,64	7,03	4,97	3,53	2,51	1,78	1,04	0,4
Passants (%)	75,00	71,65	70,16	68,68	67,19	65,70	64,22	62,73	61,24	55,30	43,41

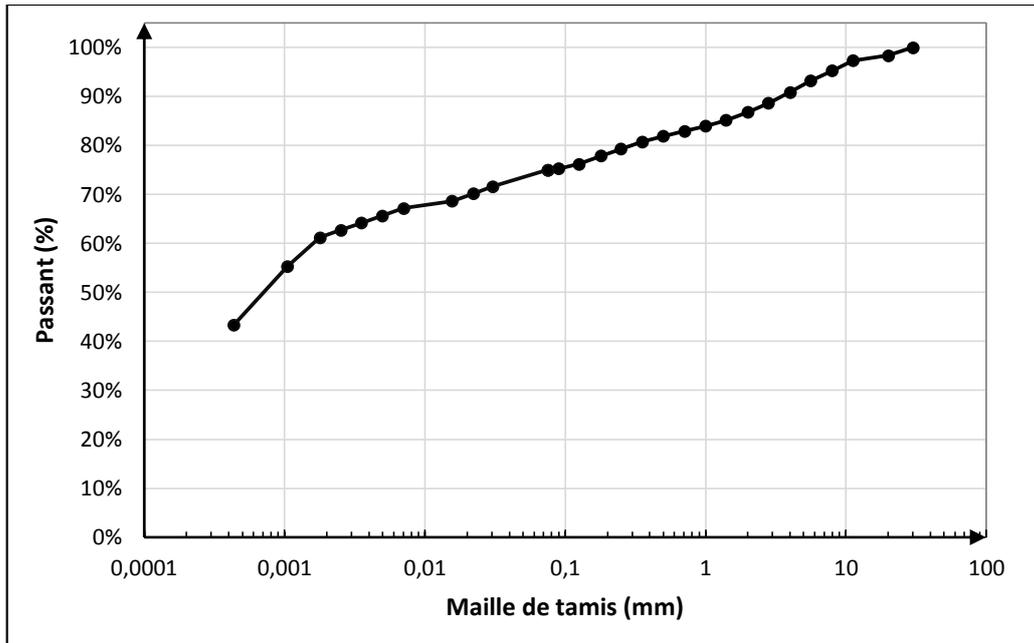


Figure 41 : Courbe granulométrique

Tableau 13 : Tableau récapitulatif de l'analyse granulométrique

Dmax (mm)	% Passants < 80µm
25	75

5.1.2. Activité argileuse par l'essai VBS

Le principe de cet essai repose sur la capacité particulière qu'a la molécule de bleu d'être adsorbée à la surface des particules, celle-ci pouvant varier de 0,3m².g⁻¹ pour des fines inertes à plus de 400m².g⁻¹ pour la montmorillonite. La surface spécifique des argiles étant 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 activité argileuse. L'activité argileuse permet en outre d'évaluer le risque de retrait/gonflement des argiles en fonction des variations hydriques du milieu. L'essai se fait selon la norme NF P 94-068.



Figure 42: dispositif pour l'essai VBS

Le dosage de bleu s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

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

Tableau 14 : Tableau récapitulatif de l'essai VBS

Poids sol (g)	31
Fraction 0/5 (mm)	92,34%
Volume bleu (cm ³)	122
Masse bleu (g)	1,22
Correction	0,92
VBS	3,63

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times C \times 100 = \frac{1,22}{31} \times 0,92 \times 100$$

Donc **VBS = 3,63**

5.1.3. Argilosité par l'essai limites d'Atterberg

L'indice de plasticité I_P se calcule à partir des limites d'Atterberg sur la fraction 0/400 μ m d'un sol. Ce sont des teneurs en eau pondérale (exprimées en %) correspondant à des transitions particulières de la consistance du sol :

- La teneur en eau pour laquelle s'effectue le passage de l'état plastique à l'état liquide est appelé limite de liquidité w_L .

- La teneur en eau pour laquelle s'effectue le passage de l'état solide à l'état plastique est appelé limite de plasticité w_P ;

Nous avons déterminé la limite de liquidité par l'essai au cône de pénétration (NF P94-052-1). Cet essai consiste à mesurer, après un temps fixé, l'enfoncement d'un cône, sous son propre poids, dans un échantillon de sol remanié. Il est réalisé sur la fraction passant au travers du tamis d'ouverture $400\mu\text{m}$.



Figure 43 : Photo du cône de pénétration

Tableau 15 : Tableau des résultats de l'essai au cône de pénétration

Pénétration	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Poids Tare (g)	Teneur en eau (%)
18	33	27,53	14,5	41,98
21,8	32	26,57	14	43,20
15,3	21,5	18,6	10,78	37,08
17,1	33	26,74	11	39,77

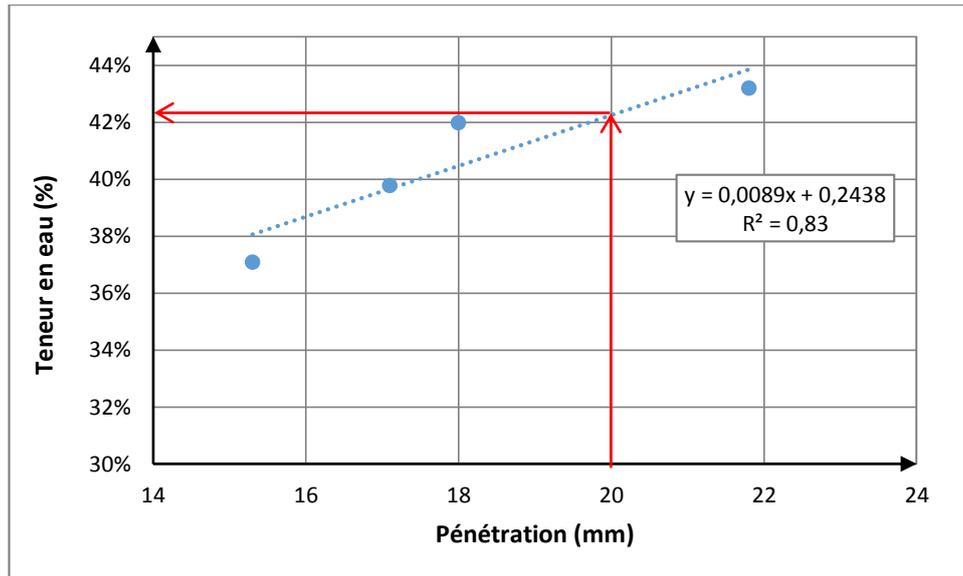


Figure 44 : Limite de liquidité, graphe teneur en eau - pénétration

La limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à une pénétration de 20mm qui est égale à $w_L = 42,18\%$.

