REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Civil

Laboratoire de Recherche en Géo Matériaux Environnement et Aménagement

(LGEA)

MEMOIRE DE MASTER 2

Spécialité : Génie Civil

Option : ***Géotechnique et environnement***

Présenté par :

BELAIDI Mohamed

Thème:

Application de l'essai de cisaillement direct dans l'étude des glissements de terrain le long des plans de stratification des sols

Devant le jury, composé de :

Mr. AIT TAHAR Kamel, Professeur à l'UMMTO,	Président
Mr. MEDDAHI Amer, Maître de conférences (A), à l'Université de Boumerdes,	Rapporteur
Mr. MELBOUCI Bachir, professeur à l'UMMTO,	Co-rapporteur
Mr. BOUDLAL Omar, Maître assistant, à l'UMMTO,	Examinateur

Soutenu le : 07/07/2011

PROMOTION : 2010/2011

Remerciements

Je suis à la fois honoré et chanceux d'être encadré par Monsieur MELBOUCI Bachir, professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Je tiens à le remercier pour ses efforts fournis tout au long de mon travail, pour la qualité de ses conseils et surtout pour sa disponibilité.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Monsieur MEDDAHI Amer, maître de conférences à l'université de Boumerdes pour son apport très précieux pour ma thèse notamment dans sa partie numérique.

Un remerciement très spécial pour Monsieur BOUKHEROUB Med Ameziane responsable du laboratoire pédagogique de MDS qui étais derrière moi et qui a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pendant les 2mois passés au laboratoire.

Permettez-moi également de remercier Monsieur BAHAR Ramdane, directeur du laboratoire LGEA pour son autorisation d'accès ainsi qu'à Monsieur LACHEBI Kamel ingénieur en ce labo ainsi que tous les membres du laboratoire.

Je tiens à remercier aussi Monsieur AIT TAHAR Kamel Professeur à l'UMMTO qui m'a honoré d'avoir accepté de présider mon jury de master, ainsi qu'à Monsieur BOUDLAL Omar membre de ce même jury.

Pour finir, je tiens à remercier toute personne ayant contribuée, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents et grands parents,

Mes sœurs, mes frères Hichem et Brahim et mes beaux frères,

A ma fiancée et ma belle famille,

…à mes amis et à toute ma famille.

Sommaire

Liste des figures. I

Liste des tableaux. IV

Liste des annexes. VI

Introduction générale 1

Première partie

Etude bibliographique

Introduction de la première partie 3

Chapitre I : Typologie des mouvements de terrain

Introduction 5

I.Caractérisation des mouvements de terrain 6

I.1.1. Les glissements 7

Classification des glissements selon la forme 8

- Les glissements de type rotationnel 8

- Les glissements translationnels 8

Classification des glissements selon la vitesse 9

- Glissement de terrain permanant 9

- Glissement de terrain spontané 9

I.1.2. Les mouvements sans surface de rupture 9

-Mouvements dans les formations meubles 10

- Mouvements dans les formations rocheuses …….……10

I.1.3. Les écroulements et chutes de blocs …….……...…11

I.1.4. Les coulées boueuses et laves torrentielles ……..……...….12

I.1.5. Synthèse ……...12

I.2. Conditions de stabilités ……..13

I.2.1. La géométrie ……13

I.2.2. Résistance au cisaillement des sols ou des roches ……...…13

I.2.3. Conditions hydrauliques ……15

I.2.4. facteurs climatiques et anthropiques ……..…...….16

- Séismes …….16
- Pluie, neige, évapo-transpiration …….....…16
- Construction sur pente …….…16
- Déblai sur pente ……...…….17
- Modification de l'utilisation des sols ……17

I.3. Vitesses de déplacement des glissements ……..…17

I.3.1. Pré-rupture……...…...…18

I.3.2. Rupture ……..…19

I.3.3. Post-rupture ……...……19

I.3.4. Réactivation ……..……20

I.4. Conclusion chapitre I……...……..22

Chapitre II : Techniques de stabilisation des glissements de terrain

II.1. Introduction chapitre II……..…….24

II.2. choix d'une technique ……...……24

II.2.1. Caractérisation du site ……...…..…25

II.2.2. Adaptation de la technique au glissement …….…..…26

II.2.3. Contraintes économiques…….…28

II.2.4. Méthodologie de choix d'une technique de stabilisation……...…28

II.3 Mise en œuvre de terrassement……..……30

II.3.1. Butée de pied et allégement en tête ……32

II.3.1.1. Butée de pied……..……...…32

II.3.1.2. Allégement en tête……..…...…35

II.3.2. Purge et reprofilage…….…35

II.3.2.1. Purge……..……35

II.3.2.2. Reprofilage……36

II.3.3. Substitutions (bêches, contreforts, masques et éperons) ……36

II.3.3.1. Substitution totale des matériaux glissés ……..36

II.3.3.2. Substitution partielle des matériaux glissés …….…….37

II.4. Dispositifs de drainage …….…40

II.4.1. Collecte et canalisation des eaux de surface (drainage de surface) ……40

II.4.2. Tranchées drainantes……...…41

II.4.3. Drains subhorizontaux …….……42

II.4.4. Drains verticaux, puits et galeries drainantes ……..…43

II.4.5. Eperons et contreforts, masques et bêches drainantes …….43

II.5. Introduction d'éléments résistants ……44

II.5.1. Ouvrages de soutènement ……...…44

II.5.1.1. Ouvrages rigides……45

II.5.1.2. Ouvrages souples ……..45

II.5.2. Tirants d'ancrage ……...……45

II.5.3. Clous et micro-pieux …….…47

II.5.4. Pieux ……...……48

II.6. Techniques de protection passive ……..……49

II.6.1. Surveillance des glissements de terrain ……..……49

II.6.2. Systèmes de protection ……...……49

II.7. Conclusion chapitre II……52

Conclusion de la première partie……...53

Deuxième partie

La partie expérimentale

Introduction de la première partie……..55

Chapitre III : Identification des matériaux.

III.1. Introduction ……57

III.2. Analyse granulométrique …….…...……57

III.2.1. Le tamisage (NF P18-560)……57

Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage, sable…….…..58

III.2.2. Analyse sédimentométrique (NF P 94-057) …….…60
- Argile…….……60
- Marne…….60

III.3. Caractéristiques physiques ……...62

III.3.1. Teneur en eau (W) ……62

III.3.2. Masse volumique des grains solides ……62
III.3.3. Masse volumique sèche ……62
III.3.4. Indice des vides (e)……62

III.3.5. Porosité (n)……63

Densité des grains solides, sable……63

Densité sèche ……63

Synthèse des résultats……..64

Masses volumiques sèches ; argile et marne……..…..64

- Argile…….…64
- Marne…….65

III.3.6. Détermination des limites d'Atterberg pour l'argile et la marne……..65

Définitions
- Limite de liquidité (w_l)……...……65
- Limite de plasticité (w_p)……65
- Limite de retrait (w_r) ……66
- Indice de plasticité (I_p)……..…66

Résultats obtenus …….…66

- Argile……66
- Marne……...….68
-

IV. Conclusion chapitre III…….71

Chapitre IV : Essais de cisaillement direct à la boîte

IV.1. Introduction……...……73

IV.2. Appareillage……..……76

IV.3. Mode opératoire……76
IV.4. Déroulement de l'essai……..77
IV.5. Expression des résultats …….……..77

IV.6. Présentation des résultats …….…78

IV.6.1. Courbes contraintes déformations : $\tau = f(\Delta l)$…….…...78

IV.6.2. Courbes de variation de volume $(\Delta V/V) = f(\Delta l)$ ……..…...84

IV.6.3. Droites intrinsèques …….…..89

IV.6.4. Interprétation des résultats…….91

IV.7. Conclusion……92

Chapitre V : Initiation au Plans d'expériences factoriels

V.I. Introduction…….94
V.2. Applications de la méthode des plans d'expériences……..…94
Avantages des plans……95
V.3. Description de la méthodologie Expérimentale……..…95
Dans la première étape…….95
La deuxième étape ……...…95
La troisième étape……...…..95
Définition d'une interaction……..…95
La quatrième étape……...…95
V.4. Plan d'expériences factoriel fractionnaire à 2 niveaux…….…96
Réduction du nombre d'essais……..…96
La matrice d'expériences…….….98

La cinquième étape……..……100
La sixième étape……..…100
La septième étape……100
La huitième étape……100
Bilan……100

V. Application du plan d'expériences factoriel fractionnaire sur les résultats des essais de cisaillement exposés au chapitre IV (ANOVA plan complet)……...….101

Illustration du plan I (combinaison I), pour la cohésion C……..…102

Effets et interactions……...….103

Graphique des effets et de l'interaction……..….103

Illustration du plan I (combinaison I), pour l'angle de frottement φ……...……104

Effets et interactions ……104

Graphique des effets et de l'interaction……104

Résultats de tous les plans d'expériences…….105

Synthèse des effets sur les résultats de la cohésion et l'angle de frottement ……...109

VI. interprétation des résultats……..…109

VII. Conclusion chapitre V ……..……110

Conclusion de la deuxième partie……..…..111

Conclusion générale……..….114

Bibliographie……...….116

Annexes……....123

Liste des figures

Figure. 1.I - Bloc diagramme d'un glissement de terrain……5

Figure.2.I –Les quatre grands types de mouvements de terrain……...…6

Figure. 3.I - les deux types de glissement (plan (a) et rotationnel (b))…….…9

Figure. 4.I – chute de bloc……...11

Figure. 5.I – Éboulement……...11

Figure.6.I – Courbes de cisaillement de l'argile de Sallèdes (Puy-de-Drôme), essais de cisaillement alternés réalisés à la boite (6*6), la course est de 16 mm alternativement dans un sens et dans l'autre (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……..14

Figure. 7.I-diagramme illustrant la dynamique d'un glissement de terrain……..18

Figure. 8.I – Évolution des déplacements du glissement de (Puy-de-Drôme) en regard de la pluviométrie (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)…….21

Figure. 1.II -les différentes actions de terrassement possibles (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)…….31

Figure.2.II–Stabilisation par plusieurs niveaux de butées du glissement de Saint-Urciz (Canatl, France)…….32

Figure. 3.II –Dimensionnement d'une butée de pied (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)…….33

Figure. 4.II – Glissement de Folkestone Warren (Royaume-Uni) (d'après Hutchinson et al., 1984)…….34

Figure. 5.II –Stabilisation par butée de pied du glissement de l'autoroute A75 au Piou (Lozère, France)……34

Figure. 6.II –Dimensionnement d'un allégement en tête……35

Figure. 7.II –Substitutions partielles Figure…….38

8.II – Stabilisation par bêche du remblai au PK 1,9 déviation de Nabringhen (Pas-de-Calais, France)(Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……..39

Figure. 9.II –Drainage mis en œuvre sur le glissement de Vaucluse (Doubs), (d'après Faure et al., 1975)……..…42

Figure. 10.II –Drainage du glissement de Châtel-Guyon (Puy-de-Dôme) (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……46

Figure. 11.II –Stabilisation de la RD 56 à Muret (Haute-Garone). (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……47

Figure. 12.II – Profil géotechnique du site d'Aktéa (Grèce).(Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……48

Figure. 13.II- Eboulement de Belle-Fontaine (Martinique), merlon protection…….51

Figure. 1.III- granulométrie par tamisage, sable…….59

Figure. 2.III-Courbe sédimentométrique, marne…….61

Figure.3.III-Courbe sédimentométrique, sol argileux…….…61

Figure. 4.III-Droite w = f(logN), sol argileux……..67

Figure. 5.III-Droite w = f(logN), marne……..69

Figure.1.IV- Echantillon N°1 après cisaillement…….....74

Figure.2.IV- Echantillon N°2 après cisaillement…….74

Figure.3.IV-Echantillon N°3 suggestion de la mise en place dans la boîte……74

Figure.4.IV- Echantillon N°4 suggestion de la mise en place dans la boîte…….75

Figure.5.IV-Echantillon N°5 suggestion de la mise en place dans la boîte.……75

Figure.6.IV. Schéma de la boite de cisaillement……...…76

Figure. A.7.IV- courbe τ = f (ΔL), (sol argileux, marne, w = 6%)……...…79

Figure. B.7.IV- courbe τ = f (ΔL), (sol argileux, marne w = 14%)……..…79

Figure. A.8.IV- courbe τ = f (ΔL), (marne, sol argileux, marne, w = 6%)……...…80

Figure. B.8.IV- courbe τ = f (ΔL), (marne, sol argileux, marne, w = 14%)…….…80

Figure. A.9.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, w = 6%)…….…81

Figure. B.9.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, w = 14%)……...…81

Figure. A.10.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable, w = 6%)……82

Figure. B.10.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable, w = 14%)……...…82

Figure. A.11.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, marne, w = 6%)……83

Figure. B.11.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, marne, w = 14%)……..…83

Figure A.12.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sol argileux, marne, w =6%)……84

Figure B.12.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sol argileux, marne, w=12%)……84

Figure A.13.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(marne, sol argileux, marne, w=6%)……..…85

Figure B.13.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL) (marne, sol argileux, marne, w=12%)……85

Figure A.14.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sable, sol argileux, w=6%)……..86

Figure B.14.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, sol argileux, w=12%)……..…86

Figure A.15.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, sol argileux, sable, w=6%)……..…87

Figure B.15.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable,w=12%)……...87

Figure A.16.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, marne,w=6%)……88

Figure B.16.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, marne, w=12%)……88

Figure.17.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sol argileux, marne, w = 6%, w = 14%)…..…89

Figure.18.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (marne, sol argileux, marne, w = 6%, w = 14%).89

Figure.19.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, sol argileux, w = 6%, w = 14%)……..90

Figure.20.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, sol argileux, sable w = 6%, w = 14%) ..90

Figure.21.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, marne, w = 6%, w = 14%)……..…91

Figure. 1.V-graphique des effets et de l'interaction, plan I, cohésion. ……..…103

Figure. 2.V- graphique des effets et de l'interaction, plan I, angle de frottement……..…105

Figure. 3.V-graphique des effets et de l'interaction, plan II, cohésion……..106

Figure. 4.V- graphique des effets et de l'interaction, plan II, angle de frottement……106

Figure. 5.V-graphique des effets et de l'interaction, plan III, cohésion……107

Figure. 6.V- graphique des effets et de l'interaction, plan III, angle de frottement……..107

Figure. 7.V-graphique des effets et de l'interaction, plan IV, cohésion……108

Figure. 8.V- graphique des effets et de l'interaction, plan IV, angle de frottement…….108

Liste des figures

Figure. 1.I - Bloc diagramme d'un glissement de terrain……5

Figure.2.I –Les quatre grands types de mouvements de terrain……...…6

Figure. 3.I - les deux types de glissement (plan (a) et rotationnel (b))…….…9

Figure. 4.I – chute de bloc……...11

Figure. 5.I – Éboulement……...11

Figure.6.I – Courbes de cisaillement de l'argile de Sallèdes (Puy-de-Drôme), essais de cisaillement alternés réalisés à la boite (6*6), la course est de 16 mm alternativement dans un sens et dans l'autre (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……..14

Figure. 7.I-diagramme illustrant la dynamique d'un glissement de terrain……..18

Figure. 8.I – Évolution des déplacements du glissement de (Puy-de-Drôme) en regard de la pluviométrie (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)…….21

Figure. 1.II -les différentes actions de terrassement possibles (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)…….31

Figure.2.II–Stabilisation par plusieurs niveaux de butées du glissement de Saint-Urciz (Canatl, France)…….32

Figure. 3.II –Dimensionnement d'une butée de pied (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)…….33

Figure. 4.II – Glissement de Folkestone Warren (Royaume-Uni) (d'après Hutchinson et al., 1984)…….34

Figure. 5.II –Stabilisation par butée de pied du glissement de l'autoroute A75 au Piou (Lozère, France)……34

Figure. 6.II –Dimensionnement d'un allégement en tête……35

Figure. 7.II –Substitutions partielles Figure…….38

8.II – Stabilisation par bêche du remblai au PK 1,9 déviation de Nabringhen (Pas-de-Calais, France)(Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……..39

Figure. 9.II –Drainage mis en œuvre sur le glissement de Vaucluse (Doubs), (d'après Faure et al., 1975)……..…42

Figure. 10.II –Drainage du glissement de Châtel-Guyon (Puy-de-Dôme) (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……46

Figure. 11.II –Stabilisation de la RD 56 à Muret (Haute-Garone). (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……47

Figure. 12.II – Profil géotechnique du site d'Aktéa (Grèce).(Guide Technique LCPC Paris, février 1998)……48

Figure. 13.II- Eboulement de Belle-Fontaine (Martinique), merlon protection…….51

Figure. 1.III- granulométrie par tamisage, sable…….59

Figure. 2.III-Courbe sédimentométrique, marne…….61

Figure.3.III-Courbe sédimentométrique, sol argileux…….…61

Figure. 4.III-Droite w = f(logN), sol argileux……..67

Figure. 5.III-Droite w = f(logN), marne……..69

Figure.1.IV- Echantillon N°1 après cisaillement…….....74

Figure.2.IV- Echantillon N°2 après cisaillement…….74

Figure.3.IV-Echantillon N°3 suggestion de la mise en place dans la boîte……74

Figure.4.IV- Echantillon N°4 suggestion de la mise en place dans la boîte…….75

Figure.5.IV-Echantillon N°5 suggestion de la mise en place dans la boîte.……75

Figure.6.IV. Schéma de la boite de cisaillement……...…76

Figure. A.7.IV- courbe τ = f (ΔL), (sol argileux, marne, w = 6%)……...…79

Figure. B.7.IV- courbe τ = f (ΔL), (sol argileux, marne w = 14%)……..…79

Figure. A.8.IV- courbe τ = f (ΔL), (marne, sol argileux, marne, w = 6%)……...…80

Figure. B.8.IV- courbe τ = f (ΔL), (marne, sol argileux, marne, w = 14%)…….…80

Figure. A.9.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, w = 6%)…….…81

Figure. B.9.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, w = 14%)……...…81

Figure. A.10.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable, w = 6%)……82

Figure. B.10.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable, w = 14%)……...…82

Figure. A.11.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, marne, w = 6%)……83

Figure. B.11.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, marne, w = 14%)……..…83

Figure A.12.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sol argileux, marne, w =6%)……84

Figure B.12.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sol argileux, marne, w=12%)……84

Figure A.13.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(marne, sol argileux, marne, w=6%)……..…85

Figure B.13.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL) (marne, sol argileux, marne, w=12%)……85

Figure A.14.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sable, sol argileux, w=6%)……..86

Figure B.14.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, sol argileux, w=12%)……..…86

Figure A.15.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, sol argileux, sable, w=6%)……..…87

Figure B.15.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable,w=12%)……...87

Figure A.16.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, marne,w=6%)……88

Figure B.16.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, marne, w=12%)……88

Figure.17.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sol argileux, marne, w = 6%, w = 14%)…..…89

Figure.18.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (marne, sol argileux, marne, w = 6%, w = 14%).89

Figure.19.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, sol argileux, w = 6%, w = 14%)……..90

Figure.20.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, sol argileux, sable w = 6%, w = 14%) ..90

Figure.21.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, marne, w = 6%, w = 14%)……..…91

Figure. 1.V-graphique des effets et de l'interaction, plan I, cohésion. ……..…103

Figure. 2.V- graphique des effets et de l'interaction, plan I, angle de frottement……..…105

Figure. 3.V-graphique des effets et de l'interaction, plan II, cohésion……..106

Figure. 4.V- graphique des effets et de l'interaction, plan II, angle de frottement……106

Figure. 5.V-graphique des effets et de l'interaction, plan III, cohésion……107

Figure. 6.V- graphique des effets et de l'interaction, plan III, angle de frottement……..107

Figure. 7.V-graphique des effets et de l'interaction, plan IV, cohésion……108

Figure. 8.V- graphique des effets et de l'interaction, plan IV, angle de frottement…….108

Liste des tableaux

Tableau .1.I – Echelle cinématique des mouvements de terrain.

Tableau 2.I – éléments caractérisant les différentes familles de mouvements.

Tableau3.I – inclinaison limite d'une pente infinie en fonction du type d'écoulement.

Tableau 1.II-Différentes techniques de stabilisation des glissements de terrain (Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

Tableau 2.II- méthodologie pour le choix d'une méthode de stabilisation (d'après Cartier,1985).

Tableau 3.II-Grille d'orientation d''un dispositif de Stabilisation d'un glissement de terrain (Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

Tableau1.III-Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage :

Tableau 2.III-Résultats de l'analyse sédimentométrique, sol argileux:

Tableau 3.III-Résultats de l'analyse sédimentométrique, marne :

Tableau 4.III-Résultats de la détermination de la masse volumique sèche, sable.

Tableau 5.III-Synthèse des résultats (caractéristiques physiques du sable).

Tableau 6.III-Résultats de la détermination de la masse volumique sèche ; sol argileux.

Tableau 7.III-Résultats de la détermination de la masse volumique sèche, marne.

Tableau 8.III-Limite de liquidité, sol argileux.

Tableau 9.III-Limite de plasticité, sol argileux.

Tableau 10.III-Synthèse des résultats (limites d'Atterberg, sol argileux).

Tableau 11.III-Limite de liquidité, marne.

Tableau 12.III-Limite de plasticité, marne.

Tableau 13.III-Synthèse des résultats (limites d'Atterberg, marne).

Tableau 1.V .interactions de trois facteurs A, B, C, sur deux niveaux (haut et bas).

Tableau 2.V. matrice d'expériences avec réduction du nombre d'essais.

Tableau 3.V. Tableau de variation du nombre d'interactions ainsi que du nombre d'essais avec le nombre de facteurs.

Tableau 4.V. matrice d'expériences.

Tableau 5.V. définissant les niveaux des facteurs.

Tableau 6.V-Synthèse des résultats des effets pour tous les plans.

Liste des annexes

Annexe I : Essais de cisaillement direct à la boite à différentes teneurs en eau.

Annexe II : Plans d’expériences factoriels.

Introduction générale

Introduction générale

Les mouvements de terrain est l'une des plus importantes thématiques de la géotechnique. Ces mouvements peuvent entrainer des quantités de terre allant de quelques mètres cubes jusqu'à plusieurs millions de mètres cubes lorsque l'instabilité concerne les vallées des zones montagneuses.

Ils sont généralement naturels, parfois très anciens, ou provoqués par des activités humaines. Pour certains cas, il est possible de les stabiliser, pour d'autres, on se limite seulement à les surveiller et à les ralentir.

A la diversité de ces situations correspond une grande diversité des techniques de stabilisation. L'essentiel des méthodes qui existent sont décrites et commentées dans ce travail qui est réparti en deux parties :

La première présente une synthèse bibliographique et la seconde traite les essais réalisés et leurs interprétations.

La première partie comprend deux chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la caractérisation des mouvements de terrain et leurs facteurs déclencheurs. Le second, porte sur les techniques utilisées pour remédier à ces instabilités.

La deuxième partie

Après identification des matériaux, des essais de cisaillement direct à la boite ont été réalisés sur des échantillons qui sont constitués de deux ou trois matériaux dans la même boîte entre un sol argileux, la marne et le sable. Ceci en faisant varier la teneur en eau.

Cette expérimentation permet de simuler les glissements qui se produisent dans les massifs de sol. Les résultats sont ensuite interprétés en fonction des différents paramètres influant.

Un progiciel de statistiques fera un tri entre les essais réalisés en tenant compte des différents paramètres qui influent sur les résultats. L'objectif est l'étude de l'influence des paramètres pris individuellement puis l'interaction entre ces paramètres sur la résistance au cisaillement.

Le mémoire termine par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

Première partie

Etude bibliographique

Chapitre I :

Typologie des mouvements de terrain.

Chapitre II :

Techniques de stabilisation des mouvements de terrain.

Introduction de la première partie

Les glissements de terrain présentent un danger naturel permanant, leurs effets engendrent des victimes humaines et des dégâts matériels. C'est des phénomènes qui se produisent partout dans le monde comme tout autre phénomène naturel. Malgré, les coûts très élevés des confortements, la stabilisation n'est pas toujours atteinte, c'est pourquoi il est nécessaire d'effectuer encore des études plus approfondies afin de pouvoir mieux maîtriser cet aléa en analysant tout paramètre influant sur la stabilité des versants.

La structure des talus, leurs morphologies, les conditions climatiques et hydriques du site et l'activité humaine sont toutes des causes pouvant provoquer des instabilités au niveau des talus.

Il est toutefois nécessaire de prévenir et détecter le risque lorsque des vies humaines sont menacées.

L'objectif de cette partie de travail consiste à étudier les différents mécanismes des glissements de terrain, les causes et les techniques de stabilisation.

Cette partie du travail est répartie sur deux chapitres :

Dans le premier chapitre sont exposés les différents mouvements de terrain existant et les causes pouvant les induire.

Le deuxième chapitre résume les différentes techniques de stabilisation adaptées pour chaque type de mouvement de terrain.

Chapitre I :

Typologie des mouvements de terrain.

Introduction

L'intention des chercheurs s'est tournée ces dernières années vers un phénomène naturel qui prend de plus en plus l'ampleur et cause des désordres et des victimes humaines. La brutalité de ce phénomène est influencée par la nature et aussi par l'activité de l'homme qui est parfois très nuisible. La nature géologique des terrains est l'un des principaux facteurs d'apparition de ces phénomènes tout comme l'eau et la pente.

L'objectif de ce chapitre est de définir en premier lieu les différents types de mouvement de terrain selon leur vitesse et selon la morphologie de leur surface de rupture, d'envisager en second lieu les principales causes qui peuvent mobiliser ces glissements.

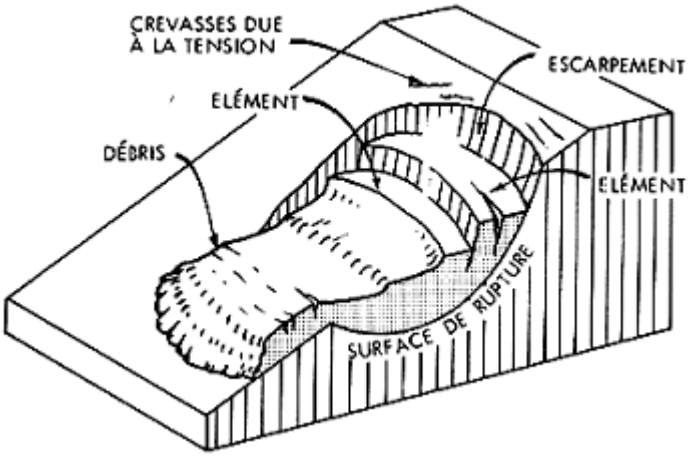


Figure. 1.I - Bloc diagramme d'un glissement de terrain.

I.1. Caractérisation des mouvements de terrain

De nombreuses classifications ont été proposées pour les mouvements de versants instables ; elles s'appuient sur des notions de cinématique, de nature de sol, de stratigraphie, etc.

De façon simplifiée, on peut considérer quatre familles principales :

- Les glissements,
- Les mouvements sans surface de rupture,
- Les écroulements et chutes de blocs,
- Les coulées boueuses et laves torrentielles.

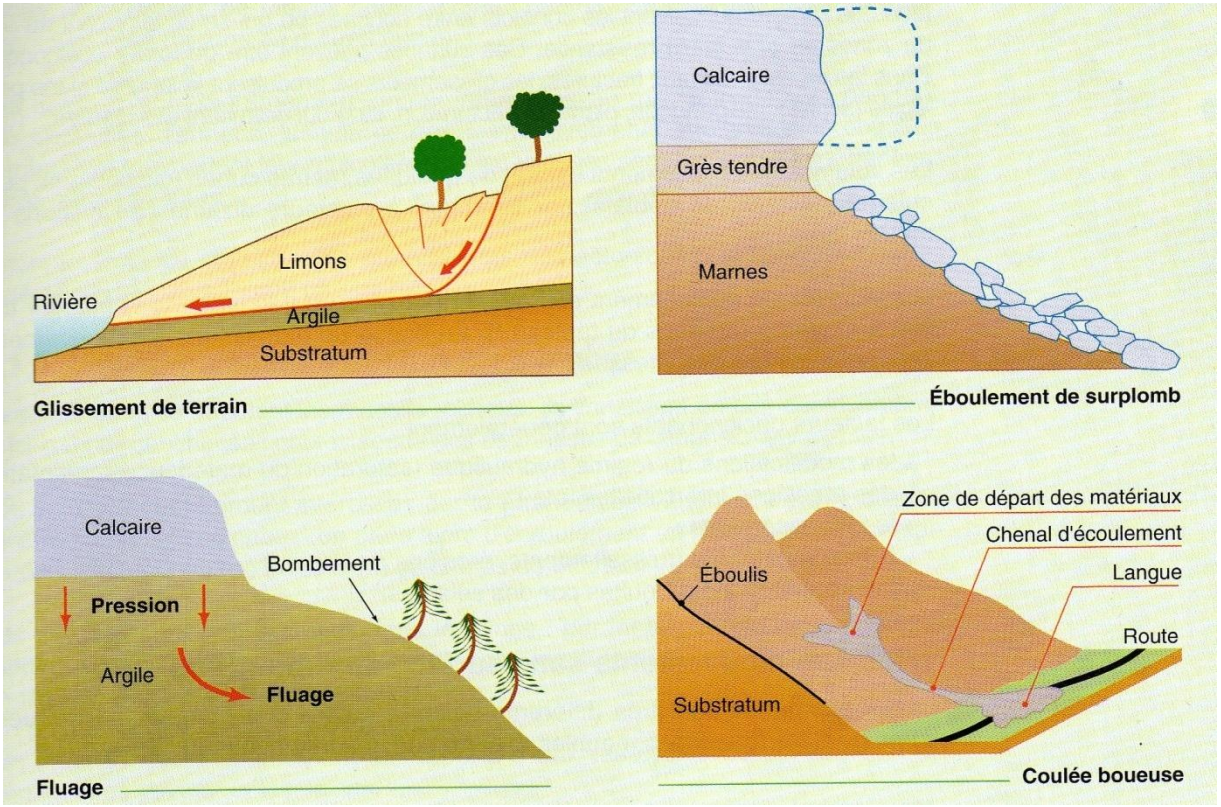


Figure.2.I –Les quatre grands types de mouvements de terrain.

Les deux dernières familles présentent la particularité de mettre en jeu des déplacements de matériaux importants et rapides ; il n'est généralement pas possible d'intervenir au cours du phénomène ni de remettre en état le site après rupture. L'intervention de l'ingénieur est orientée, dans ces conditions vers la prévention, la prévision et la protection.

-Les échelles géométriques et cinématiques des phénomènes sont très étendues :

- Volumes allant de quelques décimètres cubes (pour des chutes de blocs) à plusieurs millions de mètres cubes ;
- Vitesses très lentes (quelques millimètres par an) à très rapides (plusieurs dizaines de mètres par seconde pour les éboulements). Le tableau 1.I définit une terminologie cinématique caractérisant les mouvements de terrain.

Tableau .1.I – Echelle cinématique des mouvements de terrain.

Très lent	***Lent***	***Moyen***	***Rapide***	***Très rapide***
1mm/an	*1mm/mois*	*1,5mm/jour*	*4mm/h*	*2500mm/s*
à	*à*	*à*	*à*	*à*
12 mm/an	*50/mois*	*100mm/jour*	*10000mm/h*	*10000mm/s*

I.1.1. Les glissements

Ces mouvements se produisent généralement dans des matériaux meubles (des sols) ou des massifs rocheux fracturés ou altérés.

Ils se manifestent par le déplacement d'une masse de matériau le long d'une (ou plusieurs) surface(s) de rupture. La forme de cette dernière dépend en partie de la structure géologique du site. Les formations complexes donnent généralement lieu à des surfaces de rupture qui suivent les contacts entre couches ou qui se développent au sein des zones de plus faibles résistances, ces surfaces peuvent être de forme quelconque. Dans les massifs rocheux fracturés, les glissements se produisent le long des plans privilégiés (schistosité, pendage, plans de fracturation, etc.) qui délimitent des dièdres.

– Les volumes des glissements varient de quelques mètres cubes (glissements pelliculaires de talus déblais, par exemple) à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes.
– Les vitesses de déplacement couramment observées varient dans la plage « très lent à moyen » (au sens du tableau 1.I). En phase de paroxysme les mouvements peuvent atteindre des vitesses « rapides ».

– Les facteurs déclencheurs sont généralement

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles, etc.) ;
- Les terrassements ;
- L'érosion naturelle (ruissellement, érosion de berges) ;
- Les accélérations produites par les séismes.

Classification des glissements selon la forme

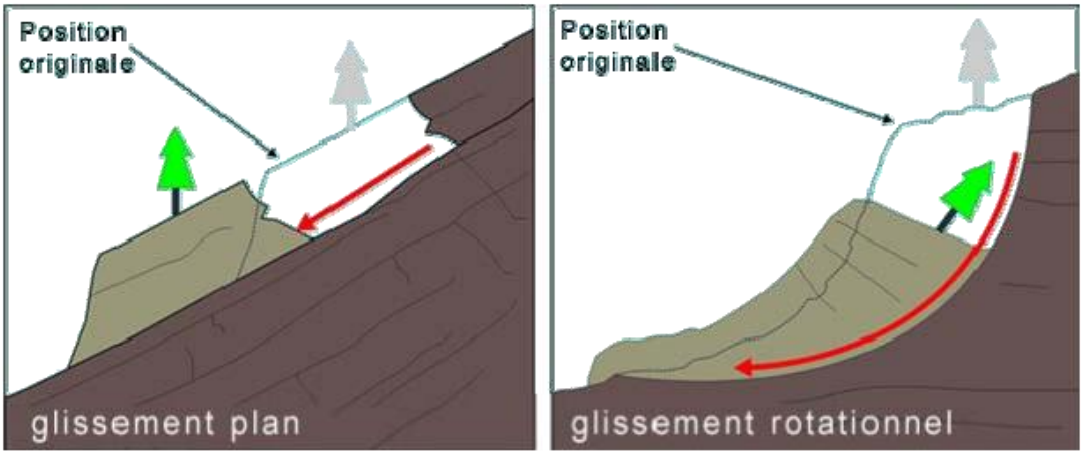
-Les glissements de type rotationnel : Sont en général de volume limité. Ils se produisent principalement dans des terrains meubles homogènes surtout argileux et silteux. Dans une coupe verticale, la surface de glissement est circulaire et plonge presque verticalement dans la niche d'arrachement. En règle générale, le mécanisme du glissement ne provoque qu'un faible remaniement interne du matériau glissé.

Des dépressions avec crevasses ouvertes et des fissures de traction sont souvent visibles dans la moitié supérieure du glissement, alors que la masse glissée tend à s'étaler et à se désagréger au front du glissement, où peuvent se former des écoulements de boue (coulées de terre) en cas de saturation en eau de la masse.

- Les glissements translationnels : Lors de glissements translationnels, les couches de terrain ou les ensembles de couches stratifiées glissent sur une zone de faiblesse existante (souvent pendage stratigraphique, discontinuité stratigraphique, schistosité, plan de fissure ou de rupture). En plan, la taille de tels glissements est très variable et peut comprendre des surfaces allant de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés.

L'épaisseur des masses en mouvement atteint fréquemment plusieurs dizaines de mètres. Les zones de flysch, les schistes marno-calcaires ou les schistes métamorphiques sont les formations les plus sujettes à ce genre de glissement.

La figure 3.I schématise les deux types de glissement.



(a) **(b)**

Figure. 3.I - les deux types de glissement (plan (a) et rotationnel (b)).

Classification des glissements selon la vitesse

-**Glissement de terrain permanant** : C'est un mouvement qui s'étend sur une longue période, la masse de terre se déplace régulièrement vers l'aval le long d'une surface de rupture existante, avec des phases d'accélération et de réactivation.

-**Glissement de terrain spontané** : C'est un mouvement relativement rapide qui se produit contrairement au glissement permanant le long d'une nouvelle surface de glissement, il se déclenche de manière subite avec des vitesses instantanées élevées, la teneur en eau étant insuffisante pour induire la liquéfaction du matériau (le sol garde une partie de sa cohésion) donc une surface de glissement peut être observée (pas de coulée).

I.1.2. Les mouvements sans surface de rupture

Les phénomènes sont très différents selon la nature des matériaux impliqués : d'une part, les formations meubles, d'autre part les formations rocheuses.

-Mouvements dans les formations meubles : Les mouvements dans les formations meubles sont souvent désignés par le terme générique de fluage. Ils se caractérisent par des mouvements lents dans la masse, susceptible d'évoluer par un phénomène de rupture progressive vers des glissements ou des écroulements (apparition d'une surface de rupture).

Le fluage se produit généralement au sein de formations (marne, argile plastique, etc.) de grande épaisseur, supportant une surcharge (naturelle ou anthropique). Ce type de phénomène s'observe également dans des remblais constitués d'argiles, qui ont été amenés à des teneurs en eau élevées au cours du temps et fluent sous leur propre poids.

– Les volumes intéressés par ce phénomène sont comparables à ceux des glissements. Les vitesses de déformation sont « très lentes ».
– Les causes motrices principales sont le chargement (dans le cas de matériaux naturels), la saturation progressive (dans le cas de certains remblais argileux) et l'évolution des caractéristiques mécaniques du matériau.

- Mouvements dans les formations rocheuses : Les mouvements dans les formations rocheuses sont souvent désignés par le terme de fauchage et se caractérisent par un basculement ou renversement des sommets de couches très redressés (proches de la verticale).

– Le fauchage affecte des matériaux qui présentent une schistosité : schistes, gneiss et micaschistes. Les marno-calcaires, grès et pélites également sont sensibles à ce type de phénomène.
– Les volumes des fauchages sont souvent très réduits : quelques centaines de mètres cubes voire quelques milliers de mètres cubes. Dans certains cas exceptionnels, ils atteignent plusieurs millions de mètres cubes.
– Les vitesses sont extrêmement lentes, inférieures au millimètre par an pendant des centaines d'années, jusqu'à ce que les mouvements atteignent les couches extrêmes et provoquent leur basculement ; les vitesses sont alors plus importantes : « très lentes à lentes ».
– Parmi les causes motrices, les mouvements néotectoniques, le vieillissement et l'altération des joints jouent un rôle majeur.

I.1.3. Les écroulements et chutes de blocs

Ces phénomènes affectent les massifs rocheux. Ils consistent en des déplacements le long de discontinuités : chutes soudaines de masses de dimensions variables.

– Les volumes couramment intéressés par le phénomène varient entre une dizaine de milliers de mètres cubes (on parle alors d'écroulement en masse) et une dizaine de mètres cubes (on parle alors de chutes de blocs).
– Les vitesses sont très variables dans le temps : durant la période qui précède la rupture, la vitesse est « très lente » ; pendant la chute des blocs ou l'écroulement en masse, elle est « très rapide ».

– Les facteurs déclenchants sont les apports d'eau, les cycles de gèl-dégel, l'érosion, le sous-cavage et les séismes.

Figure. 4.I – chute de bloc.

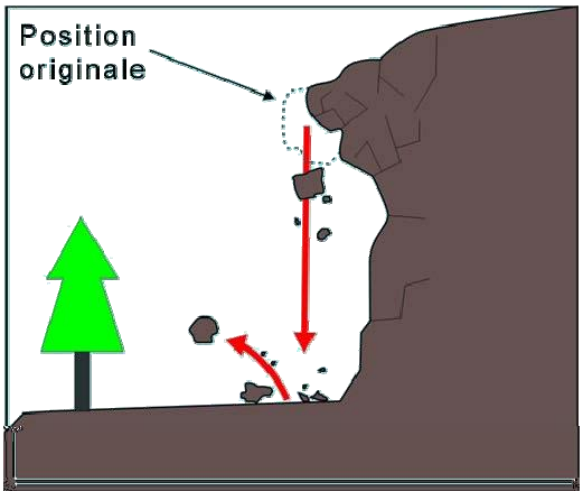


Figure. 5.I – Éboulement.

I.1.4. Les coulées boueuses et laves torrentielles

Ces phénomènes sont des mouvements fluides de suspensions de matériaux de granulométrie variable pouvant aller des limons aux blocs rocheux. La taille de ces blocs est généralement de l'ordre du décimètre mais peut atteindre plusieurs mètres. Les mouvements se produisent lorsque la matrice fine atteint une teneur en eau très élevée qui la liquéfie.

– Les volumes déplacés se chiffrent en dizaines voire en centaines de milliers de mètres cubes.

– Les vitesses atteintes sont « très rapides » pendant une durée de quelques heures à quelques jours. Les distances parcourues peuvent atteindre plusieurs kilomètres.

Ces phénomènes se produisent lorsque des quantités d'eau très importantes sont disponibles. C'est le cas pendant de fortes précipitations ou lors de ruptures de digues ou de barrages.

I.1.5. Synthèse

Le tableau 2.I présente les différentes familles de mouvement et leur caractérisation en termes de nature de matériaux, de vitesses de déplacement, de volumes déplacés et de facteurs déclenchants.

