

Amélioration du comportement mécanique des sols par les plantes

Auteur : Diette-Stevaux, Anouchka

Promoteur(s) : François, Bertrand

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20892>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

AMÉLIORATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES SOLS PAR LES PLANTES

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
master "Ingénieur Civil des Constructions"

Auteur :
DIETTE-STEVAUX Anouchka

Promoteur :
FRANÇOIS Bertrand

Membres du jury :
COLLIN Frédéric
COURARD Luc
TOCQUIN Pierre

Année académique 2023-2024

Remerciements

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de fin d'études, ainsi qu'à celles qui m'ont encouragé tout au long de mon parcours universitaire.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur, Bertrand FRANÇOIS, pour son expertise et ses conseils tout au long de ce projet. Son soutien ainsi que sa grande disponibilité ont été d'une importance cruciale dans la réalisation de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma sincère gratitude aux membres de mon jury, Frédéric COLLIN, Luc COURARD et Pierre TOCQUIN, pour leur attention, leur intérêt et leur implication dans l'évaluation de ce travail.

Un remerciement tout particulier va à Pierre TOCQUIN pour sa collaboration précieuse, qui a permis de faire pousser les plantes nécessaires à cette étude dans les serres de l'Institut de Botanique. Je lui suis profondément reconnaissante pour son expertise et ses conseils constructifs tout au long de l'expérimentation. Mes remerciements vont également à son équipe et à tout le personnel ayant pris soin de mes plantes, en les arrosant et en les transplantant dans leurs contenants appropriés.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Pierre ILLING et Mathilde PIETTE, membres du laboratoire de géotechnologies, pour leur aide précieuse, leur disponibilité et leur généreux partage de connaissances tout au long de ce travail. Leur bonne humeur constante et leur sympathie ont grandement égayé mes journées au laboratoire. Je leur suis également reconnaissante pour leur soutien lors de mes trajets vers les serres et pour le transport des caisses.

Je remercie également mes amis, en particulier Sophie LANCKOHR, Manon PIRON et Eliott THOMMES, pour leur bonne humeur, leur motivation et leur soutien tout au long de ces deux années de master. Ces années auraient été bien plus difficiles sans vous, sans nos moments passés dans "notre" classe, sans les vocaux interminables de Sophie, et sans nos sorties mémorables ensemble. Je souhaite également exprimer ma gratitude à Bérengère ESTERS pour son soutien et ses encouragements constants tout au long de nos années d'amitié. Merci à Loïc GLINEUR et Pierre DRANSART pour leur présence et soutien durant ces années d'études, ainsi que pour les nombreux fous rires que nous avons partagé.

Enfin, je réserve mes remerciements les plus sincères à ma famille, et plus particulièrement à mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leur aide précieuse et leurs encouragements constants durant toutes ces années d'études. Je remercie également mon compagnon Robin LO MANTO pour toutes ces années à mes côtés. Ton soutien constant et ton aide ont été d'un grand réconfort et m'ont permis de surmonter les moments les plus difficiles.

Anouchka.

Résumé

La stabilisation des pentes est cruciale pour prévenir les glissements de terrain. Parmi les méthodes de stabilisation, l'utilisation des plantes est de plus en plus courante. Les racines des plantes contribuent à la stabilisation de deux manières : elles assèchent le sol, ce qui accroît sa résistance et sa stabilité, et elles renforcent la cohésion des particules de sol, améliorant ainsi sa structure.

Ce mémoire se penche sur l'amélioration de la résistance au cisaillement des sols enracinés à différentes étapes de l'enracinement. Pour atteindre cet objectif, le travail est structuré en deux parties distinctes.

La première partie consiste en une revue de la littérature existante afin d'établir un état de l'art. Celui-ci se focalise d'abord sur les racines avec leur réseau racinaire différent et leur anatomie. Il poursuit en examinant l'un des effets majeurs des racines sur les sols, à savoir l'amélioration de la cohésion. Enfin, il s'intéresse à l'application potentielle de ces connaissances dans le domaine de la stabilité des pentes.

La deuxième partie se concentre sur une étude expérimentale réalisée sur deux types de plantes : le plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*) et le trèfle (*Trifolium repens*). L'objectif principal est de quantifier la résistance au cisaillement générée par les racines, en termes de cohésion et d'angle de frottement. Cette étude s'étend sur plusieurs semaines de croissance des plantes et s'appuie sur des essais de cisaillement direct en condition saturée ainsi que des essais de compression triaxiale en condition consolidée drainée. En parallèle, les paramètres morphologiques du réseau racinaire, tels que la biomasse, la largeur et l'angle d'ouverture, sont également analysés afin d'évaluer l'évolution de la densité du réseau. Enfin, les résultats obtenus, qui montrent une augmentation de la cohésion et de la densité au fil du temps, sont mis en relation pour mieux comprendre les interactions entre ces variables.

Mots-clés : Sol, Racines, Réseau racinaire, Cisaillement, Cisaillement direct, Compression triaxiale, Cohésion, Angle de frottement, Stabilité des pentes.

Abstract

Slope stabilization is crucial for preventing landslides. Among the stabilization methods, the use of plants is becoming increasingly common. Plant roots contribute to stabilization in two ways : they help to dry out the soil, which increases its strength and stability, and they enhance the cohesion of soil particles, thereby improving its structure.

This thesis focuses on the enhancement of shear strength in rooted soils at various stages of root development. To achieve this objective, the work is structured into two distinct parts.

The first part involves a review of existing literature to establish a state of the art. It initially focuses on roots, their varying root networks, and their anatomy. It then examines one of the major effects of roots on soils, namely the improvement of cohesion. Finally, it explores the potential application of this knowledge in the field of slope stability.

The second part concentrates on an experimental study conducted on two types of plants : narrowleaf plantain (*Plantago lanceolata*) and white clover (*Trifolium repens*). The primary objective is to quantify the shear strength generated by the roots, in terms of cohesion and friction angle. This study spans several weeks of plant growth and relies on direct shear tests under saturated conditions as well as triaxial compression tests under consolidated drained conditions. In parallel, the morphological parameters of the root network, such as biomass, width, and opening angle, are also analyzed to assess the evolution of network density. Finally, the results, which demonstrate an increase in cohesion and density over time, are correlated to better understand the interactions between these variables.

Keywords : Soil, Roots, Root system, Shear strength, Direct shear test, Triaxial compression test, Cohesion, Friction angle, Slope stability.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Introduction générale	1
1.2	Objectif du travail	1
2	État de l'art	2
2.1	Racines	2
2.1.1	Les différents systèmes racinaires	3
2.1.2	Anatomie racinaire	5
2.1.3	Biomécanique des racines	7
2.2	Stabilité des pentes	7
3	Identification du sol	9
3.1	Essais granulométriques	9
3.1.1	Essai granulométrique	9
3.1.2	Essai sédimentométrique	10
3.1.3	Analyse des résultats	12
3.2	Essais des limites d'Atterberg	13
3.2.1	Limite de liquidité w_L	14
3.2.2	Limite de plasticité w_P	15
3.2.3	Analyse des résultats	16
3.3	Essai Proctor	17
3.3.1	Analyse des résultats	19
4	Étude expérimentale	21
4.1	Matériaux	21
4.1.1	Sol	21
4.1.2	Racines	21
4.2	Préparation des matériaux	22
4.2.1	Préparation des caisses	22
4.2.2	Préparation des cylindres	23
4.2.3	Croissance des racines	24
4.3	Préparation des échantillons	26
4.3.1	Essai cisaillement direct	26
4.3.2	Essai triaxial	30
4.4	Essais effectués	30
4.4.1	Essai de cisaillement direct	31
4.4.2	Essai triaxial	32
4.5	Caractérisation des racines	34
4.5.1	Récupération des racines	34
4.5.2	Mesure de la biomasse	36
4.5.3	Mesure de la largeur et de l'angle d'ouverture	36