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 $400\mu\text{m}$.

Tableau 16 : Résultats Limite de plasticité

Poids humide (g)	Poids sec (g)	Poids tare (g)	w (%)
75	65	14	19,61%
79	68	14,5	20,56%
95	82,55	10,78	17,35%

Une moyenne des trois teneurs en eau nous donne : $w_p = 19,17$.

$$I_p = w_L - w_p = 23.$$

5.2. Classification du matériau selon le GTR

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

$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$
 $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \rightarrow \text{Sol de classe A.}$
 $\text{Tamisât à } 75 \text{ mm} = 75\%$

VBS = 3,63
 Ip = 23
 } → Sous classe **A2**

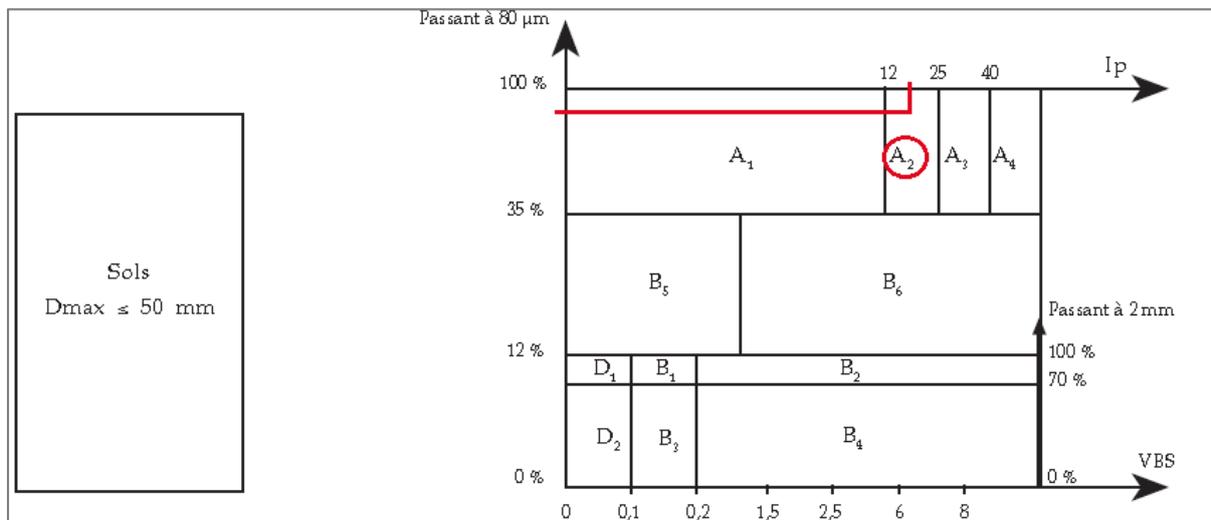


Figure 45 : Classification de notre sol à partir du GTR

La classe **A2** est un sol argileux avec un caractère moyen qui se prête à l'emploi dans les remblais routiers de la plus large gamme d'outils de terrassement si la teneur en eau n'est pas trop élevée.

6. Paramètres optimaux de compactage et Portance immédiate avant traitement

Une fois les essais d'identification et la classification effectués, la série d'essais se poursuit avec :

- la détermination des paramètres optimaux de compactage (essai Proctor) selon la norme NF P 94-093 et,
- la détermination de l'indice portant immédiat (IPI) selon la norme NF P94-078.

Le principe de l'essai Proctor consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une dame normalisée, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

En ce qui concerne l'IPI, le principe de l'essai consiste à mesurer les forces appliquées sur un piston cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoquées deux enfoncements conventionnels (2,5 mm et 5mm) sont rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements (13,35 kN et 19,93 kN).

Etant donné que nous avons à déterminer les paramètres optimaux de compactage en même temps que l'IPI, nous avons donc confectionné dans un premier temps les moules pour la détermination des paramètres optimaux de compactage et ces moules ont été passé ensuite à la presse CBR sans le disque de surcharge pour la détermination de l'IPI. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 17: Résultats Proctor et IPI

Moule	Teneur en eau (%)	Masse Sol+Moule (kg)	Masse humide du sol (kg)	Masse sèche (kg)	ρ_d (t/m ³)	IPI
1	8	15,97	4,03	3,731	1,458	15,37
2	12	16,20	4,26	3,804	1,487	24,67
3	17,2	16,71	4,77	4,070	1,591	14,26
4	19,6	16,91	4,97	4,157	1,625	9,83
5	25	16,90	4,96	3,968	1,551	1,54
6	30	16,88	4,94	3,8	1,485	0,73

A partir de ces résultats, nous avons obtenu les courbes suivantes :

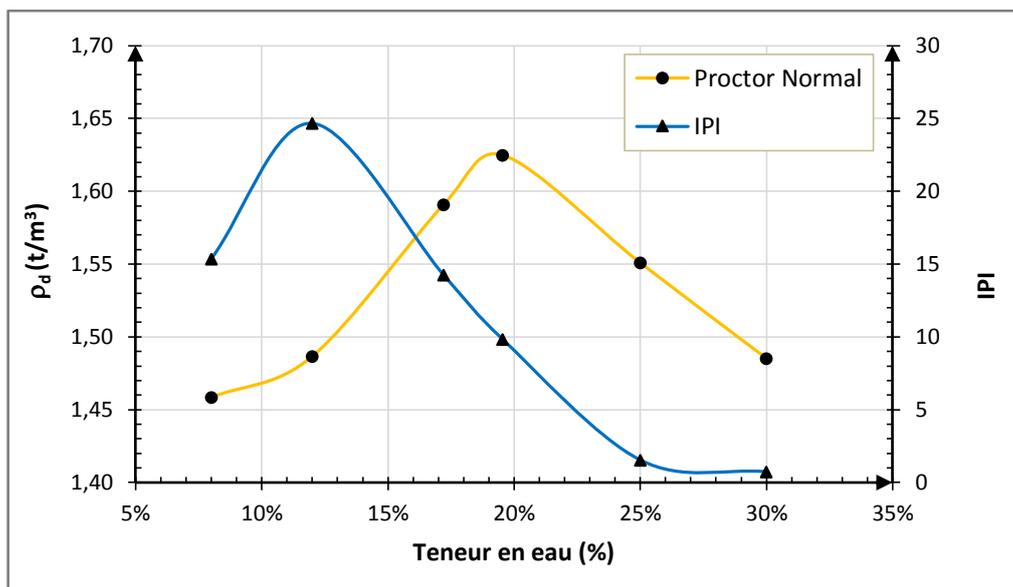


Figure 46: Courbes Proctor et IPI



Figure 47 : Photos des essais Proctor et IPI

A partir de cette courbe nous obtenons les paramètres optimaux de compactage de notre sol, et l'IPI en fonction des différentes teneurs en eau ainsi que les plages de teneur en eau caractérisant son état hydrique. On obtient une densité à l'optimum Proctor normal de $1,63\text{t/m}^3$ pour une teneur en de **19%**.