Tableau 2.I – éléments caractérisant les différentes familles de mouvements :

Terrains		**Vitesse moyenne**	**Volume**	**Facteurs déclenchants**
Glissement	Sols Massifs fracturés	Très lente à moyenne	De quelques m^3 à plus de dix millions m^3	Eau, terrassement
Fluage	Formations meubles	Très lente	De quelques m^3 à plus de dix millions m^3	Chargement Évolution du matériau
Ecroulement	Massifs rocheux	De très lente à très rapide	De quelques m^3 à plus de dix milles m^3	Eau, gel-dégel, Séisme
Coulée	Sols argileux et limoneux lâches	Très rapide	De dix à plusieurs Centaines de milliers de m^3	Très fortes pluies, Ruptures de digues

I.2. Conditions de stabilités

Le processus d'instabilité d'une pente dépend de différents facteurs :

- Sa géométrie.
- La résistance au cisaillement des sols ou des roches.
- Les pressions interstitielles de l'eau.
- Les sollicitations extérieures (climatiques ou anthropiques).

I.2.1. La géométrie

La pente de la surface de terrain constitue le premier facteur de stabilité ou d'instabilité. La pente critique dépend de la nature des sols ou des roches (caractéristiques de résistance au cisaillement) et de la présence d'eau dans le massif.

I.2.2. Résistance au cisaillement des sols ou des roches

Parmi les facteurs qui régissent la stabilité d'une pente, la résistance mécanique des sols et des roches constitue un élément essentiel.

– Le mécanisme de rupture mis en œuvre dans les phénomènes d'instabilité fait intervenir la résistance au cisaillement à laquelle on s'intéressera dans la suite de ce travail.
– Cette résistance, en un point donné, dépend de la nature du matériau, de son histoire et de l'état des contraintes qui règne au point considéré. L'état de contraintes est fonction des diverses sollicitations appliquées au massif (chargement, déchargement, fluctuations de la nappe phréatique, etc.).

En cas de réactivation de glissements de versants naturels, les déplacements se produisent le long de la surface de rupture préexistante. Sur cette surface de rupture, la résistance au cisaillement mobilisée est appelée résistance résiduelle.

La détermination de l'état de stabilité d'un versant nécessite donc la connaissance de deux types de paramètres des terrains rencontrés :

- La résistance au cisaillement à court ou à long terme,
- La résistance au cisaillement résiduelle.

Dans le cas des argiles raides, que l'on rencontre fréquemment dans les versants instables, la courbe effort-déformation relevée lors d'un essai de cisaillement présente un pic de résistance plus au moins marqué, suivi d'une décroissance sensible de la résistance au cisaillement ; la valeur ultime est la résistance résiduelle. Cette dernière s'obtient en laboratoire par un essai de cisaillement alterné, comme l'indique la figure 6.I.

Les analyses de stabilité consistent habituellement en un calcul d'équilibre limite prenant en compte la résistance au cisaillement au pic, dans le cas d'une première rupture, et la résistance au cisaillement résiduelle. Dans le cas de la réactivation d'un glissement. En général, ce sont les paramètres de résistance drainés c' et φ' (valeurs de pic) et c'_R et φ'_R (valeurs résiduelles) qui régissent la stabilité de la pente.

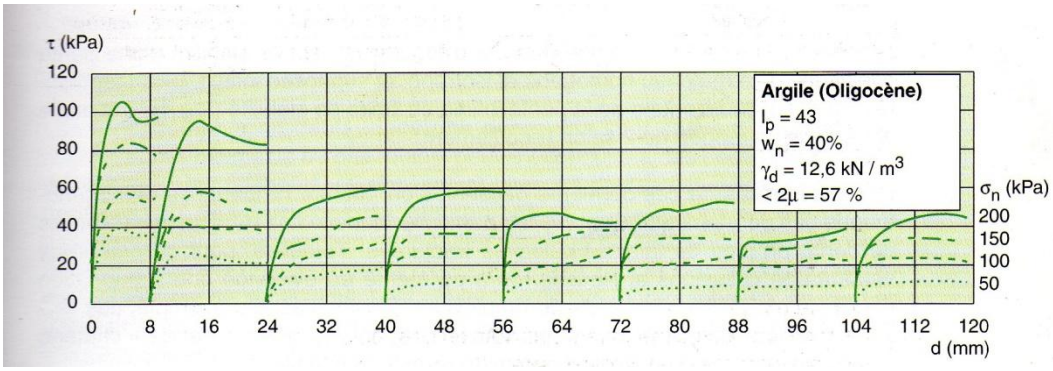


*Figure.6.I – Courbes de cisaillement de l'argile de Sallèdes (Puy-de-Drôme), essais de cisaillement alternés réalisés à la boite (6*6), la course est de 16 mm alternativement dans un sens et dans l'autre (Guide Technique LCPC Paris, février 1998).*

Par ailleurs, dans le cas des remblais de versant, l'effet de la consolidation des argiles reste très faible et la construction de l'ouvrage par étapes n'apporte aucune amélioration de la stabilité (Blondeau et a*l 1983).*

Le comportement mécanique des sols et des roches dépend de facteurs mal connus comme les déformations avant rupture, l'état de contraintes dans le massif, la loi de comportement du matériau, les conditions aux limites, etc. Certains auteurs ont proposé de prendre en compte ces aspects dans l'analyse de stabilité, par des calculs en éléments finis (Chan et Morgenstern, par exemple, en 1987).

Des résultats intéressants ont été obtenus , mais ce type d'approche fait partie, encore aujourd'hui, du domaine de la recherche.

I.2.3. Conditions hydrauliques

La compréhension du régime hydraulique du site est un élément essentiel pour l'analyse d'une instabilité et dans la recherche des solutions. Ceci conduit à s'intéresser à une zone nettement plus grande que celle qui est en mouvement. En effet, les conditions d'alimentation peuvent être complexes et dépendre des couches de terrains situées bien en amont.

La connaissance des conditions hydrauliques nécessite une longue durée d'observation sur le terrain. Par exemple, on peut choisir de prendre en compte des régimes hydrauliques mesurés durant une année dont la pluviométrie est décennale. Ceci étant rarement possible, des extrapolations peuvent être utilisées pour juger des conditions les plus défavorables.

La détermination du régime hydraulique est souvent très difficile du fait de l'étendue des zones à prospecter et de l'hétérogénéité des sols rencontrés, et notamment la présence d'accidents tectoniques qui perturbent sensiblement les nappes.

Certains éléments sont de première importance. Il s'agit :

- des pressions interstitielles au niveau de la surface de rupture ; la nappe peut être statique ou présenter des gradients mettant en charge la couche le long de laquelle se produisent les mouvements ;
- de l'alimentation hydraulique du site ; des couches plus perméables dont la capacité d'alimentation est importante, sont susceptibles d'exister et il est alors intéressant de les drainer. D'une manière plus générale, la perméabilité des terrains est un point important qui permet d'orienter les solutions de confortement ;
- de l'évolution de la nappe au cours du temps ; les mouvements s'accroissent fortement au-delà d'un seuil critique.

Le tableau 3.I illustre l'influence du type d'écoulement sur la stabilité d'une pente constituée d'un matériau homogène et isotrope, et supposée infinie. Il donne l'inclinaisonβ, sur l'horizontale de la pente infinie en limite de stabilité (F=1). Cet angle varie dans un rapport de 2 selon l'écoulement.

Les expériences de ces dernières décennies ont montré l'importance des phénomènes dits de « château d'eau », en particulier dans les couches d'éboulis de pentes en pied de falaises calcaires fracturées. Toutefois, pour de nombreux versants de colluvions argileuses, on a pu mettre en évidence une alimentation principale par infiltration directe de l'impluvium.

Tableau3.I – inclinaison limite d'une pente infinie en fonction du type d'écoulement

Type de l'écoulement	**Angle β limite théorique**	**Sable (φ′=35°)**	**Argile (φ′=22°)**	**Argile (φ′=14°)**
Parallèle à la pente	$\beta = \tan^{-1}(0{,}5.\tan\varphi')$	$\beta = 19{,}3°$	$\beta = 11{,}4°$	$\beta =$ $\beta = 7{,}1°$
Horizontal	$\beta = \varphi'/2$	$\beta = 17{,}5°$	$\beta = 11°$	$\beta = 7°$

Vertical descendant	$\beta = \varphi'$	$\beta = 35°$	$\beta = 22°$	$\beta = 14°$

I.2.4. facteurs climatiques et anthropiques

Les facteurs climatiques prépondérants sont constitués par les rapports d'eau. Les autres actions externes, susceptibles de modifier l'état d'équilibre d'un versant, résultent principalement des modifications de géométrie, de chargement et de déchargement.

- **Pluie, neige, évapo-transpiration**

Les nappes sont alimentées principalement par les pluies et la fonte des neiges. D'autres phénomènes peuvent se rajouter, comme des infiltrations à partir de fossés, de bassins de rétention et d'adduction d'eau ou de réseaux d'assainissement.

- **Séismes**

Les sollicitations sismiques peuvent être la cause des glissements de terrain. Deux phénomènes entrent en jeu dans ce cas :

- La liquéfaction des limons et sables fins saturés, susceptibles de provoquer le glissement des formations sus-jacentes,
- La force d'inertie déstabilisatrice due au séisme.

- **Construction sur pente**

La construction de remblais sur pente naturelle diminue la stabilité de l'ensemble pente et remblai. Cartier et a*l* (1984) décrivent le glissement de Nabringhen (figure 8.II), déclenché par la construction d'un remblai sur un versant crayeux reposant sur l'argile du Gault. A la suite de conditions météorologiques très défavorables, le remblai et la pente naturelle se sont déplacés de plusieurs mètres.

Lorsque la pente naturelle est en équilibre limite, ou qu'elle a connu des glissements par le passé, les charges apportées par les ouvrages (remblais, fondations, soutènement) peuvent provoquer des mouvements et des désordres importants. L'ouvrage mis en place peut dans certains cas être complètement détruit.

- **Déblai sur pente**

Les terrassements en déblai dans une pente, qui sont souvent réalisés pour construire des bâtiments ou des routes, peuvent conduire à des désordres de grande ampleur. Ces phénomènes s'observent dans les pentes naturelles en équilibre limite, avec des surfaces de glissement remontant loin en amont. Ils s'expliquent par la suppression de la butée de pied. De faibles volumes de déblais peuvent provoquer des glissements d'ensemble.

L'action de raidissement d'une pente d'un talus joue un rôle défavorablement sur la stabilité de ce dernier.

- **Modification de l'utilisation des sols**

Une autre cause d'instabilité est le changement d'utilisation des sols ;

- Remembrement
- Déforestation
- Abandon d'exploitations agricoles (cultures en terrasses, drainages agricoles).

I.3. Vitesses de déplacement des glissements

- K.Terzaghi (1950) proposent quatre phases

- La phase de préparation : dans cette phase on remarque une absence d'évolution mesurable ou un mouvement de faible amplitude qui peut conduire à une diminution progressive des caractéristiques du terrain.
- La phase du paroxysme (rupture) : c'est une période généralement de courte durée pendant laquelle on observe des déplacements importants. La stabilisation du glissement a lieu généralement après cette phase.
- La phase d'amortissement (relaxation) : elle succède immédiatement à la phase de proxysme, c'est la phase la plus couramment rencontrée par le géotechnicien, car, il est amené à intervenir dans cette phase pour stabiliser ou surveiller le phénomène.
- La phase de stabilisation : le versant est stabilisé pour une durée indéterminée

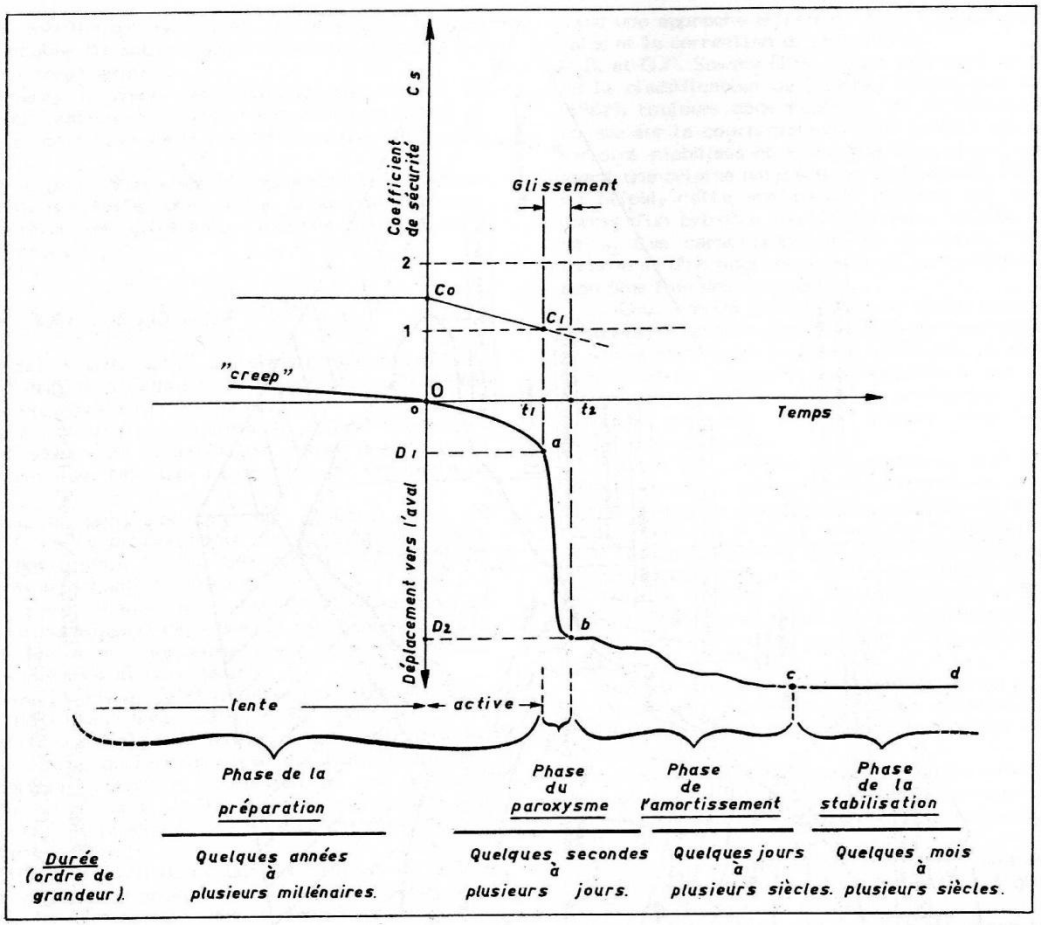


Figure. 7.I-diagramme illustrant la dynamique d'un glissement de terrain.

- Une pente naturelle connaît plusieurs périodes dans son évolution, Vaunat et a*l*.(1994) proposent de considérer quatre phases aussi

  - Pré-rupture.
  - Rupture.
  - Post-rupture.
  - Réactivation.

I.3.1. Pré-rupture

En phase de pré-rupture, deux situations sont susceptibles d'être observées : la première correspond à une absence d'évolution mesurable du massif, la seconde à l'existence de mouvements de faibles amplitudes, qui induisent une diminution progressive de la résistance moyenne des terrains. Ce phénomène est connu sous le nom de rupture progressive. Il a été décrit vers les zones voisines.

I.3.2. Rupture

La rupture, *stricto sensu*, correspond à la période, généralement de courte durée, pendant laquelle le massif connaît des déplacements importants. Cette notion dépend du sens accordé au terme « déplacements importants » : les déformations admissibles d'un ouvrage porté par le massif en rupture peuvent, par exemple, permettre de la définir. Au sens mécanique, une zone du massif de sol ou de roche est à la rupture lorsque l'état de contraintes atteint la résistance au pic.

Les vitesses de glissement atteintes lors de la rupture peuvent être très importantes. En général, l'intervention pour stabiliser le massif a lieu après cette phase de mouvements très intenses.

Lorsque les mouvements sont déclenchés par des séismes, on observe en général des vitesses élevées plusieurs heures après le passage de l'onde sismique.

Dans le cas où la modification de l'état des contraintes dans le massif est brutale non contrôlée (lors de terrassements par exemple), le phénomène se caractérise généralement par des mouvements importants de la pente qui peuvent atteindre en quelques heures, plusieurs dizaines de mètres selon le matériau constitutif. Il s'agit d'une rupture généralisée. Les vitesses de mouvements iront par la suite en décroissant (en phase post-rupture) pour évoluer en fonction d'autres facteurs d'influences (hydrogéologie, géométrie).

I.3.3. Post-rupture

La phase post-rupture succède immédiatement à la phase rupture.

Le cas de la post-rupture correspond au cas le plus couramment rencontrés par le géotechnicien. En effet, très souvent, il est amené à intervenir après que les mouvements les plus importants se sont produits.

Selon les types de phénomènes, les vitesses moyennes durant cette phase correspondent à celles présentées dans le tableau 2.I, dans les plages « très lente » à « très rapide », en fonction des facteurs pluviométriques et géométrique.

Les vitesses conditionnent les techniques se stabilisation réalisables : des drains ne pourront pas être installés dans un massif qui glisse de plusieurs dizaines de centimètres par mois.

Dans le cas d'instabilité qui affectent des colluvions argileuses, les mouvements se produisent en dehors des périodes sèches et les vitesses de déplacement présentent des pointes, qui peuvent atteindre plusieurs centimètres par jour et dont l'amplitude dépend de la durée et de l'importance des épisodes pluvieux antérieurs. Les mouvements se produisent par à-coups successifs lors des remontées des pressions interstitielles.

La cinématique peut être très différente d'un site à l'autre. On peut rencontrer des phénomènes avec plusieurs surfaces de rupture (emboîtées ou non) et des comportements différents au niveau de chacune d'elles.

Certaines instabilités de grande ampleur dans des éboulis calcaires présentent une surface de glissement profonde (47m) et une vitesse de déplacement de l'ordre du centimètre par an. Cette vitesse paraît peu influencée par les évolutions piézométriques ou les apports pluviométriques.

I.3.4. Réactivation

La réactivation désigne un mouvement qui se produit le long d'une surface de rupture créée lors des déplacements anciens et après qu'ils se sont arrêtés pendant une période de temps plus ou moins importante.

En l'absence de modifications géométriques, les réactivations de mouvement sont principalement liées à l'hydrogéologie du site (figure 8.I).

Les manifestations qui en résultent peuvent varier sensiblement d'un site à l'autre : c'est ainsi que l'on peut observer des déplacements annuels sur versants marneux de l'ordre du millimètre ou supérieurs à 30mm sur le site de Sallèdes (Puy-De-Dôme).

Lorsque des terrassements sont réalisés sur un site de glissement fossile, un suivi des mouvements en surface ou en profondeur peut permettre de contrôler l'évolution de la déformation avant la réactivation, et d'arrêter éventuellement les terrassements pour éviter des désordres importants.

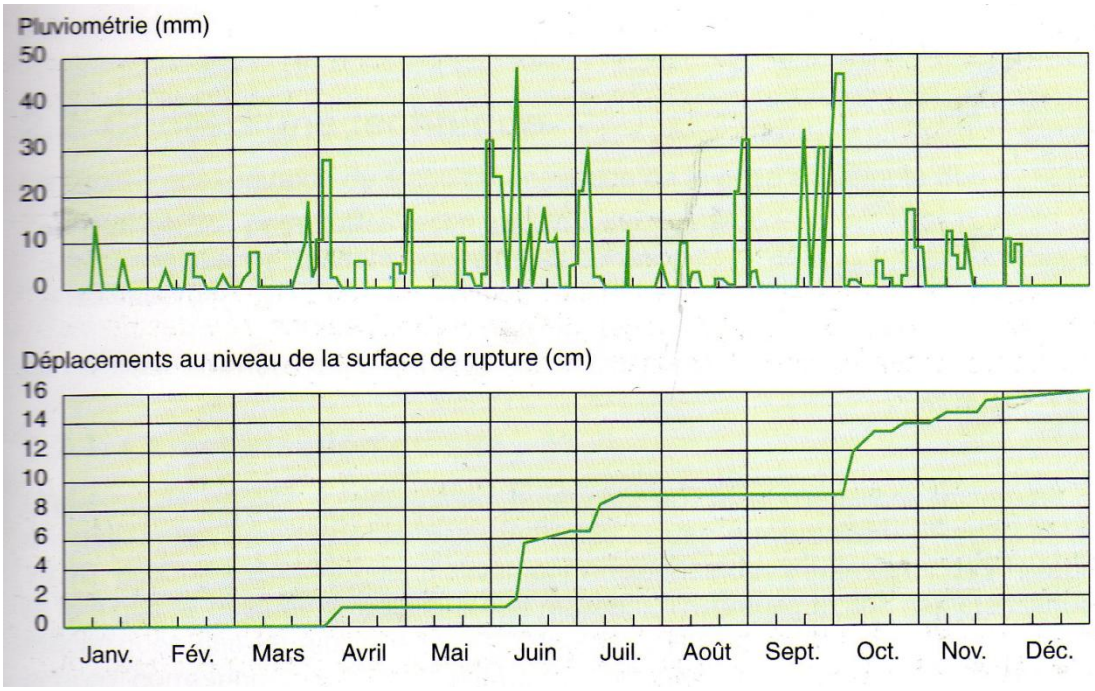


Figure. 8.I – Évolution des déplacements du glissement de

(Puy-de-Drôme) en regard de la pluviométrie

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

I.4. Conclusion

Quatre familles principales caractérisent les mouvements de terrain. Des classifications ont été exposées dans ce chapitre. Elles s'appuient sur des notions de cinématique, de nature de sol ainsi de la forme et de la surface de rupture.

Une description a été faite pour les quatre types de mouvement de terrain ; commençant par les causes qui dépendent de la géométrie, la résistance au cisaillement, les pressions interstitielles de l'eau et les sollicitations extérieures.

J'ai étudié aussi les principales phases de déplacement des glissements selon les auteurs cités dans ce chapitre.

Chapitre II :

Techniques de stabilisation des glissements de terrain

II.1. Introduction

Dans la majorité des cas, l'étude d'un glissement de terrain conduit à définir une solution confortative. Cette solution doit tenir compte de la faisabilité des travaux liée à :

- L'investissement consenti.
- L'accessibilité du site.
- La période de l'année choisie pour l'exécution des travaux.
- La cinématique du glissement.

Elle doit tenir compte également d'autres aspects tels que

- Les conditions de sécurité vis-à-vis de l'environnement et notamment les risques de désordres en phase de travaux ;
- Les délais impartis à la réalisation du confortement, qui dépendent de la gravité du phénomène et de l'urgence des travaux ;
- La pérennité du système retenu et les possibilités d'entretien et de réparation ;
- Les moyens en matériels et la technicité des entreprises locales.

Enfin, les différentes solutions envisageables sont examinées dans l'ordre d'une progressivité croissante des moyens mis en œuvre : des solutions réparatrices (qui s'opposent aux conséquences de l'instabilité) aux solutions curatives (qui traitent la cause de l'instabilité), en allant des solutions les plus simples aux plus complexes. De plus, dans certains cas, les actions peuvent être graduées dans le temps : par exemple, mise en place progressive de diverses actions de drainage après appréciation de l'efficacité de chacune d'entre elles.

Dans ce sens, le jugement et l'expérience du géotechnicien contribuent au meilleur choix. La réalisation d'une étude de stabilité adaptée à l'ampleur des problèmes fournit une méthodologie qui assure une aide réelle à la décision. C'est la connaissance des particularités locales et régionales, ainsi que l'analogie avec des chantiers réussis, qui permettront d'adapter les règles générales au site considéré.

II.2. choix d'une technique

Le choix d'une méthode de stabilisation résulte de la prise en compte de :

- L'analyse des paramètres techniques du site,
- La connaissance des techniques de stabilisation,
- Les impératifs technico-économiques.

La méthode retenue devra être le fruit d'un compromis entre ces trois aspects.

II.2.1. Caractérisation du site

L'analyse de stabilité, généralement basée sur un calcul d'équilibre limite, conduit à évaluer quantitativement l'incidence des paramètres de l'instabilité tels que la géométrie (équilibre des masses), l'hydraulique, les caractéristiques mécaniques des terrains. Le résultat de ces calculs permet donc de classer les actions correspondantes (terrassement, drainage, soutènement et amélioration des efforts résistants) par ordre d'efficacité. Il convient son choix dés le départ, sur la basse de ce classement. Évoquer trop tôt les problèmes de faisabilité, de coût, d'urgence, etc., peut en effet conduire à éliminer une solution qui aurait pu être optimale.

En pratique, on procède de la façon suivante :

- Sur un profil représentatif du glissement,on s'assure que le calcul de stabilité donne un coefficient de sécurité F_0=1 avec les paramétres (résistance au cisaillement mobilisable, niveau de la nappe, géométrie,etc.) à l'époque de la rupture. On fait alors varier l'équilibre des masses, les niveaux des nappes, les caractéristiques mécaniques,etc.,ce qui fournit, pour chaque technique de stabilisation, le gain de stabilité $\Delta F/F_0$ que l'on peut espérer obtenir :
- Le gain de sécurité théorique ainsi déterminé doit alors être comparé avec la marge qu'il est nécessaire d'atteindre en pratique pour stabiliser le glissement et s'affranchir des désordres ultérieurs. Cette marge n'est généralement pas de 50% comme pour les projets d'ouvrages en terre, mais comprise entre 10 et 30%. Cette différence entre le projet et la réparation provient du fait que le calage à F= 1 sur « l'essai de cisaillement en vraie grandeur » que constitue le glissement réduit ces incertitudes. Les marges de sécurité à atteindre par chacune des techniques de stabilisation sont, par ailleurs, bien calées sur l'expérience, bien qu'il n'existe pas de valeur unanimement fixée.

Quelques recommandations sur la manière d'évaluer les avantages et les inconvénients de chaque technique sont données dans la suite de ce travail.

La construction d'un ouvrage (remblai, déblai, fondation d'une structure) sur un versant pose le problème de la stabilité du versant dans une zone réduite appelée communément zone d'influence. En général, la construction ne modifie pas fondamentalement la stabilité d'ensemble du versant (il convient néanmoins de s'en assurer). Le versant est donc maintenu dans ses conditions de stabilité d'origine (qui peuvent être éventuellement inférieures aux critères imposés aux ouvrages neufs). La question qui se pose alors au projeteur est celle de l'étendue de la zone d'influence dans laquelle le versant et l'ouvrage doivent avoir un coefficient de sécurité minimal vis-à-vis du glissement=1,5. Une règle couramment admise est celle dite des « 3H » :

- Dans le cas d'un remblai de hauteur H, la zone d'influence a pour longueur 3H horizontalement en aval du pied de remblai ;
- Dans le cas d'un déblai de hauteur H, la zone d'influence a pour longueur 3H horizontalement en amont de la crête du déblai ;
- Dans le cas d'une fondation de structure, la zone d'influence est une combinaison des deux cas précédents (remblai-déblai).

Cette « règle » est issue de calculs élastoplastiques par éléments finis de massifs horizontaux excavés pour lesquelles on a obtenu des points plastiques jusqu'à une distance de 2H de la crête du déblai. Elle a été généralisée en « 3H » et reste toute théorique. En effet, les conditions géologiques sont prépondérantes : existence d'une surface de rupture fossile, d'une couche « savon », d'un pendage privilégiant le glissement, etc. Elle doit donc être adaptée à chaque cas particulier étudié.

Des actions de stabilisation acceptables au seul vu des calculs de stabilité peuvent être éliminées du fait de certaines particularités du glissement.
Par exemple :

- La stabilisation des glissements très étendus ne peut généralement pas être assurée par une structure ponctuelle (mur, rangée de pieux, etc.) ;
- Les glissements très actifs s'accommodent mal de technique qui utilisent des éléments fragiles (drains subhorizontaux, tirants, etc.) ;
- Dans le cas des glissements de terrain à très faible module, les structures (pieux, par exemple) ne peuvent généralement pas empêcher la masse en mouvement de s'écouler.

Cette première étape conduit à un premier choix de solutions techniquement acceptables.

II.2.2. Adaptation de la technique au glissement

Proposer un procédé de stabilisation suppose que l'on en maîtrise parfaitement les limites d'utilisation. Aussi doit-on s'interroger sur :

- L'adéquation entre l'action du confortement et la cause des désordres ; d'une manière générale, et outre les limites évoquées précédemment, le fait de se demander si la confortation est à l'échelle du phénomène évitera de nombreuses déconvenues ;
- La pérennité de certaines techniques et les possibilités d'entretien ultérieur, cela peut être le cas de systèmes drainants susceptibles d'être colmatés et pour lesquels un autre type de solution serait préférable ;
- La progressivité d'application des moyens : outre qu'il est toujours préférable d'accorder la priorité au drainage et au terrassement (dans la mesure où l'hydraulique et le chargement sont généralement les causes directes des mouvements), il est également souhaitable de graduer les remèdes en fonction des observations faites sur chantier ; dans ce sens on devra se réserver la possibilité de faire réaliser des travaux complémentaires ;
- La maîtrise des risque liés à certains types de travaux ; ceci concerne la phase de chantier mais également la vie ultérieure du site dans la mesure où, à long terme, une stabilisation locale peut entrainer la réactivation d'autres mouvements ; ce risque concerne principalement les drainages, dont l'exutoire peut réalimenter des terrains en profondeur ou en aval du site et les travaux de terrassement dans les argiles surconsolidées.

Le tableau 1.II présente les différentes techniques de stabilisation des glissements de terrain qui seront décrites en détail dans la suite du travail.

Tableau 1.II-Différentes techniques de stabilisation des glissements de terrain (Guide Technique LCPC Paris, février 1998)

	Principe de stabilisation	Moyens techniques	Méthode de dimensionnement	F final	Contraintes d'utilisation
Butée de pied	Rééquilibrage Des masses	Remblai	Calcul de stabilité avec la géométrie modifiée	1,20 à 1.30	-accès et emprises nécessaires -présence d'un horizon résistant à faible profondeur -assurer la stabilité en aval
Allégement En tête	Rééquilibrage Des masses	déblai	Calcul de stabilité avec la géométrie modifiée	1,20	-accès et emprises nécessaires -assurer la stabilité en amont
Purge totale	Le massif est stable après la purge	déblai	Calcul de stabilité avec la géométrie modifiée	1,50	-s'applique à de petits volumes -protection de la surface mise à nu -assurer la stabilité en amont
Reprofilage	Adoucissement De la pente	déblai	Calcul de stabilité avec la géométrie modifiée	1,20	-accès et emprises nécessaires -terrassements importants
Substitution totale	Apport de matériau de meilleure résistance	Déblai, remblai	Calcul de stabilité avec Les caractéristiques du matériau initial et de celui de substitutions	1,50	--terrassements importants -ancrer sous la surface de rupture -travail par plots
Substitution Partielle :bêche, contrefort, éperon, masque	Apport de matériau de meilleure résistance	déblai remblai	Calcul de stabilité avec Les caractéristiques du matériau initial et de celui de substitution	1,20	-ancrer sous la surface de rupture -protection du matériau allégé -gérer les circulation d'eau
Substitution en tête, matériau allégé	Diminution du moment moteur	Déblai Polystyrène matériau alvéolaire	Calcul de stabilité avec Les caractéristiques de poids du matériau allégé	1,20	-terrassement réduits -protection du matériau allégé -gérer les circulations d'eau
Collecte et canalisation des eaux de surface	Limiter les pressions interstitielles	Cunettes, Drains agricoles	Calcul de stabilité avec le champ de pressions interstitielles estimé après drainage	1,30	-implique une surface supérieure à celle du glissement -entretien indispensable
Tranchées drainantes	Diminuer les Pressions interstitielles	Trancheuse, haveuse, pelle	Calcul de stabilité avec le champ de pressions interstitielles estime après drainage	1,30	-connaissance préliminaire du réseau d'écoulement -entretien indispensable
Drains subhorizontaux	Diminuer Les pressions interstitielles	Drains Plastiques, Moyens de forage	Calcul de stabilité avec le champ de pressions interstitielles estimé après drainage	1,30	-connaissance préliminaire du réseau d'écoulement -vérification du rabattement -entretien indispensable
Drainages profonds	Diminuer Les pressions interstitielles	Drains verticaux puits, galeries	Calcul de stabilité pressions avec le champ de pressions interstitielles estimé après drainage	1,30	-ancrer l'ouvrage sous le niveau de la rupture -gérer la circulation des eaux derrière l'ouvrage
soutènements	Apporter un effort Stabilisateur horizontal	Ouvrages fixes Ouvrages souples	Murs fixes : Calcul de la longueur de massif mis en butée, Murs souples : calcul de stabilité en tenant compte	1,50 1,20	-ancrer l'ouvrage sous le niveau de la rupture -gérer la circulation des eaux derrière l'ouvrage

			de la résistance du mur		
Tirants d'ancrage	Apporter un effort Stabilisateur horizontal	Torons, barres	Calcul de stabilité en introduisant les efforts stabilisateurs, Calcul à la rupture des tirants (F=1,5)	1,20	-technicité importante -estimation correcte des interactions sol/inclusions -associer un bon drainage
clous	Apporter un effort stabilisateur perpendiculaire à la surface de rupture	Barres, tubes micro pieux	Calcul de stabilité en introduisant les efforts stabilisateurs, Calcul à la rupture des clous (F=1,5)	1 ,20 à 1,30	
pieux	Apporter un effort Stabilisateur horizontal	Pieux bétons, profilés H, palplanches	Calcul de stabilité en introduisant les efforts stabilisateurs, Calcul à la rupture des pieux (F=1,5)	1,10 à 1,20	-technicité importante -estimation correcte des interactions sol/inclusions -associer un bon drainage

II.2.3. Contraintes économiques

Les conclusions des réflexions d'ordre technique doivent être mises en regard des impératifs des différentes parties concernées par la stabilisation. Le compromis recherché devra en effet tenir compte :

- Des considérations économiques : rapport « efficacité/coût », de l'entretien et de la maintenance du site après travaux, conditions locales relatives aux matériaux disponibles et à la qualification des entreprises ;
- Des contraintes imposées aux autorités concernées : urgence des travaux, rapidité dans les effets recherchés, risques liés à des ouvrages, problèmes d'emprises ;
- D'autres considérations techniques : conditions météorologiques prévisibles pendant le chantier, menace d'extension du phénomène, degré de stabilisation recherché.

II.2.4. Méthodologie de choix d'une technique de stabilisation

Le choix d'une méthode de stabilisation d'un glissement de terrain passe par le jugement, l'expérience et l'intuition du géotechnicien. Une démarche méthodologique doit être suivie : elle est présentée dans le tableau 1.II. Il est nécessaire d'envisager successivement toutes les techniques existantes avant de fixer son choix.

Le tableau 1.II donne un premier choix de types de solutions envisageables. Les critères utilisés sont volontairement limités aux plus importants.

Le choix obtenu dans le tableau 2.II doit être affiné en tenant compte de la profondeur du mouvement, de la nature et du volume de matériau en jeu, des vitesses de glissement, des contraintes d'accès et d'emprise du site, etc.

Lorsque plusieurs types de solutions sont envisageables, il peut être intéressant de les associer.

Tableau 2.II- méthodologie pour le choix d'une méthode de stabilisation (d'après Cartier,1985)

Phase d'étude	**Eléments nécessaires**
Analyse à rebours du glissement. Calage de la méthode de calcul et des paramétres de résistance au cisaillement sur F=1.	Profil géotechnique Paramètres géométriques, hydrauliques, mécaniques calcul de stabilité.
Détermination de l'influence sur F Des actions envisageables : -modification de la geogéométrie ; -abaissement de la nappe ; -renforcements au niveau de la surface de rupture.	Calculs de stabilité
Définition des solutions techniques	Limites et avantages des techniques envisagées caractéristiques particulières du glissement
Choix d'une solution.	Contraintes économique Délais Savoir-faire des entreprises Risques acceptables à cout et long terme
Dimensionnement de la solution	Calcul de stabilité Essais (tirants, drains, etc.) Règlementation
Travaux.	Controles des structures(déplacements, efforts, etc.) Contrôle des paramétres du glissement

Tableau 3.II-Grille d'orientation d''un dispositif de

Stabilisation d'un glissement de terrain

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998)

Effet sur la stabilité de la variation de pression interstitielle	Effet sur la stabilité de la modification de la géométrie	Effet sur la stabilité de l'accroissement de la résistance au cisaillement	Solutions envisageables
+	+	+	Terrassement Drainage
+	+	-	Renforcement Terrassement (mais substitution inefficace)
+	-	-	Drainage
+	-	+	Terrassement pour substitution Drainage
-	+	+	Renforcement Terrassement
-	+	-	Renforcement terrassement
-	-	+	Terrassement pour Substitution Renforcement
-	-	-	Application des techniques de surveillance ou de protection

+ : important, - : faible

II.3 Mise en œuvre de terrassement

Les conditions de stabilité étant directement liées à la pente du terrain, le terrassement reste le moyen d'action le plus naturel. On peut distinguer trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement :

- L'action sur l'équilibre des masses (allégement en tête et butée en pied),
- Les actions sur la géométrie de la pente (purge et reprofilage),
- Les substitutions partielles ou totales de la masse glissée (bêches, contreforts, masques, éperons).

La figure (1.II) schématise les différentes actions de terrassement.

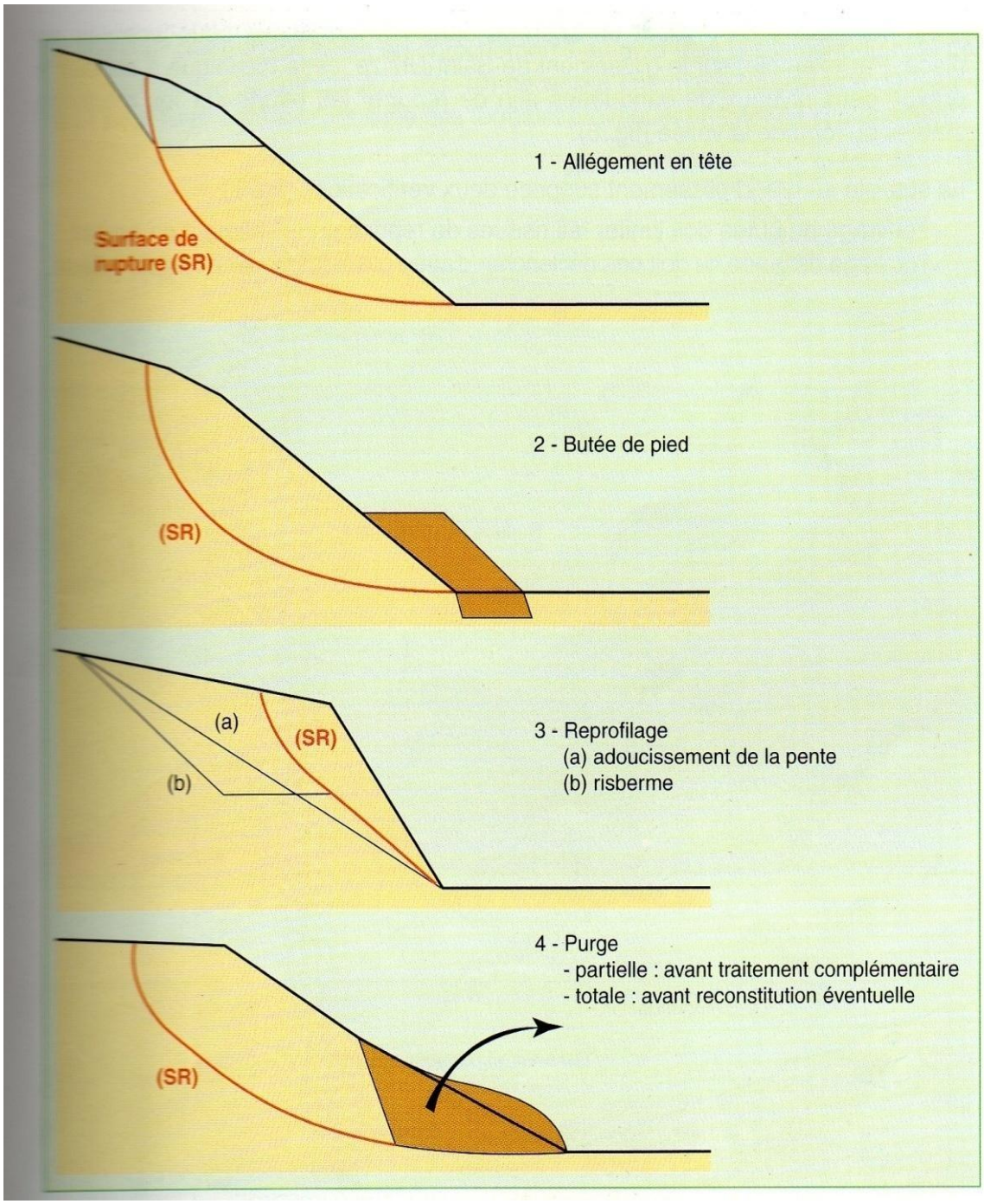


Figure. 1.II -les différentes actions de terrassement possibles

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

II.3.1. Butée de pied et allégement en tête

Le chargement en pied ou déchargement en tête d'un glissement sont des techniques généralement efficaces, qui sont très fréquemment utilisées.