5	Résultats et interprétation	38
5.1	Cisaillement direct - Essais préliminaires	38
5.2	Cisaillement direct - Essais principaux	41
5.2.1	Sol naturel	41
5.2.2	Sol et plantain	42
5.2.3	Sol et trèfle	43
5.2.4	Discussion	45
5.3	Triaxial	45
5.4	Caractérisation des racines	48
6	Conclusion et perspectives	50
6.1	Conclusion	50
6.2	Perspectives	51
	Bibliographie	52
	Annexe	53
A	Résultats et interprétation	54
A.1	Caractérisation des racines	54

Table des figures

2.1	Comparaison entre les monocotylédones et les dicotylédones [FORTIER et al., 2023]	2
2.2	Schéma d'une plante à fleurs [CRANG et al., 2018]	3
2.3	Système racinaire pivotant du <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> [KUTSCHERA et al., 1997]	4
2.4	Système racinaire fasciculé du <i>Iris siberica</i> [KUTSCHERA et LICHTENEGGER, 1982]	4
2.5	Système racinaire traçant du <i>Populus alba</i> [KUTSCHERA et LICHTENEGGER, 2002]	5
2.6	Racines adventives (entourées en rouge) sur la tige du <i>Zea mays</i> [CRAAQ, 2024]	5
2.7	Coupe longitudinale de la région apicale d'une racine de plante [TAIZ et al., 2015]	6
3.1	Matériel pour l'essai granulométrique	9
3.2	Matériel pour l'essai sédimentométrique	11
3.3	Courbe granulométrique	12
3.4	Consistance du sol en fonction de sa teneur en eau w [FANARA, 2021]	13
3.5	Matériel pour les essais des limites d'Atterberg	13
3.6	Graphique du nombre de coups NC en fonction de la teneur en eau w obtenue par l'essai de la limite de liquidité	15
3.7	Signification des symboles dans la classification USCS [FRANÇOIS, 2024]	16
3.8	Diagramme de Casagrande	17
3.9	Moule Proctor	18
3.10	Machine de compactage automatique Proctor [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023e]	18
3.11	Courbe de la teneur en eau w en fonction de la masse volumique sèche ρ_d obtenue par essai Proctor	20
4.1	Malaxeur	22
4.2	Caisse servant de contenant pour les plantes	23
4.3	Godets de plantain	24
4.4	Petits pots de plantain et trèfle	24
4.5	Quatre caisses contenant du plantain et du trèfle	25
4.6	Cylindres de plantain et de trèfle	25
4.7	Échantillon cisaillement direct : étapes 1, 2 et 3	28
4.8	Échantillon cisaillement direct : étapes 6 et 7	28
4.9	Échantillon cisaillement direct : étapes 8, 11 et 13	29
4.10	Échantillon cisaillement direct : étapes 14, 15, 17, 19, 21 et 24	29
4.11	Échantillon triaxial : étape 2	30
4.12	Échantillon final pour essai triaxial	30
4.13	Boîte de Casagrande	31
4.14	Banc de cisaillement	31
4.15	Principe de l'essai de cisaillement direct [FRANÇOIS, 2024]	32
4.16	Schéma de l'appareil triaxial [FRANÇOIS, 2024]	33
4.17	Appareil triaxial	33

4.18	(a) L'enveloppe de rupture et (b) les paramètres de résistance déduits [FRANÇOIS, 2024]	34
4.19	Récupération des racines : étape 14 (les cinq racines sont entourées en rouge) . .	35
4.20	Récupération des racines : étape 16	35
4.21	Méthode 1	37
4.22	Méthode 2	37
4.23	Illustration du cône racinaire ainsi que de l'angle d'ouverture γ [LI et al., 2024] .	37
5.1	Essais préliminaires : (a), (c), (e) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b), (d), (f) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale	40
5.2	Sol naturel : (a) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale	42
5.3	Plantain : (a), (c), (e) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b), (d), (f) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale	43
5.4	Trèfle : (a), (c), (e) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b), (d), (f) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale	44
5.5	Comparaison de l'augmentation de résistance au cisaillement du plantain et du trèfle	45
5.6	(a), (c), (e) Évolution du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale - (b), (d), (f) Enveloppe de rupture des cercles de Mohr	47
5.7	Évolution de la cohésion en fonction des paramètres caractérisant la densité du réseau racinaire	49
A.1	Mesure des biomasses aériennes et racinaires sur le trèfle et le plantain	54
A.2	Mesure des largeurs et angles d'ouverture sur le plantain	55
A.3	Mesure des largeurs et angles d'ouverture sur le trèfle	55

Liste des tableaux

3.1	Résultats du tamisage par voie sèche	10
3.2	Résultats de la sédimentométrie	12
3.3	Résultats de la limite de liquidité	14
3.4	Résultats de la limite de plasticité	16
3.5	Résultats des essais Proctor pour la détermination des teneurs en eau	19
3.6	Résultats des essais Proctor pour la détermination des masses volumiques sèches	20
5.1	Cohésion et angle de frottement obtenus par les essais préliminaires de cisaillement en conditions non saturées	39
5.2	Cohésion et angle de frottement obtenus par essai de cisaillement sur le sol naturel	41
5.3	Cohésion et angle de frottement obtenus par essai de cisaillement sur le plantain	42
5.4	Cohésion et angle de frottement obtenus par essai de cisaillement sur le trèfle	44
5.5	Cohésion et angle de frottement obtenus par essai triaxial	46
5.6	Résultats des biomasses aériennes et racinaires du plantain et du trèfle	49
5.7	Résultats des largeurs et angles d'ouverture du plantain et du trèfle	49

Chapitre 1

Introduction

1.1 Introduction générale

Les glissements de terrain sont des phénomènes naturels complexes où des masses de terre, de roches ou de débris se déplacent vers le bas le long des pentes. Ces mouvements peuvent se manifester sous diverses formes dont les principales sont les chutes et les glissements, et sont souvent le résultat de facteurs naturels ou humains, voire d'une combinaison des deux. Parmi les causes naturelles, les pluies intenses et les tremblements de terre sont les plus courantes, tandis que les activités humaines comme la construction ou la déforestation jouent également un rôle significatif dans le déclenchement de ces événements. Ces glissements de terrain sont particulièrement destructeurs, affectant des millions de personnes et causant des pertes humaines et économiques considérables [CHARLIER, 2016, EMADI-TAFTI et al., 2021]. Face à l'ampleur de ces risques, la stabilisation des pentes devient une priorité dans les régions vulnérables.

La bio-ingénierie des sols offre une approche durable pour renforcer la stabilité des pentes en utilisant des éléments naturels comme les plantes. Les racines des plantes jouent un rôle crucial à deux niveaux : hydrologique et biomécanique. Tout d'abord, elles participent à l'assèchement du sol, ce qui réduit sa déformabilité et augmente sa résistance, car les sols secs tendent à être plus stables que les sols humides. Par ailleurs, les réseaux racinaires favorisent la cohésion entre les particules de sol, renforçant ainsi la structure du sol [LI et al., 2024, EMADI-TAFTI et al., 2021, LANN et al., 2024].

1.2 Objectif du travail

L'objectif principal de ce travail est d'étudier comment la résistance au cisaillement des sols enracinés, en termes de cohésion et d'angle de frottement, évolue à différentes étapes de l'enracinement. Pour ce faire, des essais de cisaillement direct et de compression triaxiale seront réalisés. Un objectif secondaire consistera à établir une corrélation entre cette augmentation de la résistance et la morphologie du réseau racinaire. Pour atteindre cet objectif, des plantes à croissance rapide, présentant des réseaux racinaires distincts, seront testées.

Chapitre 2

État de l'art

Ce chapitre explore divers aspects liés au sujet de cette étude. Il commence par une analyse des racines, en détaillant leurs réseaux racinaires variés et leur anatomie. Il se poursuit en examinant l'un des principaux effets des racines sur les sols, à savoir leur impact biomécanique. Enfin, il aborde les applications potentielles de ces connaissances pour améliorer la stabilité des pentes.