A partir de **20,9%** notre sol est caractérisé d'humide ($1,1w_{\text{opt}} \leq w_n \leq 1,3 w_{\text{opt}}$ ou $2 < \text{IPI} \leq 5$) à **très humide** ($\text{IPI} \leq 2$) suivant les tableaux de classification du GTR et nous remarquons que notre sol a une très faible portance dans la plage de teneur en eau le caractérisant d'humide ou de très humide. L'IPI est de 1,5 pour une teneur en eau de 25% et de 0,7 pour une teneur en eau de 30%, le seuil étant de 5 (seuil acceptable recommandé par le GTS). C'est donc pour cette plage de teneur en eau (sol en état humide ou très humide) que le traitement est requis.

En résumé, à partir des différents essais nous avons pu arriver au fait que nous sommes en présence d'un sol **A2** selon la classification GTR. Ce sol est dans un état humide pour une teneur en eau entre 21 et 25% à trait humide au-delà d'une teneur en eau de 25%. Nous avons choisi pour la suite de notre étude expérimentale d'appliquer un traitement à une teneur en eau de **28%** (état très humide).

7. Portance immédiate après traitement

7.1. Produits de traitement utilisés

7.1.1. La chaux vive

La chaux utilisée est une chaux vive disponible dans le marché des produits de construction. Elle est fabriquée par une société activant dans la wilaya de Annaba. Cette chaux est sous forme granulée (voir figure ci-dessous). Nous l'avons donc concassé manuellement en poudre pour pouvoir l'incorporer au sein de notre sol. Selon l'annexe 1 du GTS, la répartition granulométrique de la chaux doit satisfaire aux conditions suivantes :

- passant à 0,08 mm : > 50 %,
- passant à 0,2 mm : > 80 %,
- passant à 2 mm : 100%.



Figure 48: Photos montrant l'application de la chaux vive pour le traitement

7.1.2. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment CEM II/B-M de classe de résistance 32,5. C'. Il est constitué de clinker, de laitier granulé (environ 17 %), de calcaire à faible teneur en TOC (environ 11 %) et d'anhydrite naturelle comme retardateur. Ce ciment est broyé à une finesse modérée, il est multi-usages destiné à être utilisé sur chantier (livré en sacs).



Figure 49: Photo montrant l'application du ciment pour le traitement

7.2. Choix des dosages

Pour le choix des dosages, nous avons pris en compte quelques recommandations du GTS qui stipule par exemple qu'il ne faut pas dépasser 4% de chaux et nous sommes basés sur quelques travaux antérieurs. Nous avons choisi 4 différents dosages pour notre traitement mixte chaux-ciment à savoir :

- 1% de chaux + 3% de ciment
- 1% de chaux + 4% de ciment
- 2% de chaux + 3% de ciment
- 2% de chaux + 4% de ciment

7.3. Protocole adoptée

Pour l'application du traitement à notre sol, le matériau est d'abord mis à l'étuve pendant une période de 24 heures. Une fois sortie de l'étuve, nous lui donnons la teneur en eau souhaitée c'est-à-dire 28%. Juste après ça, la chaux auparavant concassée est répartie sur notre matériau selon le dosage choisi puis malaxée jusqu'à obtention d'un mélange homogène. Le mélange est mis à l'abri de l'air ambiant afin d'éviter la diminution de la teneur en eau dont il peut être la cause. Une heure de temps après le ciment est à son tour mélangé avec notre sol selon le dosage choisi puis mis de nouveau à l'abri de l'air ambiant cette fois-ci pour une période de 15 minutes. Ces délais d'attente sont fournis dans la norme NF P 94 – 093. Une fois cela fait, nous passons à la confection des éprouvettes par compactage à l'énergie Proctor normal dans un moule CBR. Pour chacun des dosages, nous avons trois différentes périodes de cure à savoir 24 heures, 3 jours et 8 jours. Les éprouvettes sont donc poinçonnées après les différentes périodes de cure.

7.4. Résultats obtenus

Les résultats de l'IPI obtenus pour différents dosages après 24h, 3 jours et 8 jours de temps de cure sont présentés dans la figure ci-dessous.

Ces résultats montrent qu'il y a une amélioration rapide des caractéristiques mécaniques du sol (portance immédiate) avec l'augmentation des dosages avec une croissance plus au moins stabilisée pour le dernier dosage.