II.3.1.1. Butée de pied

Le chargement en pied (ouvrage de butée, également appelé banquette dans certaines configurations) agit de deux manières : d'une part, il équilibre les forces motrices et, d'autre part, il permet de contenir les déplacements de la masse instable.

Le dimensionnement d'une butée de pied se fait par un calcul de stabilité (méthode de calcul d'équilibre limite) « au glissement » de la pente instable en tenant compte de la modification géométrique envisagée. La surface de rupture étudiée est celle qui résulte de l'investigation (inclinomètre, coupes de sondages, observation de terrain). On recherche généralement une amélioration de la sécurité $\Delta F/F_0$ de 20 à30%.

Il est nécessaire de réaliser un ancrage dans les formations sous-jacentes en place. Par exemple, sur le glissement de Saint-Urcize (France), cette technique a conduit à prévoir deux niveaux de banquettes afin de reporter les efforts sur les moraines stables du fond de la vallée (figure.2.II).

La stabilité au grand glissement suppose deux vérifications (figure.3.II) :

- L'ouvrage de butée doit limiter les risques de reprise du glissement en amont,
- L'ouvrage de butée ne doit pas déclencher d'autre glissement, par exemple à l'aval

.

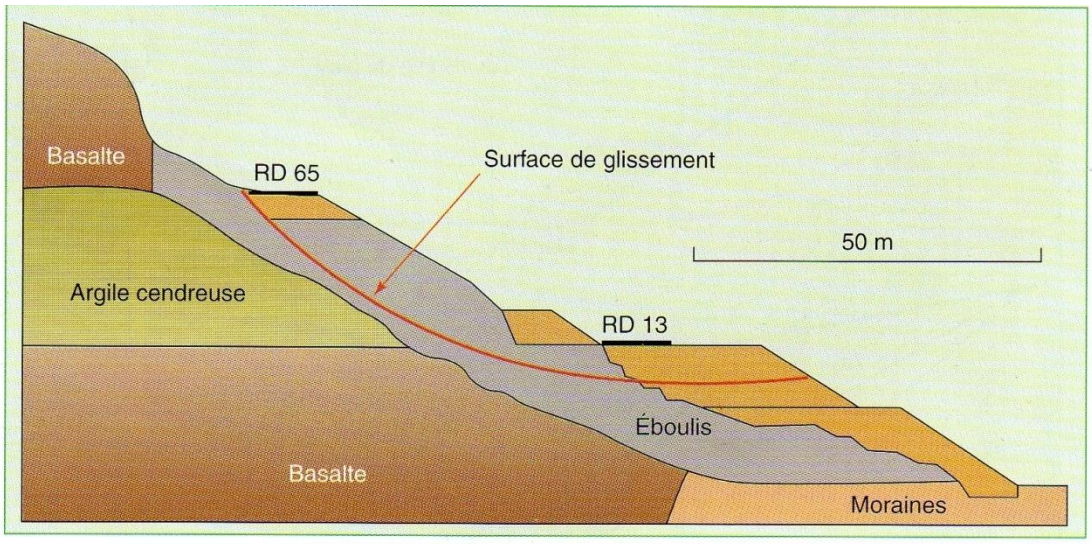


Figure.2.II –Stabilisation par plusieurs niveaux de butées du glissement de Saint-Urciz (Canatl, France).

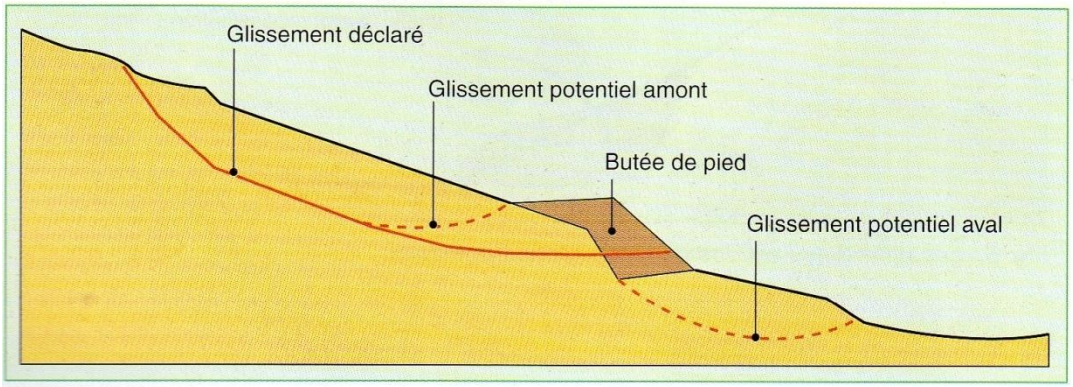


Figure. 3.II –Dimensionnement d'une butée de pied

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998)

On remarquera que les ouvrages de butée ainsi dimensionnés, en plus de leur action gravitaire, peuvent assurer un drainage du massif. Même si l'on ne recherche pas spécifiquement cet effet, il est recommandé d'utiliser un matériau drainant et autostable, et d'organiser la collecte et l'évacuation des eaux, par exemple par un drain placé en fond de fouille et une collection. Dans tous les cas, on veillera à disposer un tapis drainant.

En pratique, il est assez facile de contrebalancer les efforts moteurs par une banquette quand le glissement est profond et ressort subverticalement en pied, comme dans le cas du célèbre glissement de Folkestone Warren, en Grande-Bretagne (figure.4.II), décrit par Hutchinson et al.(1984).

Cette solution est également bien adaptée aux remblais construits sur le flanc instable d'une vallée, à proximité du point bas. C'est ce qui a été réalisé sur l'auto-route A13 au passage du vallon des Bottentuits. Le remblai a été construit selon le profil de la figure (5.II), après réalisation d'un important dispositif d'assainissement .

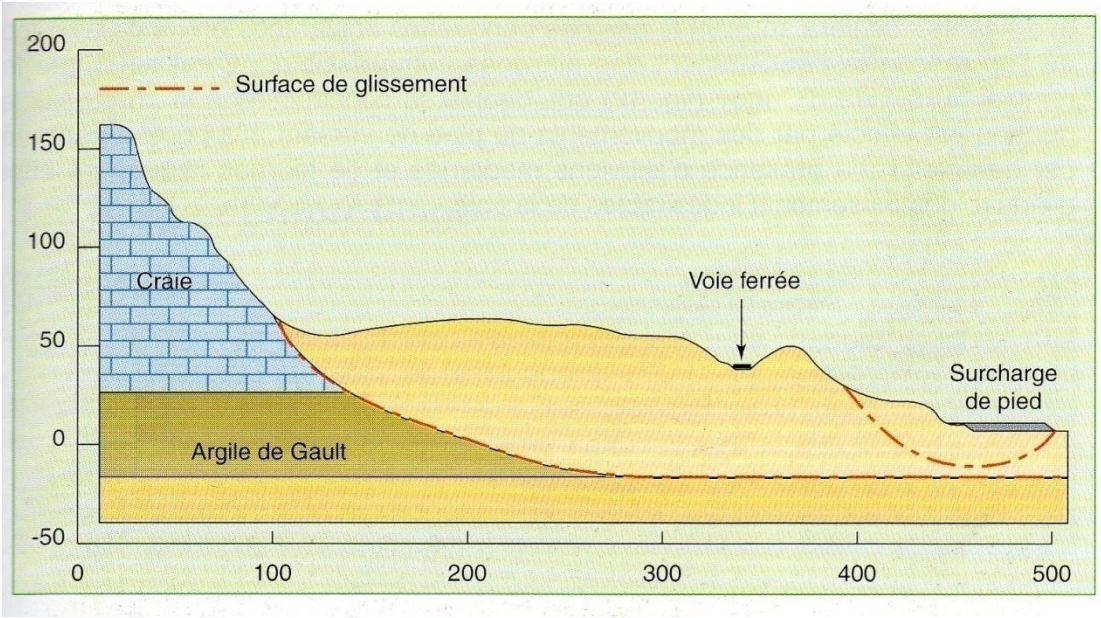


Figure. 4.II – Glissement de Folkestone Warren (Royaume-Uni)

(d'après Hutchinson et al., 1984).

La mise en place d'une butée en enrochements au pied d'un glissement du type de celui du Piou (France) l'Autoroute A75 (figure 5.II) nécessite une masse importante de matériaux pour lutter contre la poussée des terres et provoquer un effet de soutènement

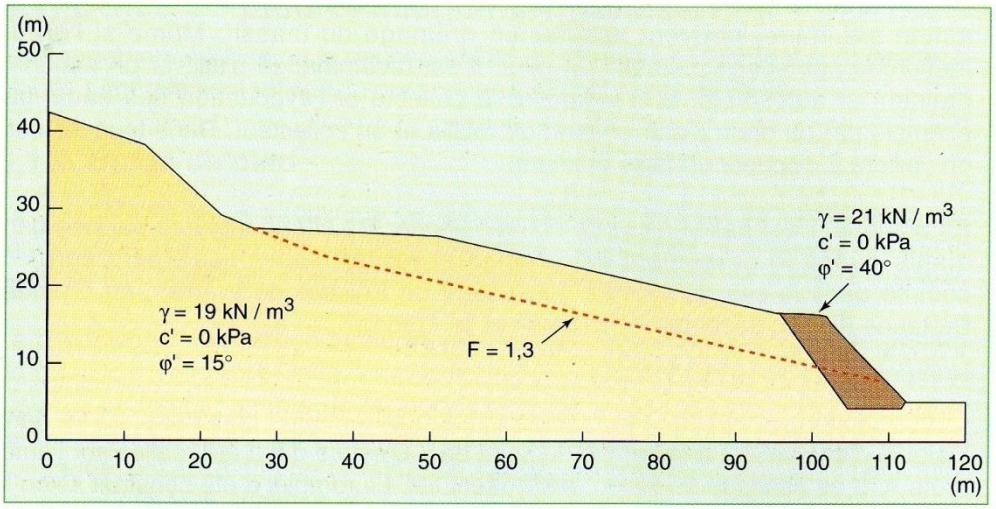


Figure. 5.II –Stabilisation par butée de pied du glissement

de l'autoroute A75 au Piou (Lozère, France).

II.3.1.2. Allégement en tête

L'allégement en tête de glissement consiste à venir terrasser le matériau dans la partie supérieure. Il en résulte une diminution du poids moteur et, par conséquent, une augmentation du coefficient de sécurité. La méthode de dimensionnement consiste en un calcul de stabilité le long de surface de rupture déclarée (figure.6.II) en prenant en compte la modification de géométrie en tête. Le déchargement par terrassement du sommet de la masse glissée, tel qu'il apparaît sur la figure (6.II) (surface 2), peut créer des risques de régression des désordres vers l'amont à court ou à long terme.

Comme dans le cas des butées de pied, l'amélioration de la sécurité recherchée $\Delta F/F_0$ sera de 20%. En général, cet objectif n'est obtenu qu'avec des volumes de terrassement importants. De ce fait, le déchargement en tête est une action rarement suffisante pour obtenir le gain de sécurité souhaité. Une action complémentaire (drainage, recharge en pied, par exemple) devra généralement être recherchée.

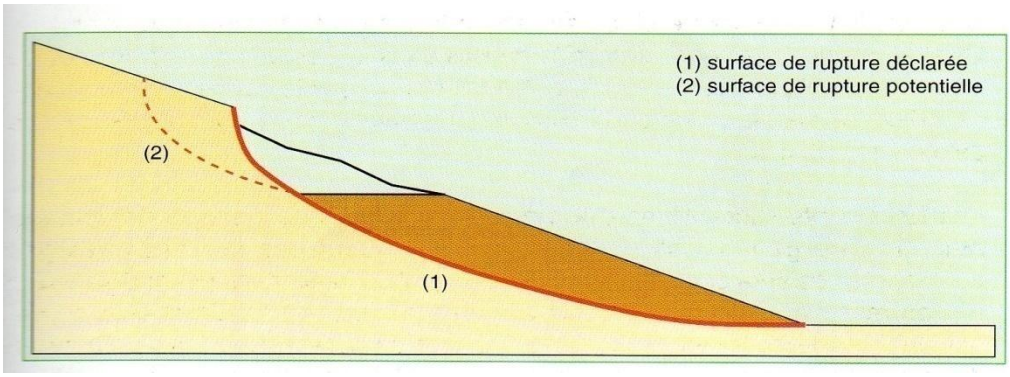


Figure. 6.II –Dimensionnement d'un allégement en tête.

II.3.2. Purge et reprofilage

II.3.2.1. Purge

Les techniques de terrassement s'accompagnent fréquemment de purges du matériau glissé. Cette solution est généralement limitée aux glissements de taille modeste. On peut, dans certains cas, purger l'ensemble du matériau glissé à condition que la surface mise à nu soit stable (F=1.5). C'est souvent le cas des éboulements rocheux.

II.3.2.2. Reprofilage

Les conditions de stabilité d'un talus étant directement liées à sa pente, on peut assez simplement augmenter la sécurité par retalutage du terrain naturel. Dans ce sens, le procédé s'apparente à l'allégement en tête : il consiste en un adoucissement de la pente moyenne. On recherchera un accroissement de sécurité $\Delta F/F_0$ égal à 20%.

L'action sur la géométrie, dans ce cas, portera essentiellement sur :

- Le rééquilibrage des masses en tête et en pied de glissement,
- Le raidissement des talus intermédiaires avec création de risbermes (cela diminue localement la stabilité, mais améliore la stabilité d'ensemble).

II.3.3. Substitutions (bêches, contreforts, masques et éperons)

La solution a priori la plus simple pour traiter un glissement est d'éliminer la masse glissée en tout ou partie, et de reconstituer le talus à l'aide d'un matériau frottant de bonne qualité, qui assure, le plus souvent, un drainage en plus de son action mécanique.

II.3.3.1. Substitution totale des matériaux glissés

La substitution totale consiste à venir purger l'ensemble des matériaux glissés et à les remplacer par un matériau de meilleure qualité. Cela permet de reconstituer le profil du talus initial.

La vérification de l'efficacité du traitement nécessite de recourir à un calcul de stabilité dans lequel on prendra en compte les caractéristiques du nouveau talus (matériau de substitution et matériau intact en place). On recherchera la surface de rupture potentielle la plus défavorable et on s'assurera que le coefficient de sécurité du projet est supérieure à $F = 1,5$.

La substitution de matériaux glissés suppose que l'on prenne un certain nombre de précautions :

- Reconnaître à l'avance le volume de matériaux concerné ;
- Excaver plus profondément que la surface de rupture sous peine d'inefficacité totale ;
- Assurer un bon accrochage entre le substratum et le massif de sol d'apport ; une purge parfaite des matériaux glissés et la réalisation de redans donnent généralement satisfaction ;
- Prévoir un drainage correct du massif de substitution et un exutoire ;

- Vérifier que les phases dangereuses des travaux sont prises en compte dans le processus d'exécution et que l'on ne risque pas d'engendrer une régression des désordres.

La tenue des talus provisoires de la purge dépend principalement des conditions des terrassements, de la météorologie, des hétérogénéités locales : il est donc toujours recommandé de travailler par plots de faible largeur, de ne pas maintenir des fouilles ouvertes pendant des durées trop importantes et de veiller à l'assainissement du chantier.

II.3.3.2. Substitution partielle des matériaux glissés

En pratique, la substitution totale est limitée par les conditions de réalisation de la purge (profondeurs importantes, présence d'eau, mauvaise tenue des matériaux). On peut toutefois limiter le terrassement en exécutant des bêches, des contreforts, des masques ou des éperons qui, s'ils sont bien dimensionnés, peuvent suffire à la stabilisation (figure.7.II).

Une bêche est une fouille réalisée en partie basse de glissement et sur toute sa largeur remblayée par des matériaux frottants et drainants. Les dimensions courantes sont :

- 4 à 10 m de largeur.
- 5 à 6 m de profondeur.

Elle permet de reporter une partie de la charge sur un horizon plus compact (substratum) avec un ancrage de 1 m ou plus.

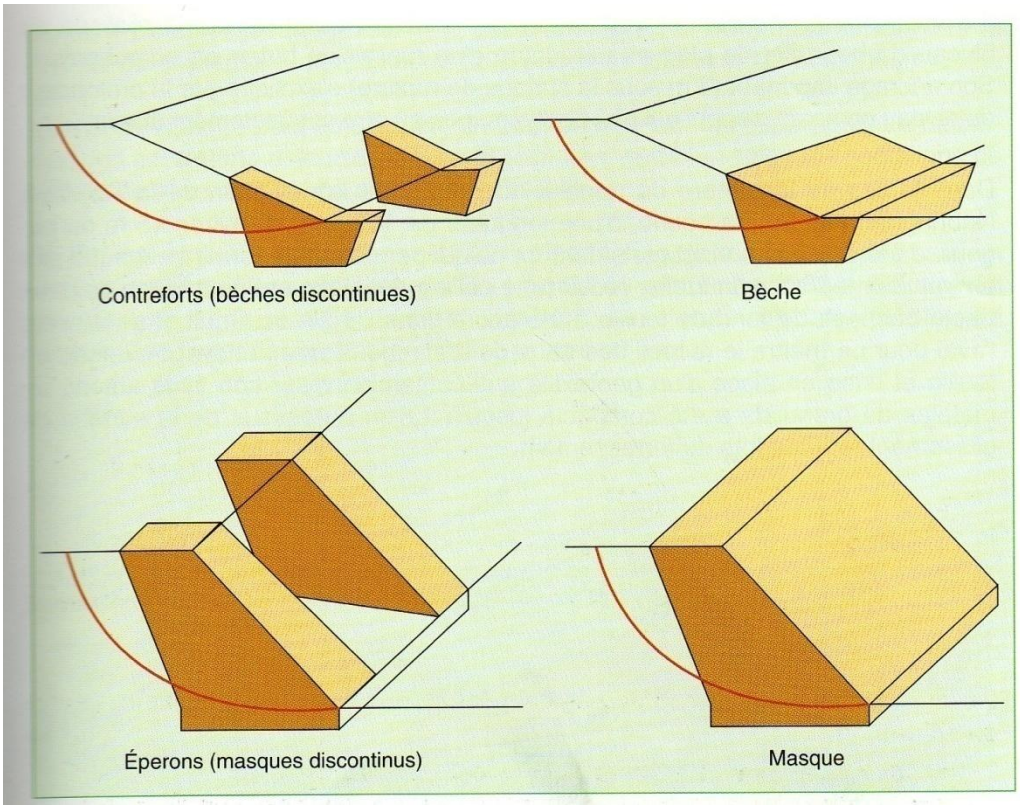


Figure. 7.II –Substitutions partielles.

La bêche est partiellement bien adaptée aux cas de construction de remblais sur un massif de sol instable de faible épaisseur (moins de 5 m). Elle permet de transmettre la surcharge du remblai au substratum et, si un exutoire peut être trouvé, de constituer un drainage à l'aval du glissement.

On dimensionne la bêche en prenant en compte le long de la surface de rupture, sur la longueur substituée, les caractéristiques mécaniques du matériau rapporté. Éventuellement, on tient également compte du rabattement de la nappe lorsqu'un exutoire existe. On recherche une amélioration de la sécurité $\Delta F/F_0$ de 20%.

Une bêche d'une longueur de 100 m et d'environ 15 m de largeur a été réalisée suite à une rupture du remblai du PK 1,9 de la déviation de la RN 42 à Nabringhen (figure.8.II). Le fond de fouille a été ancré dans l'argile de Gault et penté vers l'aval pour permettre le recueil des eaux de drainage. Après nettoyage du fond de fouille et mise en place d'un géotextile anti-contaminant sur son talus amont, un matelas de granulats a été compacté jusqu'à 1,5 m au-dessus de la surface de glissement repérée lors du terrassement.

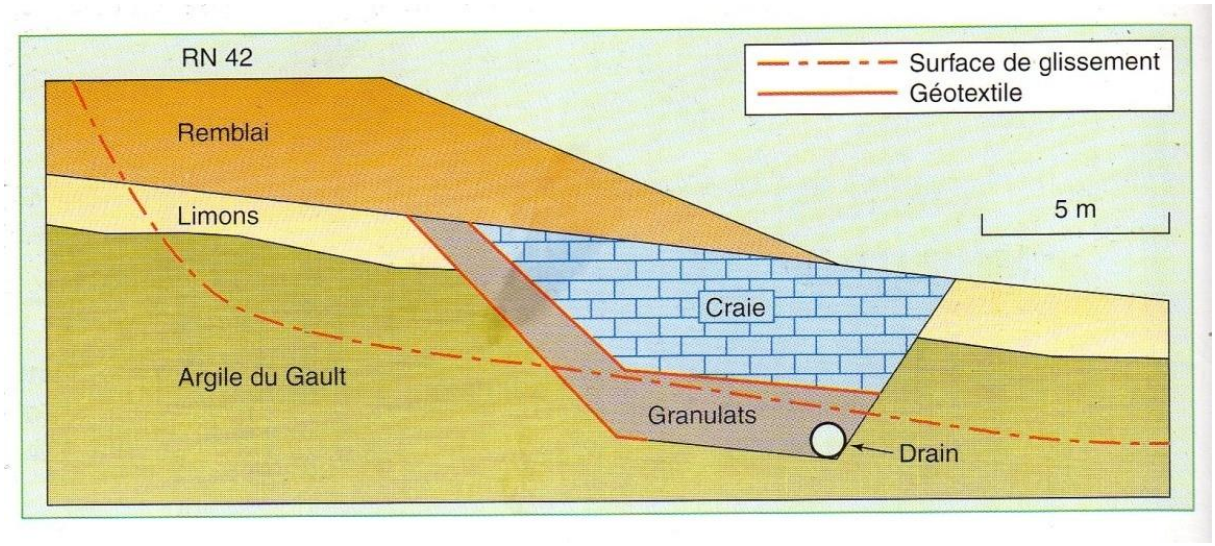


Figure. 8.II – Stabilisation par bêche du remblai au PK 1,9

déviation de Nabringhen (Pas-de-Calais, France)

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

Une recharge de la fouille a ensuite été réalisée avec une craie compactée provenant d'un déblai voisin. Peu de temps après la fin des travaux, et après un déplacement d'environ 10 mm s'était à nouveau produit, le glissement s'est stabilisé. Les vitesses maximales mesurées sur le site avant les travaux de stabilisation s'élevaient à près de 3,5 mm par jour.

II.4. Dispositifs de drainage

Très souvent, l'eau joue un rôle moteur déterminant. Aussi, et bien qu'elles soient plus délicates à dimensionner et à mettre en œuvre que des techniques de terrassement, le géotechnicien doit étudier des solutions ayant pour objectif de réduire l'action de l'eau. Le drainage a pour but de réduire les pressions interstitielles le long de la surface de glissement et ainsi d'augmenter la résistance au cisaillement du terrain. Différentes techniques peuvent être appliquées pour atteindre cet objectif. Elles relèvent de deux options fondamentales :

- Eviter l'alimentation en eau du site.
- Expulser l'eau présente dans le massif instable afin de réduire les pressions interstitielles.

Les dispositifs de drainage peuvent être utilisés seuls ou associés à d'autres techniques de stabilisation.

De nombreux paramètres conditionnent l'efficacité d'un système de drainage, en particulier la nature et l'hétérogénéité des terrains, la géométrie des couches aquifères, la perméabilité, l'anisotropie et la fissuration des sols, les alimentations et les exutoires.

De ce fait, et compte tenu des difficultés de détermination de l'ensemble de ces éléments, le dimensionnement d'un système de drainage est fait en prenant un coefficient de sécurité plus élevé ($\Delta F/F_0$ de l'ordre de 30%) que pour d'autres techniques (terrassements, renforcements). Sur le terrain, cet accroissement du coefficient de sécurité est difficile à atteindre, aussi doit-on s'assurer de l'efficacité du drainage par des mesures de suivi de débits, de pressions interstitielles et de déplacement du sol.

Comme la plupart des ouvrages, les dispositifs de drainage nécessitent un entretien régulier qui, s'il n'est pas réalisé, peut conduire à la ruine de l'ouvrage. On distingue schématiquement : les drainages de surface et les ouvrages de collecte des eaux, les tranchées drainantes, les drains subhorizontaux, les drains verticaux, les galeries, tunnels et autres ouvrages profonds.

II.4.1. Collecte et canalisation des eaux de surface (drainage de surface)

Il s'agit de mettre en œuvre des moyens pour limiter les infiltrations dans le massif en mouvement. Les eaux peuvent provenir d'une couche superficielle acquière, d'un défaut d'étanchéité sur un réseau ou sur un bassin de stockage à l'amont, ou de l'impluvium et des eaux de ruissèlement. En effet, les eaux de surface ont tendance à s'infiltrer dans les fissures et à stagner dans les zones de faible pente mettant ainsi en pression la surface de rupture. Aussi les ouvrages de collecte des eaux (fossés, caniveaux, cunettes) l'étanchéification des fissures de surface, bien que ne constituant pas des ouvrages de drainage à proprement parler, sont réalisés en première urgence dans de nombreux cas de glissements.

II.4.2. Tranchées drainantes

Les tranchées drainantes, sont des ouvrages couramment employés pour rabattre le niveau de la nappe. Elles sont implantées sur le site de façon à venir recouper les filets d'eau (lignes de courant dans un horizon homogène, couche aquifère, venues d'eau ponctuelles, etc.). Le choix de l'implantation (dans le sens de la plus grande pente ou dans un sens parallèle aux lignes de niveau, ou encore en épis) dépend des résultats de l'étude hydrogéologique et conditionne l'efficacité de la tranchée.

L'effet stabilisateur provient, dans le cas des tranchées drainantes, de la diminution des pressions interstitielles au niveau de la surface de rupture.

Les tranchées drainantes peuvent être réalisées de plusieurs façons :

- à la pelle mécanique : les dimensions de la tranchée sont de l'ordre de 5 à 6 m de profondeur sur une largeur de l'ordre du mètre ; un drain en plastique souple est généralement placé au fond avec un sable propre en protection.
  Le remplissage est réalisé en matériau drainant de 40/100 mm (environ) ;
- à la trancheuse : les profondeurs atteintes sont du même ordre de grandeur ; la largeur de la tranchée est par contre réduite, de l'ordre de 30 cm ; un dispositif mécanisé permet de mettre en place un géotextile anti-contaminant, le drain en plastique et le matériau drainant de remplissage.
- à la haveuse de paroi, les profondeurs atteintes sont plus importantes (jusqu'à 20 cm) ; la tenue des parois de la fouille est assurée par une boue biodégradable, dont la viscosité diminue avec le temps et qui s'élimine naturellement par gravité.

La figure (9.II) présente un exemple se stabilisation par tranchées drainantes. Il s'agit du confortement du glissement de Vaucluse près de Besançon à l'est de la France.

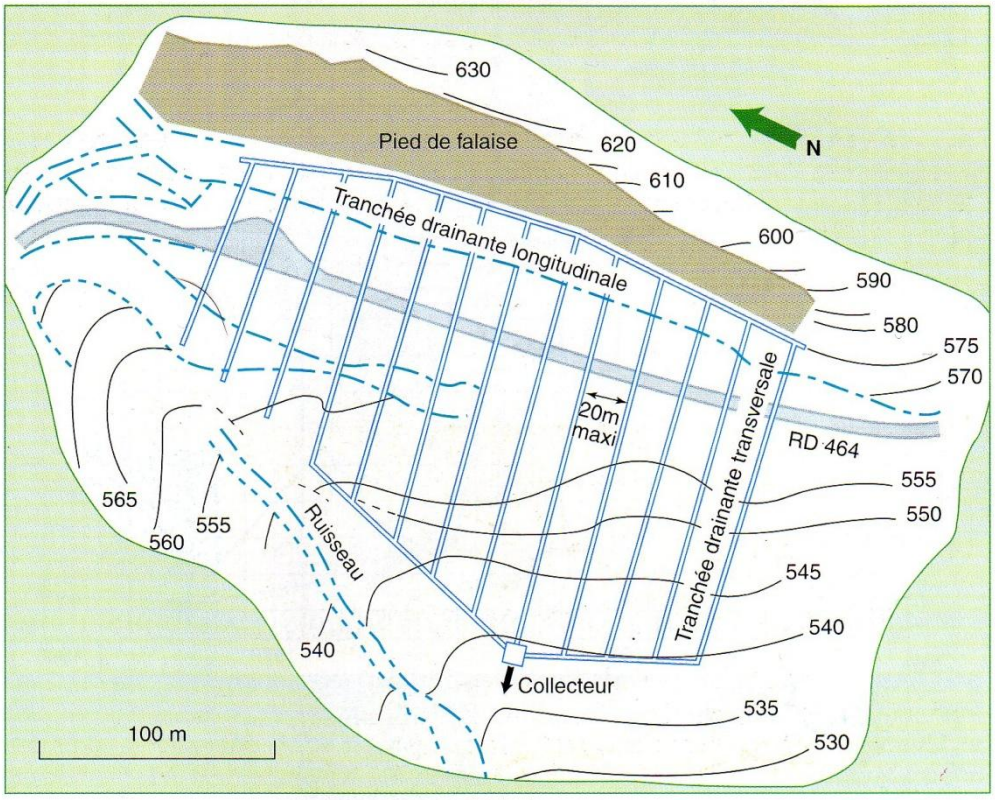


Figure. 9.II –Drainage mis en œuvre sur le glissement de Vaucluse (Doubs),(d'après Faure et al., 1975)

II.4.3. Drains subhorizontaux

Lorsque les contraintes d'accessibilité du site ou les conditions de circulation interdisent la réalisation de tranchées, l'installation des drains subhorizontaux peut permettre de diminuer les pressions interstitielles et de décharger des aquifères localisés.

La technique consiste à réaliser de nombreux forages avec une faible pente sur l'horizontale (2° à 5°) et à y placer des tubes crépinés. Ces tubes sont généralement en PVC (50 à 80 mm de diamètre), parfois en acier

Lorsque de grandes déformations sont susceptibles de se produire. Un dispositif de captage des eaux recueillies dans les drains avec un exutoire adapté complète l'ensemble. Les drains subhorizontaux peuvent être disposés en un ou plusieurs faisceaux ou simplement en lignes. Dans certains cas, pour des raisons de contraintes géométriques ou hydrauliques, on peut forcer les drains en faisceau sur deux ou trois plans subhorizontaux différents. Les longueurs courantes des drains sont de 30 à 100 m. la limite physique à la longueur des drains est celle imposée par la machine de forage et la nature du matériau à drainer. Le positionnement de la tête du drain est difficile à maîtriser lorsque les longueurs deviennent importantes. Le forage

des drains se fait à partir de plates-formes qui peuvent être installées à l'intérieure de puits ou de fossés lorsque la configuration du terrain l'impose.

Les drains subhorizontaux permettent de drainer des versants instables dans les cas suivants :

- nappe de versant.
- Couches et poches aquifères, éventuellement en charge,
- Circulations d'eau localisées (dans des fractures, dans des couches de faible épaisseur).

Le dimensionnement du confortement d'un glissement de terrain par drains subhorizontaux se fait en recherchant un accroissement du coefficient de sécurité de l'ordre de $\Delta F/F_0 = 30\%$. Cet accroissement provient du rabattement de nappe qu'on est en droit d'attendre des drains. Ce rabattement doit être vérifié en place après exécution des travaux.

II.4.4. Drains verticaux, puits et galeries drainantes

Les techniques de drains et puits verticaux sont peu fréquemment utilisées pour la stabilisation des glissements de terrain, sans doute en raison des difficultés d'évacuation des eaux drainées : gravitairement en profondeur vers des couches plus perméables ou vers le haut par pompage ou siphonage.

Les galeries drainantes constituent un autre type d'ouvrage profond à partir duquel il est possible, comme pour les puits, de forer des drains subhorizontaux qui augmentent le rayon d'action du drainage.

Le dimensionnement du confortement d'un glissement de terrain par une rangée de puits drainants se fait en recherchant un accroissement du coefficient de sécurité de l'ordre de $\Delta F/F_0 = 30\%$. Cet accroissement provient du rabattement de nappe qu'on est en droit d'attendre des puits. La profondeur des puits et leur espacement dépendent du modèle hydraulique du site.

II.4.5. Eperons et contreforts, masques et bêches drainantes

Ces ouvrages ont été présentés dans la partie (II.3). Ils possèdent une fonction drainante en plus de leur fonction gravitaire déjà vue.

II.5. Introduction d'éléments résistants

On appelle éléments résistants les structures suivantes :

- Ouvrages de soutènements (murs poids, murs cellulaires, gabions, remblais renforcés),
- Tirants d'ancrage et murs ancrés,
- Clouages par des barres, des micro-pieux,
- Rangées de pieux, de barrettes ou de profilés métalliques d'inertie diverse, etc.

Ces techniques ne s'attaquent pas à la cause des mouvements mais tentent d'en combattre les effets. Elles visent à réduire ou à arrêter les déformations. Elles sont intéressantes dans le cas où les solutions curatives (terrassements et drainages) ne peuvent pas être techniquement ou économiquement mises en œuvre.

On peut également introduire des éléments résistants à titre préventif, de façon à éviter les déplacements, qui pourraient avoir pour conséquence de diminuer la résistance au cisaillement des sols.

Deux grands types de structures peuvent être distingués :

- Les ouvrages rigides tels que les murs en béton, les tirants précontraints, les pieux et les barrettes,
- Les ouvrages souples tels que les remblais renforcés, les murs cellulaires, les clous et les micro-pieux.

La compatibilité des déplacements des sols et des structures doit être prise en compte lors du choix de ce type de technique. En effet, dans le cadre de travaux de stabilisation de glissements de terrain très actifs, l'exécution d 'ouvrages rigides comme un mur de soutènement en béton ou des tirants précontraints n'est pas envisageable. Les déplacements du glissement conduiraient à la ruine de l'ouvrage au cours de son exécution. Il est préférable de construire, dans ces conditions, des ouvrages qui supportent mieux les déformations.

Par ailleurs, la construction d'un ouvrage rigide se prête mal à la stabilisation d'un glissement. En effet, les efforts engendrés par ce dernier sont généralement très importants, ce qui conduit au dimensionnement de structures très lourdes.

II.5.1. Ouvrages de soutènement

On trouve dans cette catégorie deux types d'ouvrages : les ouvrages rigides (mur poids ancré) et les ouvrages souples (murs cellulaires, gabions, remblais renforcés par armatures ou nappes).

II.5.1.1. Ouvrages rigides

Les ouvrages rigides ne sont pas les mieux adaptés à la stabilisation des glissements de terrain. Outre l'aspect de l'incompatibilité des déformations, le dimensionnement doit prendre en compte les efforts très importants engendrés par le glissement.

Le dimensionnement d'un mur de soutènement se fait en considérant les mécanismes de rupture suivants :

- Rupture interne de l'ouvrage en béton ou en maçonnerie (les pressions appliquées derrière l'ouvrage dépassent la résistance interne de la surface) ;
- Rupture par glissement sur la base ; elle se produit lorsque l'ancrage de la structure est insuffisant ;
- Rupture par renversement ou basculement ; elle se produit également lorsque l'ancrage est insuffisant et que la résultante des moments appliqués est trop forte et dirigée dans le sens d'un renversement ;
- Poinçonnement du sol de fondation.

II.5.1.2. Ouvrages souples

Il s'agit de structures obtenues à partir de gabions, de sol renforcé par les fibres ou des pneumatiques usagés, de sol renforcé par des armatures synthétiques ou métalliques, de sol renforcé par des nappes de géotextiles, de sol renforcé par des grilles métalliques ou synthétiques, de murs cellulaires souples ou rigidifiés qui sont éventuellement renforcés (par des nappes des géosynthétiques, des grilles ou des armatures).

Ces ouvrages fonctionnent comme les massifs poids. On les dimensionne en deux phases : vis-à-vis de la stabilité interne, selon une méthode propre à chacune des techniques ; vis-à-vis de la stabilité externe. On recherche généralement un coefficient de sécurité F = 1,2 pour la stabilité externe.

Ces ouvrages, qui respectent les déformations du sol, sont utilisés nettement plus couramment que les murs rigides.

II.5.2. Tirants d'ancrage

Les techniques de boulonnage par barres ou de stabilisation par tirants actifs, bien connues pour la protection des excavations, peuvent également être employées pour la stabilisation des glissements de terrain.

Le principe consiste à accroître les contraintes normales effectives sur la surface de rupture. Pour ce faire, on ancre des tirants dans le terrain stable situé en dehors de la surface de rupture et on applique en tête un effort tel que l'on améliore le coefficient F vis-à-vis de la rupture d'une valeur $\Delta F/F_0$ suffisante. Cet effort peut être réparti sur la surface du terrain par l'intermédiaire de plaque ou de petits massifs en béton armé.

Il est constaté que la plupart des cas concernent des stabilisations de pentes rocheuses ou des applications à titre préventif. Il est, en effet, judicieux d'utiliser des structures ancrées pour améliorer la stabilité de pentes en limite de stabilité, ou pour compenser le déchargement dû à une excavation en pied de versant. En revanche, l'application de cette technique sera donc limitée aux glissements de faible extension.

L'utilisation de tirants précontraints suppose :

- Que l'on détermine la force d'ancrage nécessaire par mètre de largeur du glissement,
- Que l'on justifie le choix et les caractéristiques des tirants.

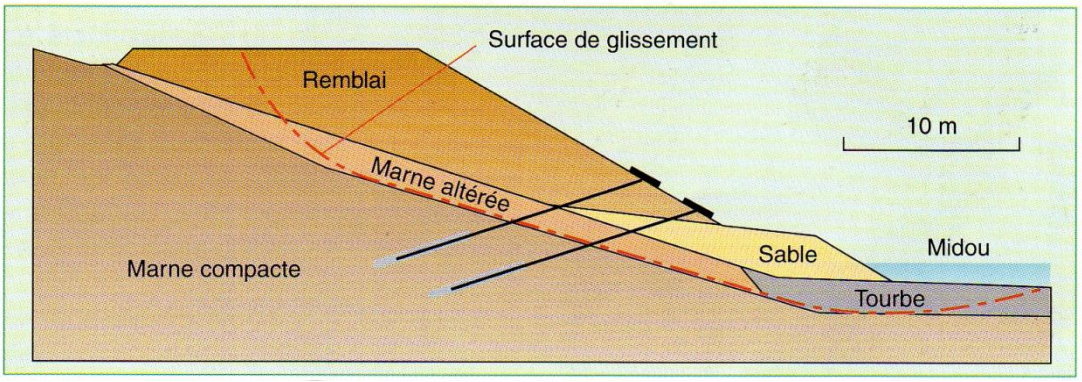


Figure. 10.II –Drainage du glissement de Châtel-Guyon (Puy-de-Dôme)

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

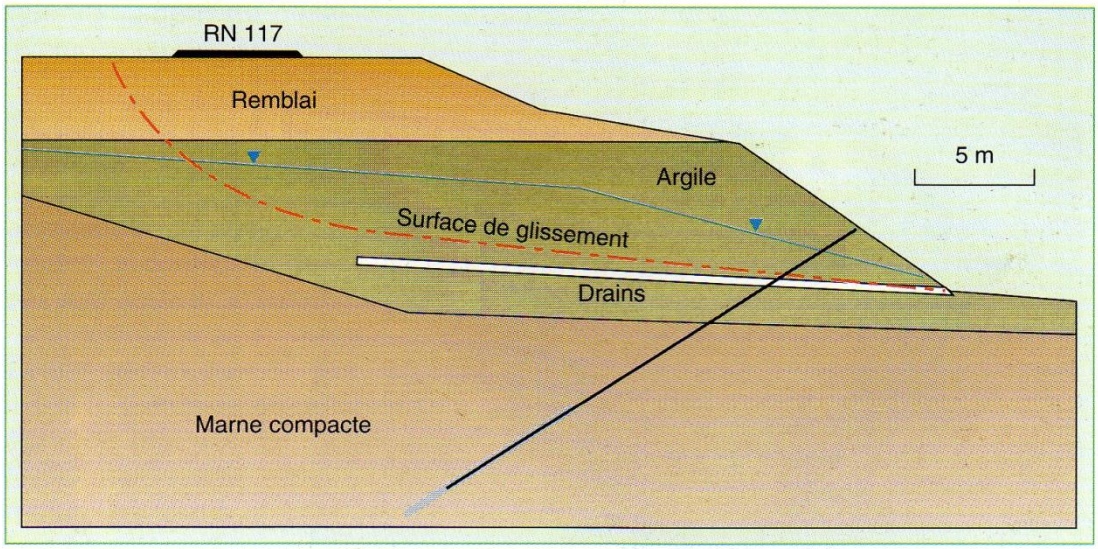


Figure. 11.II –Stabilisation de la RD 56 à Muret (Haute-Garone).