2.1 Racines

Le groupe de végétaux le plus présent sur Terre est celui des Cormophytes [LABERCHE, 2020]. Ces végétaux sont caractérisés par un cormus, c'est-à-dire que leur appareil végétatif se compose de tiges feuillées et peut éventuellement posséder des racines. Parmi ce groupe se trouvent les plantes à fleurs et à fruits, qui appartiennent à la classe des angiospermes [JACQUEMART et al., s. d.]. Celles-ci sont les plus répandues et comprennent des racines, des tiges, des feuilles et des fleurs. Dans les angiospermes, deux grandes classes se distinguent : les Monocotylédones et les Eudicotylédones. Celles-ci sont couramment appelées les monocots et eudicots. La différence majeure entre les deux est le nombre de cotylédons qu'elles possèdent. En effet, les monocots en ont un seul tandis que les eudicots en ont deux comme représenté à la FIGURE 2.1 [CRANG et al., 2018]. Le cotylédon est présent dans la graine et "est la première feuille produite par les plantes" [FORTIER et al., 2023]. Grâce à sa structure de stockage des nutriments, il nourrit la plante jusqu'à ce qu'elle produise ses vraies feuilles qui prendront le relais par photosynthèse [FORTIER et al., 2023 ; CRANG et al., 2018].



FIGURE 2.1 – Comparaison entre les monocotylédones et les dicotylédones [FORTIER et al., 2023]

La FIGURE 2.2 illustre une plante à fleurs et montre la distinction entre la partie aérienne et la partie racinaire. La partie aérienne, située au-dessus du sol, contient une série de modules appelés phytomères. Un segment de tige nommé entrenoeud ainsi qu'un noeud portant des feuilles et un bourgeon axillaire compose chacun de ces phytomères. Finalement, le système racinaire contenant les racines primaires et secondaires forme la partie racinaire qui se situe en dessous du sol [MOROT-GAUDRY et al., 2021].

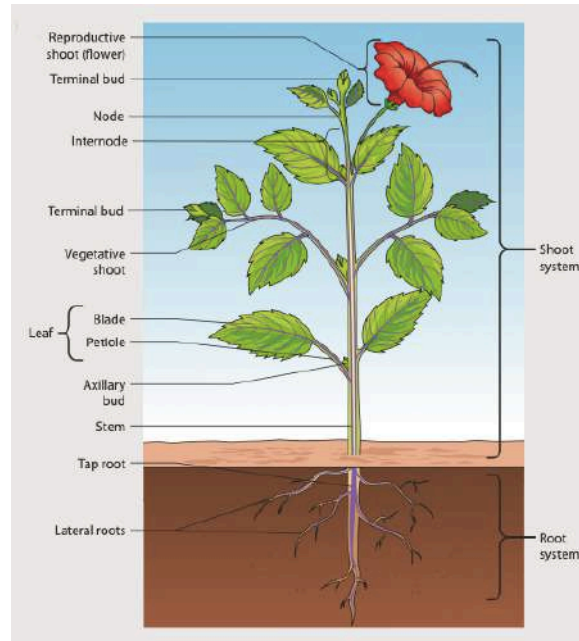


FIGURE 2.2 – Schéma d'une plante à fleurs [CRANG et al., 2018]

2.1.1 Les différents systèmes racinaires

Le processus qui permet à une graine de se développer en plante est appelé germination. Lors de celle-ci, une première racine nommée radicule croît et devient la racine primaire du système racinaire. Par la suite, des racines secondaires ou latérales apparaissent grâce à la ramification de la racine primaire [QUIROS, 2023 ; "Roots of Plants", s. d.]. Le système racinaire se développe différemment en fonction des espèces végétales, ce qui explique la diversité des types de systèmes racinaires [TAIZ et al., 2015]. Les plus courant sont :

- **La racine pivotante** (FIGURE 2.3). Ce système se distingue par la présence d'une racine primaire, nommée pivot, qui croît verticalement en profondeur dans le sol. Sur cet axe principal, se développent latéralement des racines secondaires. Ce type de système racinaire est typiquement observé chez les dicotylédones [QUIROS, 2023 ; TAIZ et al., 2015].
- **Les racines fasciculées** (FIGURE 2.4). Ce type de système se caractérise par des racines secondaires qui se ramifient tôt, avec des ramifications qui continuent de se multiplier. On parle alors de "faisceau de racines". De plus, comme ces racines ont généralement des diamètres similaires, la racine principale est difficilement discernable. Leur emplacement proche de la surface du sol permet aux plantes qui en sont dotées de contrôler efficacement l'érosion. Les racines fasciculées sont souvent présentes chez les monocotylédones [QUIROS, 2023 ; "Roots of Plants", s. d. ; TAIZ et al., 2015].
- **Les racines traçantes** (FIGURE 2.5). Ce système est constitué majoritairement de racines latérales situées à faible profondeur et ayant poussées horizontalement. Ici, le développement de la racine principale est peu avancé [QUIROS, 2023 ; JACQUEMART et al., 2024].

- **Les racines adventives** (FIGURE 2.6). C'est souvent au niveau d'un noeud, à partir de tiges aériennes ou souterraines, ou d'autres parties de la plante qu'elles émergent. Ce type de racine apparaît régulièrement en complément d'un autre système racinaire, comme ceux mentionnés ci-dessus [QUIROS, 2023 ; JACQUEMART et al., 2024].
- **Les racines tubéreuses**. Ces racines, telles que celles des carottes, se sont adaptées dans le stockage de réserves alimentaires, prenant ainsi l'allure de grosses racines pivotantes [JACQUEMART et al., 2024 ; "Roots of Plants", s. d.].

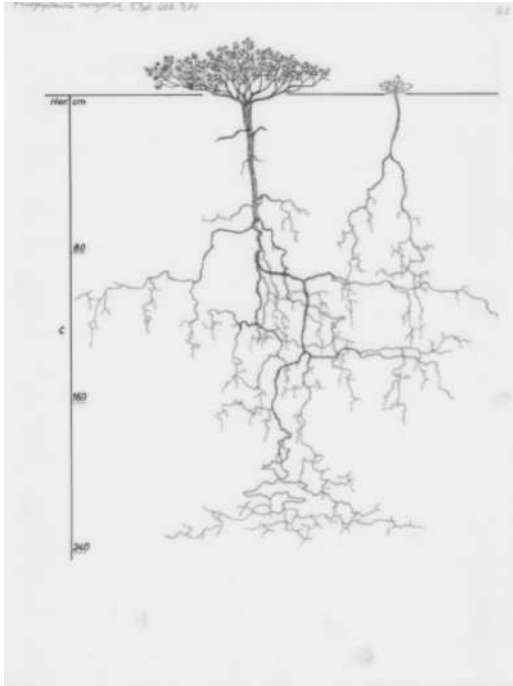


FIGURE 2.3 – Système racinaire pivotant du *Ammopiptanthus mongolicus* [KUTSCHERA et al., 1997]

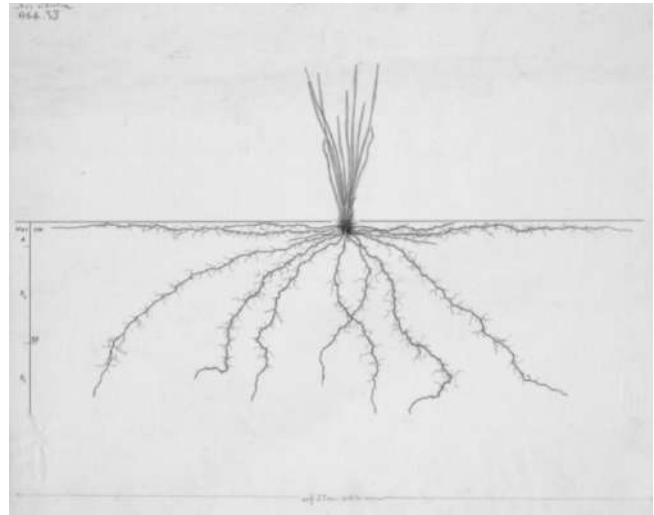


FIGURE 2.4 – Système racinaire fasciculé du *Iris siberica* [KUTSCHERA et LICHTENEGGER, 1982]



FIGURE 2.5 – Système racinaire traçant du *Populus alba* [KUTSCHERA et LICHTENEGGER, 2002]



FIGURE 2.6 – Racines adventives (entourées en rouge) sur la tige du *Zea mays* [CRAAQ, 2024]

2.1.2 Anatomie racinaire

Bien qu'il existe une multitude de systèmes racinaires, chaque racine possède la même structure de base. Sur la FIGURE 2.7, trois zones d'activité sont identifiables : les zones méristématique, d'élongation et de maturation [TAIZ et al., 2015].