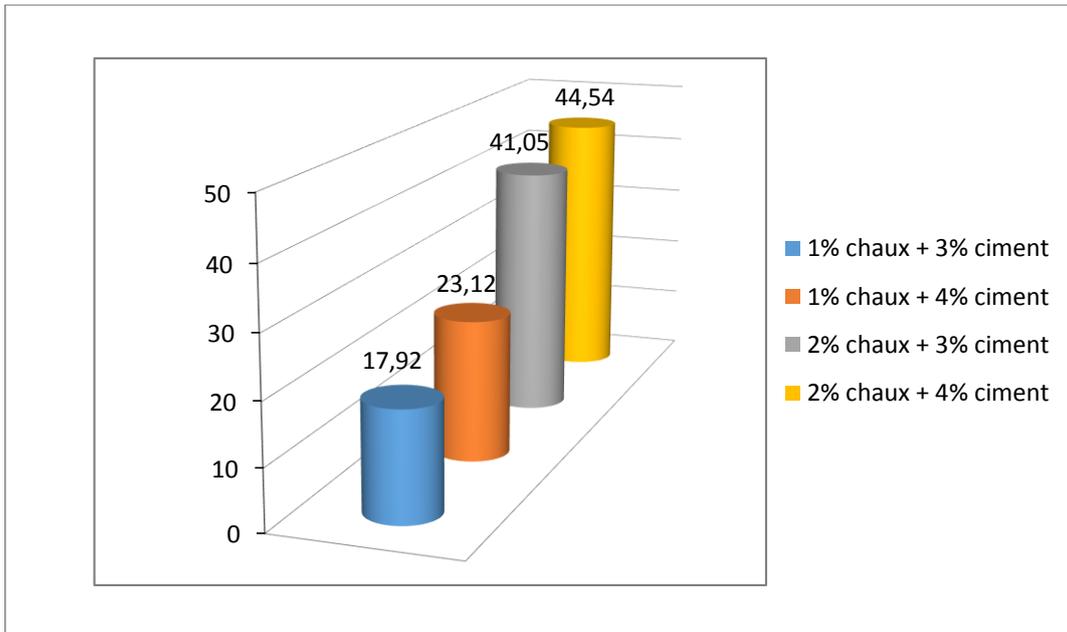


Figure 50: Valeurs de l'IPI en fonction des différents dosages après 24h

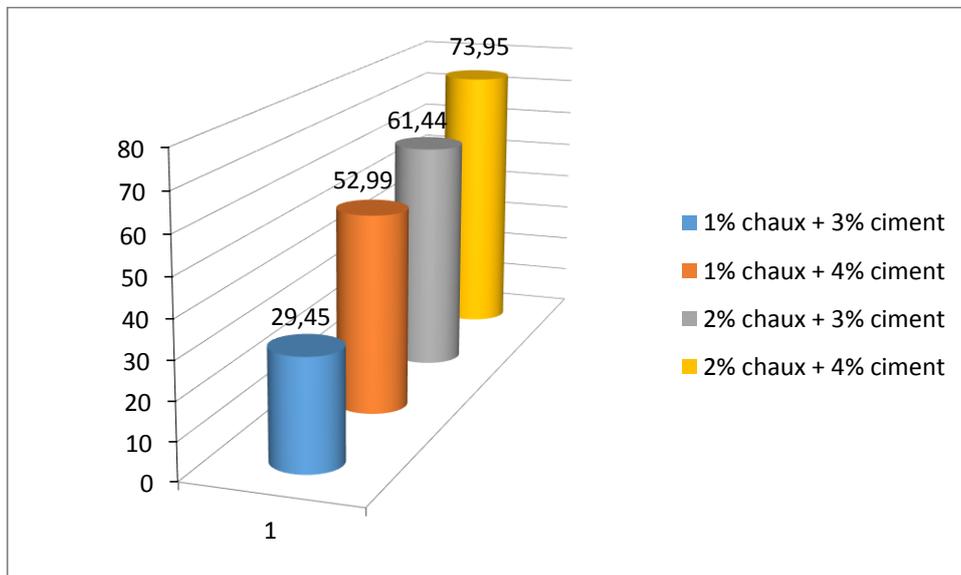


Figure 51 : Valeurs de l'IPI en fonction des différents dosages après 3 jours

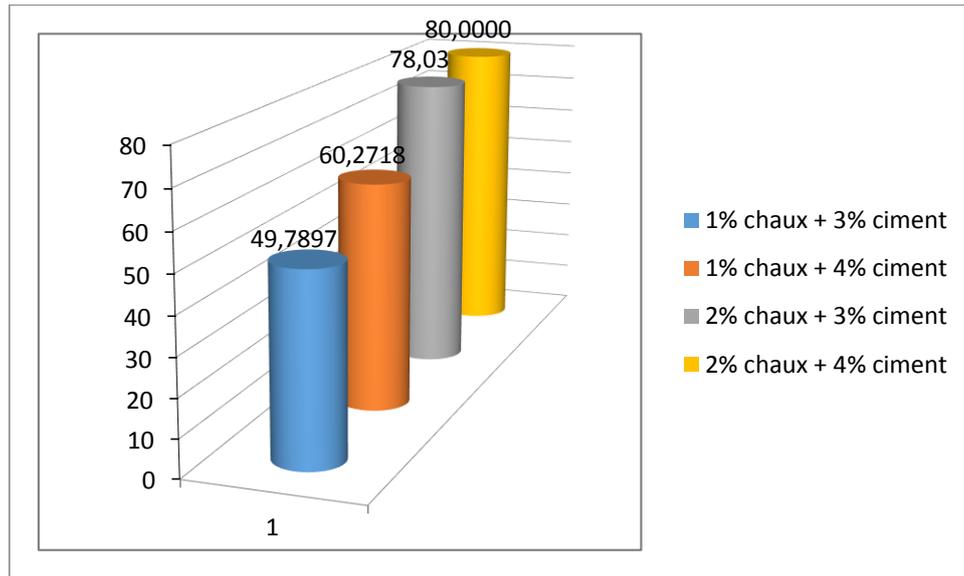


Figure 52 : Valeurs de l'IPI en fonction des différents dosages après 8 jours

En ce qui concerne le suivi de l'évolution de l'IPI dans le temps pour différents dosages, les résultats obtenus sont synthétisés dans la figure ci-dessous.

Ces résultats montrent l'influence de la période de cure sur le traitement.

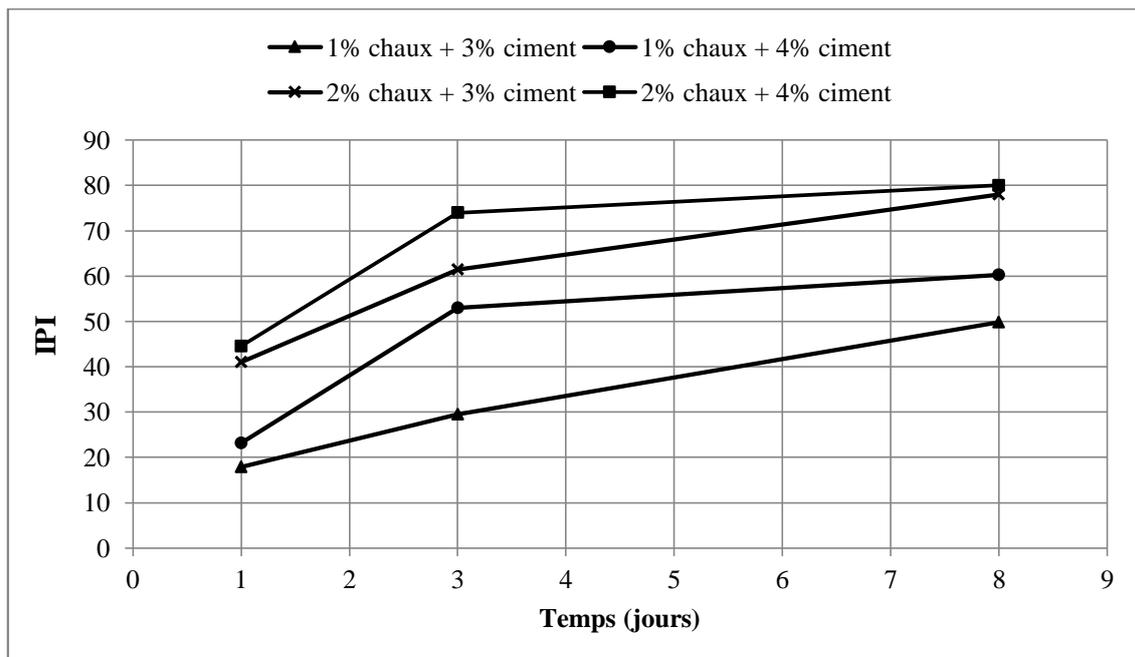


Figure 53: Graphe IPI en fonction de la période de cure

8. Tassement des remblais constitués de matériaux fins

8.1. Essai effectué : Essai œdométrique

Pour étudier le tassement de notre sol constitué de matériaux fins, nous avons réalisé l'essai œdométrique selon la norme XP P-94-090-1.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers de 24h maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