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

II.5.3. Clous et micro-pieux

Le clouage des sols a été largement employé durant les dernières années comme une technique de stabilisation des pentes instables pour la facilité et la rapidité de sa mise en œuvre.

On distingue habituellement deux catégories d'inclusions, en fonction de l'inertie des armatures utilisées :

- Les clous et micro-pieux, constitués d'une armature de faible inertie et d'un coulis d'injection,
- Les pieux et barrettes, qui sont des éléments de grande rigidité, mis en place verticalement.

Les clous et micro-pieux les couramment utilisés sont :

- Des barrettes HA de différents diamètres ou petits profilés pleins scellés dans des forages de diamètre de 100 à 150 mm à l'aide d'un coulis de ciment ;
- Des cornières battues jusqu'au refus directement dans le massif ;
- Des tubes métalliques de quelques millimètres d'épaisseur pour un diamètre de 40 à 120 mm, scellés dans des forages à l'aide d'un coulis de ciment.

Les clous sont habituellement installés avec un angle de 5° à 20° sur l'horizontale, tandis que les micro-pieux sont disposés subverticalement (45° à 90° sur l'horizontale).

II.5.4. Pieux

Le clouage de glissement par des pieux ou des barrettes procède du même principe. Toutefois, compte tenu de leur inertie importante, les pieux travaillent principalement en flexion/cisaillement alors que les clous de faible inertie travaillent en traction/flexion.

Comme dans le cas d'un clouage par micro-pieux ou clous, l'évaluation de la sécurité au glissement se fait en utilisant une méthode de calcul de stabilité de pente dans laquelle on introduit les efforts apportés par les pieux. On recherche en général un gain de sécurité de 10 à 20 %.

Cette technique a été employée pour stabiliser le glissement de terrain qui affectait la petite ville d'Aktéa,située à 36 km d'Athènes, Grèce, (Sève et a*l*., 1996).

Le site (figure.12.II) a été stabilisé à l'aide de 80 pieux de 1 m de diamètre. Le gain de sécurité calculé lors de l'étude était de 20% correspondant à un déplacement théorique du sol de 3 cm.

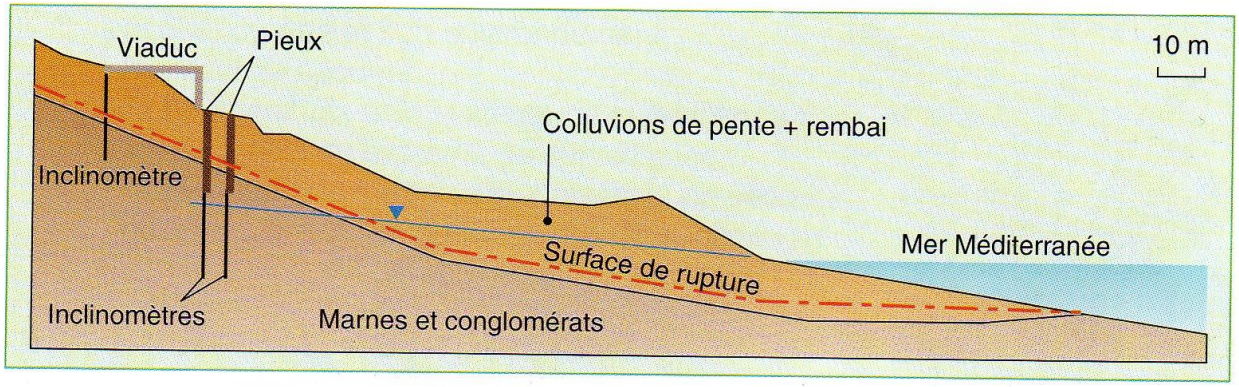


Figure. 12.II – Profil géotechnique du site d'Aktéa (Grèce).

(Guide Technique LCPC Paris, février 1998).

II.6. Techniques de protection passive

En présence d'un versant instable qui menace des personnes ou des biens, nous avons vu qu'il existait une panoplie importante de solutions de confortement. Cependant, dans certains cas, si l'on peut choisir de construire des ouvrages de protection ou encore de ne pas réaliser

de travaux, mais d'installer un système de surveillance qui donne l'alarme si une évolution dangereuse se produit.

II.6.1. Surveillance des glissements de terrain

Le Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées de Paris a publié en 1994 un guide technique consacré à la surveillance des glissements de terrain et à la définition de dispositifs de surveillance. Les points suivants y sont successivement abordés :

- Données nécessaires à la conception de la surveillance :
  - Le phénomène et son environnement,
  - L'objectif de sécurité ;
- Guide pour le choix d'un système de surveillance :
  - Les éléments du système de surveillance,
  - L'adéquation du système aux objectifs de sécurité.

II.6.2. Systèmes de protection

Les systèmes de protection contre les mouvements de terrain sont nombreux. Ils ne s'opposent pas aux mouvements et déformations mais permettent de réduire voire même d'annuler leurs effets sur les ouvrages. En pratique, le géotechnicien devra adapter le système de protection au problème spécifique qui lui est posé.

- La première protection consiste à déplacer les ouvrages ou les personnes au-delà du rayon d'action du phénomène. Cela pourra conduire, par exemple, à reconstruire la route sur le versant opposé de la vallée qui ne connaît pas d'instabilité de pente.
- Une autre façon de résoudre le problème consiste à s'affranchir des effets des mouvements de terrain sans déplacer l'ouvrage. Ceci peut être obtenu, par exemple, en construisant les fondations profondes d'un ouvrage d'art à l'intérieur de puits qui assurent une « garde » suffisante vis-à-vis des déplacements.
- ➢ Les mesures de protection et de prévention des chutes de blocs et éboulements rocheux sont généralement parmi les suivantes :
  - Purges des éléments susceptibles de se détacher (purge manuelle ou abattage à l'explosif) ;
  - Stabilisation :
    - Béton projeté pour éviter l'évolution de l'altération,
    - Boulons, épingles, tirants pour renforcer le massif,
    - Piliers, butons, contreforts pour soutenir ponctuellement,
    - Câble de ceinturage,
    - Filet métallique attaché ;

- Déviation de la trajectoire et freinage des blocs :
  - Grillage de protection.
  - Etraves disposées sur le versant pour détourner les blocs ;
- Interception :
  - Ecrans verticaux (filets anti sous-marins),
  - Ecrans massifs (massifs poids de toute nature),
  - Pièges à blocs.

La parade couramment mise en œuvre consiste en la pose de grillages sur les parois estimées dangereuses. On associe fréquemment à ces grillages un boulonnage des blocs les plus menaçants et des pièges à cailloux en pied de paroi. Dans certains cas, on est amené à construire un tunnel de protection.

Après l'éboulement de la falaise de Belle-Fontaine (Martinique) en 1992 (figure.13.II), la chaussée qui passait immédiatement en pied de la falaise a été déplacée sur un remblai en mer et protégée d'éventuelles chutes de blocs et de nouveaux éboulements par un merlon en terre de 5 m de hauteur

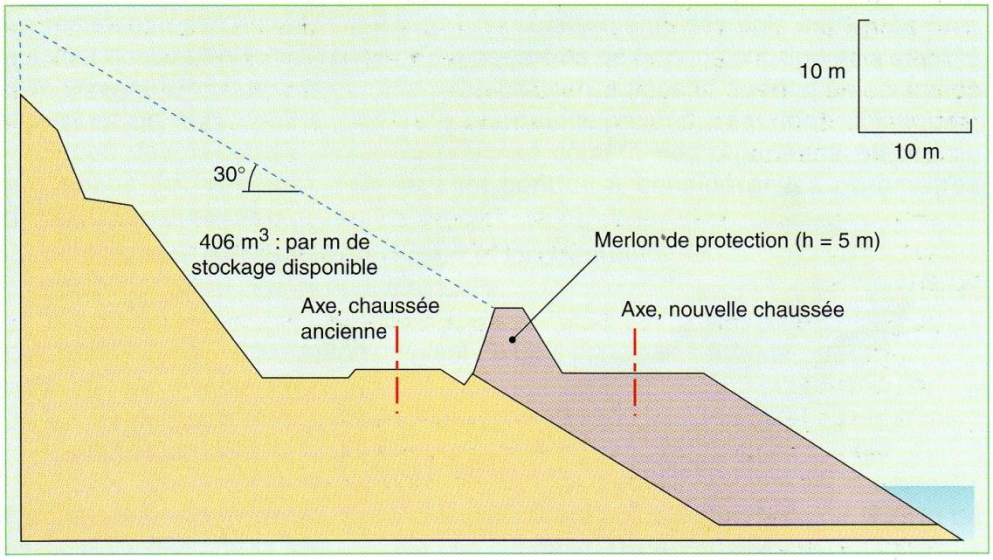


Figure. 13.II- Eboulement de Belle-Fontaine (Martinique), merlon protection.

II.7. Conclusion

Ce chapitre est l'illustration des différentes techniques de stabilisation des mouvements de terrain.

Une solution confortative tient compte de la faisabilité des travaux liée aux contraintes tels que : le rapport « efficacité/coût », l'urgence des travaux et le degré de stabilisation recherché.

Le choix d'une technique passe aussi par une analyse approfondie des paramètres techniques du site et exige une connaissance et une maîtrise des techniques de stabilité existantes. Cela, pour une bonne adaptation de la technique au cas auquel on fait face.

Il est toutefois recommandé de suivre une méthodologie qui respecte une succession par priorité des méthodes comme il a été présenté par Cartier, 1985.

Le drainage et le terrassement sont les méthodes les plus pratiques et les plus efficaces dans la mesure où l'hydraulique et le chargement sont généralement les causes directes des mouvements de terrain.

Conclusion de la première partie

Les glissements de terrain se différencient par leur forme et leur dynamique. En fonction de leur forme, on peut distinguer deux types : les glissements rotationnels et les glissements translationnels. En fonction de la dynamique du mouvement deux types aussi sont définis : les glissements permanants et les glissements spontanés. Cependant, dans un cas général, les glissements sont souvent plus complexes, et présentent des formes et une dynamique quelconque (complexe) résultant d'un emboitement de plusieurs glissements induisant une instabilité globale du versant.

Les conditions de stabilité des talus sont multiples, on peut citer : la géométrie, la résistance au cisaillement et les conditions hydrauliques. Autres facteurs influant sur les mouvements de terrain (action de l'eau, action des efforts sismiques et l'action de la végétation) démontrent aussi leurs rôles importants sur la stabilité des versants.

La mise en œuvre des terrassements, les dispositifs de drainage et l'introduction des éléments résistants sont les familles principales des techniques de stabilité existantes. Ajoutée à cela, la nécessité de la surveillance des sites susceptibles au glissement par les moyens appropriés.

Le géotechnicien est appelé à exploiter son expérience, son intuition et son ingéniosité pour adapter la meilleure technique de stabilisation au cas échéant.

Deuxième partie

Partie expérimentale

Chapitre III :

Identification des matériaux.

Chapitre IV :

Essais de cisaillement direct à la boîte.

Chapitre V :

Initiation aux Plans d'expériences factoriels.

Introduction de la deuxième partie

Les terrains sédimentaires apparaissent du fait de leur mode de genèse, comme un empilement d'unités qui sur les affleurements leur confère un aspect souvent bien réglé sur des épaisseurs considérables, ils sont dit « stratifiés », c'est-à-dire formés par des strates.

Un strate est un dépôt sédimentaire continu, homogène, séparé des dépôts, inférieur à son mur et supérieur à son toit, par un changement marqué de composition qui est appelé surface de stratification.

Les surfaces de stratification sont souvent marqués par des figures sédimentaires : rides, fentes de retrait, traces d'activités biologiques, traces de courant qui sont interprétables en terme de milieu de dépôt.

Les glissements qui se produisent le long de ces surfaces sont l'objet de cette étude.

Cette deuxième partie est consacrée à l'étude des paramètres de cisaillement des sols rencontrés dans la nature.

Le premier chapitre définit l'essentiel des caractéristiques physiques des trois sols utilisés qui sont : un sable d'oued, un sol argileux en plus de la marne.

Dans le deuxième chapitre sont exposés les résultats des essais de cisaillement qui ont été fait sur cinq combinaisons entre les trois sols cités.

Et enfin le troisième chapitre étudie les effets de deux paramètres influents les résultats obtenus au chapitre précédent ainsi que l'interaction des deux facteurs. Un progiciel dit « ANOVA plan complet » est l'outil utilisé pour cette partie.

Cette partie termine par une conclusion qui résume l'essentiel des résultats obtenus dans les trois chapitres.

Chapitre III :

Identification des matériaux

III.1. Introduction

Des essais d'identification ont été réalisés pour les trois (3) matériaux sur lesquels des essais de cisaillement ont permis de déterminer les caractéristiques : cohésion et angle de frottement (chapitre IV). Deux matériaux (sol argileux, marne) parmi les trois utilisés dans ce travail sont extraits des couches superficielles du sol, à la même profondeur choisie pour poser les fondations de deux bâtiments sis à Tizi ouzou au lieu dit « ex-habitât ».

Pour le troisième matériau, on a choisi un sable d'oued.

III.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant un sol. Elle s'applique pour déterminer des paramètres tels que : le diamètre maximal des grains, le coefficient d'uniformité C_u et le pourcentage des fines. Elle consiste en deux essentielles parties :

III.2.1. Le tamisage (NF P18-560)

L'essai consiste à classer les différents grains constituants l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des mailles sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne des tamis.

Afin de connaître l'étalement granulométrique des sols étudiés et pouvoir les classer, deux paramètres sont utilisés (R.D Holtz et W.D Kovacs, 1991 ; F.Schlosser, 1997) : le paramètre de la courbe ; appelé coefficient d'uniformité (C_u), dit coefficient de Hazen, donné par la relation :

$$C_u = \frac{D60}{D10} \quad \ldots(III.1)$$

Le paramètre de courbure appelé coefficient de courbure (C_c), donné par la relation :

$$C_c = \frac{(D30)^2}{(D10)\times(D60)} \quad \ldots(III.2)$$

D_{10}, D_{30}, D_{60} représentent les diamètres correspondants respectivement à 10%, 30% et 60% du tamisât cumulé.

Par définition, un sol est dit à granulométrie étalée, lorsque celui-ci est constitué de particules dont les diamètres forment une gamme étendue et présente une courbe régulière et légèrement concave vers le haut. Contrairement, un sol peu étalé est celui qui affiche un excès ou un déficit de particules d'un diamètre donné (R.D Holtz et W.D Kovacs. 1991).

➢ Dans la suite du travail, la classe granulométrique est la même pour les trois matériaux utilisés. C'est la classe (0/2) mm.

Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage

❖ **Le sable**

Masse de départ est M = 0,2×D ; D étant le plus grand diamètre.

M = 400 gr.

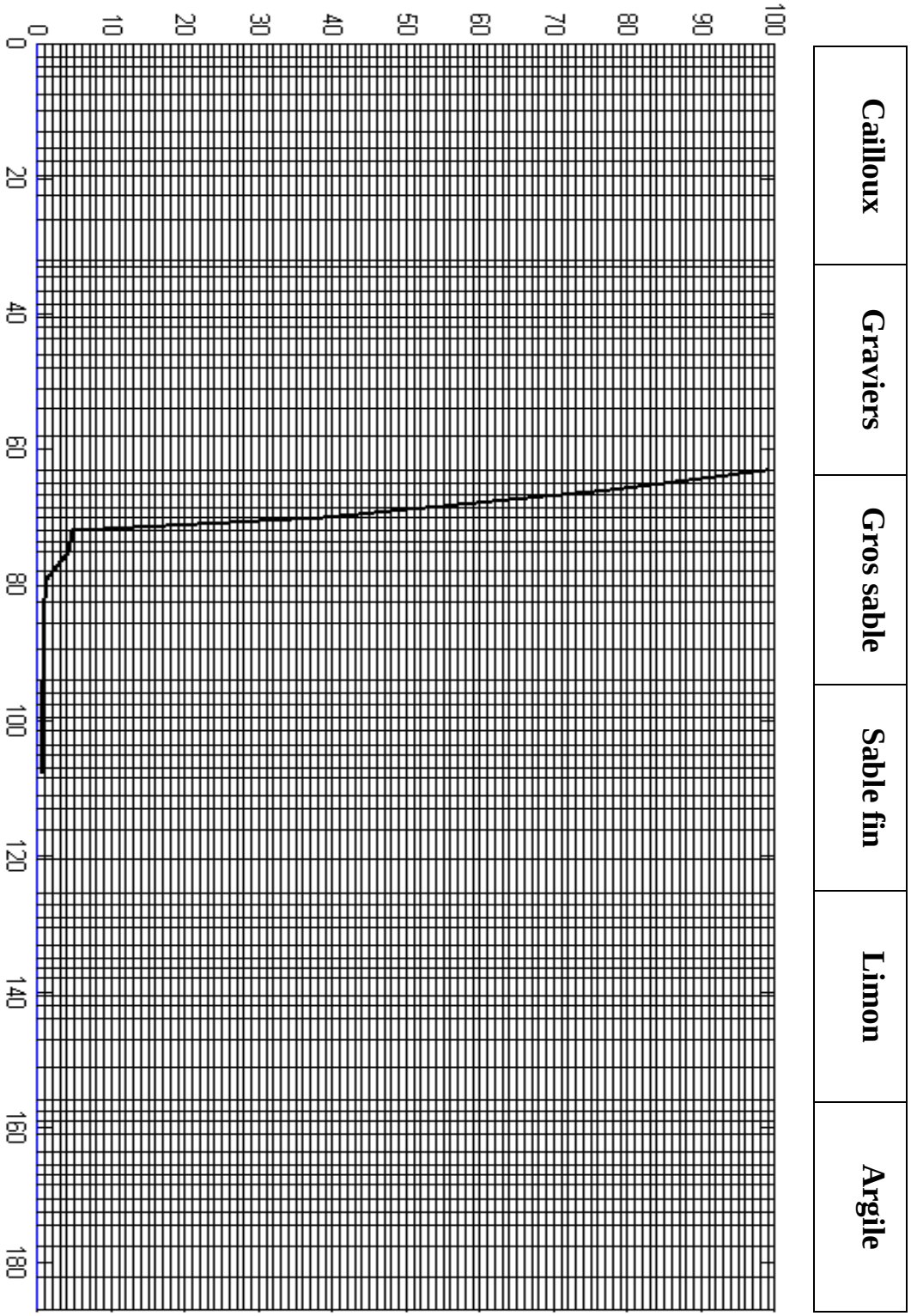
Tableau1.III-Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage :

Diamètre tamis (mm)	Refus (gr)	Masses cumulées (gr)	Masses cumulés en pourcentage(%)	Tamisâts cumulés (%)
2	4,9	4,9	1,225	98,775
1,6	84,1	89	22,25	77,75
1,25	156,2	245,2	61,3	38,7
1	136,1	381,3	95,325	4,675
0,8	2,4	383,7	95,925	4,075
0,63	11,7	395,4	98,85	1,15
0,5	1	396,4	99,1	0,9
0,4	0,4	396,8	99,2	0,8
0,315	0,2	397	99,25	0,75
0,2	0,8	397,8	99,45	0,55
0,16	0,3	398,1	99,525	0,475
0,125	0,1	398,2	99,55	0,45
0,1	0,1	398,3	99,575	0,425
0,08	0,1	398,4	99,6	0,4
Fond du tamis	0,2	398,6	99,65	0,35

C_u=1,94 C_c=0,6

D'après le système unifié des classifications des sols, la classe granulaire utilisée est un sable propre mal gradué de symbole (SP).

Figure. 1.III- granulométrie par tamisage, sable



III.2.2. Analyse sédimentométrique (NF P 94-057)

Elle a pour objet la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol. Elle s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80 (µm) d'ouverture. Les particules de taille inférieure à 1 (µm) ne peuvent être différenciées par cet essai.

Résultats de l'essai

Tableau 2.III-Résultats de l'analyse sédimentométrique, sol argileux:

Diamètre équivalent (µm)	**67,3**	**48**	**34,5**	**22,1**	**15,9**	**11,3**	**8,10**	**5,7**	**3,4**	**1,4**
Pourcentage des éléments (%)	**98**	**94**	**88**	**80**	**71**	**65**	**56**	**49**	**38,6**	**29**

Tableau 3.III-Résultats de l'analyse sédimentométrique, marne :

Diamètre équivalent (µm)	**66,8**	**48,8**	**34,7**	**22,4**	**16,1**	**11,6**	**8,2**	**5,9**	**3,4**	**1,4**
Pourcentage des éléments (%)	**97**	**84**	**75**	**60**	**51,6**	**40,7**	**34**	**27**	**24,7**	**12,6**

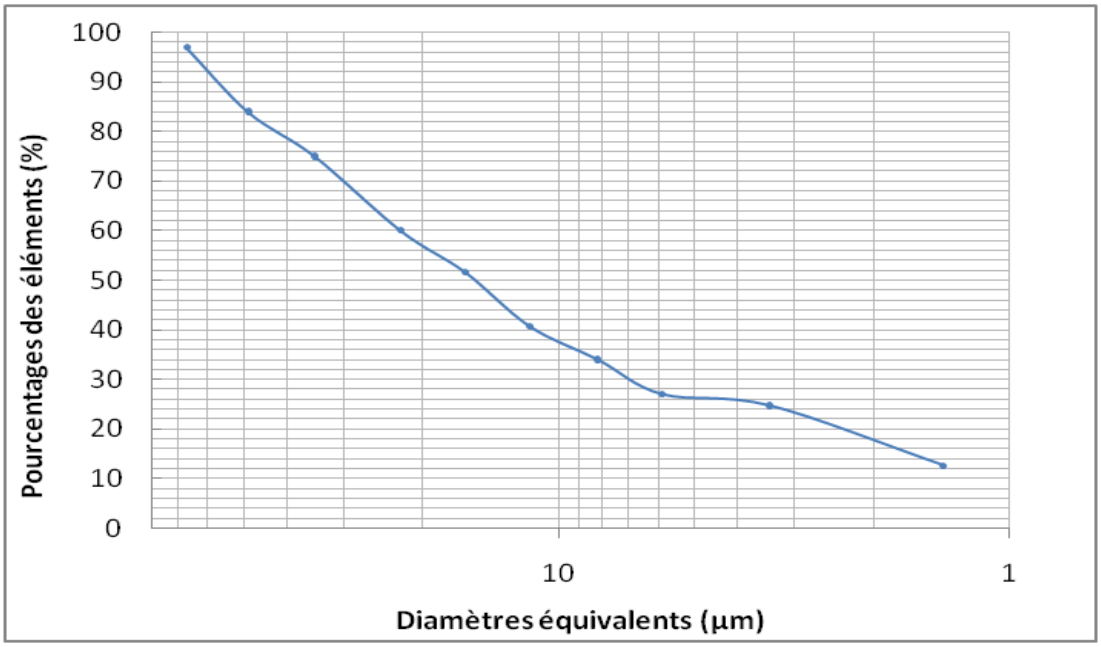


Figure. 2.III-Courbe sédimentométrique, marne.

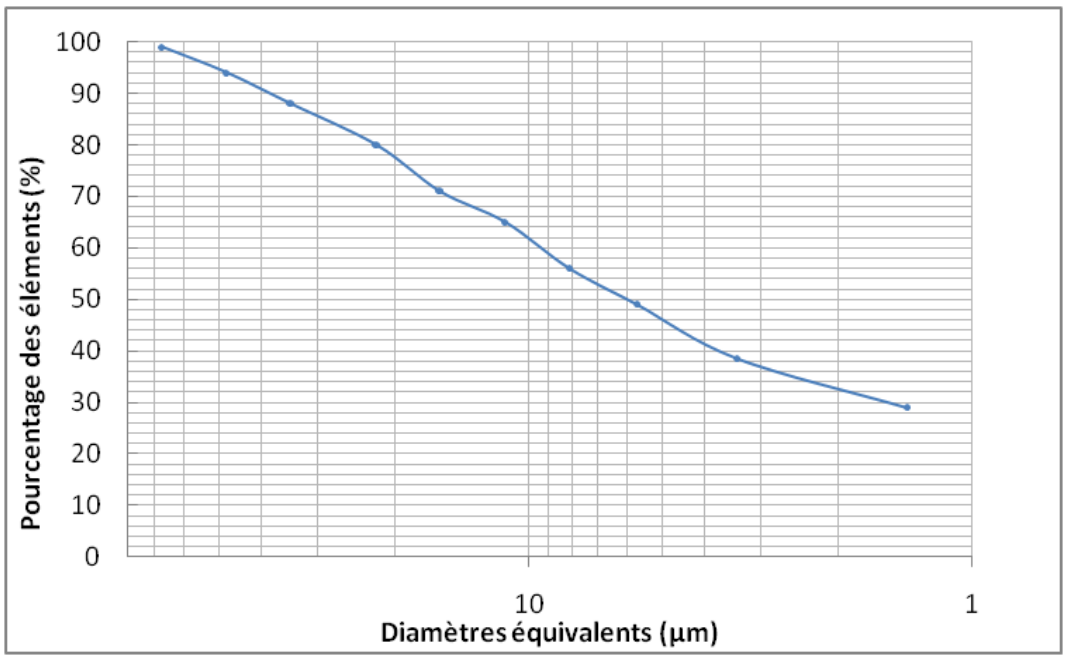


Figure.3.III-Courbe sédimentométrique, sol argileux.

III.3. Caractéristiques physiques

III.3.1. Teneur en eau (W)

La teneur en eau d'un matériau est le rapport de la masse de l'eau (m_w) contenue dans ce matériau à la masse du même matériau à l'état sec après passage à l'étuve (NF P94-050).

$$\mathbf{w = m_e / m_s} \quad \ldots(III.3)$$

- Pour mon travail, la teneur en eau n'est pas à déterminer du moment que les échantillons des différents matériaux sont remaniés, la teneur en eau est plutôt imposée.

III.3.2. Masse volumique des grains solides

La masse volumique des grains solides (ρ_s) d'un sol est déterminée selon la norme (NF P94-054), elle est appelée aussi la masse volumique réelle.
La masse volumique des particules solides est le quotient de la masse (m_s) des particules solides par leur volume (v_s).

$$\boldsymbol{\rho_s = m_s / v_s} \quad \ldots(III.4)$$

III.3.3. Masse volumique sèche

La masse volumique sèche (ρ_d), est le quotient de la masse des particules de sol sec (m_s) par le volume total de la même masse du sol (v_t), y compris les vides.

$$\boldsymbol{\rho_d = m_s / v_t} \quad \ldots(III.5)$$

III.3.4. Indice des vides (e)

L'indice des vides (e), est le rapport du volume des vides V_v sur le volume des grains solides (V_s). L'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà définis (ρ_s et ρ_d) selon la formule :

$$\mathbf{e = (\rho_s/\rho_d)-1} \quad \text{…(III.6)}$$

III.3.5. Porosité (n)

La porosité (n), est le rapport du volume des vides (volume occupé par l'air, l'eau ou les deux fluides simultanément) au volume total du sol. La porosité et l'indice des vides sont liés par la formule :

$$\mathbf{n = e/(e+1)} \quad \text{…(III.7)}$$

Masse volumique des grains solides du sable

En utilisant le pycnomètre à eau :

-Masse du pycnomètre plein d'eau : M_0 = 1,9675 kg.

-Masse du sable : M_1 = 0,5000 kg.

-Masse du pycnomètre rempli d'eau + masse du sable : M_2 = 2,2770 kg.

$$d_s = \frac{M1}{(M0+M1)-M2} = 2{,}62 \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{\rho_s = 2620\ kg/m^3}.$$

Tableau 4.III-Résultats de la détermination de la masse volumique sèche, sable.

N° du récipient	Masse tarre (kg)	Volume du récipient ($m^{3)}$	Masse sable (kg)	ρ_d (kg/m3)
1	0,0208	0,000082	0,1418	2230,49
2	0,0605	0,000086	0,1451	1669,77
3	0,0409	0,0000849	0,1436	1709,07
			Moyenne	**1870**

$$\rho_d = 1870 \text{ kg/m}^3$$

Tableau 5.III-Synthèse des résultats (caractéristiques physiques du sable).

Caractéristiques déterminées	**Moyenne**
Masse volumique des graines solide ρ_s (gr/cm^3)	**2,62**
Masse volumique sèche ρ_d (gr/cm^3)	**1,87**
Indices des vides e (%)	**40**
Porosité n (%)	**28**

Tableau 6.III-Résultats de la détermination de la masse volumique sèche ; sol argileux.

N° essai	Volume du récipient (m^3)	Masse (kg)	**Masse volumique (kg/m^3)**
1	82 .10^{-6}	0,1063	**1296,34**
2	86.10^{-6}	0,1137	**1322,09**
3	85.10^{-6}	0,1119	**1318,02**

ρ_d **= 1310 kg/m^3**

Tableau 7.III-Résultats de la détermination de la masse volumique sèche, marne.

N° essai	Volume du récipient (m^3)	Masse (kg)	**Masse volumique (kg/m^3)**
1	82 .10^{-6}	0,1296	**1580,49**
2	86.10^{-6}	0,1386	**1611,63**
3	85.10^{-6}	0,1102	**1297,00**

ρ_d **= 1494 kg/m^3**

III.3.6. Détermination des limites d'Atterberg pour le sol argileux et la marne

Limite de liquidité à la coupelle - limite de plasticité au rouleau (NF P94-051)

Cette norme destinée à la détermination des deux limites d'Atterberg (W_l et W_p) s'applique aux éléments d'un sol passant à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400 µm.

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état. Ils ont été élaborées au début du 20ème siècle par A.Atterberg, un

pédologue suédois, qui s'intéressait à la plasticité des argiles en vue de la fabrication des produits céramiques.

Les essais mis au point à cette époque ont été repris et modifiés par Casagrande, afin que leur interprétation puisse permettre d'établir un lien entre la teneur en eau du sol et son comportement.

Définitions

- **Limite de liquidité (w_l) :**

Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

- **Limite de plasticité (w_p)**

Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

- **Limite de retrait (w_r)**

Teneur en eau relativement inférieur à w_p de tel sorte que si on sèche encore le sol on aura pas de retrait (pas de diminution de volume).

- **Indice de plasticité (I_p)**

Différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

- Les teneurs en eau exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

Résultats obtenus

- **Argile**

Tableau 8.III-Limite de liquidité, sol argileux.

N° Essai	Nombre de coups	Masse du sol Humide (gr)	Masse du Sol sec (gr)	Masse de l'eau (gr)	Teneur en eau (%)

1	21	11,43	8,38	3,05	36,4
2	24	13,23	9,71	3,52	36,25
3	30	12,48	9,24	3,24	35,06
4	35	13,37	9,94	3,43	34,5

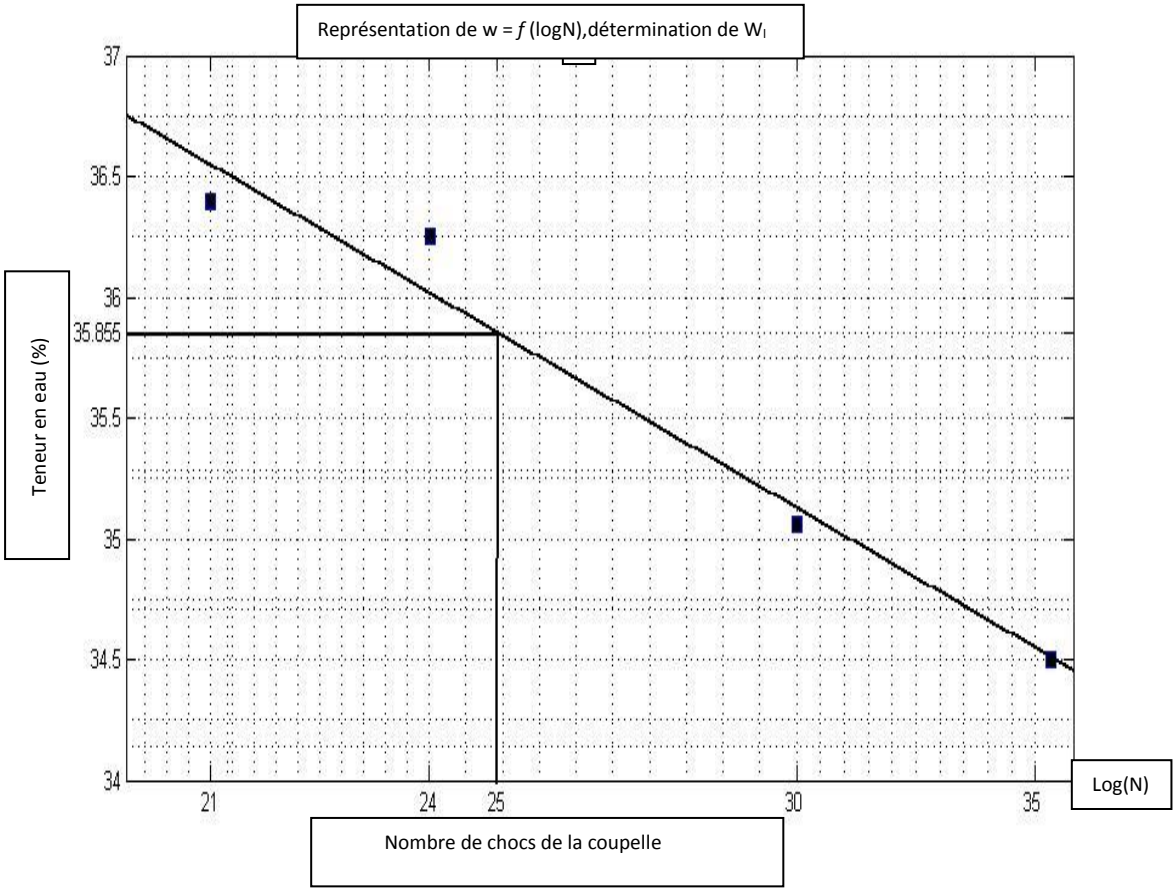


Figure. 4.III-Droite w = f(logN), sol argileux.

De la droite w = *f* (log N), la valeur de W_l est la teneur en eau qui correspond à N = 25

W_l = 35,85 %

Tableau 9.III-Limite de plasticité, sol argileux.

	1er Essai	2ème Essai	3ème Essai	4ème Essai
Masse du sol humide (gr)	2,6	3,1	3,4	3,9
Masse du sol sec (gr)	2,2	2,5	2,8	3,2
Teneur en eau (%)	18,18	24,00	21,43	21,87

Moyenne de la limite de plasticité **:** **W_p = 21,37%**

Tableau 10.III-Synthèse des résultats (limites d'Atterberg, sol argileux).

Caractéristique	Résultat
W_l	**35,85**
W_p	**21,37**
I_p	**14,48**

- **Marne**

Tableau 11.III-Limite de liquidité, marne.

N° de la tare	Nombre de coups	Masse du sol Humide (gr)	Masse du Sol sec (gr)	Masse de l'eau (gr)	Teneur en eau (%)
1	19	18,74	14,87	3,87	**26,02**

2	23	15,32	12,25	3,07	**25,06**
3	29	14,42	11,54	2,88	**24,96**
4	32	17,77	14,16	3,5	**24,71**

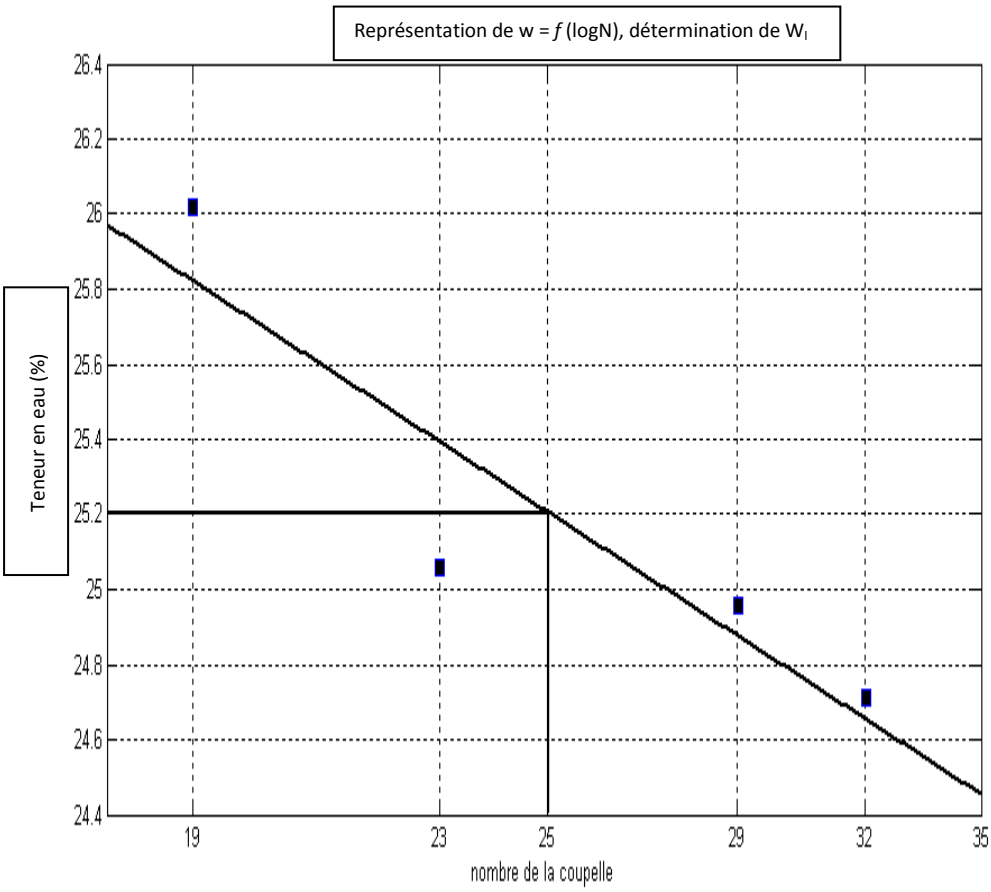


Figure. 5.III-Droite w = f(logN), marne.

De la droite w = *f* (log N), la valeur de W_l est la teneur en eau qui correspond à N = 25

W_l = 25,2%

Tableau 12.III-Limite de plasticité, marne.

	1er Essai	2ème Essai	3ème Essai	4ème Essai
Masse du sol humide (gr	3	3,3	3,2	3
Masse du sol sec (gr)	2,6	2,8	2,7	2,6
Teneur en eau (%)	**15,38**	**17,8**	**18,5**	**15,38**

Moyenne de la limite de plasticité : **17%**

Tableau 13.III-Synthèse des résultats (limites d'Atterberg, marne).

Caractéristique	Résultat
W_l	**25,2 %**
W_p	**17 %**
I_p	**8,2**

:

IV. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des paramètres d'identification d'un sol pour mieux connaître les aspects physiques et mécaniques des matériaux.
Cette étude n'intervient pas de façon explicite dans la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux. Ils présentent par contre une grande importance pour l'étude expérimentale que nous verrons dans la suite de travail.

Chapitre IV :

Essais de cisaillement direct à la boite

IV.1. Introduction

Afin de mieux connaitre les comportements mécaniques des sols, on a choisi de réaliser des essais de cisaillement direct à la boite pour mettre en évidence l'influence du contact entre deux couches différentes d'un sol sur la cohésion et l'angle de frottement des sols en plus de l'influence de la teneur en eau.

L'objectif principal étant de suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques (C et φ) en fonction de la teneur en eau.

Les essais ont été fais sur trois matériaux différents qui sont la marne, un sol argileux et le sable avec un total de cinq combinaisons :

- Echantillon N°1 :
  - Demie- boîte supérieure : sol argileux.
  - Demie- boîte inférieure : marne.

- Echantillon N°2 :
  - Demie- boîte supérieure : marne,
  - Demie- boîte inférieure : marne,
  - Couche mince du sol argileux de 5±2 mm au milieu.
- Echantillon N°3 :
  - Demie- boîte supérieure : sable.
  - Demie- boîte inférieure : sol argileux.

- Echantillon N°4 :
  - Demie- boîte supérieure : sable,
  - Demie- boîte inférieure : sable,
  - Couche mince du sol argileux 5±2 mm.

- Echantillon N°5 :
  - Demie- boîte supérieure : sable,
  - Demie- boîte inférieure : marne.

Les figures ci-après donnent une idée plus claire sur la mise en place des échantillons dans la boite de cisaillement

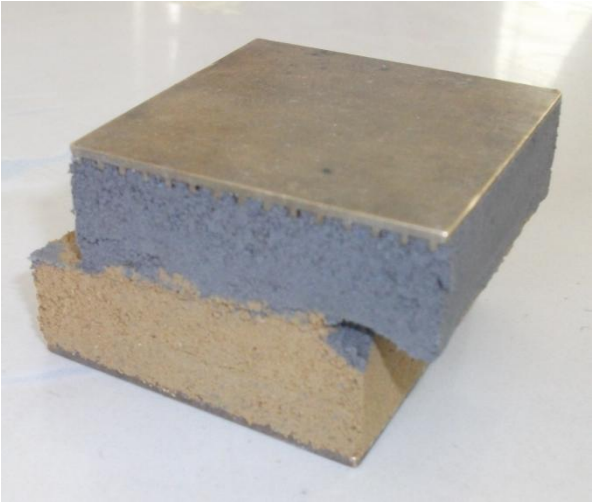


Figure.1.IV- Echantillon N°1 après cisaillement.