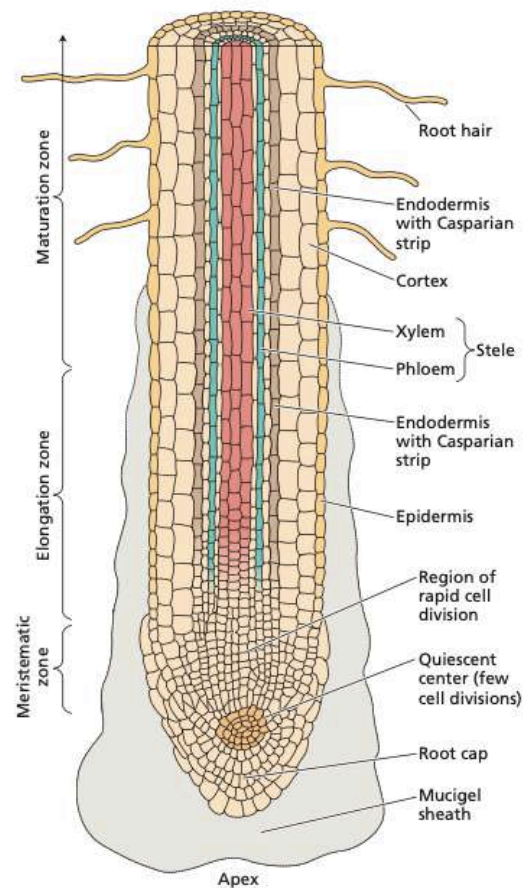


FIGURE 2.7 – Coupe longitudinale de la région apicale d'une racine de plante [TAIZ et al., 2015]

Dans la zone méristématique, deux directions de division cellulaire se distinguent. La première se dirige vers la base de la racine, permettant aux cellules de devenir des tissus fonctionnels. La deuxième se déplace vers l'apex pour que la coiffe racinaire se forme. Celle-ci est entourée de mucigel qu'elle sécrète et qui est une substance gélatineuse facilitant son enfoncement dans le sol et évitant que l'apex se dessèche. Derrière la coiffe, se situe le centre quiescent qui est la zone où il y a peu de division cellulaire. En plus de protéger la zone méristématique et le centre quiescent lors de son enfoncement, la coiffe joue un rôle primordial dans la réponse gravitropique. En effet, c'est elle qui capte la gravité, permettant ainsi de diriger la racine vers le bas lors de sa croissance [TAIZ et al., 2015].

Juste au-dessus de la zone méristématique se trouve la zone d'élongation. Dans cette zone, l'endoderme est produit par élongation et division des cellules. L'endoderme est un anneau unistratifié dont les cellules sont parallélépipédiques avec des parois axiales minces et des parois radiales épaisses dues à la subérine, formant ainsi les bandes de Caspary. Celles-ci bloquent le transport apoplastique de l'eau et des solutés au sein de la racine grâce à leur fonction hydrophobe [LABERCHE, 2020 ; TAIZ et al., 2015]. Autour de l'endoderme, deux régions sont visibles : vers l'extérieur, le cortex, et vers l'intérieur, la stèle. Cette dernière est composée du phloème et du xylème, deux éléments vasculaires [TAIZ et al., 2015]. Le phloème transporte la sève élaborée, contenant les produits de la photosynthèse, tandis que le xylème transporte la sève brute, constituée "de l'eau et des sels minéraux absorbés par les racines" [LABERCHE, 2020].

Finalement, les cellules atteignent la zone de maturation, où elles deviennent matures. Dans

cette région, les poils racinaires (ou poils absorbants) émergent de l'épiderme [VIANA et al., 2022]. La surface d'absorption de la racine est augmentée par les poils racinaires. En effet, ceux-ci permettent l'absorption de l'eau et des sels minéraux grâce aux parois de leurs cellules allongées, composées d'une grande vacuole. Au fur et à mesure que la racine croît, ils sont remplacés par d'autres poils absorbants car ils ont une durée de vie temporaire. Ceci permet d'avoir une taille de zone pilifère constante [LABERCHE, 2020].

2.1.3 Biomécanique des racines

Les racines des plantes jouent un rôle essentiel à deux niveaux : hydrologique et biomécanique. Le rôle hydrologique est lié à la succion des racines qui assèche le sol, réduisant ainsi sa déformabilité tout en augmentant sa résistance. Le rôle biomécanique, quant à lui, se décompose en deux types d'effets. Le premier est dû aux petites racines fibreuses qui augmentent la cohésion dans le composite racine-sol, ce qui a pour effet de renforcer la structure. Le deuxième est l'effet d'ancrage qui se produit chez les racines plus grosses ou des groupes de racines qui développent une résistance à la traction suffisante pour stabiliser le sol en profondeur [EMADI-TAFTI et al., 2021, LANN et al., 2024, LI et al., 2024]. Dans le cadre de ce travail, l'effet de succion des plantes ne sera pas étudié, et l'état de l'art se concentrera uniquement sur les résultats liés à l'aspect biomécanique.

L'augmentation de cohésion signifie que la résistance au cisaillement des sols est augmentée. L'étude de ALI et OSMAN, 2008 illustre de manière précise cette évolution de la cohésion induite par les racines sur les sols. En effet pour des essais de cisaillement direct sous eau réalisés sur cinq espèces différentes à 6 et 12 mois de croissance, il ressort que la cohésion, et donc la résistance au cisaillement, augmente avec le temps pour toutes les espèces examinées. En revanche, l'effet des racines sur l'angle de friction du sol ne montre pas de variation notable. Cette recherche montre aussi que l'augmentation de la profondeur à laquelle les racines sont testées a un impact plus marqué sur la résistance. Cela s'explique par l'intensification de l'interaction entre les racines et les particules de sol. Enfin, l'étude montre que la résistance au cisaillement est influencée par les paramètres physiologiques des plantes, tels que la biomasse aérienne, par exemple. Il ressort également que chaque type de racine possède un potentiel d'ancrage maximum déterminé par les caractéristiques propres aux racines. Les résultats de cette étude ont démontré leur fiabilité au fil des années, comme en témoignent de nombreuses autres recherches qui ont obtenu des résultats similaires, notamment l'étude récente de LI et al., 2024.

2.2 Stabilité des pentes

Les glissements de terrain sont des mouvements de masse qui se produisent lorsque la résistance mécanique interne d'une pente est dépassée par les forces gravitationnelles. Ces événements peuvent être déclenchés par diverses conditions, telles que des précipitations intenses, des changements dans l'utilisation des terres, ou une saturation en eau des sols. Lorsque le sol est saturé d'eau, sa cohésion diminue, augmentant ainsi le risque de défaillance mécanique qui mène aux glissements de terrain superficiels [LÖBMANN et al., 2020 ; WU et al., 2015]. Les glissements de terrain sont extrêmement dangereux car ils peuvent entraîner des pertes humaines tragiques et des destructions massives [CHARLIER, 2016, EMADI-TAFTI et al., 2021]. En raison de la gravité de ces risques, il est crucial de prioriser la stabilisation des pentes dans les zones susceptibles d'être affectées.