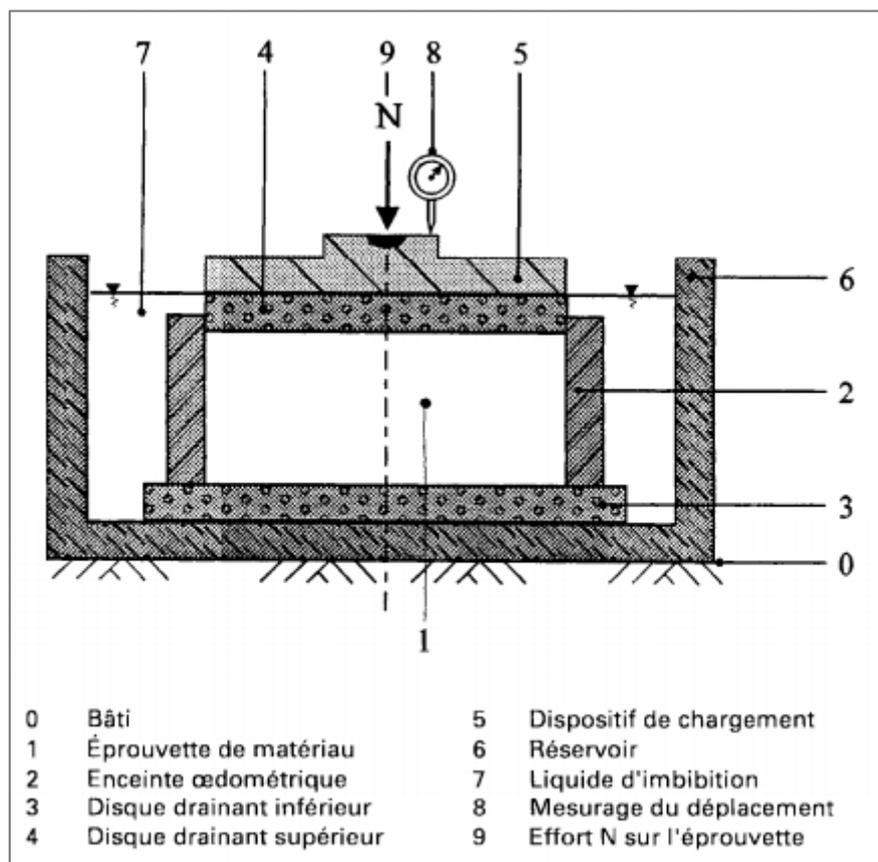


Figure 54 : Principe de l'œdomètre

8.2. Protocole adopté

Pour la réalisation de l'essai, un problème se posait au niveau de la confection de l'échantillon. Dans le cas où un sondage géotechnique a été effectué, la bague de l'œdomètre est insérée dans la partie de sol se trouvant dans le carottier. Pour notre étude, nous travaillons en laboratoire sur notre matériau et la bague de l'œdomètre ne pouvait donc plus être insérée dans notre sol à l'état naturel. Il fallait donc trouver pour chaque éprouvette soumise à l'essai œdométrique, le même degré de compactage afin d'avoir le même indice des vides initial. Pour se faire nous

avons donc au préalable réalisé un compactage à l'énergie Proctor Normal dans un moule Proctor à une même teneur en eau pour toutes les éprouvettes. L'échantillon a été extrait à l'aide d'un extracteur pour conserver la forme de l'éprouvette puis nous avons inséré la bague de l'œdomètre dans l'échantillon de sol compacté (photos ci-dessous). Dans le cas de l'échantillon traité, nous avons humidifié notre sol la même teneur en eau que précédemment (28%) puis nous avons appliqué le traitement mixte chaux+ciment et compacté à l'énergie Proctor Normal. L'étape d'après est l'extraction de l'échantillon de sol compacté puis insérer la bague pour ressortir l'échantillon final. Une fois terminé, l'échantillon est passé à l'œdomètre.



Figure 55: Photos représentant la confection de l'éprouvette pour l'essai œdométrique

8.3. Résultats de l'essai et courbes de compressibilité

Les résultats de l'essai sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 18: Résultats de l'essai œdométrique

σ (kPa)	50	100	200	400	800	1600	3200	800	100
Avant traitement									
Tassement final (mm)	0,271	0,59	0,99	1,67	2,275	2,875	3,535	3,281	2,66
e	0,559	0,533	0,502	0,448	0,400	0,353	0,301	0,321	0,370
Après traitement									
Tassement final (mm)	0,03	0,07	0,15	0,23	0,33	0,53	0,85	-	0,71
e	0,578	0,574	0,568	0,561	0,553	0,537	0,511	-	0,522

A partir de ces résultats, nous obtenons les courbes de compressibilité suivantes :