Figure.2.IV- Echantillon N°2 après cisaillement.

Figure.3.IV-Echantillon N°3 suggestion de la mise en place dans la boîte.

Figure.4.IV- Echantillon N°4 suggestion de la mise en place dans la boîte.

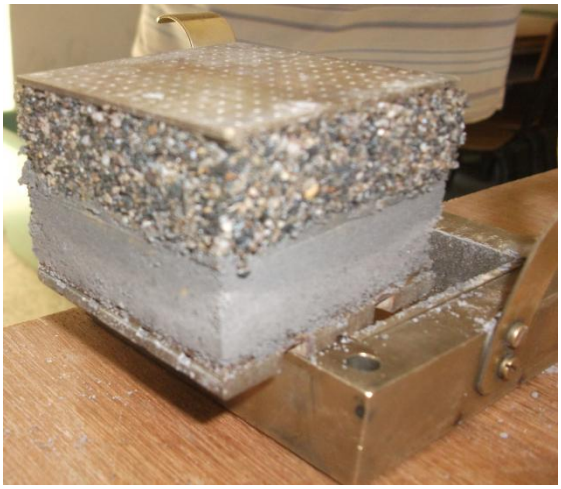


Figure.5.IV-Echantillon N°5 suggestion de la mise en place dans la boîte.

IV.2. Appareillage

L'appareil comprend :

-la boîte de cisaillement de section intérieure A = l × l = (60 × 60) mm^2, elle est composée de deux demis-boîtes,

- Un système mécanique permettant d'appliquer les contraintes verticales désirées,

-Un système mécanique permettant de déplacer horizontalement la demie- boîte inférieure,

-Un anneau dynamométrique indiquant les efforts de cisaillement,

-Un comparateur au 1/1000 de millimètres indiquant les déplacements horizontaux,

-Un comparateur au 1/100 de millimètres indiquant les déplacements verticaux,

-Un chronomètre pour prendre les mesures chaque 15 secondes.

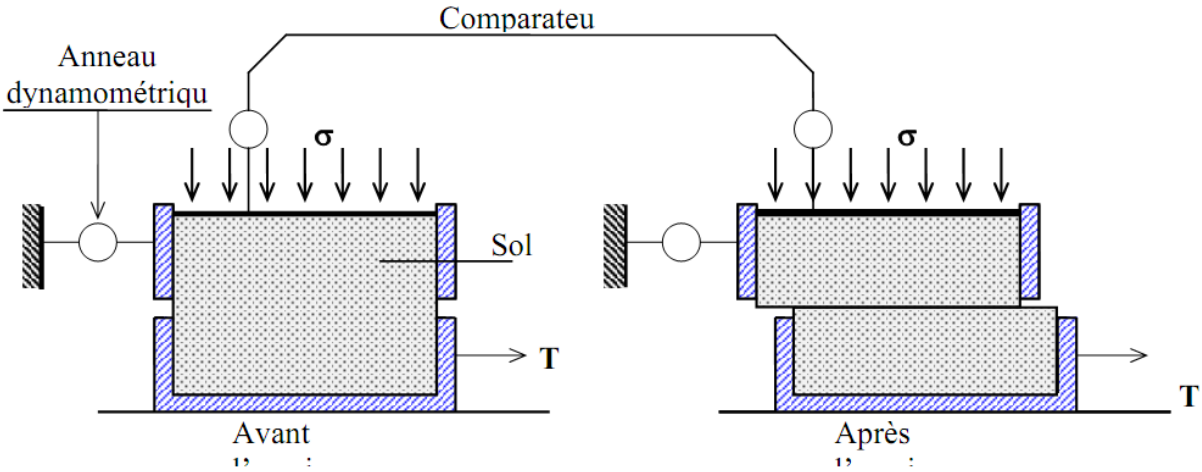


Figure.6.IV. Schéma de la boite de cisaillement.

L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée.

IV.3. Mode opératoire

Les essais sont réalisés selon la norme française (NF P94-071-1) sur les cinq échantillons, qui sont humidifiés à deux teneurs en eau différentes (6%, 14%).

Les échantillons sont mis dans l'appareil par deux couches pour chacune des deux demis-boîte avec densification du matériau avec la même énergie soit 15 coups.
L'énergie de densification de la demie- boîte inférieure est plus grande que celle de la demie- boîte supérieure pour qu'il n'y ait pas une variation de volume au début de l'essai, c'est à dire le plan de cisaillement imposé reste le plan juste au niveau du contact entre les différents matériaux mis en place dans la boîte.

IV.4. Déroulement de l'essai

Après avoir préparé l'échantillon et mis dans la boite de cisaillement ;

-Appliquer sur la face supérieure de l'échantillon un effort vertical (N), résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale σ = (50, 100, 200, 300) kPa, maintenue constante tout le long de l'essai,

-Mettre tous les comparateurs à zéro,

-Régler la vitesse de la machine de façon à imposer un déplacement horizontal relatif entre les deux demies- boîte constant (1,5 mm/mn),

-Démarrer la machine et prendre les lectures des trois comparateurs simultanément à des intervalles de temps réguliers ; toute les 15secondes,
-La rupture est atteinte lorsqu'un pic ou un palier est obtenu du graphe $\tau = f(\Delta l)$, ce qui permet d'arrêter l'essai après quelques lectures décroissantes ou stabilisées, si non on ira jusqu'à la fin de la course,
-Toutes les lectures obtenues par les comparateurs sont converties en unités de calcul, les détails sont expliqués au prochain paragraphe.

IV.5. Expression des résultats

L = longueur de la boite de cisaillement, L = (60mm),
ΔL : déplacement horizontal mm,
S_c : la section corrigée, $S_c = L\,(L-\Delta L)$ (mm^2),
La variation de volume en pourcentage : ($\Delta V/V$), avec
ΔV : déplacement volumique vertical mm^3
La contrainte tangentielle $\tau = \frac{T}{Sc}$ (kPa), avec
T : force de cisaillement en (daN).

IV.6. Présentation des résultats

Les résultats des essais de cisaillement direct à la boite sont représentés sous forme de courbes :

- Contraintes déformations $\tau = f(\Delta l)$, τ étant la contraintes tangentielle,
- Variations de volume $(\Delta V/V) = f(\Delta l)$,
- Droites intrinsèques $\tau = f(\sigma)$, σ étant la contrainte normale appliquée.

IV.6.1. Courbes contraintes déformations : $\tau = f(\Delta l)$

En faisant varier la contrainte verticale σ = (50, 100, 200, 300), pour les cinq échantillons et à deux teneurs en eau différentes, nous avons obtenus les résultats représentés sur les figures ci-dessous.

Echantillon N°1 (demie-boîte supérieure : sol argileux, demie-boîte inférieure : marne) :

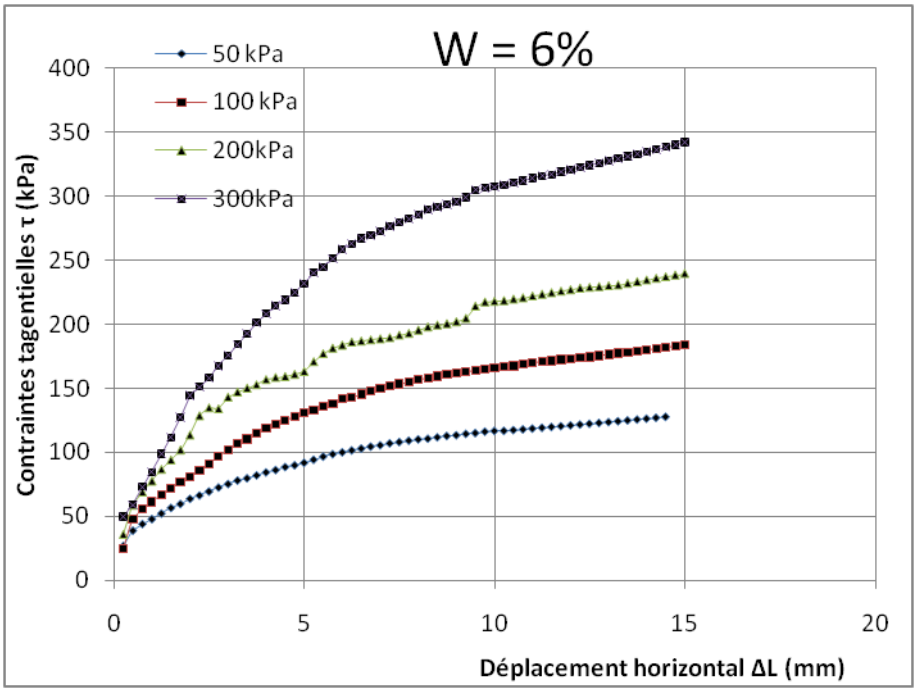


Figure. A.7.IV- courbe τ = f (ΔL), (sol argileux, marne, w = 6%).

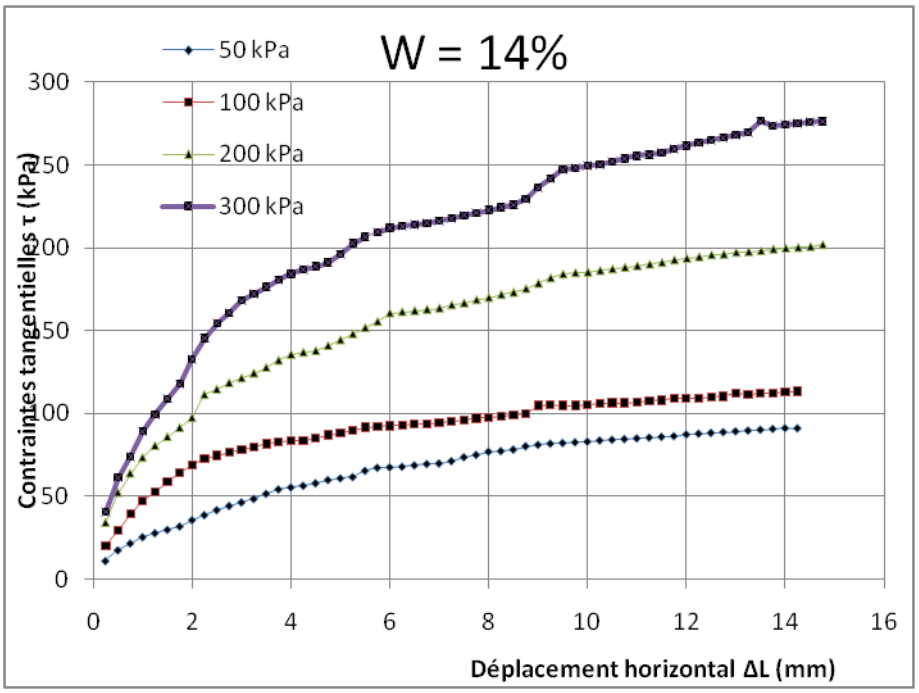


Figure. B.7.IV- courbe τ = f (ΔL), (sol argileux, marne w = 14%).

Echantillon N°2 (demie-boîte supérieure : marne, demie-boîte inférieure : marne, une couche mince du sol argileux entre les deux couches de marne) :

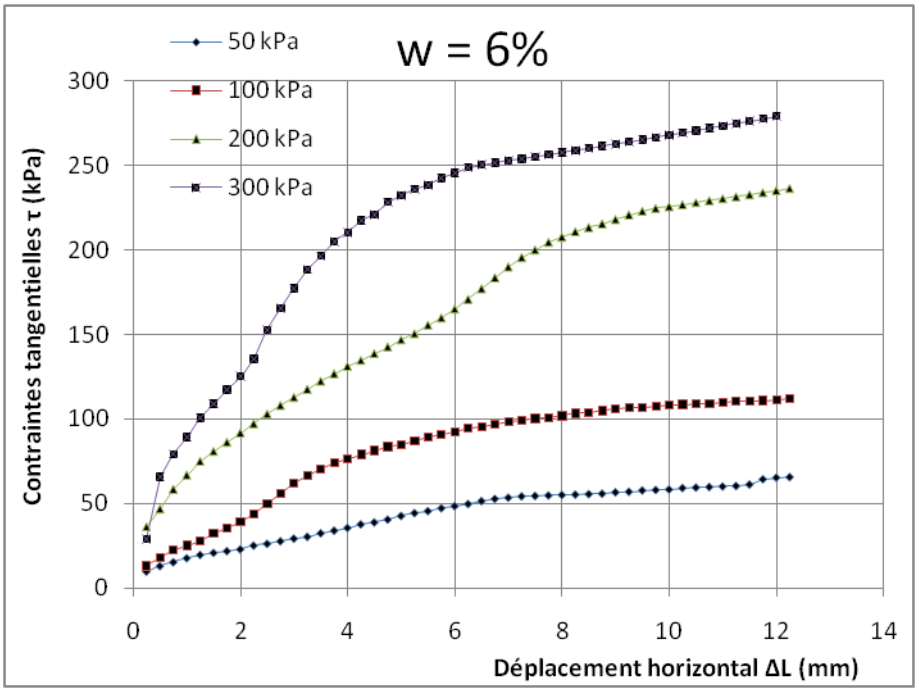


Figure. A.8.IV- courbe τ = f (ΔL), (marne, sol argileux, marne, w = 6%).

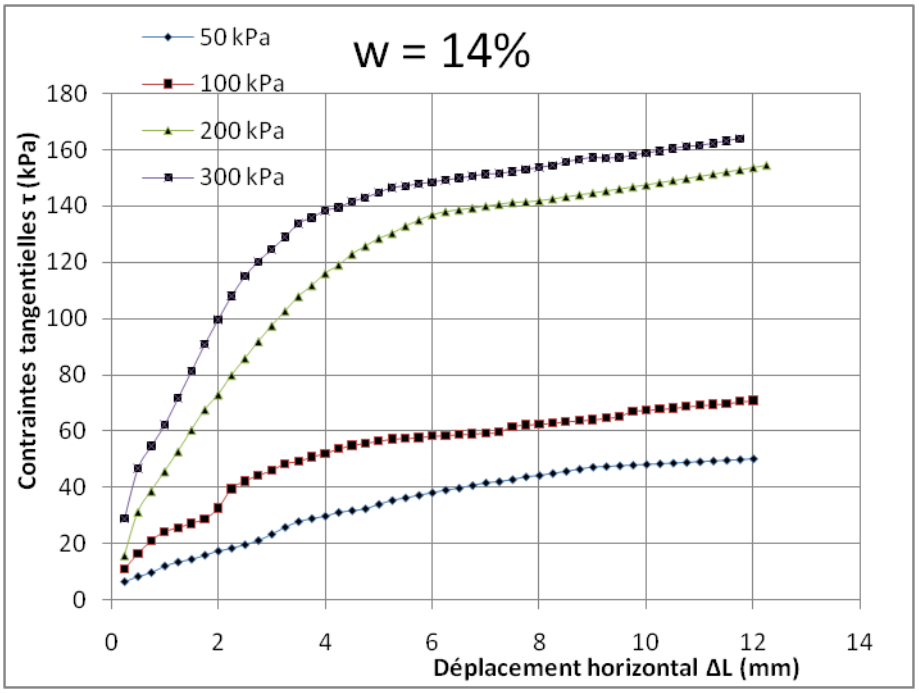


Figure. B.8.IV- courbe τ = f (ΔL), (marne, sol argileux, marne, w = 14%).

Echantillon N°3 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : sol argileux) :

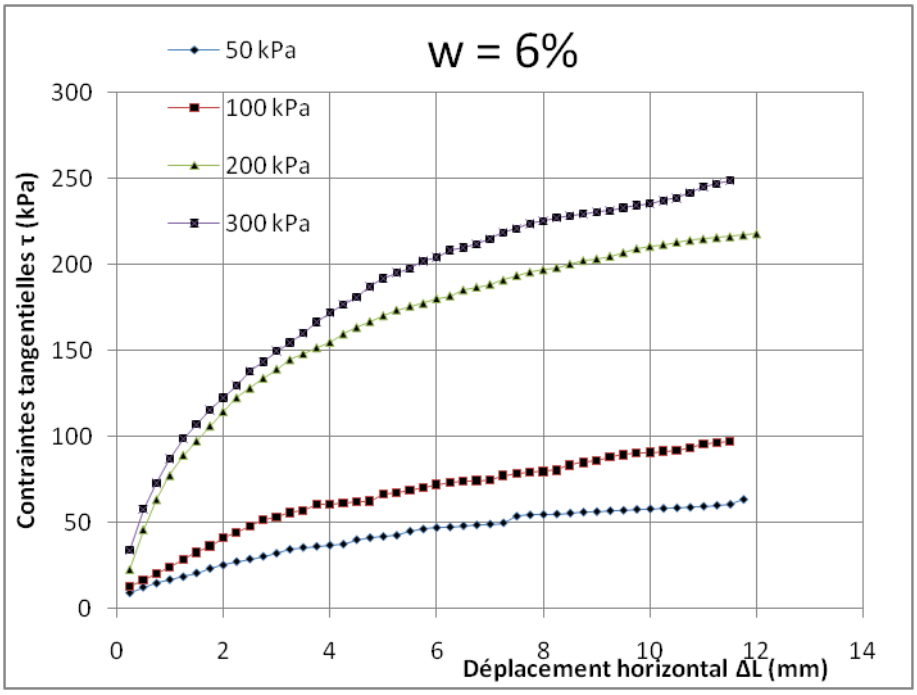


Figure. A.9.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, w = 6%).

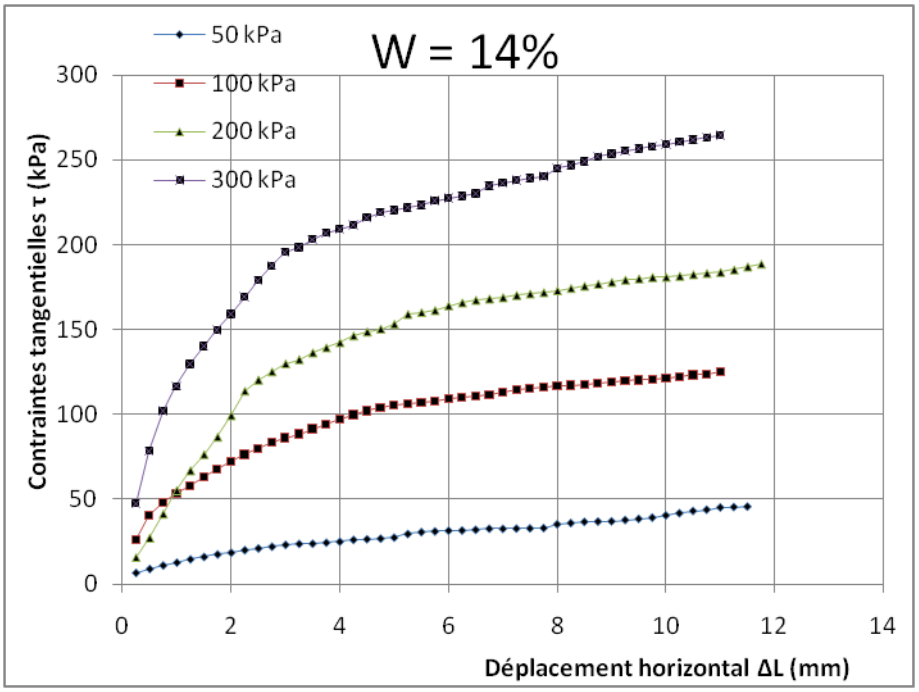


Figure. B.9.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, w = 14%)

Echantillon N°4 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : sable, une couche mince du sol argileux entre les deux couches de sable) :

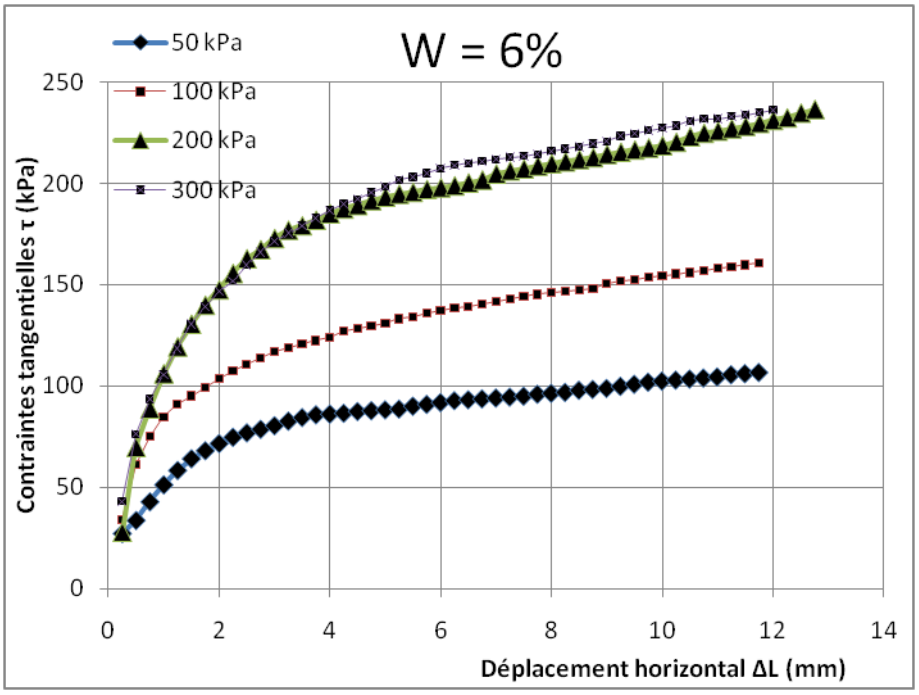


Figure. A.10.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable, w = 6%).

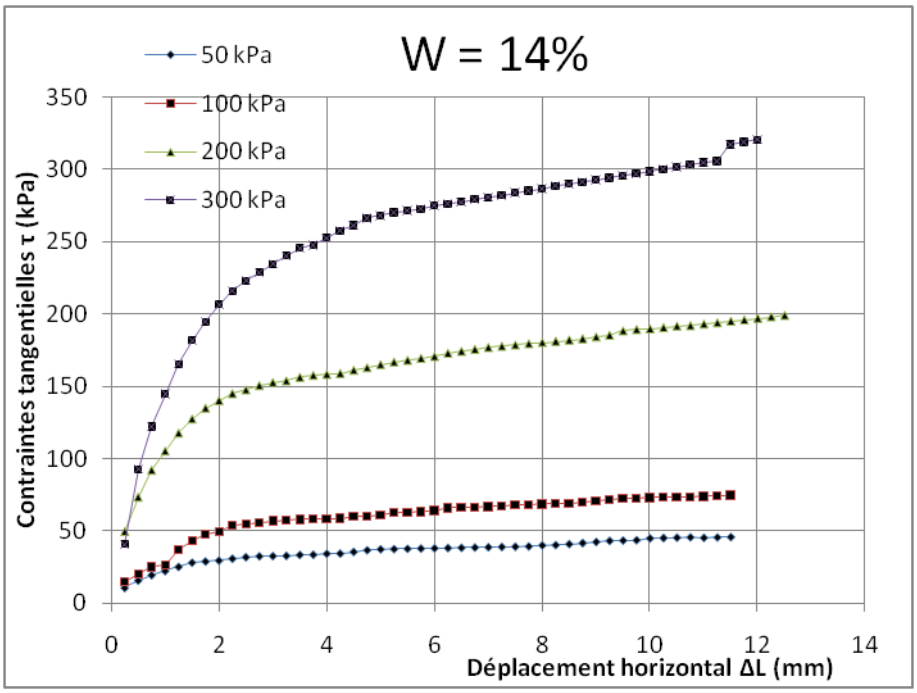


Figure. B.10.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable, w = 14%).

Echantillon N°5 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : marne)

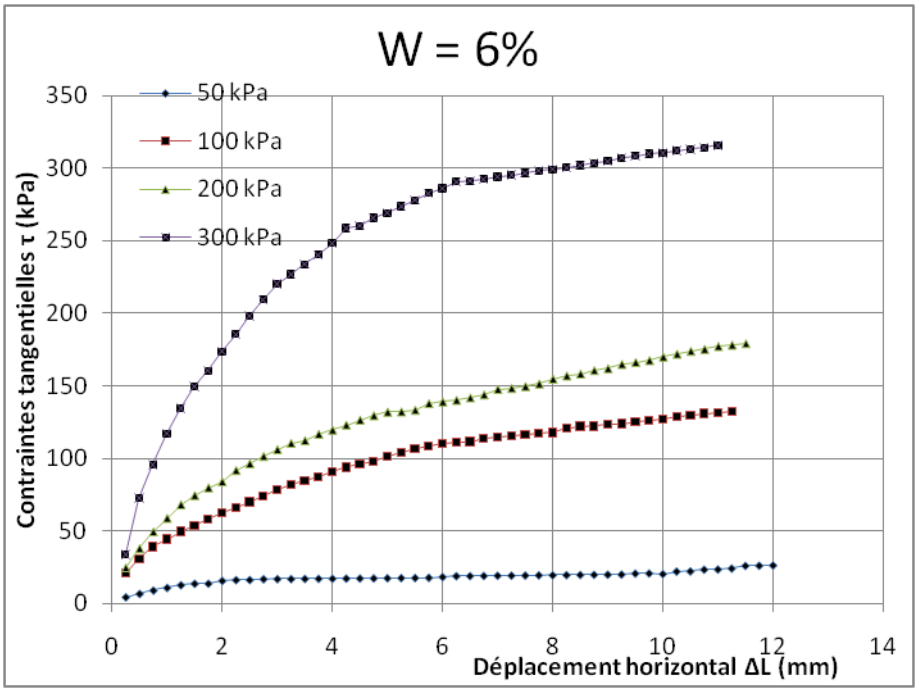


Figure. A.11.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, marne, w = 6%).

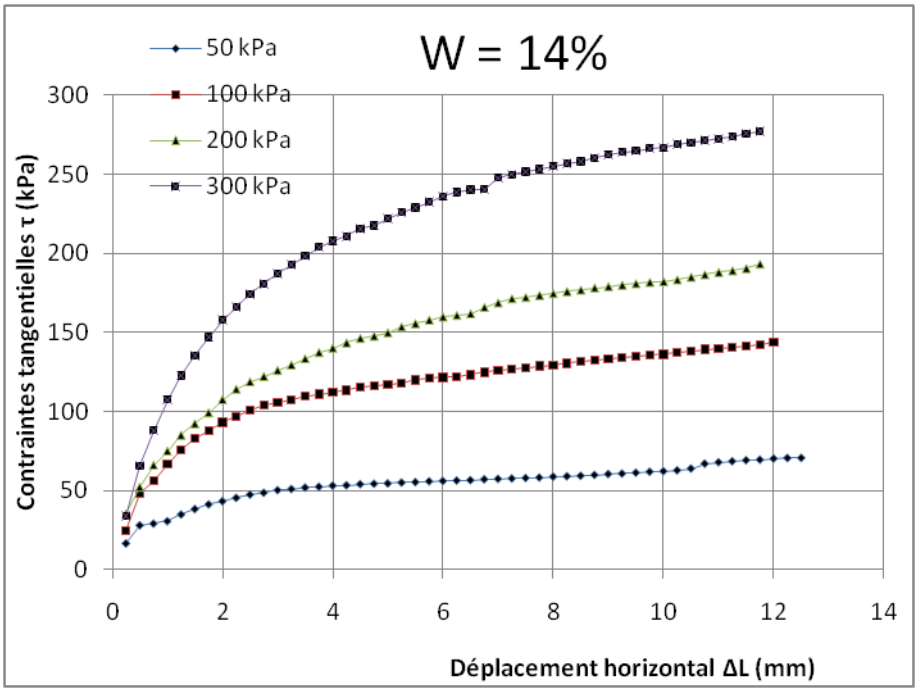


Figure. B.11.IV- courbe τ = f (ΔL), (sable, marne, w = 14%).

IV.6.2. Courbes de variation de volume (ΔV/V) = *f* (Δl)

Echantillon N°1 (demie-boîte supérieure : sol argileux, demie-boîte inférieure : marne) :

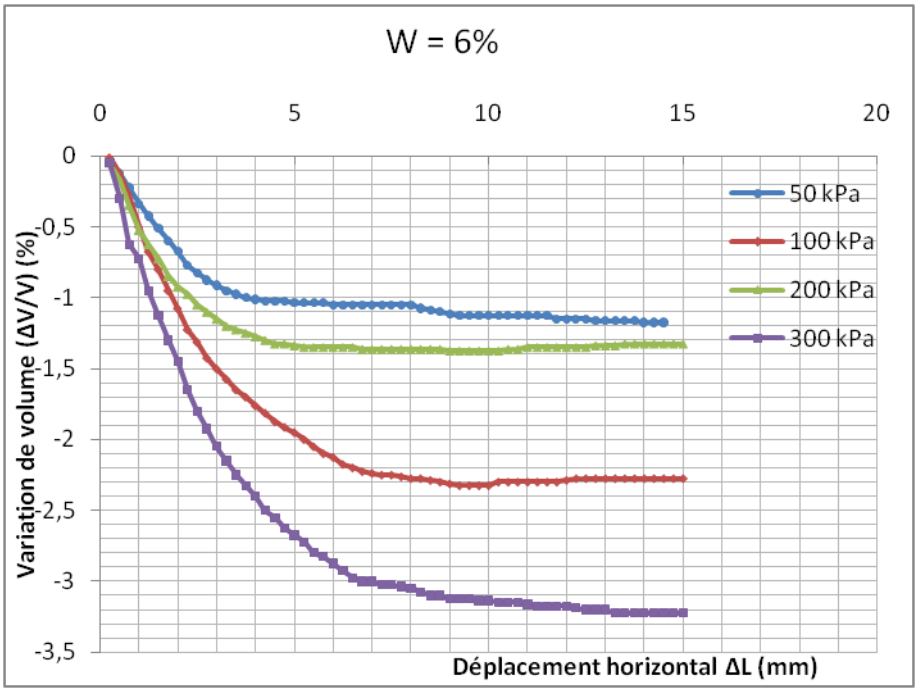


Figure A.12.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sol argileux, marne, w =6%).

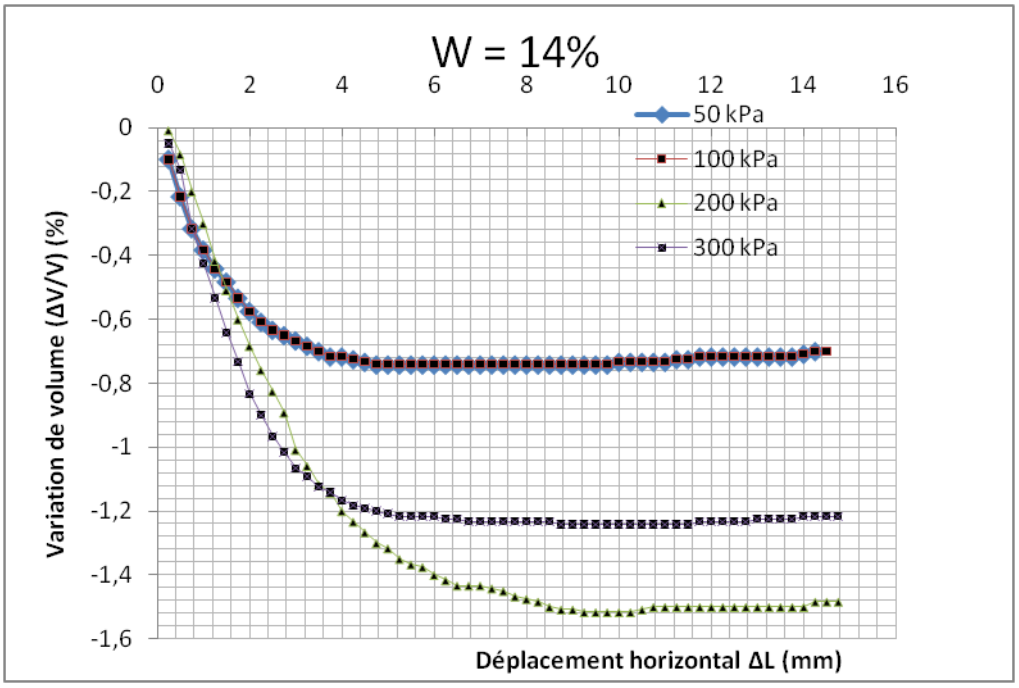


Figure B.12.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sol argileux, marne, w=12%)..

Echantillon N°2 (demie-boîte supérieure : marne, demie-boîte inférieure : marne, une couche mince d'argile entre les deux couches de marne) :

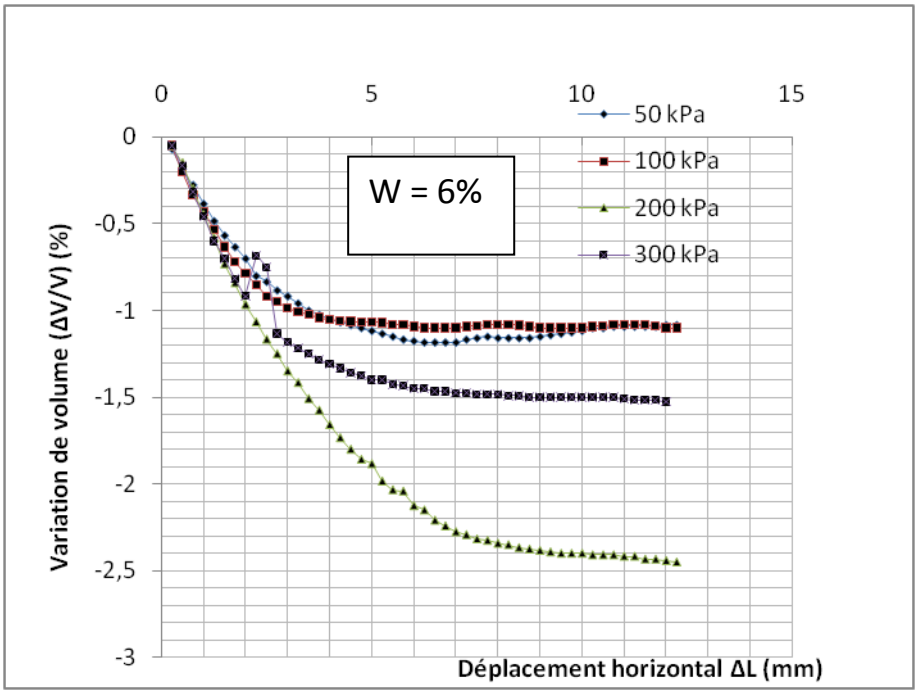


Figure A.13.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(marne, sol argileux, marne, w=6%).

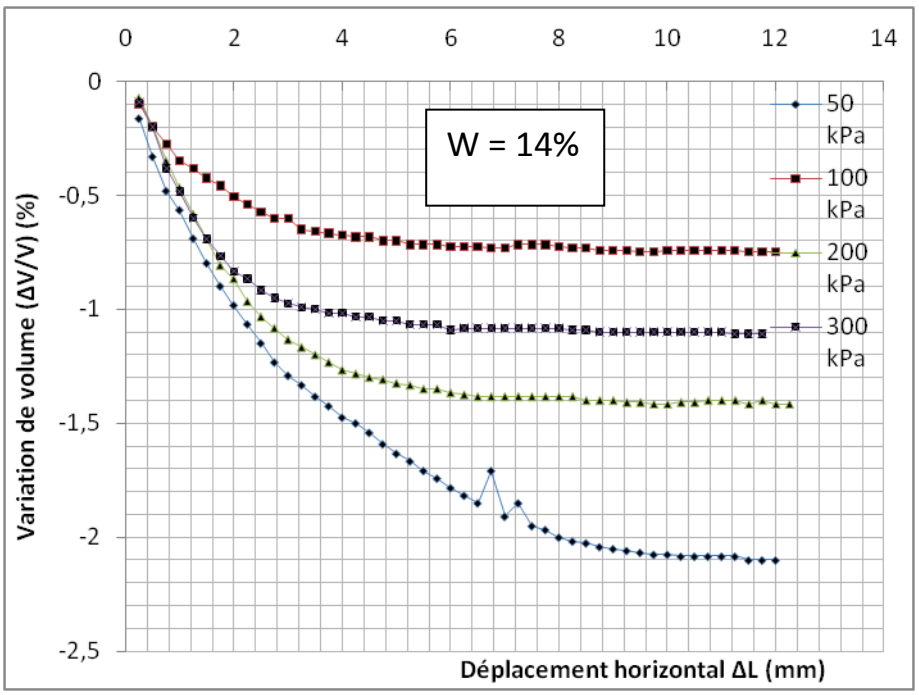


Figure B.13.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL) (marne, sol argileux, marne, w=12%).

Echantillon N°3 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : argile) :

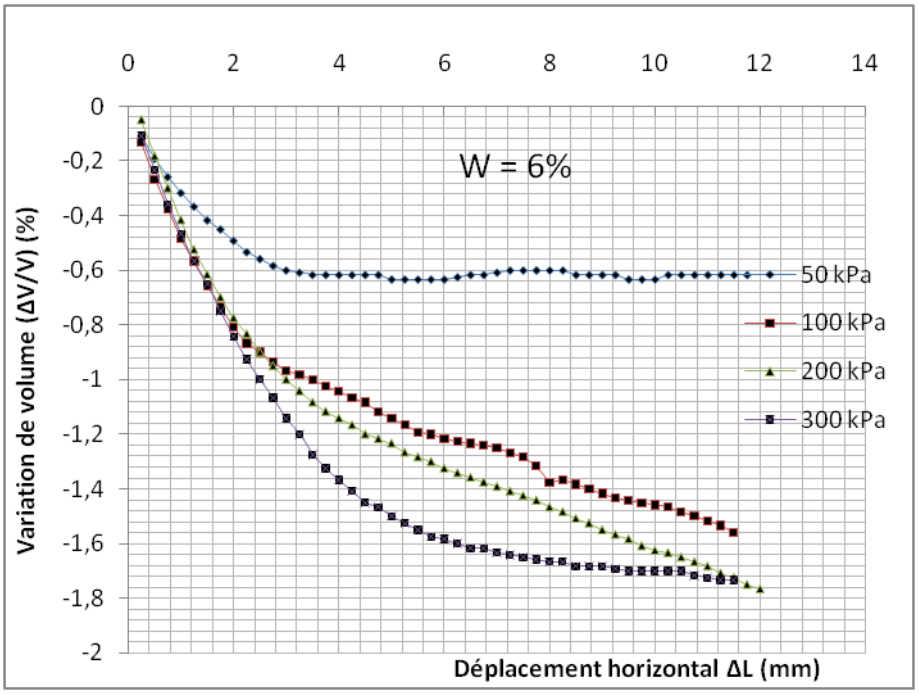


Figure A.14.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sable, sol argileux, w=6%).

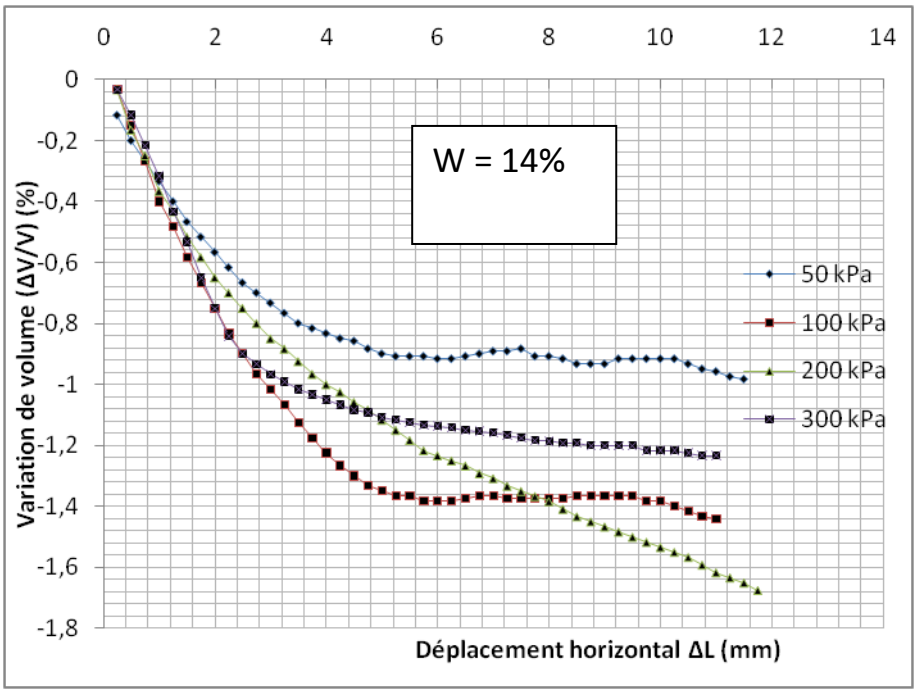


Figure B.14.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, sol argileux, w=12%).