Pour améliorer la stabilité des pentes, des éléments naturels tels que les plantes peuvent jouer un rôle crucial. En effet, comme dit précédemment, les racines des plantes contribuent de ma-

nière significative à l'amélioration de la résistance au cisaillement du sol et, par conséquent, à la stabilité des pentes [LANN et al., 2024].

Ensuite, pour évaluer la stabilité des pentes, plusieurs méthodes analytiques et numériques sont couramment utilisées, chacune ayant ses propres principes et applications spécifiques. Ces méthodes permettent de déterminer le facteur de sécurité d'une pente F_s , c'est-à-dire la marge de sécurité contre les glissements de terrain. La pente est jugée stable si le coefficient de sécurité est supérieur ou égal à un. Les méthodes les plus courantes sont [CHARLIER, 2016 ; MASEKANYA, 2008] :

- La méthode de Fellenius est l'une des méthodes les plus traditionnelles. Elle repose sur l'hypothèse que le glissement se produit le long d'une surface circulaire. Pour l'étude, elle divise le talus en tranches et néglige les forces entre ces tranches. Cette méthode calcule le facteur de sécurité F_s en comparant les forces de résistance (R) et les forces de rupture (S) le long de cette surface de glissement :

$$F_s = \frac{R}{S} \quad (2.1)$$

- La méthode de Bishop est une approche plus avancée pour l'analyse de la stabilité des pentes par rapport à la méthode de Fellenius. La méthode vérifie à la fois l'équilibre des moments et l'équilibre vertical pour chaque tranche, mais elle ignore l'équilibre des forces horizontales. Le facteur de sécurité F_s est calculé par itérations successives en prenant le coefficient de sécurité par la méthode de Fellenius pour première valeur.
- La méthode de Janbu offre une approche plus généraliste pour les surfaces de glissement non circulaires et est adaptée aux sols présentant des hétérogénéités. Elle se distingue par ses équations plus complexes qui permettent d'évaluer le facteur de sécurité dans des conditions variées.
- Pour les analyses numériques plus sophistiquées, la méthode par Éléments Finis (FEM) peut être employée. Cette approche numérique simule le comportement de la pente en divisant le sol en petits éléments, ce qui permet une évaluation détaillée de la stabilité en fonction des propriétés du sol et des conditions de chargement.

Chapitre 3

Identification du sol

Avant de passer à la partie expérimentale de ce travail, il est nécessaire de caractériser le sol qui va être utilisé. Ce chapitre décrit donc les essais d'identification qui ont été menés, à savoir :

- Un essai granulométrique et sédimentométrique
- Un essai de la limite d'Atterberg
- Un essai Proctor

3.1 Essais granulométriques

Dans cette section, deux essais complémentaires seront réalisés pour déterminer les différents diamètres des grains constituant le sol étudié ainsi que leur répartition. Le premier essai, appelé granulométrie, permettra de classer les grains jusqu'à une taille de $74\text{ }\mu\text{m}$. Tandis que le second, nommé sédimentométrie, analysera les grains plus fins, inférieurs à $74\text{ }\mu\text{m}$. Ensuite, une courbe granulométrique sera tracée, ce qui permettra de déterminer le type de sol [FANARA, 2021].

3.1.1 Essai granulométrique

L'essai granulométrique par tamisage consiste à faire passer une masse de sol dans une série de tamis disposés en pile allant du plus gros diamètre (au dessus) au plus fin (en bas). Cet essai peut se faire par voie sèche ou humide. Pour réaliser l'essai, il faut des tamis à mailles carrées (FIGURE 3.1a) et une table vibrante (FIGURE 3.1b).



(a) Tamis à mailles carrées



(b) Table vibrante [ARGENCO -
LABORATOIRE DE
GÉOTECHNOLOGIES, 2023a]



(c) Pile de tamis

FIGURE 3.1 – Matériel pour l'essai granulométrique

La première étape pour réaliser l'essai est de préparer la masse d'échantillon M à classer. En effet, celle-ci est exprimée en kilogrammes et doit être comprises dans un certain intervalle calculé grâce au diamètre D , en millimètres, du plus gros granulat. Cela permet d'obtenir une masse d'échantillon suffisante pour réaliser l'essai, tout en évitant de surcharger les tamis. La masse doit donc vérifier l'équation suivante :

$$0,2D < M < 0,6D \quad (3.1)$$

Ensuite, l'essai par voie sèche est réalisé selon la procédure suivante [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023a] :

1. Peser l'échantillon dans un récipient taré ;
2. Sélectionner une série de tamis de manière à ce que chaque taille soit le double de la précédente ;
3. Brosser les tamis pour éliminer tous les résidus potentiels ;
4. Peser et empiler les tamis de manière à avoir la plus grande taille de maille au dessus (FIGURE 3.1c) ;
5. Verser l'échantillon progressivement ;
6. Placer la pile de tamis sur la table vibrante pour s'assurer qu'aucun grain ne reste bloqué dans des tamis qui ne correspondent pas à leur diamètre ;
7. Peser chaque tamis afin de déterminer la masse de l'échantillon retenu (le refus) pour chacun d'eux.

Finalement, grâce à la masse de départ et les refus pesés, le pourcentage de passant peut être calculé. Les données récoltées pour ce travail sont reprises à la TABLE 3.1.

Tamis [mm]	Refus [%]	Refus cumulé [g]	Refus cumulé [%]	Passant [%]
2,36	0,03	0,02	0,03	99,97
1,19	1,09	0,81	1,12	98,88
0,6	1,48	1,91	2,6	97,4
0,3	2,52	3,79	5,13	94,87
0,15	15,76	15,51	20,88	79,12
0,075	22,88	32,52	43,76	56,24

TABLE 3.1 – Résultats du tamisage par voie sèche

3.1.2 Essai sédimentométrique

L'essai sédimentométrique analyse les parties fines de l'échantillon de sol. Cet essai repose sur la loi de Stokes qui permet de déterminer la vitesse à laquelle les particules sphériques se déposent dans un fluide. L'échantillon de sol provient soit directement du passant du tamis de 0,075 mm de l'essai granulométrique réalisé précédemment, soit du passant d'un tamis de 2,38 mm si la quantité de matière disponible est insuffisante pour la première option. La deuxième option est possible même si l'on s'intéresse uniquement aux fines particules, car les particules plus grosses de l'échantillon se déposeront rapidement au fond de la burette, n'affectant ainsi pas la densité du mélange eau-particules en suspension [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023b ; VRANCX, 2023].

Le matériel nécessaire pour ce test est [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023b] :

- Un bain thermostatique à 20°C (FIGURE 3.2a) ;
- Une burette de 1000 ml ;
- Un aréomètre ;
- Un chronomètre ;
- Un mixeur (FIGURE 3.2b) ;
- Un défloculant (solution d'Hexamétaphosphate de sodium) ;
- De l'eau distillée ;
- Un cristalliseur.



(a) Bain thermostatique [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023b]



(b) Mixeur

FIGURE 3.2 – Matériel pour l'essai sédimentométrique

Premièrement, il faut préparer l'échantillon contenant le mélange eau-sol la veille du test. Pour ce faire, il faut [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023b] :

1. Prélever entre 50g et 100g de sol sec pour l'essai ;
2. Prélever et peser une autre petite quantité de sol dans un cristalliseur taré ;
3. Placer le cristalliseur à l'étuve 24h pour connaître la teneur en eau de l'échantillon ;
4. Prélever 125 ml de défloculateur pour 500 ml d'eau ;
5. Mélanger le sol, le défloculant et l'eau distillée ;
6. Mixer le mélange grâce au mixeur pendant une minute ;
7. Verser le mélange dans la burette et compléter avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre les 1000 ml de solution ;
8. Placer et laisser pendant 24h la burette dans le bain thermostatique à 20°C.