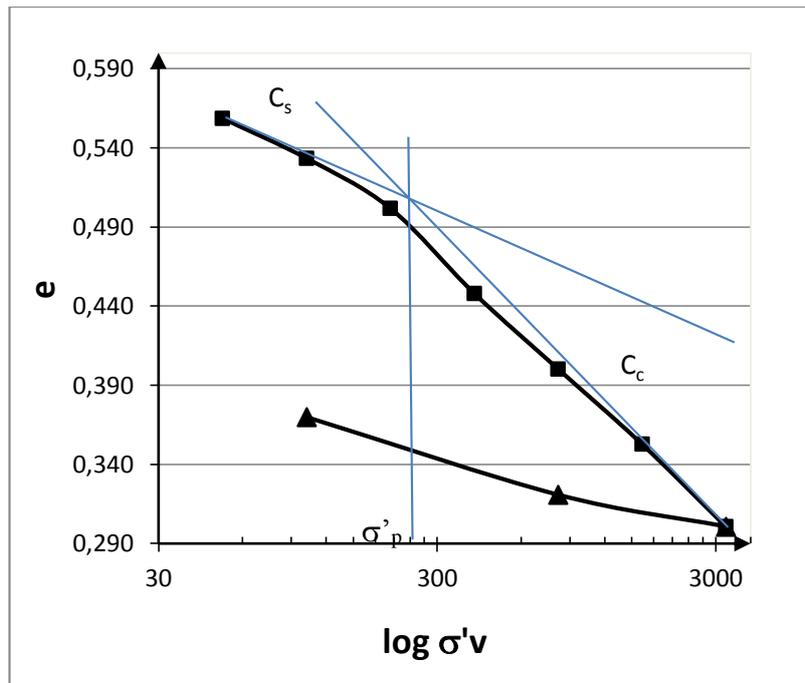


Figure 56 : Courbe œdométrique du sol naturel avant traitement

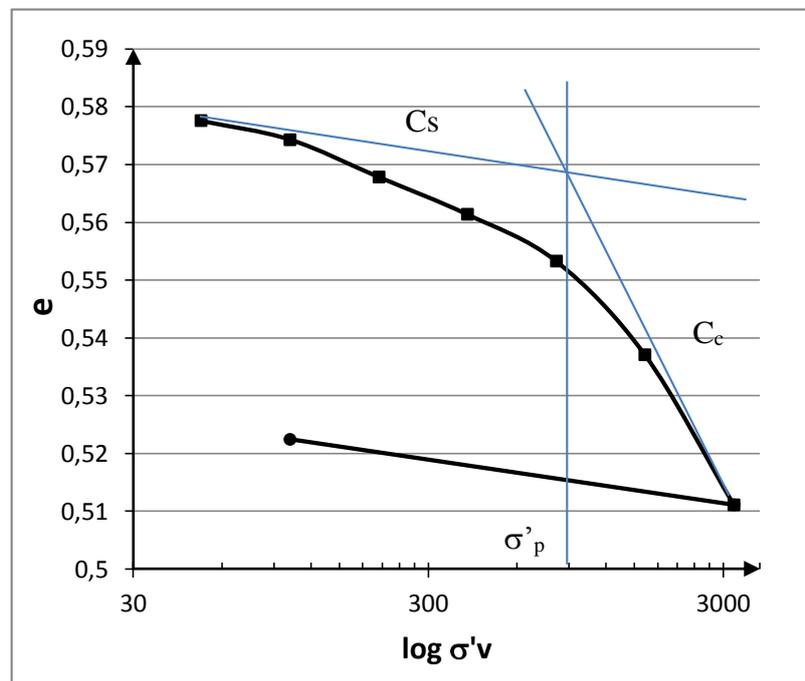


Figure 57 : Courbe œdométrique du sol après traitement

A partir de ces résultats nous remarquons que le tassement final cumulé pour la charge la plus grande (3200 kPa) a atteint environ 3,54mm pour le sol naturel alors que le tassement pour le sol traité à la même charge est d'environ 0,85mm. Cela montre une meilleure capacité du sol fin traité à résister aux tassements dû à la solidification du squelette solide du matériau suite au traitement avec les liants hydrauliques (Chaux+ciment).

A partir de ces mêmes courbes, nous avons pu ressortir les paramètres de la courbe de compressibilité œdométrique (tableau ci-dessous).

Tableau 19 : Paramètres de la courbe de compressibilité œdométrique

Paramètres	Indice de gonflement Cs	Indice de compression Cc	Pression de préconsolidation σ_p'
Avant traitement	0,083	0,173	100 kPa
Après traitement	0,010	0,086	500 kPa

Nous remarquons que l'indice de gonflement est 8 fois plus faible pour le sol traité que le sol naturel, ce qui confirme l'action du traitement sur la réduction du gonflement des matériaux fins. Concernant l'indice de compression, il y a un rapport de 2 entre le sol traité et naturel ce qui montre la capacité du sol traité à résister à la compression suite à l'action des produits de traitement.

9. Paramètres de stabilité des talus de remblais routiers après traitement

9.1. Essai effectué : Essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Nous recherchons à travers ce paragraphe à déterminer les paramètres de stabilité de talus de remblai routier constitué de sol fin traité. Pour se faire, nous avons réalisé l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte selon la norme NF P 94-071-1 sur sol traité et naturel. L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à :

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant la durée de l'essai,
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan de glissement des deux demi boîtes l'une par rapport à l'autre un déplacement relatif Δl à vitesse constante,
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement correspondant.

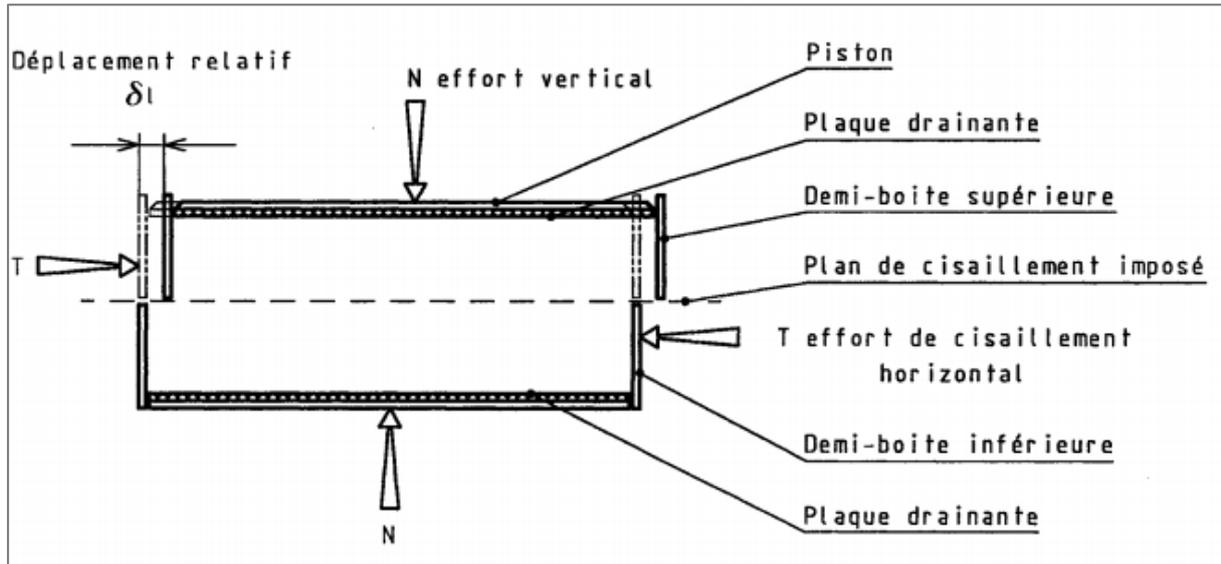


Figure 58: Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Pour chaque déplacement, on calcule la contrainte appliquée $\tau = \text{force horizontale} / \text{Surface}$ et on trace la courbe contrainte horizontale en fonction du déplacement afin de voir le comportement du sol. Puis pour les 3 contraintes appliquées (100 kPa, 200 kPa et 300 kPa) on trace la courbe contrainte effective en fonction de la contrainte finale de cisaillement. De cette courbe à l'allure linéaire on détermine l'angle de frottement « ϕ' » qui n'est autre que l'arc tangente du coefficient directeur de la droite reliant les 3 points et la cohésion « c' » qui est le point d'intersection de cette droite avec l'axe des abscisses.