Echantillon N°4 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : sable, une couche mince d'argile entre les deux couches de sable) :

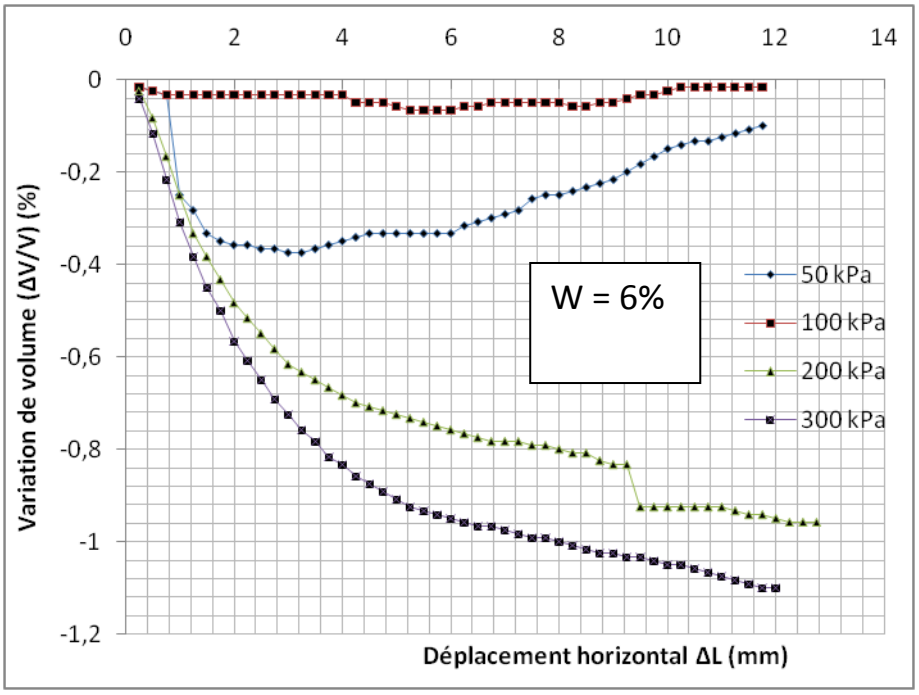


Figure A.15.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, sol argileux, sable, w=6%).

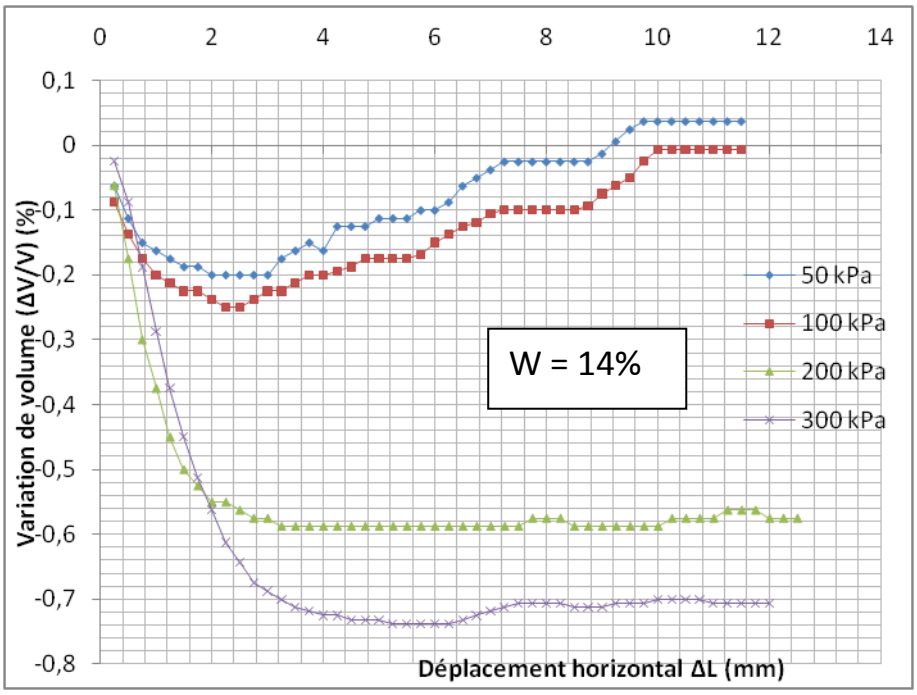


Figure B.15.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL), (sable, sol argileux, sable,w=12%).

Echantillon N°5 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : marne)

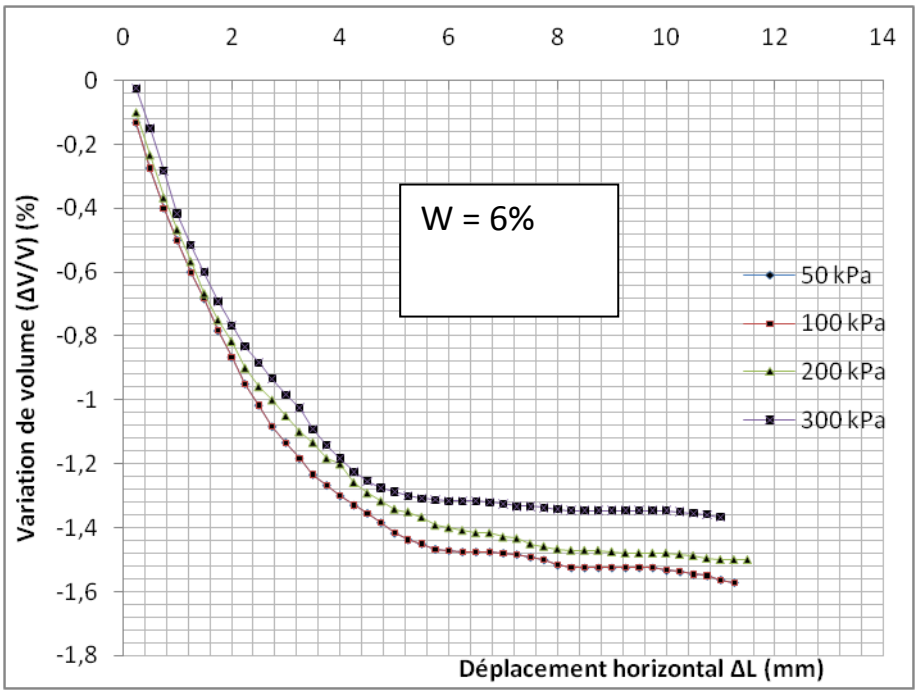


Figure A.16.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, marne,w=6%).

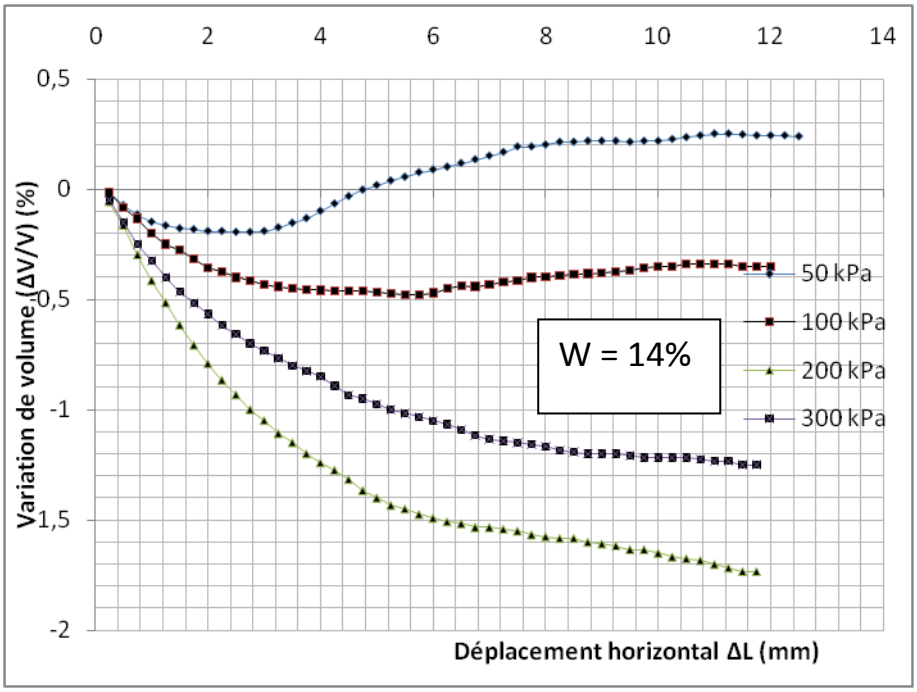


Figure B.16.IV- courbe (ΔV/V) = f (ΔL),(sable, marne, w=12%).

IV.6.3. Droites intrinsèques :

Echantillon N°1 (demie-boîte supérieure : argile, demie-boîte inférieure : marne) :

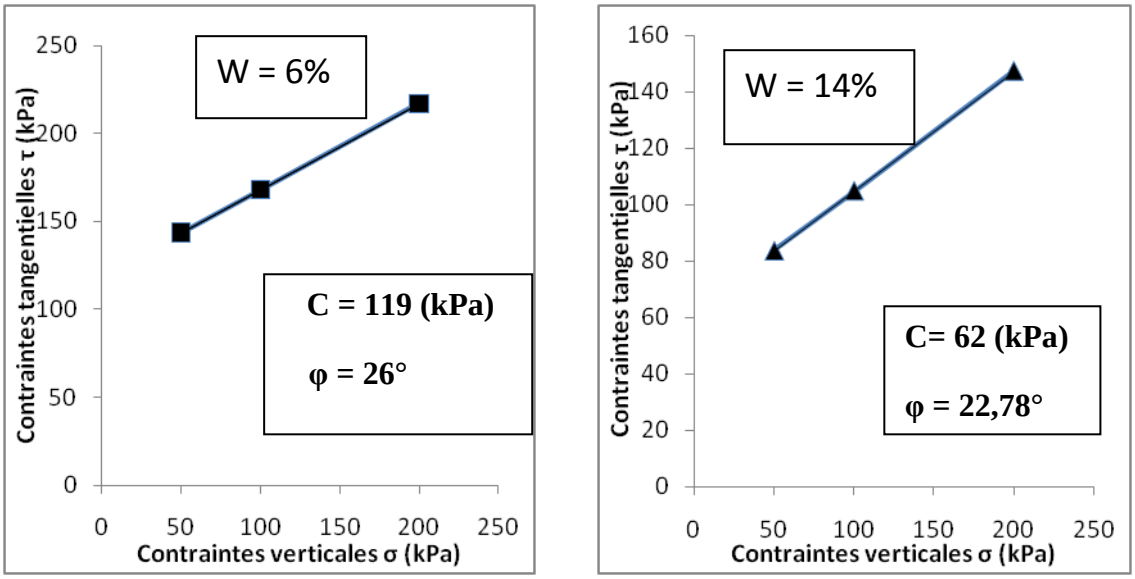
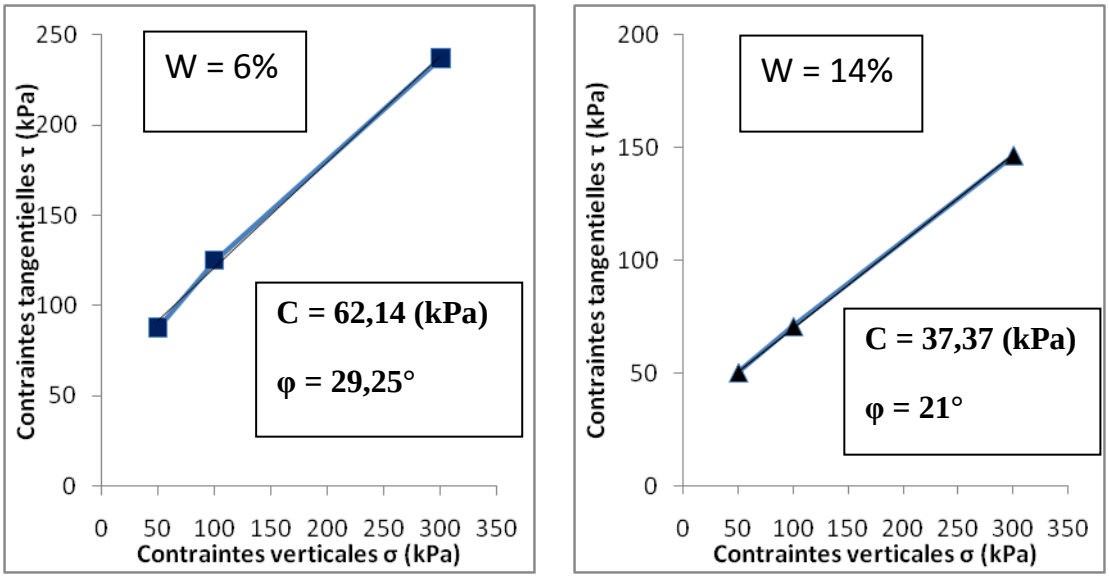


Figure.17.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sol argileux, marne, w = 6%, w = 14%).

Echantillon N°2 (demie-boîte supérieure : marne, demie-boîte inférieure : marne, une couche mince d'argile entre les deux couches de marne) :



f igure.18.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (marne, sol argileux, marne, w = 6%, w = 14%).

Echantillon N°3 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : argile) :

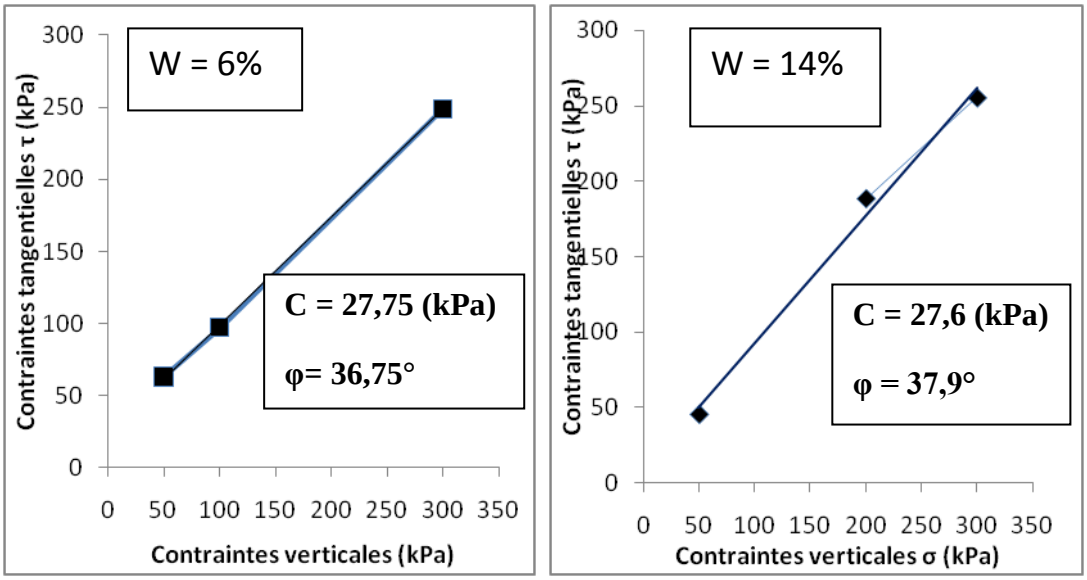


Figure.19.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, sol argileux, w = 6%, w = 14%).

Echantillon N°4 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : sable, une couche mince d'argile entre les deux couches de sable) :

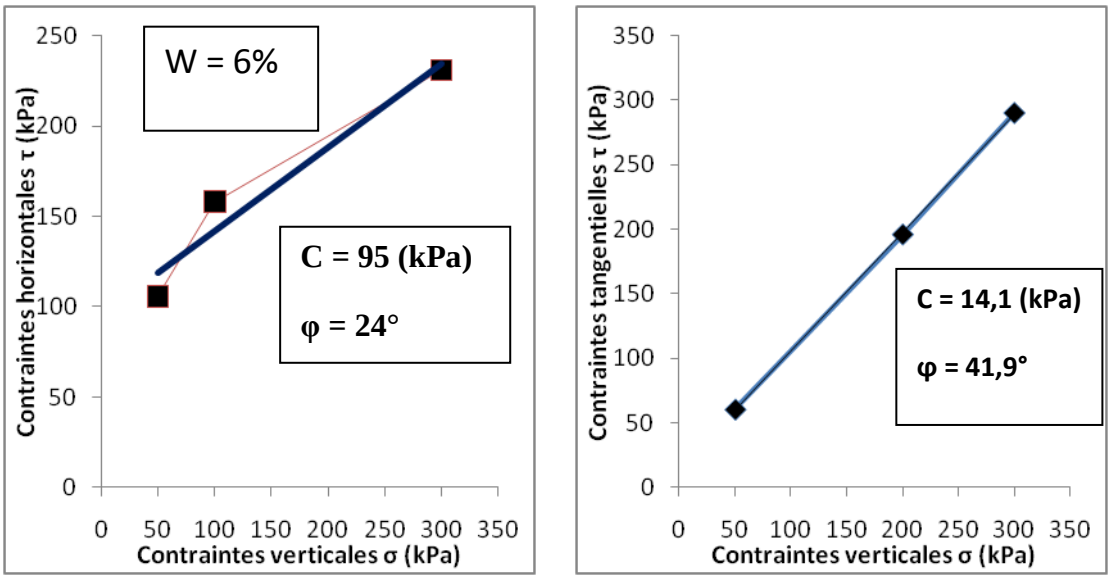
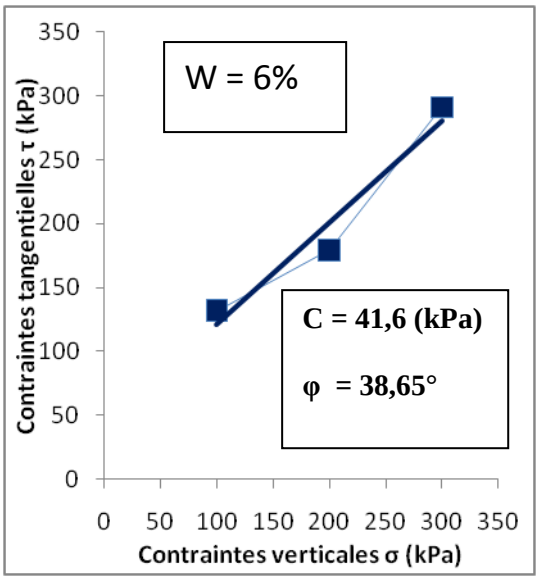


Figure.20.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, sol argileux, sable w = 6%, w = 14%).

Echantillon N°5 (demie-boîte supérieure : sable, demie-boîte inférieure : marne)



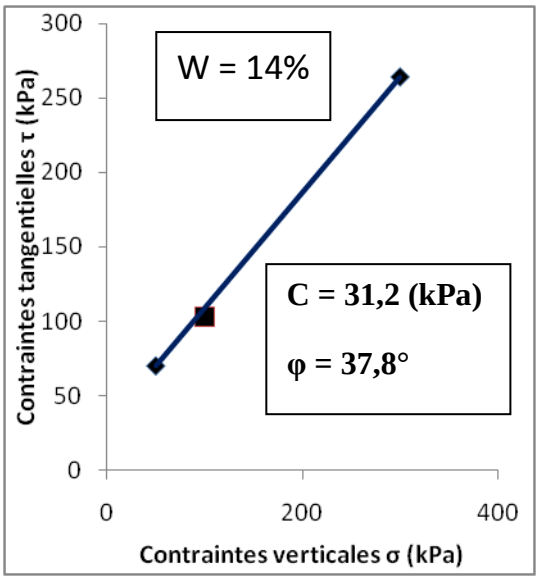


Figure.21.IV-Droites intrinsèques τ = f(σ), (sable, marne, w = 6%, w = 14%).

IV.6.4. Interprétation des résultats

Les courbes contraintes-déformations, représentées dans les figures précédentes montrent que la contrainte de cisaillement augmente en fonction de la contrainte normale appliquée et ceci pour tous les types d'échantillons et pour les deux teneurs en eau.

On a constaté aussi lors de l'expérimentation une diminution de la résistance au cisaillement en augmentant la teneur en eau. Ceci est dû au fait que la présence d'eau favorise le glissement relatif des grains. L'eau casse aussi la liaison entre les grains ce qui diminue aussi l'angle de frottement interne.

Pour la variation du volume, on remarque essentiellement une diminution de volume du début de l'essai jusqu'à la fin pour tous les échantillons et pour les deux teneurs en eau. Cette diminution de volume est appelée : contractance.

Pour l'échantillon N°4 (pour w = 14%) et l'échantillon N°5 (pour w = 14%), on remarque qu'il y a une légère augmentation de volume après avoir diminuer. Cette augmentation est le résultat du réarrangement des grains du sable, une caractéristique propre aux sols pulvérulents. Elle est appelée dilatance.

IV.7. Conclusion

Les sols mis à l'essai de cisaillement ont présenté des résistances de cisaillement variables, qui évoluent en fonction de l'augmentation de la contrainte normale appliquée et décroissent en fonction de l'augmentation de la teneur en eau.

Les courbes de variation de volume montrent une diminution de volume pour toutes les combinaisons des matériaux, c'est la contractance. Pour le sable avec la couche mince d'argile au milieu (échantillon N°4), le volume a augmenté, ce phénomène est appelé dilatance, il est dû au réarrangement des grains de sable.

Il est constaté lors de cette expérimentation que l'échantillon N°1 (argile et marne) présente les meilleurs caractéristiques mécaniques parmi les combinaisons des trois matériaux deux par deux dans la même boîte, l'échantillon N°5 (sable et marne) vient au deuxième rang. Tandis que l'échantillon N°3 (sable et argile) présente les plus faibles caractéristiques entre ces trois combinaisons des matériaux deux par deux dans la même boîte.

Pour les combinaisons à trois matériaux dans la même boîte (échantillons N°2 et N°4), leurs comportements mécaniques prennent les caractéristiques de la couche d'argile qui est au milieu.

Ces combinaisons reflètent la réalité du terrain, où l'on peut rencontrer en surface 2 à 3 combinaisons de couches constituées d'argile de sable et de marne. Ces combinaisons présentent des fois une très bonne adhérence comme c'est le cas de l'échantillon N°1, comme elles peuvent présenter aussi une mauvaise adhérence.

En général, lorsque l'une des couches présente des faibles caractéristiques, le glissement ou des déformations importantes peuvent avoir lieu dans celle-ci.

Chapitre V :

Initiation aux Plans d’expériences factoriels

V.I. Introduction

Les plans d'expériences est une méthode d'expérimentation extrêmement puissante. Elle permet de modéliser, c'est-à-dire, de représenter sous forme d'équation mathématique un système complexe. Le système étudié peut être quelconque à partir du moment où il dépend de variables sur lesquelles on peut agir et que celui-ci donne des résultats expérimentaux qui sont mesurables.
La méthode des plans d'expériences est aussi appelée méthode Taguschi, du nom du Docteur G. Taguschi qui a grandement contribué au développement de celle-ci, par ses travaux au Japon dans les années 60. Par la suite, les grandes firmes américaines ont été parmi les premières à en profiter, à partir de la fin des années 70. Les industriels européens ont commencé assez tardivement à s'intéresser à cette méthode dans les années 80.
La méthode des plans d'expériences se prête particulièrement bien à l'étude des systèmes très complexes où de très nombreux paramètres interviennent. D'ailleurs l'intérêt de la méthode réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire de rentrer dans les détails des mécanismes du système pour établir une relation entre les variables et le résultat. Le principe consiste à considérer qu'une relation entre les deux, sous forme de polynôme. Le problème revient alors simplement à résoudre une équation à N inconnues (les N facteurs ou variables qui interviennent dans le système étudié). La résolution du polynôme se fait par voie expérimentale. Elle consiste à réaliser un certain nombre d'expériences en fixant des valeurs bien précises aux variables et en mesurant le résultat.

V.2. Applications de la méthode des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences est toute indiquée pour l'étude des systèmes complexes, où de nombreux facteurs interviennent.
Elle est utilisée dans le but d'optimiser et de maîtriser un système et aussi pour :

- Amélioration des performances techniques.
- Amélioration de la qualité.
- Détermination des réglages optimums.
- Réduction des rebuts.

Son champ d'utilisation est très large, puisqu'elle convient à tout système qui donne un résultat mesurable en fonction de paramètres (facteurs) que l'on sait faire varier. C'est par exemple:

- Un procédé.
- Un matériau.
- Un produit.
- Une machine.
- Une organisation.

Elle permet de déterminer l'influence des facteurs (ou paramètres, ou encore variables) sur le résultat, et d'établir un modèle mathématique qui permettra de prévoir un résultat, sans avoir à faire d'essais expérimentaux supplémentaires.

Avantages des plans

Les avantages sont nombreux et expliquent la généralisation de cette méthode dans l'industrie et les laboratoires de recherche. Ils permettent :

- La rationalité et la rigueur dans la démarche expérimentale,
- La réduction du nombre d'expériences pour les plans factoriels fractionnaires. Il est possible à l'extrême de déterminer N facteurs avec N+1 expériences,
- La détermination des facteurs influents et des facteurs négligeables,
- La création d'un modèle mathématique qui permet de prévoir les résultats,
- Le gain de temps, de matières, et d'argent, etc.

V.3. Description de la méthodologie Expérimentale

Dans la première étape

Il faut définir les objectifs, et la manière dont on va réaliser les expériences. Il faut aussi connaître l'incertitude de mesure des résultats expérimentaux.

La deuxième étape

Consiste à établir une liste des paramètres (que l'on appellera facteurs par la suite) qui interviennent ou que l'on suppose intervenir sur le système étudié. Il faut essayer de les classer par ordre décroissant d'influence, et de préciser à chaque fois si le facteur est contrôlable ou pas. Ce travail est souvent réalisé en groupe (Brainstorming).

La troisième étape

Elle est souvent un peu délicate, car il faut maintenant prévoir les interactions qui peuvent exister entre les facteurs de la liste précédente.

Définition d'une interaction

C'est lorsque deux facteurs se potentialisent. L'effet des 2 facteurs sur le système est supérieur à la somme des 2 facteurs pris individuellement. Par exemple : Le facteur " A " a un effet de 5 et le facteur " B " a un effet de 4. Les facteurs " AB " en agissant en même temps donnent un effet de 20 au lieu de 9.

La quatrième étape

C'est la construction de la matrice d'expérience. On commence par sélectionner les facteurs qui peuvent être maîtrisés, et dont l'influence est supposée significative.
Il faut retenir que le premier plan d'expériences va servir à dégrossir la connaissance du système. Il ne faut pas être trop ambitieux en voulant prendre tous les facteurs, car l'interprétation des résultats risque d'être alors trop difficile. Un bon choix est par exemple de débuter une étude avec au maximum de 7 facteurs en plus des interactions entre eux, ce qui donne par la méthode des plans d'expériences factoriels fractionnaires 8 expériences (Nous allons voir les raisons).

V.4. Plan d'expériences factoriel fractionnaire à 2 niveaux:

Les facteurs vont prendre 2 valeurs différentes : Une valeur basse appelée niveau bas et une valeur haute appelée niveau haut, (2 niveaux).
Un certain nombre de facteurs sont mélangés (on dit aliasés) avec les interactions dans le but de réduire le nombre d'essais. Bien sûr, ce n'est pas fait au hasard, on choisit de préférence d'aliaser les facteurs forts avec les interactions faibles ou vice versa.
Par conséquent :
Le nombre d'expériences à réaliser va fortement diminuer. Pour comprendre pourquoi, prenons un exemple simple avec 3 facteurs : A, B, C. On les fait varier sur 2 niveaux, ce qui donne $2^3 = 8$ possibilités.

H = niveau haut et B = niveau bas.

Tableau 1.V .interactions de trois facteurs A, B, C, sur deux niveaux (haut et bas).

Essai	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Facteur A	**H**	**B**	**H**	**B**	**H**	**B**	**H**	**B**
Facteur B	**H**	**H**	**B**	**B**	**H**	**H**	**B**	**B**
Facteur C	**H**	**H**	**H**	**H**	**B**	**B**	**B**	**B**

Nous avons bien 8 combinaisons de 3 facteurs sur 2 niveaux, c'est la base du plan d'expérience dit complet.

Réduction du nombre d'essais

Nous savons que 3 facteurs à étudier correspondent à 3 inconnues, il suffit donc de réaliser un système à trois équations avec les trois inconnues pour pouvoir le résoudre avec 3 essais (3 essais=3résultats).
Nous savons aussi que les 3 facteurs **A, B, C** se combinent entre eux pour donner 4 combinaisons (4 interactions), nous avons **AB, AC, BC, ABC.**
Supposons maintenant que l'interaction AB soit négligeable. On peut alors se permettre de confondre le facteur **C** à l'interaction **AB**. Si par exemple C vaut 10 et **AB** vaut 0.1, on peut considérer que **C + AB = C.**
C et **AB** sont confondus ou encore aliasés. Lorsque **C** est au niveau bas alors **AB** est aussi au niveau bas, et lorsque C est au niveau haut alors **AB** est aussi au niveau haut, ou encore:

C = AB.

Nous avons une nouvelle matrice d'expériences :

Tableau 2.V. matrice d'expériences avec réduction du nombre d'essais.

Essai	**1**	**2**	**3**	**4**
Facteur A	**H**	**B**	**H**	**B**
Facteur B	**H**	**H**	**B**	**B**
Facteur C = AB	**H**	**B**	**B**	**H**

L'interaction AB ou (C) est le produit de A par B.

Nous venons de voir de façon simplifiée le principe du plan d'expériences factoriel fractionnaire. En confondant les interactions avec des facteurs (dits supplémentaires), il est possible de réduire le nombre d'expériences à réaliser. Dans l'exemple précédent, la détermination des 3 facteurs avec un plan complet aurait nécessité 8 essais, par contre 4 essais suffisent avec un plan fractionnaire.

Mais toute la difficulté, et c'est là qu'intervient l'expérience de l'expert en plan d'expérience, est de ne pas aliaser les interactions significatives avec les facteurs, mais aussi de construire la matrice d'expérience de façon à pouvoir désaliaser un facteur d'une interaction en réalisant une ou deux expériences supplémentaires.

Le tableau suivant montre que le nombre d'interactions et le nombre d'essais pour un plan complet augmentent très rapidement avec le nombre de facteur. Le plan fractionnaire s'impose la plupart du temps à partir de 5 facteurs à étudier.

Tableau 3.V. Tableau de variation du nombre d'interactions ainsi que du nombre d'essais avec le nombre de facteurs.

Nb de facteur	**Nb d'intéraction**	**Nb d'essai**	**Nb d'essai**
		plan complet	**plan fractionnaire**
1	**/**	**2**	**2**
2	**1**	**4**	**4**
3	**4**	**8**	**4**
4	**11**	**16**	**8**
5	**26**	**32**	**8**
6	**57**	**64**	**8**
7	**120**	**128**	**8**
n	$(2^n)^{(-n-1)}$	$(2)^n$	$(2)^{(n-i)}$

La matrice d'expériences

C'est un tableau, où les facteurs prennent séquentiellement un niveau haut (+1) et un niveau bas (-1).

En pratique, on se contente de mettre les signes (+) ou (-).

Voici un exemple d'une matrice à 4 facteurs (A,B ,C ,D).

Le facteur D a été aliasé avec l'interaction ABC.

Le nombre d'essai est de $2^3 = 8$.

A, B et C sont les facteurs principaux, ils définissent la matrice.

D est le facteur supplémentaire.

Y est le résultat de l'essai.

Tableau 4.V. matrice d'expériences.

Essai	A	B	C	D=ABC	AB	AC	BC	Réponse=Y
1	-	-	-	-	+	+	+	y1
2	+	-	-	+	-	-	+	y2
3	-	+	-	+	-	+	-	y3
4	+	+	-	-	+	-	-	y4
5	-	-	+	+	+	-	-	y5
6	+	-	+	-	-	+	-	y6
7	-	+	+	-	-	-	+	y7
8	+	+	+	+	+	+	+	y8

Un deuxième tableau définit les niveaux des facteurs :

Tableau 5.V. définissant les niveaux des facteurs.

Facteur:	A	B	C	D
Désignation:	Température	Pression	Concentration	Vitesse
Niveau bas:	40°C	1 bar	100 g/L	250 trs/mn
Niveau haut:	80°C	2 bars	200 g/L	500 trs/mn

La cinquième étape est la réalisation des essais qui sont définis par les deux tableaux précédents.

La sixième étape est le calcul des effets des facteurs et des interactions.
Chaque essai correspond à une équation où les inconnues sont les facteurs et y le résultat de l'essai , dont voici le modèle : **y = Y ± a ± b ± c ± d± ab ± ac ± bc** ...
Y : moyenne des essais, a: effet du facteur A, b: effet du facteur B, c: effet du facteur C ...
±: le signe est donné à l'intersection de la colonne du facteur et du numéro d'essai.
Par exemple:

$$y1 = Y - a - b - c - d + ab + ac + bc$$
$$y2 = Y + a - b - c + d - ab - ac + bc$$

La matrice d'expériences précédente va donner un système de 8 équations, d'où on pourra extraire nos 8 inconnues: **a, b, c, d, ab, ac, bc et Y.**
Pour ne pas alourdir cette présentation, je n'irai pas plus loin dans la description de la méthode de résolution.

La septième étape est certainement une des plus délicates. L'interprétation des résultats demande toute l'expérience et la compétence de l'expérimentateur qui pourra déterminer si un effet est bien significatif, si une interaction n'a pas été négligée à tort, si les résultats ne sont pas affectés d'une dérive, si aucun facteur n'a été oublié, etc.
Je résumerai en disant que cette partie de l'étude fait appel aux outils statistiques, dont voici une rapide présentation :

1. **Moindre carré,**
2. **Variance globale,**
3. **Variance résiduelle,**
4. **Variance entre échantillon,**
5. **Analyse de la variance.**

La huitième étape découle de la précédente. L'expert à partir de ses conclusions sur le premier plan d'expériences, décide de réaliser soit quelques expériences supplémentaires, soit un deuxième plan d'expérience complémentaire, afin de lever les ambiguïtés entre facteurs et interactions. Il peut aussi décider d'un nouveau plan d'expériences où certains facteurs seront abandonnés et d'autres rajoutés à l'étude. Il peut aussi resserrer ou élargir l'écart entre les niveaux ou encore les décaler.

BILAN : En fin d'expérience, il est alors possible de dresser la liste des facteurs qui influencent le système, de donner pour chacun d'eux l'intensité et le signe de leur action. Ces informations vont permettre de dire, sur quel facteur il faut agir, et comment il faut agir pour améliorer un résultat.
En outre, le système sera modélisé par une équation qui permettra de prévoir un résultat sans essais supplémentaires.

V. Application du plan d'expériences factoriel fractionnaire sur les résultats des essais de cisaillement exposés au chapitre IV (ANOVA plan complet).

Pour mon travail, deux facteurs influent les résultats de la résistance au cisaillement :

- Les différentes combinaisons des 3 matériaux.
- La teneur en eau.

Soient :

Le facteur A = Combinaison → Niveau 1 : Echantillon N°1 : argile et marne.

Le facteur A = Combinaison → Niveau 2 : Echantillon N°2 : sable et argile.

Le facteur B = W (teneur en eau) → 6%

Le facteur B = W (teneur en eau) → 14%

Les différents facteurs dans un plan d'expériences pour un système donné prennent deux valeurs, comme expliqué aux paragraphes précédents. Dans mon travail, et comme le facteur A (Combinaisons entre les échantillons qui sont déjà des combinaisons des matériaux en deux jusqu'à trois matériaux dans la même boîte) ne prennent pas de valeurs (c'est des facteurs non mesurables), j'ai choisi d'appeler le facteur A, la combinaison, et les niveaux de ce facteur ne sont pas des valeurs numériques mais plutôt des échantillons.

Au total, 4 combinaisons du facteur A sont conçues dans ce travail :

- Combinaison I : Echantillon N°1 (argile et marne) avec l'échantillon N°3 (sable et argile).
- Combinaison II : Echantillon N°1 (argile et marne) avec l'échantillon N°5 (sable et marne).
- Combinaison III : Echantillon N°3 (sable et argile) avec l'échantillon N°5 (sable et marne).

- Combinaison IV : Echantillon N°4 (2couches de sables et la couche mince d'argile au milieu) avec l'échantillon N°2 (2couches de marne avec la couche mince d'argile au milieu).

Pour le facteur B, qui est la teneur en eau W, il prend à chaque fois deux valeurs, la valeur basse qui de 6% et la valeur haute qui est de 14%.

Le but de cette conception est de comparer les effets des deux teneurs en eau (6% et 14%), ainsi que les différents échantillons sur la cohésion en premier lieu et sur l'angle de frottement en deuxième lieu. L'effet est pris d'abord individuellement, c'est-à-dire, l'influence de la variation de la teneur en eau toute seule et l'influence de la nature de l'échantillon tout seul sur la cohésion et l'angle de frottement, puis l'interaction des deux facteurs (teneur en eau et nature de l'échantillon), c'est-à-dire l'effet des deux facteurs sur la cohésion et l'angle de frottement au même temps.

Illustration du plan I (combinaison I), pour la cohésion C

	Facteurs	**Niveau 1**	**Niveau 2**
A =	Combinaison I	argile & marne	sable & argile
B =	W	6%	14%

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	***Réponses***	*Y1*	*Y2*
1	argile & marne	6%	***118,500***	*119,000*	*118,000*
2	argile & marne	14%	***61,500***	*62,000*	*61,000*
3	sable & argile	6%	***27,250***	*27,750*	*26,750*
4	sable & argile	14%	***27,100***	*27,600*	*26,600*

- Ce programme ne peut fonctionner que si le nombre d'essais est strictement supérieur à 1.
- Vu le nombre d'échantillons qui implique un nombre d'essais total de 40 essais de cisaillement sans tenir compte des essais refait, il était impossible de faire deux variantes à chaque fois. Donc, j'ai choisi à chaque fois la deuxième variante à partir de la première en réduisant le résultat par une unité pour tous les plans, que ce soit pour la cohésion ou bien pour l'angle de frottement pour que le programme fonctionne, chose qui n'influe presque pas les résultats.

Cohésion : $\mathbf{Y_2 = Y_1 - 1}$ **(kPa).**

Angle de frottement : $Y_2 = Y_1 - 1$ (degré).

Effets et interactions

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	58,588	31,413	14,288
niveau 2	58,588	-31,413	-14,288

Interactions	A1B1 = 14,213	**| AB | = 14,213**
	A2B1 = -14,213	
	A1B2 = -14,213	
	A2B2 = 14,213	

Graphique des effets et de l'interaction

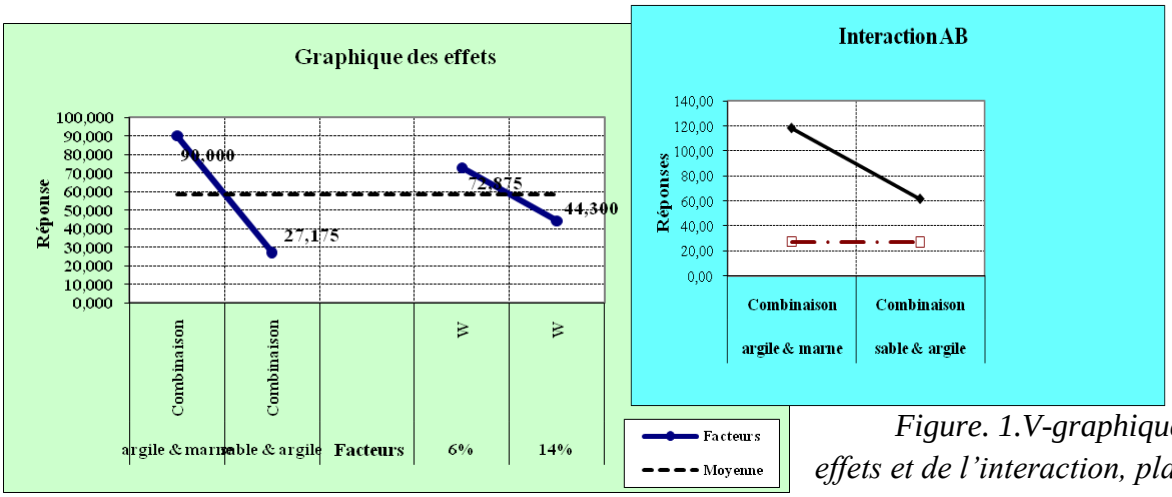


Figure. 1.V-graphique des effets et de l'interaction, plan I, cohésion.

Illustration du plan I (combinaison I), pour l'angle de frottement φ

C'est la même démarche que celle pour la cohésion. Les valeurs numériques sont prises des courbes intrinsèques du chapitre IV.