Le lendemain, l'essai peut être lancé. La procédure de celui-ci est la suivante [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023b] :

1. Secouer la burette de gauche à droite pendant une minute pour bien mélanger la solution et éviter tout dépôt au fond ;
2. Placer la burette dans le bain et activer le chronomètre ;
3. Mesurer et noter la densité grâce à l'aréomètre ;
4. Rincer l'aréomètre avec l'eau distillée pour que toutes les particules restent dans la burette ;
5. Reproduire les étapes 3 et 4 toutes les x minutes jusqu'à la dernière mesure à 1430 minutes.

Les résultats obtenus lors de cet essai sont repris à la TABLE 3.2.

Temps [min]	Diamètre [mm]	Refus [%]	Refus cumulé [%]	Passant [%]
1	0,0474	12,46	56,2	43,8
2	0,035	8,24	64,5	35,5
5	0,0233	11,01	75,5	24,5
15	0,0139	6,88	82,3	17,7
45	0,0081	2,75	85,1	14,9
120	0,005	1,38	86,5	13,5
300	0,0032	0,69	87,2	12,8
1430	0,0015	0,69	87,8	12,2

TABLE 3.2 – Résultats de la sédimentométrie

3.1.3 Analyse des résultats

Grâce aux résultats des TABLES 3.1 et 3.2, une courbe granulométrique a été tracée. Celle-ci est visible à la FIGURE 3.3.

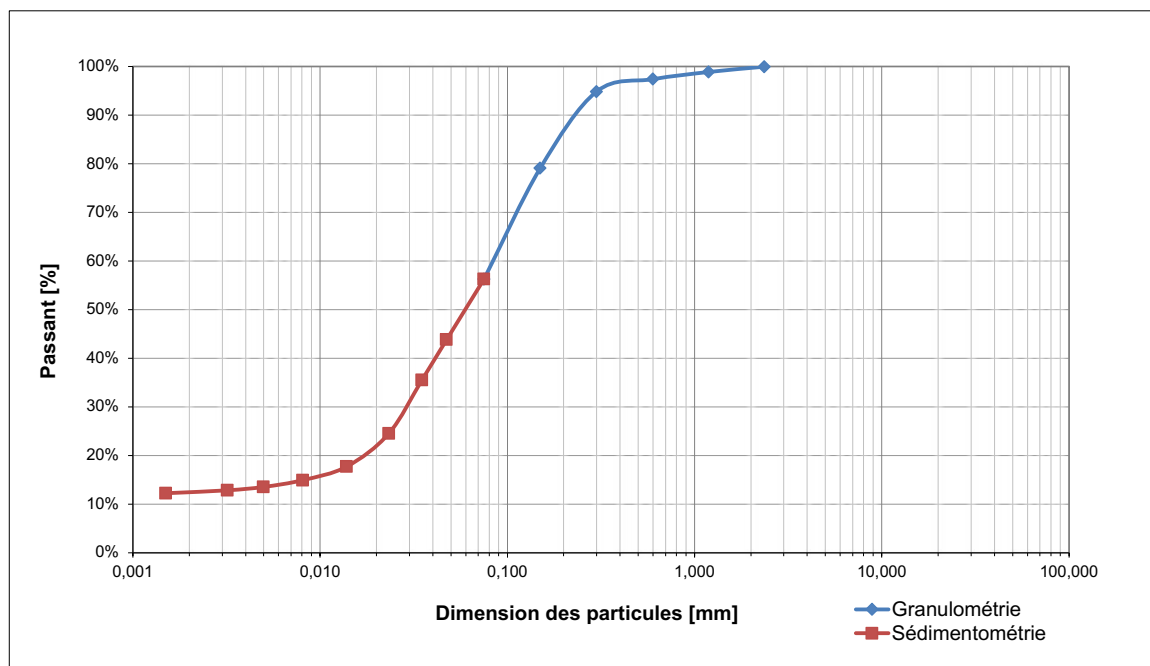


FIGURE 3.3 – Courbe granulométrique

3.2 Essais des limites d'Atterberg

Les essais à la limite d'Atterberg permettent de déterminer la consistance d'un sol, qui varie selon sa teneur en eau. En effet, l'eau du sol sera plus ou moins rapidement absorbée en fonction de sa composition en argile et en sable. Lors des manipulations, l'échantillon passera donc par plusieurs états en séchant (FIGURE 3.4) :

- De l'état liquide à plastique permettant d'évaluer la limite de liquidité w_L
- De l'état plastique à solide permettant d'évaluer la limite de plasticité w_P

La réalisation de ces essais se fait avec une granulométrie du sol inférieur à $425\ \mu\text{m}$ [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023d ; FANARA, 2021].

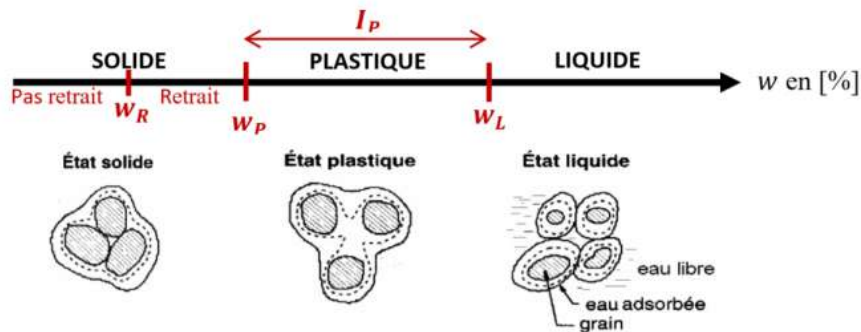


FIGURE 3.4 – Consistance du sol en fonction de sa teneur en eau w [FANARA, 2021]

Pour établir ces essais, il faut se munir du matériel suivant :

- Un plaque de verre ;
- Une coupelle de Casagrande (FIGURE 3.5a) ;
- De l'eau distillée ;
- Une spatule ;
- Une cloche en verre ;
- Un récipient et des cristallisoirs pour contenir les échantillons.



(a) Coupelle de Casagrande [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023d]



(b) Cloche en verre

FIGURE 3.5 – Matériel pour les essais des limites d'Atterberg

La première étape consiste à préparer à l'avance l'échantillon de sol qui servira pour les deux essais. Pour ce faire, il faut prélever entre 200g et 250g de sol tamisé au préalable à travers un tamis de 425 μm . La plupart du temps, ce passant provient d'un essai granulométrique par voie sèche réalisé juste avant. Ensuite, l'échantillon est progressivement humidifié avec de l'eau distillée et mélangé à l'aide d'une spatule jusqu'à obtenir une texture comparable à celle d'une "pâte à tartiner". Enfin, l'échantillon est placé dans un récipient et mis sous une cloche en verre pendant 24 heures. Cette cloche permet de maintenir une température et une humidité de l'air constantes, assurant ainsi une homogénéisation de la teneur en eau de l'échantillon [FANARA, 2021].

3.2.1 Limite de liquidité w_L

La réalisation de l'essai de limite de liquidité se fait en prenant une partie de l'échantillon préparé. La procédure suit les étapes suivantes [FANARA, 2021 ; ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023d] :

1. Étaler l'échantillon sur la plaque en verre ;
2. Malaxer et assécher légèrement l'échantillon avec la spatule ;
3. Déposer la matière dans la coupelle de Casagrande, en s'assurant d'éliminer toutes les bulles d'air en appuyant fermement avec la spatule ;
4. Créer une fente au milieu de la coupelle à l'aide de l'outil de Casagrande ;
5. Tourner la manivelle de l'appareil à un rythme de 1 coup par seconde jusqu'à ce que la fente soit refermée sur 10 mm ;
6. Noter le nombre de coups atteints pour avoir fermé la fente ;
7. Collecter un échantillon dans la zone refermée et placer le dans un cristalliseur taré à l'avance ;
8. Peser le cristalliseur rempli d'échantillon et placer le à l'étuve pendant 24h ;
9. Peser le cristalliseur avec l'échantillon séché afin de calculer sa teneur en eau ;
10. Répéter la procédure pour obtenir au moins trois points de données, en veillant à ce que l'écart entre le nombre de coups de chaque essai successif soit compris entre 5 et 10. Veiller également à ce que le point du milieu possède un nombre de coups proche de 25.