9.2. Protocole adopté

Pour la réalisation de l'essai à la boîte de cisaillement rectiligne, il se posait le même problème que pour l'essai œdométrique au niveau de la confection de l'échantillon. La bague de la boîte de cisaillement ne pouvant être insérée dans notre sol à l'état naturel, il fallait donc trouver pour chaque éprouvette soumise à l'essai le même degré de compactage afin d'avoir le même état initial des échantillons. Pour se faire nous avons donc au préalable réalisé un compactage à l'énergie Proctor Normal dans un moule Proctor à une même teneur en eau pour toutes les éprouvettes (28%). L'échantillon a été extrait à l'aide d'un extracteur pour le conserver tel quel puis nous avons inséré la bague de la boîte de cisaillement dans l'échantillon de sol compacté. Dans le cas de l'échantillon traité, nous avons donné à notre sol la même teneur en eau que précédemment puis appliqué les traitements d'abord à la chaux suivi du ciment et réalisé le compactage à l'énergie Proctor normal, extrait l'échantillon de sol compacté puis inséré la bague. Une fois confectionnées, les échantillons ont été passés à la boîte de cisaillement.



Figure 59 : Photo de notre sol après l'essai de cisaillement

9.3 Résultats de l'essai :

Les résultats de l'essai sont fournis dans le tableau suivant :

Tableau 20 : Résultats de l'essai de cisaillement avant traitement

Déplacement horizontal (mm)	Contrainte de cisaillement (kPa)					
	Avant traitement			Après traitement		
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
0,01	1,111	3,057	14,171	0,834	38,346	0,000
0,11	0,279	20,074	37,080	9,200	77,506	0,000
0,42	7,888	35,779	59,443	14,086	121,140	32,116
0,72	13,946	47,245	72,031	17,646	124,701	56,087
1,03	18,985	57,531	81,406	33,368	123,979	74,215
1,34	23,261	65,981	88,974	48,541	122,703	106,129
1,64	28,796	72,873	94,911	59,650	120,769	139,575
1,95	35,056	79,888	100,119	67,415	119,684	154,189
2,35	41,591	85,895	105,523	71,127	118,143	166,968
2,95	49,600	92,730	111,563	74,861	114,603	182,138
3,55	55,766	98,021	117,247	77,534	112,161	194,781
4,16	60,952	103,522	121,306	79,657	110,617	202,528
4,76	65,042	107,346	124,191	81,583	110,187	210,314
4,96	66,560	108,536	125,183	82,235	110,157	212,745

A partir de résultats nous obtenons les graphes suivants :

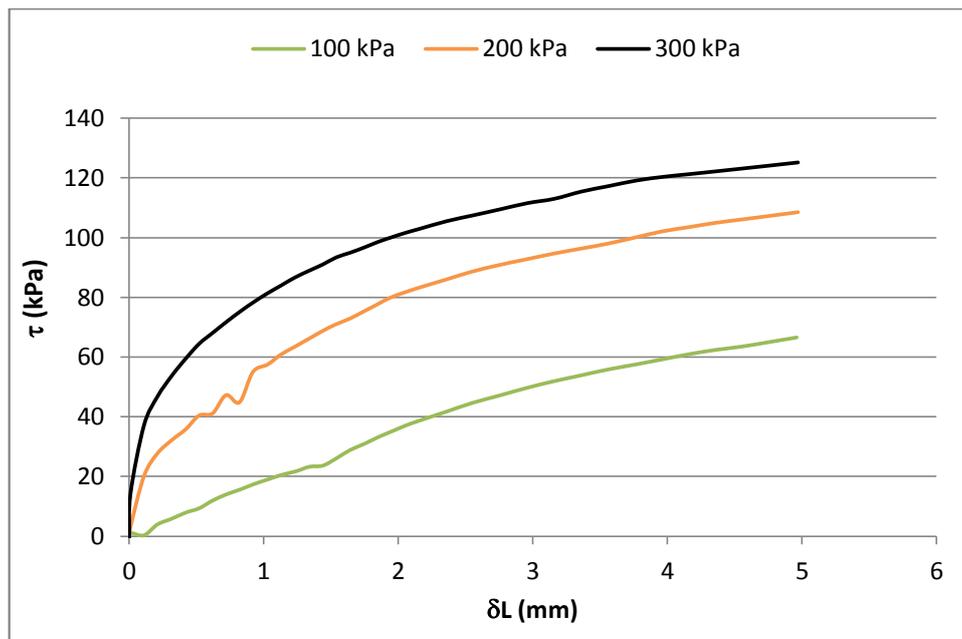


Figure 60 : Graphe contrainte de cisaillement – déplacement avant traitement

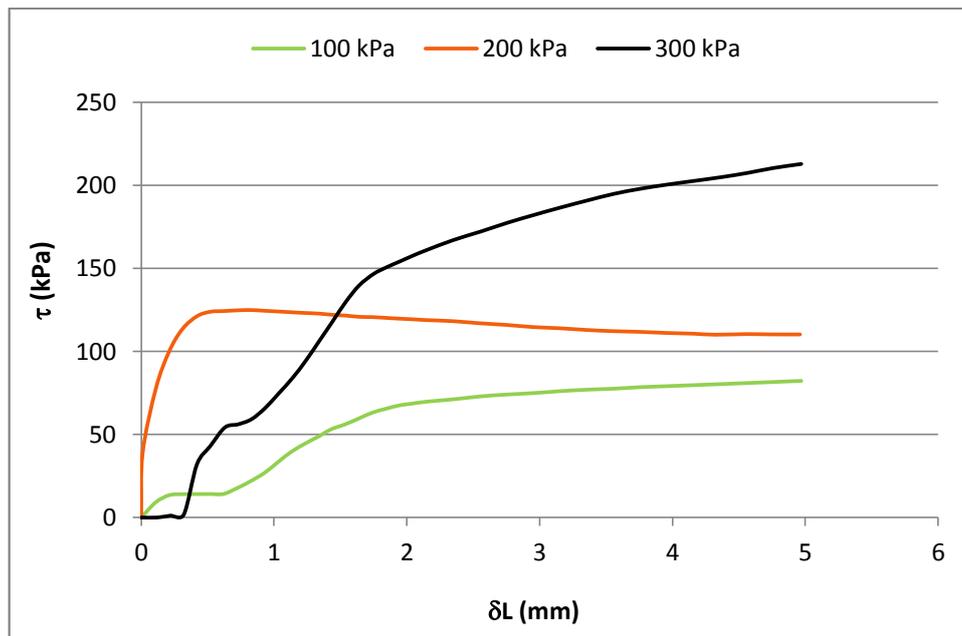


Figure 61 : Graphe contrainte de cisaillement – déplacement après traitement

Pour le sol à l'état naturel, les 3 courbes montrent un comportement contractant du matériau (courbes sans pics). En revanche, le sol traité a montré un comportement dilatant pour la contrainte verticale de 200 kPa, cela est peut être dû aux incertitudes liées à la confection des éprouvettes par compactage.