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	argile & marne	sable & argile
B =	W	6%	14%

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	***Réponses***	*Y1*	*Y2*
1	argile & marne	6%	***25,500***	*26,000*	*25,000*
2	argile & marne	14%	***22,280***	*22,780*	*21,780*
3	sable & argile	6%	***36,250***	*36,750*	*35,750*
4	sable & argile	14%	***37,400***	*37,900*	*36,900*

Effets et interactions :

Effets moyens	**Général**	**Combinaison**	**W**
niveau 1	**30,358**	**-6,468**	**0,517**
niveau 2	**30,358**	**6,468**	**-0,518**

Interactions	A1B1 = 1,093	**| AB | = 1,093**
	A2B1 = -1,093	
	A1B2 = -1,093	
	A2B2 = 1,092	

Graphique des effets et de l'interaction

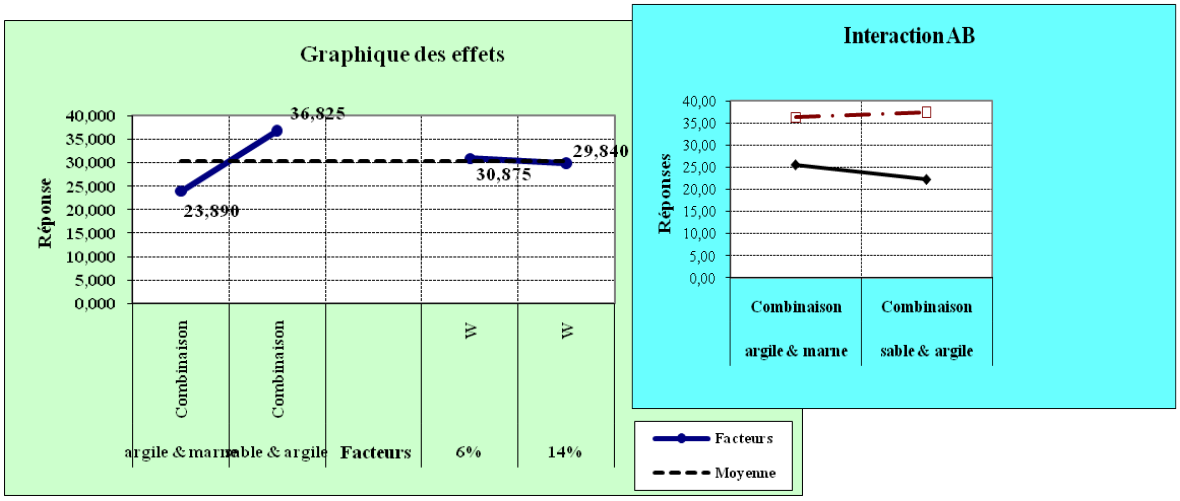


Figure. 2.V- graphique des effets et de l'interaction, plan I, angle de frottement.

Les résultats des autres plans (II, III et IV) sont représentés sous forme de graphiques des effets et des interactions.

Les plans complets sont représentés en Annexe II.

Résultats de tous les plans d'expériences

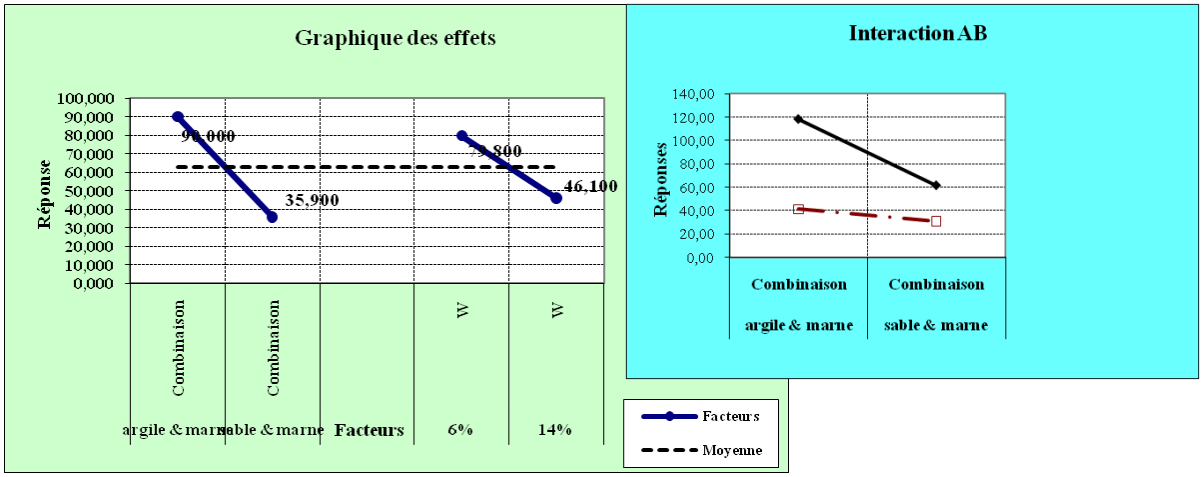


Figure. 3.V-graphique des effets et de l'interaction, plan II, cohésion.

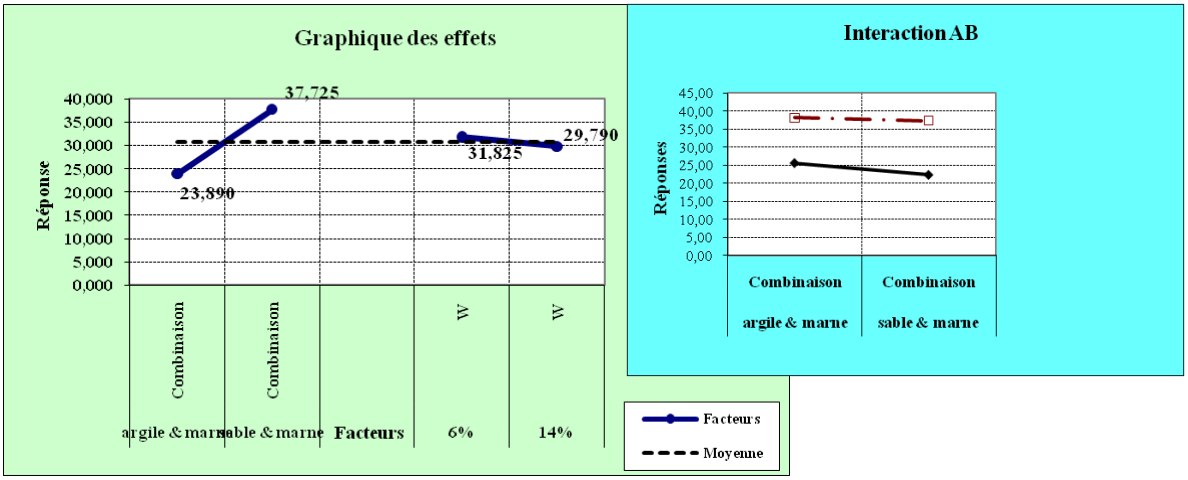


Figure. 4.V- graphique des effets et de l'interaction, plan II, angle de frottement.

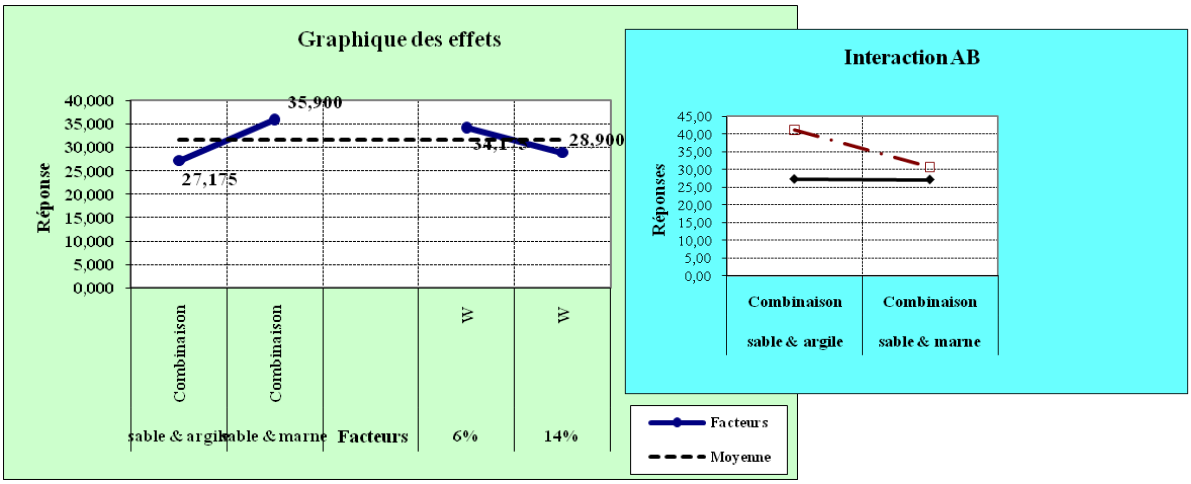


Figure. 5.V-graphique des effets et de l'interaction, plan III, cohésion.

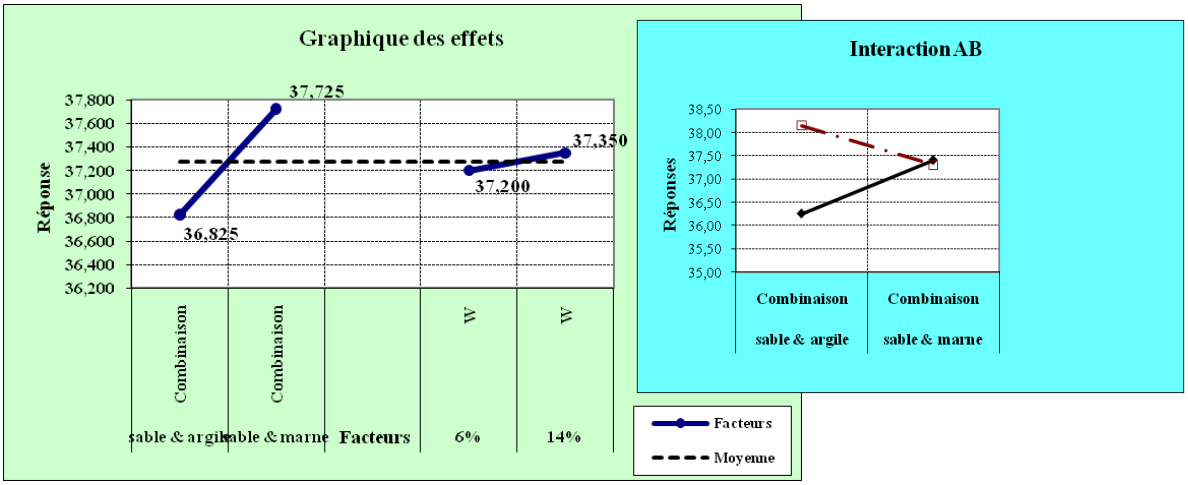


Figure. 6.V- graphique des effets et de l'interaction, plan III, angle de frottement.

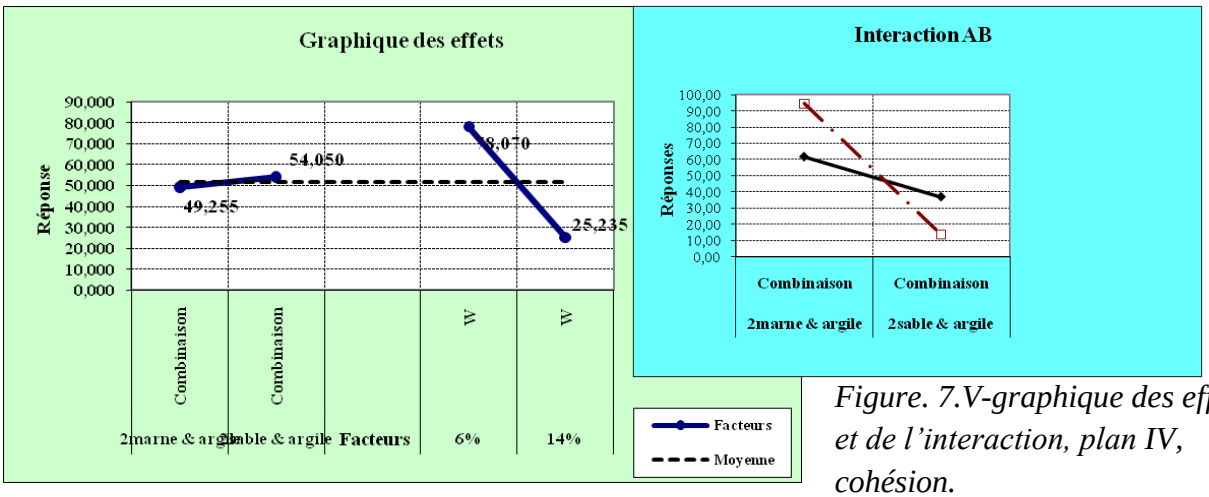


Figure. 7.V-graphique des effets et de l'interaction, plan IV, cohésion.

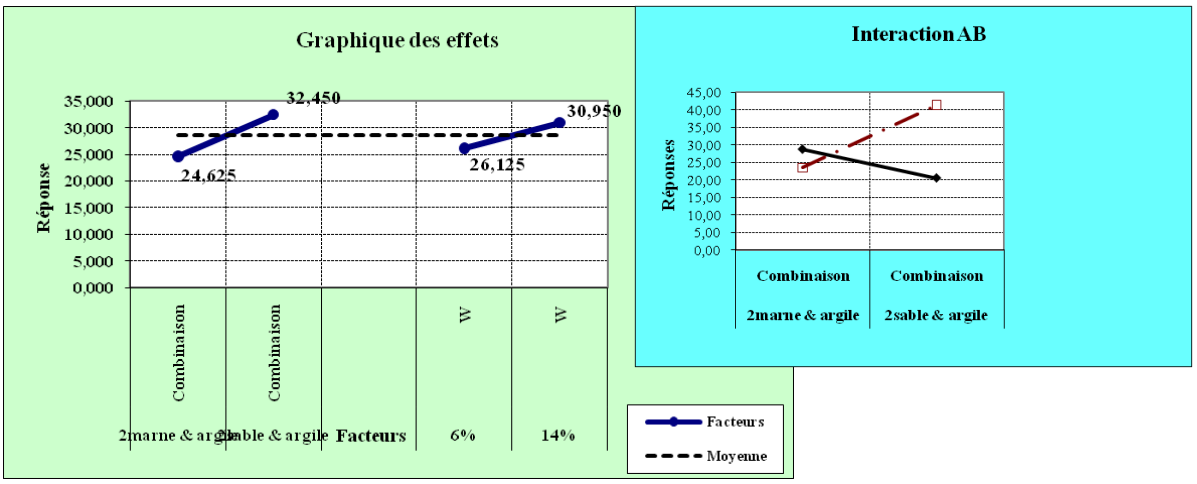


Figure. 8.V- graphique des effets et de l'interaction, plan IV, angle de frottement.

Synthèse des effets sur les résultats de la cohésion et l'angle de frottement :

L'effet de la variation de la teneur en eau sur la cohésion et l'angle de frottement et l'effet de la combinaison des matériaux sur la cohésion et l'angle de frottement peuvent être tirer des graphiques des effets.

Si on prend le graphique de la figure (1.V), l'effet de la combinaison du matériau sur la cohésion est celui à gauche : $Réponse_{max}$-$Réponse_{min}$ =90 - 27,175= 62,825.

Et l'effet de la teneur en eau sur la cohésion est celui à droite :

$$Réponse_{max}\text{-}Réponse_{min} = 72{,}875\text{-}44{,}3 = 28{,}575.$$

Tableau 6.V-Synthèse des résultats des effets pour tous les plans.

	Effet sur la cohésion		Effet sur l'angle de frottement	
	Effet de la combinaison	*Effet de la teneur en eau*	*Effet de la combinaison*	*Effet de la teneur en eau*
Plan I	**62.875**	**28.575**	**12.935**	**1.035**
Plan II	**54.1**	**33.7**	**13.835**	**2.035**
Plan III	**8.725**	**5.2**	**0.9**	**0.15**
Plan IV	**4.795**	**52.835**	**7.825**	**4.825**

VI. interprétation des résultats

L'effet de la variation de la teneur en eau est plus important sur la cohésion que sur l'angle de frottement.

Même remarque pour l'effet de la combinaison des matériaux qui est aussi plus important sur la cohésion que sur l'angle de frottement.

Il est aussi constaté que la nature du matériau (les combinaisons) influent les résultats de la cohésion et l'angle de frottement plus que l'influence de la teneur en eau sur ces mêmes résultats, sauf dans le plan IV, où l'eau joue un rôle plus important que le changement des matériaux, parce que en réalité, il n' y avait pas un changement du matériau puisque l'argile est au milieu du sable et da la marne, c'est-à-dire l'argile est toute seule responsable des comportements, car le plan de cisaillement touche seulement l'argile.

Pour l'interaction des effets de la teneur en eau et de la combinaison des matériaux, quelques cas, notamment la combinaison IV, présentent une forte interaction.

Les autres cas présentent une interaction faible, c'est-à-dire l'influence de l'eau et de la combinaison du matériau pris individuellement est plus importante que l'effet des deux au même à la fois.

Une forte interaction graphiquement est l'intersection des deux droites représentées dans les figures (Interaction AB).

Une interaction faible graphiquement est la convergence des deux droites, elles se coupent mais plus loin dans le plan.

Dans le cas où y a pas interaction, les deux droites sont parallèles.

Le model mathématique donné par le progiciel « ANOVA plan complet » n'est pas exploitable dans ce cas pour des prévisions de résultats, par définition des facteurs au début. Dans le cas où on essaye d'avoir un résultat, on aura pour la cohésion et l'angle de frottement une valeur qui se situe dans 4matériaux jusqu'à 6, ce qui n'est pas significatif par rapport au plan de mon travail, où le maximum est 3matériau.

Un autre plan pourra avoir comme but l'exploitation du model mathématique pour prévenir un résultat.

VII. Conclusion

La méthode des plans d'expériences factoriels fractionnaires ou autres permet de diminuer le nombre d'essais à réaliser, et ceci sans perte d'informations significatives.

La partie la plus importante et la plus difficile qu'aucun logiciel ne peut faire est l'interprétation des résultats. Déterminer si un effet est significatif, si une interaction supposée négligeable l'est vraiment, si les résultats ne sont affectés d'une dérive, si aucun facteur important n'a été oublié, demande toute l'expérience et la compétence du l'expérimentateur.

Un plan d'expériences correctement réalisé, permettra d'établir la liste des facteurs influents, des interactions entre facteurs, d'indiquer comment agir sur les facteurs pour améliorer les résultats. Il sera possible d'améliorer de réduire la dispersion des caractéristiques par une meilleure connaissance et, par voie de conséquence une meilleure maîtrise du procédé. Il permettra d'établir un modèle mathématique du système étudié, il sera alors possible de prévoir un résultat par calcul, sans nécessité d'essais supplémentaires.

Conclusion de la deuxième partie

D'après les résultats obtenus aux essais de cisaillement, on a constaté que la résistance au cisaillement des sols est influencée par la teneur en eau et par la nature des matériaux qui sont au contact au niveau des plans de stratification.

Ces combinaisons étudiées reflètent la réalité du terrain, où l'on peut rencontrer en surface 2 à 3 combinaisons de couches constituées d'argile de sable et de marne. Ces combinaisons présentent des fois une très bonne adhérence comme c'est le cas de l'échantillon N°1, comme elles peuvent présenter aussi une mauvaise adhérence.

Lorsque l'une des couches présente des faibles caractéristiques, le glissement ou des déformations importantes peuvent avoir lieu dans celle-ci.

Pour une bonne maîtrise des facteurs influents sur les résultats de cisaillement, le progiciel « ANOVA plan complet » avec la méthode des plans d'expériences nous a permis d'avoir une idée sur l'effet de chaque facteur pris individuellement et l'interaction entre ces facteurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

La diversité des types de mouvement de terrain a induit une panoplie de techniques de stabilisation que le géotechnicien examine dans un ordre de progressivité croissante de moyens, en partant à partir des solutions réparatrices (qui s'opposent aux conséquences de l'instabilité) jusqu'aux solutions curatives (qui traite la cause de l'instabilité).

La résistance au cisaillement est un facteur de stabilité majeur dans l'étude des stabilités des pentes.

Le sol dans la nature se compose de plusieurs couches superposées. Le contact entre ces couches influe sur cette caractéristique de cisaillement.

La principale conclusion à laquelle on est arrivé est que ces couches présentent une adhérence plus au moins importante.

Dans le cas où l'une des couches présente des caractéristiques faibles vis-à-vis du cisaillement, le glissement ou des déformations importantes peuvent avoir lieu dans celle-ci.

La fiabilité des résultats obtenus en réalisant les essais de cisaillement qui peuvent être simulé à la réalité stratigraphique du sol, dépend de la mise en place de l'échantillon dans la boîte de cisaillement. En effet, il faut que le plan de cisaillement se confonde avec le plan de stratification. La densification de l'échantillon dans la boîte joue un rôle important dans pour réussir une bonne mise en place.

Afin de mieux comprendre les comportements mécaniques de ce type de sols, il est recommandé d'effectuer encore des études plus approfondies en essayant de réussir un bon model qui reflète la réalité.

Des nouvelles dispositions des différentes couches peuvent aboutir à des résultats plus précis.

Afin d'avoir des résultats qui touchent les caractéristiques de plus d'un matériau dans la même boîte comme c'est le cas de cette étude, il est recommandé de disposer les matériaux autrement en élargissant le nombre de sols utilisés et en combinant le maximum de possibilités. Les outils mathématiques d'expérimentation comme celui utilisé dans ce travail (« AVOVA plan complet ») peuvent nous aider à accélérer la procédure en ayant le meilleur résultat

Si on choisit par exemple de mettre en place un échantillon qui est composé de deux ou plusieurs sols différents verticalement dans la boîte ou bien avec des inclinaisons avec des angles bien définis peut se rapprocher encore plus de la réalité.

Cette étude m'a permis d'avoir une idée très claire sur les caractéristiques de cisaillement ainsi que les instabilités qui se produisent le long des plans de stratification des différents couches de sols. Elle permet aussi de bien définir les outils et les conditions dans lesquelles on peut réussir d'autres plans d'expériences plus fiables et plus précis pour une meilleure identification des glissements de terrain.

Bibliographie

Bibliographie :

[1] : Stabilisation des glissements de terrains ; guide technique (Laboratoire des Ponts et Chaussées de Paris, Février1998).

[2] : Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées ; risque naturel (Laboratoire des Ponts et Chaussées de Paris Juillet-Octobre 1987).

[3] : Contribution à l'étude des glissements de terrain, cas de glissement d'El-Biar_Alger.

Présentée par M.Ramdane BOUZID pour le diplôme de MAGISTER à l'école nationale polytechnique Juin 1985. 90pages

[4] : Dynamique d'évolution du glissement de terrain d'Ain El Hammam.

Présenté par Melle DJERBAL Lynda pour le diplôme de master en géotechnique et environnement à l'université Mouloud Mammeri ? juillet 2010. 172pages

[5] : Jaques Goupy, Lee Creighton : Introduction aux plans d'expériences. 3éme édition DUNOD 2004.

[6] : GOUPY, plans d'expériences : les mélanges. Paris. DUNOD 2000.

[7] : Sadog, Sadom- C, les plans d'expériences de l'expérimentation à l'assurance qualité. AFNOR 1991.

[8] : SCHIMMERLING.F, SISSON.J : pratique des plans d'expériences, édition LAVOISIER , Tec et Doc, 1998.

[9] : G.Sanglerat, G.Olivari, B.Cambou : Problèmes pratiques de mécanique des sols et de fondations 1.

[10] : Comité technique AIPCR des terrassements, drainage, couches de forme (C12) (1997) –glissement de terrain techniques d'évaluation du risque

[11] : BOUGDAL. R (2010) – les glissements de terrain en Kabylie – journée d'étude sur les glissements, Université de Tizi-Ouzou, 1 juin 2010

[12] : FLAGEOLLET. J-C (janvier 1988), Université Louis Pasteur de Strasbourg – les mouvements de terrain et leur prévention

[13] : Guide Technique (1994) – surveillance des pentes instables – Laboratoire central des ponts et chaussées

[14] : BENAISSA. A (2003) – glissements de terrain calcul de stabilité- office des publications universitaires

[16] : MILLIER-LACROIX. A (janvier 1981) – classification des talus et versants instables- Bull. liaison labo. P et Ch. Spécial X, P

Annexe I

Essais de cisaillement à différentes teneurs en eau

ANNEXE 1: Essais de cisaillement à différentes teneurs en eau.

Echantillon N°1 : Marne + Argile avec W=6%

MARNE +ARGILE W = 6 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	27,112	-0,05	24,853	-0,0125	36,151	-0,050	49,707	-0,050
0,5	39,025	-0,125	48,100	-0,125	58,992	-0,175	58,992	-0,300
0,75	44,202	-0,225	55,594	-0,275	69,266	-0,350	72,911	-0,625
1	48,050	-0,3375	61,322	-0,5	77,797	-0,525	84,661	-0,725
1,25	52,391	-0,425	66,638	-0,675	86,860	-0,625	98,809	-0,950
1,5	56,769	-0,5125	71,538	-0,8	94,154	-0,725	111,692	-1,125
1,75	59,793	-0,6	76,480	-0,95	101,974	-0,850	127,468	-1,300
2	63,775	-0,675	81,000	-1,075	113,586	-0,925	144,310	-1,450
2,25	66,389	-0,775	86,025	-1,225	128,571	-0,975	151,013	-1,650
2,5	69,495	-0,825	91,095	-1,3125	134,765	-1,050	158,243	-1,800
2,75	72,628	-0,875	97,152	-1,425	133,939	-1,100	167,424	-1,925
3	75,315	-0,9125	101,842	-1,5	143,053	-1,150	175,737	-2,050
3,25	78,026	-0,95	107,048	-1,575	147,013	-1,200	184,123	-2,150
3,5	79,805	-0,975	110,389	-1,65	150,053	-1,225	192,584	-2,250
3,75	82,080	-1	115,200	-1,7	152,640	-1,250	201,120	-2,325
4	84,375	-1,0125	118,607	-1,7625	156,696	-1,275	208,286	-2,400
4,25	86,206	-1,025	122,044	-1,8125	158,368	-1,300	214,547	-2,500
4,5	88,540	-1,025	125,027	-1,875	159,081	-1,325	218,919	-2,550
4,75	89,918	-1,025	128,036	-1,9125	160,778	-1,325	224,796	-2,625
5	91,800	-1,0375	131,072	-1,95	162,982	-1,338	231,709	-2,675
5,25	94,191	-1,0375	133,150	-2	170,630	-1,350	240,164	-2,725
5,5	96,605	-1,0375	135,743	-2,05	176,862	-1,350	244,734	-2,800
5,75	98,543	-1,0375	137,861	-2,1	181,161	-1,350	251,336	-2,825
6	100,000	-1,05	141,500	-2,125	183,500	-1,350	258,500	-2,875
6,25	101,469	-1,05	143,162	-2,175	185,860	-1,350	262,716	-2,925
6,5	102,953	-1,05	145,345	-2,2	186,729	-1,350	266,972	-2,975
6,75	104,450	-1,05	147,549	-2,225	187,606	-1,363	269,239	-3,000
7	105,452	-1,05	149,773	-2,2375	188,491	-1,363	272,547	-3,000
7,25	106,976	-1,05	152,018	-2,25	189,384	-1,363	276,398	-3,025
7,5	108,000	-1,05	153,257	-2,25	191,314	-1,363	279,771	-3,025
7,75	109,033	-1,05	155,023	-2,2625	192,746	-1,363	282,144	-3,038
8	110,076	-1,05	156,807	-2,275	195,231	-1,363	285,577	-3,050
8,25	110,608	-1,075	158,086	-2,275	197,739	-1,363	289,565	-3,075
8,5	111,669	-1,0875	159,378	-2,2875	199,223	-1,363	291,495	-3,100
8,75	112,741	-1,1	160,682	-2,3	200,195	-1,363	293,444	-3,100
9	113,294	-1,1125	162,000	-2,3125	201,706	-1,375	295,412	-3,125
9,25	114,384	-1,125	162,798	-2,325	204,296	-1,375	298,995	-3,125
9,5	114,950	-1,125	164,138	-2,325	213,861	-1,375	304,752	-3,125
9,75	116,059	-1,125	164,955	-2,325	217,075	-1,375	306,269	-3,138

10	116,640	-1,125	165,780	-2,325	217,620	-1,375	307,260	-3,138
10,25	116,683	-1,125	166,613	-2,3	218,171	-1,375	308,804	-3,150
10,5	117,272	-1,125	167,454	-2,3	219,273	-1,363	310,364	-3,150
10,75	117,868	-1,125	168,852	-2,3	220,386	-1,363	311,939	-3,150
11	118,469	-1,125	169,714	-2,3	221,786	-1,350	314,082	-3,163
11,25	119,076	-1,125	170,584	-2,3	223,200	-1,350	315,692	-3,175
11,5	119,690	-1,125	171,463	-2,3	224,351	-1,350	316,763	-3,175
11,75	120,310	-1,15	172,352	-2,3	225,513	-1,350	318,964	-3,175
12	120,937	-1,15	173,250	-2,2875	226,688	-1,350	320,625	-3,175
12,25	121,570	-1,15	174,157	-2,275	227,874	-1,350	322,304	-3,188
12,5	122,210	-1,15	174,505	-2,275	228,505	-1,350	324,000	-3,200
12,75	122,857	-1,1625	175,428	-2,275	229,143	-1,338	325,714	-3,200
13	123,510	-1,1625	176,361	-2,275	229,787	-1,338	327,447	-3,200
13,25	124,171	-1,1625	177,304	-2,275	230,439	-1,338	329,198	-3,225
13,5	124,838	-1,1625	178,258	-2,275	231,677	-1,325	330,968	-3,225
13,75	125,513	-1,1625	179,221	-2,275	232,930	-1,325	332,757	-3,225
14	126,195	-1,175	180,195	-2,275	234,196	-1,325	334,565	-3,225
14,25	126,885	-1,175	181,180	-2,275	235,475	-1,325	336,393	-3,225
14,5	127,582	-1,175	182,175	-2,275	236,769	-1,325	338,242	-3,225
14,75			183,182	-2,275	238,077	-1,325	340,110	-3,225
15			184,200	-2,275	239,400	-1,325	342,000	-3,225

Echantillon N°1 : Marne + Argile avec W=14%

MARNE +ARGILE W = 14 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	11,297	-0,088	19,883	-0,150	33,891	-0,013	40,669	-0,075
0,5	17,697	-0,250	29,496	-0,325	52,185	-0,125	61,261	-0,200
0,75	21,873	-0,438	39,190	-0,475	63,797	-0,300	73,823	-0,475
1	25,627	-0,813	47,136	-0,575	73,220	-0,450	89,237	-0,638
1,25	28,034	-0,850	52,851	-0,663	80,426	-0,625	99,268	-0,800
1,5	30,000	-1,000	58,615	-0,725	85,846	-0,763	108,923	-0,963
1,75	31,983	-1,050	64,429	-0,800	91,313	-0,900	117,734	-1,100
2	35,845	-1,138	69,129	-0,863	97,293	-1,025	132,672	-1,250
2,25	38,805	-1,200	72,468	-0,913	111,273	-1,138	145,403	-1,350
2,5	41,791	-1,238	74,661	-0,950	114,574	-1,238	154,487	-1,450
2,75	44,332	-1,275	76,402	-0,975	118,376	-1,338	160,821	-1,525
3	46,421	-1,300	78,158	-1,000	121,263	-1,513	168,158	-1,600
3,25	48,529	-1,325	79,454	-1,025	124,176	-1,588	172,229	-1,638
3,5	51,611	-1,350	81,717	-1,050	124,726	-1,675	176,336	-1,688
3,75	54,240	-1,363	82,560	-1,075	125,280	-1,713	180,480	-1,713
4	55,446	-1,375	83,411	-1,075	125,839	-1,800	184,179	-1,750
4,25	56,422	-1,375	83,785	-1,088	126,404	-1,850	186,942	-1,775
4,5	57,892	-1,388	85,135	-1,100	126,973	-1,900	188,757	-1,788
4,75	59,864	-1,400	86,986	-1,113	130,480	-1,950	191,077	-1,800
5	60,873	-1,400	88,364	-1,113	131,073	-1,975	195,873	-1,813
5,25	61,644	-1,425	89,753	-1,113	131,671	-2,025	202,685	-1,825
5,5	65,394	-1,425	91,651	-1,113	132,275	-2,050	206,587	-1,825
5,75	67,189	-1,433	92,074	-1,113	133,382	-2,063	209,530	-1,825
6	67,500	-1,433	92,500	-1,113	134,000	-2,100	212,000	-1,825
6,25	67,814	-1,450	92,930	-1,113	135,126	-2,125	212,986	-1,838
6,5	68,636	-1,450	93,364	-1,113	135,757	-2,150	213,981	-1,838
6,75	69,465	-1,450	93,803	-1,113	136,394	-2,150	214,986	-1,850
7	69,792	-1,475	94,245	-1,113	137,547	-2,150	216,000	-1,850
7,25	71,147	-1,525	95,460	-1,113	138,711	-2,163	217,536	-1,850
7,5	73,543	-1,525	96,171	-1,113	139,371	-2,175	219,600	-1,850
7,75	74,928	-1,525	97,148	-1,113	140,555	-2,200	221,167	-1,850
8	76,846	-1,525	97,615	-1,113	141,231	-2,213	222,750	-1,850
8,25	77,217	-1,525	98,087	-1,113	142,435	-2,225	224,348	-1,850
8,5	78,117	-1,525	99,087	-1,113	143,126	-2,250	225,961	-1,850
8,75	80,078	-1,525	100,098	-1,113	144,351	-2,263	229,171	-1,863
9	81,000	-1,525	104,824	-1,113	145,059	-2,263	236,118	-1,863
9,25	81,665	-1,525	105,340	-1,113	146,039	-2,275	241,537	-1,863
9,5	82,069	-1,500	104,792	-1,113	147,030	-2,275	247,010	-1,863
9,75	82,478	-1,500	104,776	-1,113	147,761	-2,275	248,239	-1,863

10	82,890	-1,500	105,300	-1,100	148,500	-2,275	249,480	-1,863
10,25	83,578	-1,500	105,829	-1,100	149,246	-2,275	250,191	-1,863
10,5	84,000	-1,488	106,364	-1,100	150,000	-2,263	252,000	-1,863
10,75	84,426	-1,488	106,355	-1,100	150,761	-2,250	253,827	-1,863
11	84,857	-1,488	106,898	-1,100	151,531	-2,250	255,398	-1,863
11,25	85,292	-1,488	107,446	-1,088	152,308	-2,250	256,154	-1,863
11,5	85,732	-1,488	108,000	-1,088	153,093	-2,250	257,474	-1,863
11,75	86,176	-1,488	109,119	-1,075	152,767	-2,250	259,648	-1,850
12	87,188	-1,488	109,125	-1,075	153,563	-2,250	261,563	-1,850
12,25	87,644	-1,488	109,131	-1,075	154,366	-2,250	263,215	-1,850
12,5	88,105	-1,488	109,705	-1,075	155,179	-2,250	264,884	-1,850
12,75	88,571	-1,488	110,286	-1,075	155,429	-2,250	266,286	-1,850
13	89,043	-1,488	112,021	-1,075	156,255	-2,250	267,989	-1,838
13,25	89,519	-1,488	111,465	-1,075	157,091	-2,250	269,422	-1,838
13,5	90,000	-1,488	112,065	-1,075	157,935	-2,250	276,387	-1,838
13,75	90,486	-1,488	112,086	-1,075	158,205	-2,250	273,795	-1,838
14	90,978	-1,488	112,696	-1,063	159,065	-2,250	274,402	-1,825
14,25	90,885	-1,488	113,311	-1,050	159,934	-2,225	275,016	-1,825
14,5	11,297	-0,088	113,934	-1,050	160,813	-2,225	275,934	-1,825
14,75	17,697	-0,250	19,883	-0,150	161,702	-2,225	276,265	-1,825
15	21,873	-0,438	29,496	-0,325				

Echantillon N°2 : Marne + Argile + Marne avec W=6%

MARNE + ARGILE + MARNE W = 6 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	9,941	-0,100	13,105	-0,075	36,151	-0,075	28,921	-0,075
0,5	13,160	-0,275	18,151	-0,300	46,739	-0,225	65,798	-0,250
0,75	15,494	-0,413	22,329	-0,500	58,329	-0,450	79,291	-0,475
1	17,847	-0,575	25,169	-0,650	66,814	-0,675	89,237	-0,688
1,25	19,762	-0,725	28,034	-0,800	74,911	-0,875	100,647	-0,900
1,5	21,000	-0,850	32,308	-0,950	80,769	-1,100	108,923	-1,050
1,75	22,017	-0,950	35,691	-1,075	86,215	-1,263	117,270	-1,225
2	23,043	-1,050	39,103	-1,175	91,707	-1,450	125,224	-1,375
2,25	25,247	-1,200	43,481	-1,275	97,247	-1,600	135,584	-1,025
2,5	26,296	-1,250	49,774	-1,375	102,835	-1,750	152,609	-1,125
2,75	27,825	-1,325	56,122	-1,425	108,000	-1,875	165,537	-1,700
3	29,368	-1,375	62,053	-1,475	112,737	-2,025	177,158	-1,775
3,25	30,449	-1,438	66,608	-1,513	117,515	-2,125	188,405	-1,825
3,5	32,496	-1,500	70,248	-1,538	122,336	-2,263	196,407	-1,875
3,75	34,080	-1,538	73,920	-1,563	126,720	-2,363	204,960	-1,925
4	38,571	-1,575	76,179	-1,575	131,143	-2,488	208,768	-1,963
4,25	42,619	-1,600	78,942	-1,588	134,637	-2,600	213,094	-2,000
4,5	44,757	-1,625	81,243	-1,595	138,649	-2,700	216,000	-2,038
4,75	49,357	-1,650	83,566	-1,600	142,697	-2,788	219,421	-2,063
5	54,000	-1,675	84,927	-1,600	146,782	-2,825	223,364	-2,100
5,25	57,699	-1,700	86,795	-1,605	150,411	-2,975	226,849	-2,100
5,5	59,945	-1,725	89,174	-1,620	155,560	-3,050	229,872	-2,138
5,75	62,212	-1,750	90,581	-1,625	159,760	-3,063	233,419	-2,150
6	65,000	-1,763	92,500	-1,638	165,000	-3,188	234,500	-2,175
6,25	67,814	-1,775	94,437	-1,650	170,791	-3,225	235,591	-2,175
6,5	70,654	-1,775	95,383	-1,650	177,140	-3,313	237,196	-2,200
6,75	72,507	-1,775	97,859	-1,650	183,549	-3,363	238,310	-2,200
7	73,868	-1,775	99,340	-1,650	190,019	-3,413	239,434	-2,213
7,25	75,754	-1,750	100,834	-1,638	195,526	-3,438	240,569	-2,213
7,5	76,114	-1,738	101,829	-1,630	200,057	-3,475	241,714	-2,225
7,75	76,478	-1,725	102,833	-1,625	204,632	-3,488	242,871	-2,225
8	77,885	-1,738	104,885	-1,625	207,692	-3,513	244,038	-2,225
8,25	78,261	-1,738	106,435	-1,625	210,783	-3,525	245,217	-2,238
8,5	78,641	-1,738	107,476	-1,628	213,379	-3,550	246,408	-2,238
8,75	80,605	-1,738	108,527	-1,638	215,473	-3,563	247,610	-2,250
9	81,000	-1,725	110,118	-1,650	218,118	-3,575	248,824	-2,250
9,25	81,399	-1,713	111,192	-1,650	220,788	-3,588	250,049	-2,250

9,5	82,337	-1,700	112,812	-1,650	222,950	-3,600	251,287	-2,250
9,75	82,746	-1,688	113,910	-1,650	224,597	-3,600	252,537	-2,250
10	83,700	-1,675	115,560	-1,650	225,720	-3,600	253,800	-2,250
10,25	84,121	-1,650	116,683	-1,638	226,854	-3,613	255,075	-2,250
10,5	85,091	-1,650	117,818	-1,633	228,000	-3,613	255,818	-2,250
10,75	85,523	-1,638	118,416	-1,625	229,157	-3,613	257,117	-2,250
11	85,959	-1,638	119,571	-1,625	230,327	-3,625	257,878	-2,263
11,25	86,400	-1,638	121,846	-1,625	231,508	-3,625	259,200	-2,275
11,5	86,845	-1,638	122,474	-1,625	232,701	-3,650	260,536	-2,275
11,75	87,295	-1,638	123,109	-1,630	233,907	-3,650	261,886	-2,275
12	88,313	-1,625	123,750	-1,650	235,125	-3,663	263,250	-2,288
12,25	88,775	-1,625	124,963	-1,650	236,356	-3,675		