Une fois les différentes mesures prises, un graphique de la teneur en eau w en fonction du nombre de coup NC est tracé. Suite à ça, la teneur en eau pour 25 coups peut être déterminée.

Dans le cadre de ce travail, quatre points ont été réalisés et sont repris à la TABLE 3.3. Par après, la courbe de la FIGURE 3.6 a été dessinée et a permis de calculer la limite de plasticité en utilisant l'équation de la droite d'interpolation du graphique.

Nombre de coups NC	Teneur en eau w
5	28,1 %
9	27,3 %
18	26 %
28	25,3 %

TABLE 3.3 – Résultats de la limite de liquidité

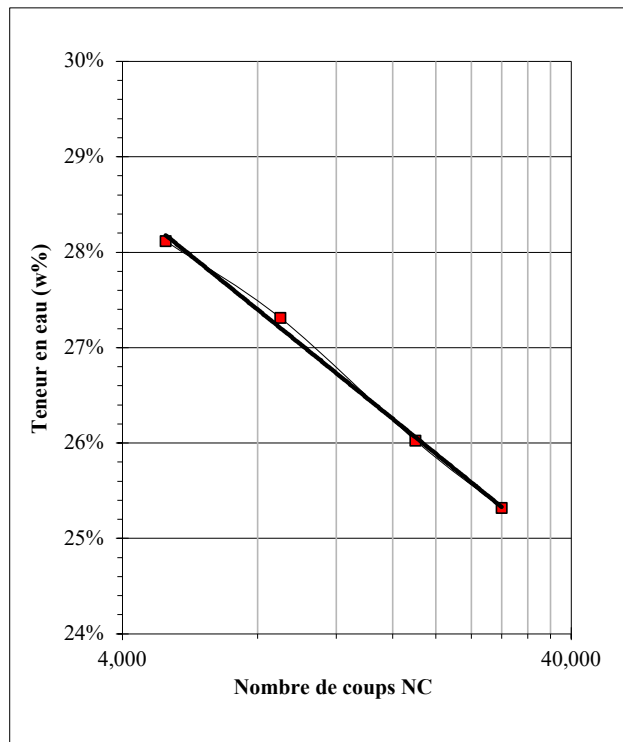


FIGURE 3.6 – Graphique du nombre de coups NC en fonction de la teneur en eau w obtenue par l'essai de la limite de liquidité

La droite d'interpolation a pour équation :

$$y = -0,0165 \cdot \ln(x) + 0,3084 \quad (3.2)$$

Ce qui donne comme valeur de limite de liquidité :

$$w_L = 25,5\% \quad (3.3)$$

3.2.2 Limite de plasticité w_P

Le restant d'échantillon de sol va être utilisé à présent pour ce test. Le but de celui-ci est de déterminer la teneur en eau en dessous de laquelle il devient impossible de confectionner des boudins de 3 mm de diamètre sans qu'ils ne se rompent ou ne s'émiettent. La procédure est la suivante [FANARA, 2021 ; ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023d] :

1. Malaxer l'échantillon à la main ou sur la plaque en verre à l'aide de la spatule afin qu'il ne soit plus collant ;
2. Prélever une petite partie d'échantillon afin d'en faire une boule ;
3. Transformer cette boule en boudin grossier sur la plaque en verre ;
4. Rouler le boudin jusqu'à obtenir un boudin fin de 3 mm de diamètre et de 100 mm de long ;
5. Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que le boudin s'effrite ou se casse avant d'atteindre le diamètre voulu ;
6. Placer les morceaux cassés dans un cristalliseur taré à l'avance ;
7. Peser le cristalliseur avec l'échantillon et placer le à l'étuve 24h ;
8. Peser l'échantillon sec dans son cristalliseur afin de déterminer la teneur en eau ;
9. Recommencer l'essai pour obtenir trois points de données.

Une fois les données de teneur en eau collectées, la moyenne arithmétique de celles-ci est calculée afin de déterminer la limite de plasticité w_P .

Dans notre cas, nous avons obtenu les teneurs en eau suivantes reprises à la TABLE 3.4

Numéro d'échantillon	Teneur en eau w
1	22,8 %
2	22,7 %
3	21,7 %
Moyenne	22,4 %

TABLE 3.4 – Résultats de la limite de plasticité

La valeur de la limite de plasticité w_p vaut donc :

$$w_P = 22,4\% \quad (3.4)$$

3.2.3 Analyse des résultats

Afin de caractériser le sol étudié, il faut calculer l'indice de plasticité I_P . Celui-ci se calcule par la formule suivante [FANARA, 2021] :

$$I_P = w_L - w_P = 25,5 - 22,4 = 3,1\% \quad (3.5)$$

Le Système Unifié de Classification des Sols (USCS) peut être utilisé pour caractériser le sol à l'aide de deux lettres composant un symbole. La description de ces lettres est reprise à la FIGURE 3.7. De plus, le sol peut être classifié en utilisant la limite de liquidité et l'indice de plasticité s'il y a plus de 50% de passant pour le diamètre 74 μm , ce qui est bien notre cas (TABLE 3.1) [FRANÇOIS, 2024]. La diagramme de Casagrande est alors tracé à la FIGURE 3.8. Notre sol, représenté par le point rouge, se situe dans la zone ML&OL, ce qui signifie qu'il est un limon de faible plasticité.

First letter		Second letter	
Symbol	Definition	Symbol	Definition
G	Gravel	P	Poorly graded
S	Sand	W	Well graded
M	Silt	H	High plasticity
C	Clay	L	Low plasticity
O	Organic		

FIGURE 3.7 – Signification des symboles dans la classification USCS [FRANÇOIS, 2024]

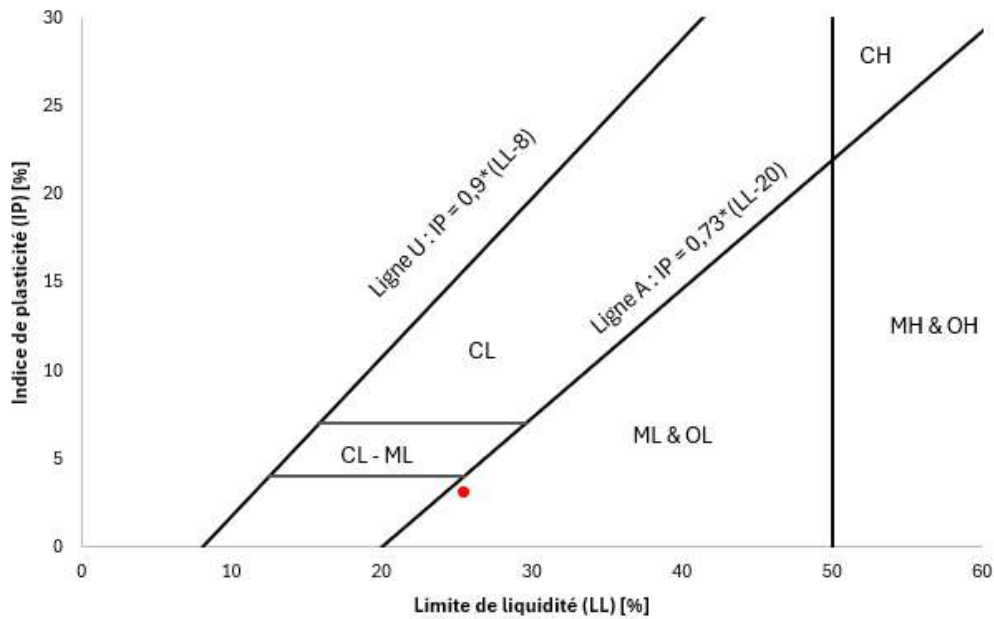


FIGURE 3.8 – Diagramme de Casagrande

3.3 Essai Proctor

Pour un sol donné, l'essai Proctor permet de déterminer le compactage optimal en fonction de la teneur en eau, permettant ainsi d'obtenir la masse volumique sèche maximale. Cet essai produit un graphique montrant l'évolution de la masse volumique sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau w . Pour ce faire, des échantillons de sol possédant des teneurs en eau différentes sont compactés. Il en ressort finalement une teneur en eau optimale w_{opt} , correspondant à l'optimum Proctor, pour une masse volumique sèche maximale.