Par la suite, en fonction des contraintes appliquées et des contraintes finales de cisaillement (contraintes correspondantes à un déplacement final d'environ 5 mm), nous traçons la courbe $\sigma = f(\tau)$ dont l'allure est proche de celle d'une droite pour déterminer les paramètres de cisaillement du sol avant et après traitement.

Tableau 21 : Résistance au cisaillement avant et après traitement

σ (kPa)	100	200	300
τ (kPa) avant traitement	66,56	108,536	125,183
τ (kPa) après traitement	82,235	123,979	212,745

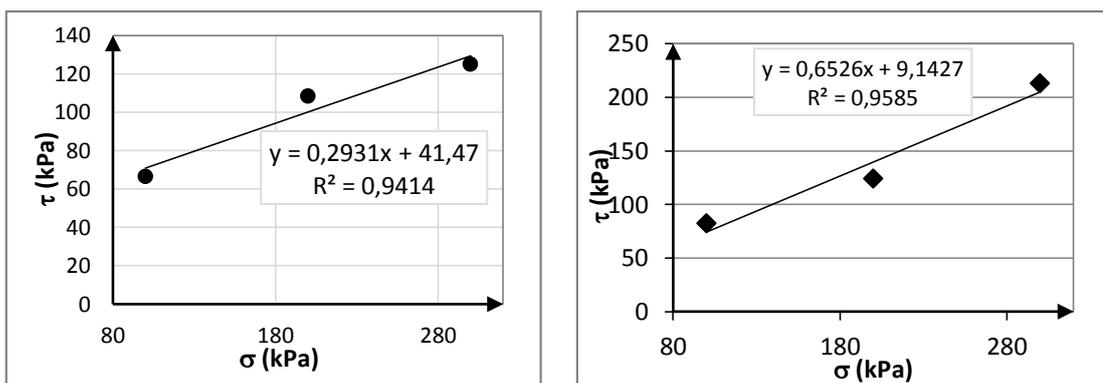


Figure 62 : Graphe contraintes de cisaillement - contraintes appliquées avant traitement et après traitement

A partir de l'équation des courbes tendances, nous déterminons la cohésion « c' » et l'angle de frottement interne « ϕ' ». Les courbes tendances sont obtenues avec de très bons coefficients de détermination (autour de 95%). La cohésion « c' » n'est autre que le dernier membre de l'équation de la droite et « ϕ' » l'arc tangente de son coefficient directeur. Ce qui nous donne les valeurs suivantes :

Tableau 22 : Angle de frottement interne et cohésion avant et après traitement

Paramètres	Cohésion « c' »	Angle de frottement « ϕ' »
Avant traitement	41,5 kPa	16,3°
Après traitement	9,0 kPa	33°

Conclusion

Les résultats obtenus après traitement de notre sol sont satisfaisants. On a noté une bonne augmentation de l'IPI supérieur au seuil recommandé par le GTS après traitement déjà après 24 h de cure. La circulation des engins de chantier peut donc être autorisée le lendemain du traitement. On note aussi une bonne amélioration des paramètres C_c et C_s caractérisant le tassement. Ils sont passés de la classe argiles à la classe limons argileux, ce qui veut dire que le tassement après traitement serait inférieur au tassement sans traitement. Et les talus de remblai sont plus stables après traitement. On le voit grâce à la cohésion « c' » et à l'angle de frottement « ϕ' » qui sont passés de la classe argile à la classe sable argileux.

CONCLUSIO
N
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail, qui a consisté au traitement d'un sol fin, destiné à être utilisé dans un remblai routier, par la chaux et le ciment (traitement mixte) était beaucoup plus axé sur les essais de laboratoire. Pour nos essais, nous avons travaillé au laboratoire de recherche et au laboratoire pédagogique de l'Université 08 Mai 1945 de Guelma. Le laboratoire permet d'effectuer des essais sur les matériaux prélevés en vue de :

- bien connaître les différentes caractéristiques de ces matériaux,
- simuler des conditions du chantier afin de voir leur comportement (détermination de l'IPI à une certaine teneur en eau donnée par exemple).

Nous avons dès le départ ciblé un sol fin car d'une part ce sont des sols à problèmes (problème de tassement, problème de gonflement) et d'autre part c'est le type de sol pour lequel nous pouvons mieux constater l'effet du traitement appliqué. En plus de cela, ce sont des sols à caractéristiques médiocres. Ils sont donc très souvent décapés lors de travaux de construction d'une route. Le but de ce travail était de pouvoir étudier l'augmentation des performances géotechniques de ces sols après qu'ils aient subi un traitement, de manière à pouvoir les valoriser dans les remblais routiers, évitant ainsi :

- des surcoûts de transport des terres décapées,
- une pollution atmosphérique à cause du nombre plus grand d'engins qu'il y aurait eu sur le chantier dans le cas où on aurait eu recours à la technique des emprunts granulaires,
- une pollution de l'environnement provoquée par la mise en décharge des matériaux décapés.

A l'issue de cette étude, nous avons pu remarquer l'évolution des propriétés géotechniques de notre sol suite à un traitement mixte chaux-ciment, permettant ainsi à ces sols d'être utilisés dans les remblais routiers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Aide-mémoire Mécanique des sols-Concepts-Applications, Y. BERTHAUD 2012

C

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

F

Fondation Spécial et Reprise en Sous-œuvre, M. FORNI

G

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

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

I

Introduction à la géotechnique, Robert D. Holtz

J

Jean-Pierre Magnan, Déformabilité des sols, tassements, consolidation

Jean-Pierre Magnan, Description, identification et classification des sols

Jean-Pierre Magnan, Mécanique des Sols et des roches, ENPC, 1999-2000,

Jean-Pierre Magnan, Résistance au cisaillement

L

Lucile Saussaye, Aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification, 2013

M

Mécanique des sols-Théorie et Pratique, V. ROBITAILLE

N

NF P 94-071-1, Norme française, essai de cisaillement rectiligne à la boîte

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

NF P 94-050, Norme française, teneur en eau naturelle

NF P 94-051, Norme française, limite de plasticité

NF P 94-052-1, Norme française, limite de liquidité au cône

NF P 94-056, Norme française, Analyse granulométrique

NF P 94-068, Norme française, Valeur au bleu de méthylène

NF P 94-078, Norme française, Indice Portant Immédiat

Nicolas Cabane, Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques, 2005

Nicolas Maubec, Approche multi échelle du traitement des sols à la chaux, 2011

T

Techniques de l'Ingénieur, Assises des vallées compressibles - Choix des méthodes de consolidation

Techniques de l'ingénieur, Classification des matériaux, 2006

Techniques de l'ingénieur, Techniques des matériaux, 2007

X

XP P-94-090-1, Norme française, essai œdométrique