Echantillon N°2 : Marne + Argile + Marne avec W=14%

MARNE + ARGILE + MARNE W = 14 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	6,326	-0,250	10,845	-0,150	15,816	-0,113	28,921	-0,138
0,5	8,168	-0,500	16,336	-0,300	31,311	-0,300	46,739	-0,300
0,75	9,570	-0,725	20,962	-0,413	38,734	-0,525	54,684	-0,575
1	11,898	-0,850	24,254	-0,525	45,763	-0,700	62,237	-0,725
1,25	13,328	-1,038	25,506	-0,575	52,851	-0,875	71,694	-0,900
1,5	14,308	-1,200	27,231	-0,638	60,462	-1,038	81,231	-1,038
1,75	15,760	-1,350	28,738	-0,688	67,674	-1,213	90,850	-1,150
2	17,224	-1,475	32,586	-0,763	73,086	-1,300	99,621	-1,250
2,25	18,234	-1,600	39,506	-0,813	79,948	-1,450	108,000	-1,300
2,5	19,487	-1,725	42,261	-0,863	85,930	-1,550	115,043	-1,375
2,75	20,987	-1,850	44,332	-0,900	91,965	-1,625	120,262	-1,425
3	23,211	-1,938	45,947	-0,900	97,579	-1,700	124,579	-1,463
3,25	25,692	-2,000	48,529	-0,975	102,767	-1,750	128,934	-1,488
3,5	27,717	-2,075	49,221	-0,988	108,000	-1,800	133,805	-1,500
3,75	28,800	-2,138	50,880	-1,000	111,840	-1,850	135,840	-1,525
4	29,652	-2,213	52,071	-1,013	116,196	-1,900	138,375	-1,525
4,25	30,996	-2,250	53,758	-1,025	119,139	-1,925	139,480	-1,550
4,5	31,622	-2,313	54,973	-1,025	123,081	-1,950	141,568	-1,550
4,75	32,253	-2,388	55,710	-1,050	125,837	-1,963	142,941	-1,575
5	33,873	-2,450	56,455	-1,050	128,618	-1,988	144,818	-1,575
5,25	35,260	-2,500	57,205	-1,075	130,438	-2,000	146,466	-1,600
5,5	36,165	-2,563	57,468	-1,075	133,018	-2,025	147,138	-1,600
5,75	37,078	-2,613	57,733	-1,075	135,124	-2,025	147,816	-1,600
6	38,000	-2,675	58,250	-1,088	137,000	-2,050	148,500	-1,638
6,25	38,930	-2,725	58,521	-1,088	138,140	-2,063	149,191	-1,625
6,5	39,617	-2,775	58,794	-1,088	138,785	-2,075	149,888	-1,625
6,75	40,563	-2,563	59,070	-1,100	139,437	-2,075	150,592	-1,625
7	41,519	-2,863	59,349	-1,100	140,094	-2,075	151,302	-1,625
7,25	41,972	-2,775	59,630	-1,075	140,758	-2,075	151,507	-1,625
7,5	42,686	-2,925	61,714	-1,075	141,429	-2,075	152,229	-1,625
7,75	43,665	-2,950	62,268	-1,075	141,589	-2,075	152,957	-1,625
8	44,135	-3,000	62,567	-1,088	142,010	-2,075	153,692	-1,625
8,25	44,870	-3,025	62,870	-1,100	142,696	-2,075	154,435	-1,638
8,5	45,612	-3,038	63,437	-1,100	143,388	-2,100	155,709	-1,638
8,75	46,361	-3,063	63,746	-1,113	144,088	-2,100	156,468	-1,650
9	47,118	-3,075	64,059	-1,113	144,794	-2,100	157,235	-1,650
9,25	47,350	-3,088	64,640	-1,113	145,507	-2,113	156,946	-1,650
9,5	47,584	-3,100	65,228	-1,125	146,228	-2,113	157,188	-1,650
9,75	47,821	-3,113	67,164	-1,125	146,955	-2,125	157,970	-1,650
10	48,060	-3,113	67,500	-1,113	147,690	-2,125	158,760	-1,650
10,25	48,302	-3,125	67,839	-1,113	148,432	-2,113	159,558	-1,650

10,5	48,545	-3,125	68,182	-1,113	149,182	-2,113	160,364	-1,650
10,75	48,792	-3,125	68,802	-1,113	149,939	-2,100	161,178	-1,650
11	49,041	-3,125	69,153	-1,113	150,704	-2,100	161,449	-1,650
11,25	49,292	-3,125	69,508	-1,113	151,477	-2,100	162,277	-1,663
11,5	49,546	-3,150	69,866	-1,125	152,258	-2,125	163,113	-1,663
11,75	49,803	-3,150	70,508	-1,125	153,047	-2,100	163,959	-1,663
12	50,063	-3,150	70,875	-1,125	153,844	-2,125		
12,25					154,649	-2,125		

Echantillon N°3 : Sable+ Argile avec W=6%

SABLE + ARGILE W = 6 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	9,038	-0,163	12,653	-0,200	22,594	-0,075	33,891	-0,163
0,5	12,252	-0,288	16,336	-0,400	45,832	-0,275	57,630	-0,350
0,75	14,582	-0,388	20,051	-0,563	63,342	-0,450	72,911	-0,538
1	16,703	-0,475	24,025	-0,725	77,339	-0,625	86,949	-0,700
1,25	18,383	-0,550	28,264	-0,850	89,157	-0,788	98,809	-0,850
1,5	20,538	-0,625	32,538	-0,988	97,385	-0,925	107,077	-0,975
1,75	23,176	-0,675	36,155	-1,100	106,146	-1,050	115,416	-1,125
2	25,138	-0,738	40,966	-1,213	114,517	-1,163	122,431	-1,263
2,25	27,117	-0,800	44,182	-1,300	122,494	-1,250	129,506	-1,388
2,5	28,643	-0,838	47,896	-1,350	128,191	-1,350	138,052	-1,500
2,75	30,183	-0,875	51,406	-1,400	133,939	-1,425	143,371	-1,600
3	31,974	-0,900	53,289	-1,450	139,263	-1,500	149,684	-1,713
3,25	34,256	-0,913	55,665	-1,475	144,634	-1,563	154,626	-1,800
3,5	35,363	-0,925	56,867	-1,500	148,142	-1,625	160,088	-1,913
3,75	36,000	-0,925	60,240	-1,538	151,680	-1,675	166,560	-1,988
4	36,643	-0,925	60,750	-1,563	154,768	-1,713	171,884	-2,050
4,25	37,291	-0,925	61,265	-1,600	159,578	-1,750	176,771	-2,113
4,5	39,892	-0,925	61,784	-1,625	163,459	-1,800	180,973	-2,175
4,75	41,050	-0,925	62,308	-1,675	166,887	-1,825	187,167	-2,200
5	41,727	-0,950	66,273	-1,713	170,345	-1,850	191,945	-2,250
5,25	42,411	-0,950	67,068	-1,750	173,589	-1,900	195,288	-2,288
5,5	44,835	-0,950	68,862	-1,788	175,872	-1,925	197,670	-2,325
5,75	46,037	-0,950	70,175	-1,800	177,429	-1,950	202,065	-2,363
6	46,875	-0,950	72,000	-1,825	180,250	-1,988	204,250	-2,375
6,25	47,219	-0,938	73,340	-1,838	181,842	-2,013	208,465	-2,400
6,5	47,944	-0,925	73,682	-1,850	185,215	-2,038	209,944	-2,425
6,75	48,423	-0,925	74,282	-1,863	186,845	-2,063	211,944	-2,425
7	48,906	-0,913	74,887	-1,875	188,491	-2,088	214,981	-2,450
7,25	49,649	-0,900	77,289	-1,900	190,919	-2,113	218,559	-2,463
7,5	53,486	-0,900	78,171	-1,925	193,629	-2,138	220,886	-2,475
7,75	54,258	-0,900	79,062	-1,975	195,589	-2,163	223,751	-2,488
8	54,519	-0,900	79,572	-2,063	197,048	-2,200	225,346	-2,500
8,25	54,783	-0,900	80,348	-2,050	198,261	-2,225	227,217	-2,500
8,5	55,311	-0,925	83,359	-2,075	200,272	-2,263	228,320	-2,525
8,75	55,844	-0,925	84,820	-2,100	202,302	-2,288	229,434	-2,525
9	56,118	-0,925	85,765	-2,125	203,294	-2,325	230,559	-2,525
9,25	56,660	-0,925	88,315	-2,150	204,828	-2,350	231,429	-2,538
9,5	56,941	-0,950	89,287	-2,163	206,911	-2,375	233,109	-2,550
9,75	57,493	-0,950	90,269	-2,175	209,284	-2,413	234,537	-2,550
10	57,780	-0,950	90,720	-2,188	210,600	-2,438	235,440	-2,550
10,25	58,070	-0,925	91,447	-2,200	211,658	-2,450	237,166	-2,550

10,5	58,364	-0,925	91,909	-2,225	213,000	-2,475	238,636	-2,550
10,75	58,660	-0,925	93,198	-2,250	214,081	-2,500	241,766	-2,575
11	59,235	-0,925	95,878	-2,275	214,898	-2,525	245,204	-2,588
11,25	59,815	-0,925	96,508	-2,300	215,723	-2,563	247,015	-2,600
11,5	60,402	-0,925	97,284	-2,338	216,278	-2,588	248,845	-2,600
11,75	63,233	-0,925			217,119	-2,625		
12					217,969	-2,650		

Echantillon N°3: Sable+ Argile avec W=14%

SABLE +ARGILE W = 14 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	6,778	-0,175	26,209	-0,050	15,364	-0,050	47,448	-0,050
0,5	9,076	-0,300	40,387	-0,225	26,773	-0,250	78,504	-0,175
0,75	11,165	-0,400	48,304	-0,400	41,013	-0,375	102,076	-0,325
1	12,814	-0,500	53,085	-0,600	54,915	-0,550	116,695	-0,475
1,25	14,706	-0,600	57,906	-0,725	66,638	-0,650	129,600	-0,650
1,5	16,154	-0,700	63,231	-0,875	76,154	-0,775	140,308	-0,800
1,75	17,614	-0,775	67,674	-1,000	86,446	-0,875	149,717	-0,975
2	18,621	-0,850	72,155	-1,125	99,155	-0,975	159,207	-1,125
2,25	20,104	-0,925	76,442	-1,250	113,610	-1,050	169,247	-1,263
2,5	21,130	-1,000	80,061	-1,350	120,209	-1,125	178,904	-1,350
2,75	22,166	-1,050	83,476	-1,450	124,978	-1,200	187,703	-1,400
3	23,211	-1,100	86,211	-1,525	129,789	-1,275	195,632	-1,450
3,25	23,789	-1,150	88,493	-1,600	132,264	-1,325	198,396	-1,488
3,5	23,894	-1,200	91,513	-1,688	136,195	-1,388	203,097	-1,525
3,75	24,480	-1,225	94,080	-1,763	139,200	-1,450	206,880	-1,550
4	25,071	-1,250	96,911	-1,838	142,232	-1,500	209,250	-1,575
4,25	26,152	-1,275	99,767	-1,900	146,260	-1,538	211,641	-1,600
4,5	26,514	-1,288	102,162	-1,950	148,622	-1,588	216,000	-1,625
4,75	26,878	-1,325	104,090	-2,000	150,271	-1,625	218,932	-1,638
5	27,491	-1,350	105,545	-2,025	153,164	-1,675	220,418	-1,663
5,25	29,589	-1,363	106,027	-2,050	158,918	-1,725	221,918	-1,675
5,5	30,716	-1,363	107,009	-2,050	160,018	-1,775	223,431	-1,688
5,75	31,106	-1,363	107,502	-2,075	161,253	-1,825	225,954	-1,700
6	31,500	-1,375	109,000	-2,075	164,000	-1,850	227,500	-1,705
6,25	31,647	-1,375	110,009	-2,075	165,717	-1,875	228,558	-1,713
6,5	32,047	-1,363	110,776	-2,063	167,299	-1,900	230,131	-1,725
6,75	32,704	-1,350	111,549	-2,050	168,085	-1,938	234,761	-1,730
7	32,604	-1,338	113,094	-2,050	168,877	-1,963	236,377	-1,738
7,25	32,758	-1,338	114,142	-2,063	170,190	-2,000	238,009	-1,750
7,5	32,914	-1,325	115,200	-2,063	171,000	-2,025	239,143	-1,763
7,75	33,072	-1,363	116,010	-2,063	171,818	-2,050	240,287	-1,775
8	35,308	-1,363	116,827	-2,063	172,904	-2,075	245,077	-1,780
8,25	36,000	-1,375	117,913	-2,063	174,261	-2,113	246,783	-1,788
8,5	36,699	-1,400	119,534	-2,050	175,631	-2,150	249,029	-1,788
8,75	36,878	-1,400	120,644	-2,050	176,751	-2,175	251,824	-1,800
9	37,059	-1,400	122,294	-2,050	177,882	-2,200	253,588	-1,800
9,25	37,773	-1,375	123,961	-2,050	179,291	-2,225	255,369	-1,800
9,5	38,495	-1,375	125,644	-2,050	179,911	-2,250	256,634	-1,800
9,75	39,224	-1,375	126,269	-2,075	180,806	-2,275	257,910	-1,825

10	40,500	-1,375	126,900	-2,075	180,900	-2,300	259,200	-1,825
10,25	41,789	-1,375	127,538	-2,100	181,538	-2,325	260,503	-1,825
10,5	43,091	-1,400	128,182	-2,125	182,455	-2,350	261,818	-1,838
10,75	43,858	-1,425	128,832	-2,150	183,107	-2,388	263,147	-1,850
11	45,184	-1,438	130,041	-2,163	183,765	-2,425	264,490	-1,850
11,25	45,415	-1,463			185,206	-2,450		
11,5	45,649	-1,475			187,052	-2,475		
11,75					188,580	-2,513		

Echantillon N°4 : Sable+ Argile + Sable avec W=6%

SABLE + ARGILE + SABLE W = 6 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	27,113	-0,025	33,891	-0,025	28,017	-0,038	42,929	-0,063
0,5	33,580	-0,038	61,261	-0,038	69,882	-0,125	76,235	-0,175
0,75	42,835	-0,050	75,190	-0,050	88,861	-0,250	93,418	-0,325
1	51,254	-0,375	84,661	-0,050	106,169	-0,375	105,712	-0,463
1,25	58,366	-0,425	90,996	-0,050	119,489	-0,500	118,570	-0,575
1,5	64,154	-0,500	95,077	-0,050	130,615	-0,575	130,615	-0,675
1,75	68,137	-0,525	99,193	-0,050	139,983	-0,650	139,056	-0,750
2	71,690	-0,538	103,810	-0,050	147,569	-0,725	146,638	-0,850
2,25	74,805	-0,538	107,532	-0,050	155,688	-0,775	151,948	-0,913
2,5	77,009	-0,550	110,817	-0,050	162,939	-0,825	159,652	-0,975
2,75	78,760	-0,550	113,659	-0,050	167,424	-0,875	166,009	-1,038
3	80,526	-0,563	117,000	-0,050	172,895	-0,925	171,474	-1,088
3,25	82,784	-0,563	118,943	-0,050	176,987	-0,950	175,559	-1,138
3,5	84,584	-0,550	120,903	-0,050	179,204	-0,975	179,204	-1,175
3,75	85,920	-0,538	122,400	-0,050	181,920	-1,000	182,880	-1,225
4	86,304	-0,525	123,911	-0,050	185,143	-1,025	186,589	-1,250
4,25	86,691	-0,513	126,888	-0,075	187,426	-1,050	189,848	-1,288
4,5	87,568	-0,500	128,432	-0,075	189,243	-1,063	192,162	-1,313
4,75	87,964	-0,500	129,502	-0,075	191,566	-1,075	195,475	-1,338
5	88,364	-0,500	131,073	-0,088	193,418	-1,088	198,327	-1,363
5,25	88,767	-0,500	133,151	-0,100	194,795	-1,100	201,699	-1,388
5,5	90,165	-0,500	134,257	-0,100	195,688	-1,113	203,119	-1,400
5,75	91,078	-0,500	135,871	-0,100	197,088	-1,125	205,051	-1,413
6	92,000	-0,500	137,000	-0,100	198,000	-1,138	207,500	-1,425
6,25	92,930	-0,475	138,642	-0,088	198,921	-1,150	208,967	-1,438
6,5	93,364	-0,463	139,290	-0,088	200,355	-1,163	209,944	-1,450
6,75	93,803	-0,450	140,451	-0,075	201,803	-1,175	210,930	-1,450
7	94,245	-0,438	141,623	-0,075	204,792	-1,175	211,925	-1,463
7,25	94,692	-0,425	142,806	-0,075	206,275	-1,175	212,929	-1,475
7,5	95,143	-0,388	144,000	-0,075	207,257	-1,188	213,429	-1,488
7,75	96,115	-0,375	145,206	-0,075	208,766	-1,188	214,450	-1,488
8	96,577	-0,375	145,904	-0,075	209,769	-1,200	216,000	-1,500
8,25	97,043	-0,363	146,609	-0,088	210,783	-1,213	217,043	-1,513
8,5	98,039	-0,350	147,320	-0,088	211,806	-1,213	218,097	-1,525
8,75	98,517	-0,338	148,039	-0,075	212,839	-1,238	219,688	-1,538
9	99,000	-0,325	150,353	-0,075	214,412	-1,250	220,765	-1,538
9,25	100,020	-0,300	151,626	-0,063	215,468	-1,250	223,448	-1,550
9,5	101,050	-0,275	152,376	-0,050	216,535	-1,388	224,554	-1,550
9,75	102,090	-0,250	153,672	-0,050	217,612	-1,388	226,209	-1,563

10	102,600	-0,225	154,440	-0,038	218,700	-1,388	227,340	-1,575
10,25	103,116	-0,213	155,216	-0,025	220,342	-1,388	228,482	-1,575
10,5	103,636	-0,200	156,000	-0,025	223,091	-1,388	230,727	-1,588
10,75	104,162	-0,200	156,792	-0,025	224,772	-1,388	231,898	-1,600
11	104,694	-0,188	158,143	-0,025	225,918	-1,388	231,980	-1,613
11,25	105,785	-0,175	158,954	-0,025	227,077	-1,400	233,169	-1,625
11,5	106,330	-0,163	159,773	-0,025	228,247	-1,413	233,814	-1,638
11,75	106,881	-0,150	160,601	-0,025	229,710	-1,413	235,026	-1,650
12					231,188	-1,425	236,250	-1,650
12,25					232,398	-1,438		
12,5					234,758	-1,438		
12,75					236,571	-1,438		

Echantillon N°4 : Sable+ Argile + Sable avec W=14%

SABLE + ARGILE + SABLE W = 14 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	10,845	-0,063	14,912	-0,087	49,707	-0,063	40,669	-0,025
0,5	15,882	-0,113	20,420	-0,137	73,513	-0,175	92,571	-0,088
0,75	19,595	-0,150	25,063	-0,175	92,051	-0,300	122,127	-0,188
1	22,424	-0,163	26,542	-0,200	105,254	-0,375	144,610	-0,288
1,25	25,277	-0,175	37,226	-0,212	117,651	-0,450	165,447	-0,375
1,5	28,154	-0,188	42,923	-0,225	127,385	-0,500	181,846	-0,450
1,75	28,970	-0,188	47,742	-0,225	134,884	-0,525	194,678	-0,513
2	29,560	-0,200	49,345	-0,237	140,121	-0,550	206,690	-0,563
2,25	30,857	-0,200	53,766	-0,250	144,935	-0,550	216,000	-0,613
2,5	31,930	-0,200	54,470	-0,250	147,443	-0,563	223,043	-0,644
2,75	32,541	-0,200	55,651	-0,237	150,445	-0,575	228,734	-0,675
3	32,684	-0,200	56,842	-0,225	152,526	-0,575	234,474	-0,688
3,25	32,828	-0,175	57,093	-0,225	153,674	-0,588	240,264	-0,700
3,5	33,451	-0,163	57,823	-0,212	156,265	-0,588	245,628	-0,713
3,75	33,600	-0,150	58,080	-0,2	157,440	-0,588	247,680	-0,719
4	34,232	-0,163	58,339	-0,2	158,143	-0,588	252,643	-0,725
4,25	34,386	-0,125	58,601	-0,193	158,852	-0,588	257,650	-0,725
4,5	35,514	-0,125	59,838	-0,187	161,027	-0,588	267,568	-0,731
4,75	36,652	-0,125	60,109	-0,175	162,733	-0,588	269,267	-0,731
5	37,309	-0,113	60,873	-0,175	164,945	-0,588	270,982	-0,731
5,25	37,479	-0,113	62,630	-0,175	166,685	-0,588	272,712	-0,738
5,5	37,651	-0,113	62,917	-0,175	167,945	-0,588	274,459	-0,738
5,75	38,820	-0,100	63,207	-0,169	169,217	-0,588	276,719	-0,738
6	40,500	-0,100	64,000	-0,150	170,500	-0,588	279,000	-0,738
6,25	42,698	-0,088	65,805	-0,137	172,800	-0,588	281,805	-0,738
6,5	43,907	-0,063	66,112	-0,125	174,112	-0,588	284,131	-0,731
6,75	45,634	-0,050	66,423	-0,119	175,437	-0,588	286,479	-0,725
7	47,887	-0,038	66,736	-0,106	176,774	-0,588	289,358	-0,719
7,25	49,649	-0,025	67,052	-0,100	177,611	-0,588	291,754	-0,713
7,5	50,914	-0,025	67,886	-0,100	178,457	-0,588	293,143	-0,706
7,75	52,708	-0,025	68,211	-0,100	179,311	-0,575	294,545	-0,706
8	54,000	-0,025	68,538	-0,100	180,173	-0,575	297,000	-0,706
8,25	55,304	-0,025	69,130	-0,100	181,043	-0,575	288,522	-0,706
8,5	55,573	-0,025	69,204	-0,100	181,922	-0,588	299,883	-0,713
8,75	56,371	-0,025	70,068	-0,094	182,810	-0,588	301,346	-0,713
9	56,647	-0,013	70,941	-0,075	183,971	-0,588	303,353	-0,713
9,25	57,458	0,006	71,823	-0,062	185,143	-0,588	304,847	-0,706

9,5	57,743	0,025	72,178	-0,005	188,198	-0,588	306,356	-0,706
9,75	58,567	0,038	72,537	-0,025	189,134	-0,588	307,881	-0,706
10	58,860	0,038	72,900		189,540	-0,588	308,880	-0,700
10,25	59,156	0,038	73,266	-0,006	190,492	-0,575	310,432	-0,700
10,5	59,455	0,038	73,091	-0,006	191,455	-0,575	312,000	-0,700
10,75	60,305	0,038	73,462	-0,006	191,878	-0,575	313,036	-0,700
11	60,612	0,038	73,837	-0,006	192,857	-0,575	314,633	-0,706
11,25	59,815	0,038	74,215	-0,006	193,846	-0,563	316,246	-0,706
11,5	60,124	0,038	74,598	-0,006	194,845	-0,563	317,876	-0,706
11,75					195,855	-0,563	319,523	-0,706
12					196,875	-0,575	321,188	-0,706
12,25					197,906	-0,575		
12,5					198,947	-0,575		

Echantillon N°5 : Sable+ Marne avec W=6%

SABLE + MARNE W = 6 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	4,519	-0,100	21,238	-0,200	24,402	-0,150	33,891	-0,038
0,5	6,807	-0,213	30,857	-0,413	37,664	-0,350	72,605	-0,225
0,75	9,114	-0,300	39,190	-0,600	49,215	-0,550	95,696	-0,425
1	10,983	-0,363	44,390	-0,750	58,576	-0,700	117,153	-0,625
1,25	12,868	-0,413	49,634	-0,900	68,017	-0,850	134,655	-0,775
1,5	13,846	-0,450	53,538	-1,025	74,308	-1,000	149,538	-0,900
1,75	13,906	-0,488	57,940	-1,175	79,725	-1,125	160,378	-1,038
2	15,828	-0,525	62,845	-1,300	83,793	-1,225	173,638	-1,150
2,25	16,364	-0,563	65,922	-1,425	91,636	-1,350	185,610	-1,250
2,5	16,435	-0,594	69,965	-1,525	96,261	-1,438	198,157	-1,325
2,75	16,978	-0,613	74,044	-1,625	101,397	-1,500	209,397	-1,400
3	17,053	-0,625	78,632	-1,700	106,105	-1,575	220,263	-1,475
3,25	17,128	-0,625	81,833	-1,775	110,379	-1,650	226,943	-1,538
3,5	17,204	-0,625	84,584	-1,850	112,301	-1,700	233,681	-1,638
3,75	17,280	-0,600	87,360	-1,900	116,640	-1,775	240,480	-1,713
4	17,357	-0,575	90,643	-1,950	119,571	-1,800	248,304	-1,775
4,25	17,435	-0,550	93,955	-1,994	123,013	-1,888	258,619	-1,838
4,5	17,514	-0,525	96,324	-2,031	126,486	-1,938	260,270	-1,881
4,75	17,593	-0,500	98,226	-2,075	129,502	-1,975	265,846	-1,913
5	17,673	-0,500	101,618	-2,125	132,055	-2,013	269,018	-1,931
5,25	17,753	-0,475	104,055	-2,156	132,164	-2,025	273,699	-1,950
5,5	17,835	-0,463	106,514	-2,175	133,266	-2,050	277,927	-1,963
5,75	17,917	-0,450	108,498	-2,200	137,862	-2,088	282,691	-1,969
6	18,500	-0,431	110,000	-2,206	139,000	-2,100	286,000	-1,975
6,25	19,088	-0,425	111,014	-2,213	140,149	-2,113	290,847	-1,975
6,5	19,178	-0,419	111,533	-2,213	141,813	-2,125	291,196	-1,975
6,75	19,268	-0,413	113,577	-2,213	144,000	-2,125	292,563	-1,981
7	19,358	-0,406	114,623	-2,219	147,736	-2,144	293,943	-1,988
7,25	19,450	-0,413	115,678	-2,225	148,436	-2,150	295,336	-2,000
7,5	19,543	-0,413	116,229	-2,238	149,657	-2,175	296,743	-2,000
7,75	19,636	-0,394	117,301	-2,250	151,407	-2,188	298,163	-2,006
8	19,731	-0,394	117,865	-2,275	154,731	-2,200	299,077	-2,013
8,25	19,826	-0,400	121,043	-2,288	157,043	-2,206	300,522	-2,019
8,5	19,922	-0,419	122,155	-2,288	158,330	-2,206	301,981	-2,019
8,75	20,020	-0,431	122,224	-2,288	160,683	-2,206	303,454	-2,019
9	20,118	-0,444	123,353	-2,288	162,000	-2,213	304,941	-2,019
9,25	20,217	-0,450	123,961	-2,288	164,926	-2,219	306,975	-2,019
9,5	20,851	-0,450	125,109	-2,288	166,277	-2,219	308,495	-2,019
9,75	20,955	-0,450	126,269	-2,288	167,642	-2,219	310,030	-2,019
10	20,520	-0,450	126,900	-2,300	170,100	-2,219	310,500	-2,019
10,25	22,251	-0,444	128,623	-2,306	172,040	-2,225	312,060	-2,025

10,5	22,364	-0,444	129,818	-2,319	174,000	-2,231	313,091	-2,031
10,75	23,574	-0,450	131,025	-2,325	175,431	-2,244	314,132	-2,038
11	23,694	-0,463	131,694	-2,344	177,429	-2,250	315,735	-2,050
11,25	24,369	-0,475	132,369	-2,356	178,338	-2,250		
11,5	26,165	-0,481			179,258	-2,250		
11,75	26,301	-0,488						
12	26,438	-0,500						

Echantillon N°5 : Sable+ Marne avec W=14%

SABLE + MARNE W = 14 %								
σ (KPa)	σ = 50 (KPa)		σ = 100 (KPa)		σ = 200 (KPa)		σ = 300 (KPa)	
L	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**	τ(KPa)	**V (%)**
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	16,720	-0,025	24,402	-0,025	35,247	-0,088	33,891	-0,075
0,5	28,134	-0,113	48,101	-0,125	52,185	-0,250	65,798	-0,225
0,75	29,165	-0,175	56,051	-0,200	66,076	-0,450	87,949	-0,375
1	30,661	-0,225	66,814	-0,300	75,051	-0,625	107,542	-0,488
1,25	34,928	-0,250	75,830	-0,375	85,021	-0,775	122,706	-0,600
1,5	38,308	-0,269	83,077	-0,413	92,308	-0,925	135,231	-0,700
1,75	41,253	-0,275	88,069	-0,475	99,193	-1,063	146,936	-0,775
2	43,293	-0,288	93,103	-0,538	107,534	-1,188	157,810	-0,850
2,25	45,351	-0,288	96,779	-0,563	114,078	-1,300	165,974	-0,925
2,5	47,426	-0,294	100,957	-0,600	118,800	-1,400	174,209	-0,988
2,75	48,576	-0,294	103,755	-0,625	122,148	-1,500	180,629	-1,050
3	50,211	-0,288	105,632	-0,650	126,000	-1,575	187,105	-1,100
3,25	50,907	-0,263	107,524	-0,663	129,410	-1,663	192,687	-1,150
3,5	51,850	-0,231	109,912	-0,675	133,327	-1,725	198,319	-1,200
3,75	52,320	-0,200	110,880	-0,681	137,280	-1,800	204,000	-1,238
4	53,036	-0,150	112,339	-0,688	140,063	-1,863	207,804	-1,275
4,25	53,274	-0,100	113,327	-0,694	143,354	-1,913	210,673	-1,338
4,5	54,000	-0,050	115,297	-0,694	146,189	-1,975	215,514	-1,400
4,75	54,244	-0,006	116,308	-0,694	147,584	-2,050	217,466	-1,425
5	54,491	0,025	116,836	-0,700	149,727	-2,100	221,891	-1,463
5,25	54,986	0,056	117,863	-0,713	153,370	-2,150	225,863	-1,500
5,5	55,239	0,081	119,890	-0,719	155,560	-2,175	228,881	-1,525
5,75	55,742	0,113	120,940	-0,719	157,770	-2,213	232,424	-1,550
6	56,000	0,131	121,500	-0,706	159,750	-2,238	236,000	-1,575
6,25	56,260	0,150	122,065	-0,675	160,744	-2,263	238,605	-1,600
6,5	56,523	0,175	123,140	-0,656	161,748	-2,275	240,224	-1,638
6,75	57,042	0,200	124,732	-0,663	165,803	-2,300	240,338	-1,675
7	57,311	0,225	125,830	-0,650	168,623	-2,300	247,585	-1,700
7,25	57,583	0,250	126,938	-0,631	171,213	-2,313	249,782	-1,713
7,5	57,857	0,288	127,543	-0,625	172,029	-2,325	251,486	-1,725
7,75	58,134	0,288	128,670	-0,600	173,368	-2,350	253,206	-1,738
8	58,673	0,300	129,288	-0,594	174,462	-2,363	254,942	-1,750
8,25	58,957	0,319	130,435	-0,588	175,826	-2,375	256,696	-1,775
8,5	59,243	0,319	131,854	-0,581	176,680	-2,375	257,942	-1,788
8,75	59,795	0,325	132,498	-0,575	178,068	-2,400	260,254	-1,800
9	60,353	0,325	133,412	-0,569	178,941	-2,413	262,324	-1,800
9,25	60,650	0,325	134,069	-0,563	179,823	-2,425	263,882	-1,800
9,5	61,218	0,319	134,733	-0,550	180,713	-2,450	264,653	-1,813
9,75	61,791	0,325	135,403	-0,538	181,612	-2,450	266,239	-1,825
10	62,100	0,325	136,080	-0,525	181,980	-2,475	266,760	-1,825
10,25	62,683	0,338	137,307	-0,525	183,166	-2,500	268,915	-1,825

10,5	63,818	0,350	138,000	-0,513	184,909	-2,513	270,000	-1,825
10,75	66,883	0,363	139,249	-0,513	186,396	-2,525	271,371	-1,838
11	67,776	0,375	139,959	-0,513	187,898	-2,550	272,204	-1,850
11,25	68,400	0,375	140,677	-0,513	188,862	-2,575	273,600	-1,850
11,5	69,031	0,369	141,402	-0,525	190,392	-2,600	275,567	-1,875
11,75	69,389	0,363	142,135	-0,525	193,057	-2,600	276,995	-1,875
12	70,031	0,363	143,438	-0,525				
12,25	70,398	0,363						
12,5	70,484	0,356						

Annexe II

Plans expériences factoriels fractionnaires

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	argile & marne	sable & argile
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	argile & marne	6%	***118,500***	*119,000*	*118,000*			
2	argile & marne	14%	***61,500***	*62,000*	*61,000*			
3	sable & argile	6%	***27,250***	*27,750*	*26,750*			
4	sable & argile	14%	***27,100***	*27,600*	*26,600*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	**58,588**	**31,413**	**14,288**
niveau 2	**58,588**	**-31,413**	**-14,288**

Interactions			
	A1B1 =	14,213	**| AB | = 14,213**
	A2B1 =	-14,213	
	A1B2 =	-14,213	
	A2B2 =	14,213	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	7893,961	1	7893,961	15787,92	7,71	**OUI**	**0,000**
W	1633,061	1	1633,061	3266,12	7,71	**OUI**	**0,000**
AB	*1615,961*	*1*	*1615,961*	*3231,92*	*7,71*	***OUI***	***0,000***
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	11144,984	7	1592,141				

Plan d'expérience pour la cohésion (C), Plan I (argile et marne, sable et argile).

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	argile & marne	sable & argile
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	argile & marne	6%	***25,500***	*26,000*	*25,000*			
2	argile & marne	14%	***22,280***	*22,780*	*21,780*			
3	sable & argile	6%	***36,250***	*36,750*	*35,750*			
4	sable & argile	14%	***37,400***	*37,900*	*36,900*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	**30,358**	**-6,468**	**0,517**
niveau 2	**30,358**	**6,468**	**-0,518**

Interactions			
	A1B1 =	1,093	**| AB | = 1,093**
	A2B1 =	-1,093	
	A1B2 =	-1,093	
	A2B2 =	1,092	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	334,628	1	334,628	669,26	7,71	**OUI**	**0,000**
W	2,142	1	2,142	4,28	7,71	**NON**	**0,107**
AB	*9,548*	*1*	*9,548*	*19,10*	*7,71*	***OUI***	***0,012***
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	348,319	7	49,760				

Plan d'expérience pour l'angle de frottement (φ), plan I (argile et marne, sable et argile).

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	argile & marne	sable & marne
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	argile & marne	6%	***118,500***	*119,000*	*118,000*			
2	argile & marne	14%	***61,500***	*62,000*	*61,000*			
3	sable & marne	6%	***41,100***	*41,600*	*40,600*			
4	sable & marne	14%	***30,700***	*31,200*	*30,200*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	**62,950**	**27,050**	**16,850**
niveau 2	**62,950**	**-27,050**	**-16,850**

Interactions			
	A1B1 =	11,650	**| AB | = 11,650**
	A2B1 =	-11,650	
	A1B2 =	-11,650	
	A2B2 =	11,650	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	5853,620	1	5853,620	11707,24	7,71	**OUI**	**0,000**
W	2271,380	1	2271,380	4542,76	7,71	**OUI**	**0,000**
AB	*1085,780*	*1*	*1085,780*	*2171,56*	*7,71*	***OUI***	***0,000***
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	9212,780	7	1316,111				

Plan d'expérience pour la cohésion (C), plan II (argile et marne, sable et marne).

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	argile & marne	sable & marne
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	argile & marne	6%	***25,500***	*26,000*	*25,000*			
2	argile & marne	14%	***22,280***	*22,780*	*21,780*			
3	sable & marne	6%	***38,150***	*38,650*	*37,650*			
4	sable & marne	14%	***37,300***	*37,800*	*36,800*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	**30,808**	**-6,918**	**1,018**
niveau 2	**30,808**	**6,917**	**-1,018**

Interactions			
	A1B1 =	0,593	**| AB | = 0,593**
	A2B1 =	-0,592	
	A1B2 =	-0,592	
	A2B2 =	0,593	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	382,814	1	382,814	765,63	7,71	**OUI**	**0,000**
W	8,282	1	8,282	16,56	7,71	**OUI**	**0,015**
AB	*2,808*	*1*	*2,808*	*5,62*	*7,71*	***NON***	***0,077***
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	395,905	7	56,558				

Plan d'expérience pour l'angle de frottement (φ), plan II (argile et marne, sable et marne).

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	sable & argile	sable & marne
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	sable & argile	6%	***27,250***	*27,750*	*26,750*			
2	sable & argile	14%	***27,100***	*27,600*	*26,600*			
3	sable & marne	6%	***41,100***	*41,600*	*40,600*			
4	sable & marne	14%	***30,700***	*31,200*	*30,200*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	31,538	-4,363	2,638
niveau 2	31,538	4,363	-2,638

Interactions			
	A1B1 =	-2,563	| AB | = 2,563
	A2B1 =	2,563	
	A1B2 =	2,563	
	A2B2 =	-2,563	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	152,251	1	152,251	304,50	7,71	OUI	0,000
W	55,651	1	55,651	111,30	7,71	OUI	0,000
AB	*52,531*	*1*	*52,531*	*105,06*	*7,71*	*OUI*	*0,001*
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	262,434	7	37,491				

Plan d'expérience pour la cohésion (C), plan III (sable et argile, sable et marne).

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	sable & argile	sable & marne
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	sable & argile	6%	***36,250***	*36,750*	*35,750*			
2	sable & argile	14%	***37,400***	*37,900*	*36,900*			
3	sable & marne	6%	***38,150***	*38,650*	*37,650*			
4	sable & marne	14%	***37,300***	*37,800*	*36,800*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	37,275	-0,450	-0,075
niveau 2	37,275	0,450	0,075

Interactions			
	A1B1 =	-0,500	| AB | = 0,500
	A2B1 =	0,500	
	A1B2 =	0,500	
	A2B2 =	-0,500	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	1,620	1	1,620	3,24	7,71	NON	0,146
W	0,045	1	0,045	0,09	7,71	NON	0,779
AB	*2,000*	*1*	*2,000*	*4,00*	*7,71*	*NON*	*0,116*
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	5,665	7	0,809				

Plan d'expérience pour l'angle de frottement (φ), plan III (sable et argile, sable et marne).

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	2marne & argile	2sable & argile
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	2marne & argile	6%	***61,640***	*62,140*	*61,140*			
2	2marne & argile	14%	***36,870***	*37,370*	*36,370*			
3	2sable & argile	6%	***94,500***	*95,000*	*94,000*			
4	2sable & argile	14%	***13,600***	*14,100*	*13,100*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	51,653	-2,398	26,418
niveau 2	51,653	2,398	-26,418

Interactions			
	A1B1 =	-14,033	| AB | = 14,033
	A2B1 =	14,033	
	A1B2 =	14,033	
	A2B2 =	-14,033	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	45,984	1	45,984	91,97	7,71	OUI	0,001
W	5583,074	1	5583,074	11166,15	7,71	OUI	0,000
AB	*1575,288*	*1*	*1575,288*	*3150,58*	*7,71*	***OUI***	***0,000***
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	7206,347	7	1029,478				

Plan d'expérience pour la cohésion (C), plan IV (2marne et argile, 2sable et argile).

Domaine du plan

	Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
A =	Combinaison	2marne & argile	2sable & argile
B =	W	6%	14%

NE DOCUMENTER QUE LES CASES DE COULEUR BLANCHE

AU MOINS DEUX REPETITIONS SONT NECESSAIRES

NB. Pour rajouter des colonnes, se placer sur Y5 pour insérer

Essais	Niveaux Combinaison	Niveaux W	*Réponses*	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*	*Y5*
1	2marne & argile	6%	***28,750***	*29,250*	*28,250*			
2	2marne & argile	14%	***20,500***	*21,000*	*20,000*			
3	2sable & argile	6%	***23,500***	*24,000*	*23,000*			
4	2sable & argile	14%	***41,400***	*41,900*	*40,900*			

Effets moyens	Général	Combinaison	W
niveau 1	28,538	-3,913	-2,413
niveau 2	28,538	3,913	2,413

Interactions			
	A1B1 =	6,538	| AB | = 6,538
	A2B1 =	-6,538	
	A1B2 =	-6,538	
	A2B2 =	6,538	

ANOVA plan complet **Y~ = M+A+B+AB**

Sources	S. des carrés	*ddl*	Variances	F	*F critique à 5%*	Résultat à 95%	p
Combinaison	122,461	1	122,461	244,92	7,71	OUI	0,000
W	46,561	1	46,561	93,12	7,71	OUI	0,001
AB	*341,911*	*1*	*341,911*	*683,82*	*7,71*	***OUI***	***0,000***
Résiduelle	2,000	4	0,500				
Totale	512,934	7	73,276				

Plan d'expérience pour la cohésion (C), plan IV (2marne et argile, 2sable et argile).