La capacité d'un sol à se compacter est influencée par les facteurs suivants [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023e] :

- La nature du sol ;
- La teneur en eau du sol ;
- Le mode de compactage ;
- L'énergie de compactage.

Le matériel nécessaire pour réaliser cet essai comprend [FANARA, 2021] :

- Une machine de compactage automatique Proctor ou une dame pour effectuer l'essai manuellement (FIGURE 3.10) ;
- Un moule Proctor cylindrique normalisé constitué d'une embase, d'un corps et d'une rehausse (FIGURE 3.9) ;
- Du papier filtre ;
- Des seaux hermétiques pour stocker les mélanges de sol ;
- Des cristallisoirs pour contenir les échantillons.



FIGURE 3.9 – Moule Proctor



FIGURE 3.10 – Machine de compactage automatique Proctor [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023e]

La première grande étape de cet essai est la préparation des échantillons de sol à différentes teneur en eau. Il est nécessaire de préparer ces échantillons au moins 24h à l'avance afin qu'ils aient une humidité uniforme. La procédure pour un échantillon est la suivante [FANARA, 2021] :

1. Prélever 1800g de sol ;
2. Peser la quantité d'eau requise pour obtenir la teneur en eau désirée ;
3. Placer délicatement le sol et l'eau dans un des seaux prévus ;
4. Fermer le couvercle du seau et mélanger énergiquement ;
5. Stocker l'échantillon sur son couvercle pendant 24h afin que l'eau remonte par capillarité.

Comme dit précédemment, chaque échantillon a une teneur en eau w spécifique. Il est donc nécessaire de calculer la quantité d'eau à ajouter au sol à chaque fois. La méthode utilisée est la suivante. Premièrement, il est important de calculer la teneur en eau résiduelle du sol w_{res} . Une fois la teneur connue, la masse sèche de l'échantillon de sol m_d peut être calculée :

$$m_d = m \cdot (1 - w_{res}) \quad (3.6)$$

Ensuite, la masse totale (eau + sol) m_{tot} que devra faire l'échantillon est déterminée :

$$m_{tot} = m_d \cdot (1 + w) \quad (3.7)$$

Finalement, pour savoir la masse d'eau à ajouter à l'échantillon m_{ajout} , il suffit de soustraire la masse humide de départ m de la masse totale m_{tot} :

$$m_{ajout} = m_{tot} - m \quad (3.8)$$

Après le repos suffisant des mélanges, l'essai Proctor standard peut commencer. Les étapes sont [FANARA, 2021] :

1. Mesurer les dimensions du moule Proctor et calculer son volume ;
2. Peser le moule sans la rehausse pour identifier la tare ;
3. Installer la rehausse et déposer un papier filtre dans le fond ;
4. Disposer le moule dans la machine Proctor en veillant à bien l'attacher ;
5. Remplir le moule au tiers avec l'échantillon de sol ;
6. Compacter manuellement un peu la surface ;
7. Lancer un essai de 25 cycles pendant lesquels une dame tombe d'une certaine hauteur donnée ;
8. Scarifier la surface compactée pour favoriser l'adhérence à la couche suivante ;
9. Remplir le moule d'un nouveau tiers et répéter les étapes 6 à 8 ;
10. Remplir le moule avec le dernier tiers restant et relancer un cycle ;
11. Enlever la rehausse et araser l'échantillon ;
12. Peser le moule rempli de sol ;
13. Retirer l'échantillon du moule ;
14. Prélever une petite partie centrale du sol et placer la dans un cristalliseur taré à l'avance ;
15. Peser le cristalliseur contenant le bout d'échantillon et placer le à l'étuve ;
16. Peser ce même cristalliseur 24h après afin de pouvoir calculer la vraie teneur en eau de l'échantillon ;
17. Répéter l'essai pour chaque échantillon.

3.3.1 Analyse des résultats

Dans le cadre de ce travail, cinq échantillons ont été préparés. Les teneurs en eau sont de 8, 12, 15, 18 et 22%. Le même moule Proctor a été utilisé pour tous les essais. Son volume vaut :

$$V = 0,939 \text{ dm}^3 \quad (3.9)$$

Et sa tare vaut :

$$T = 4562 \text{ g} \quad (3.10)$$

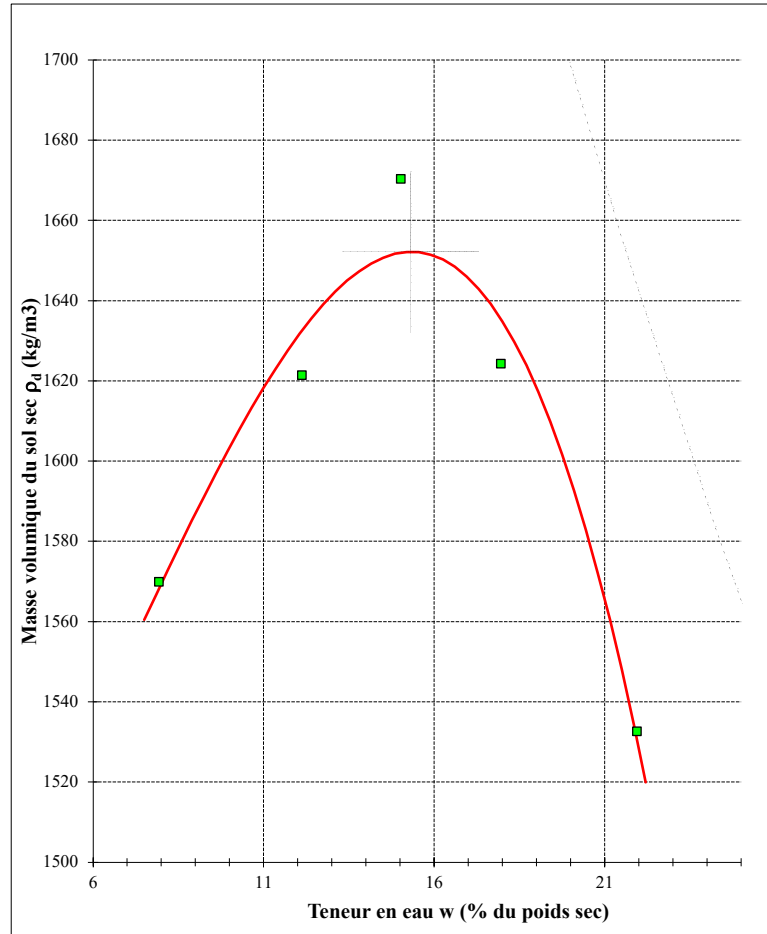
La TABLE 3.5 reprend les valeurs mesurées pour calculer la vraie teneur en eau des échantillons. Les mesures effectuées sur les échantillons obtenus du moule Proctor sont reprises dans la TABLE 3.6. Finalement, grâce à ces données, la courbe de la FIGURE 3.11 peut être tracée.

w estimé	8 %	12 %	15 %	18 %	22 %
$P_h + T$ [g]	1855,9	1973,9	2069,8	2057,9	2010,6
$P_s + T$ [g]	1739,3	1789,8	1834,7	1784,6	1695,9
T [g]	268,3	270,2	269,1	262,3	261,7
w	7,9 %	12,1 %	15 %	18 %	21,9 %

TABLE 3.5 – Résultats des essais Proctor pour la détermination des teneurs en eau

w estimé	8 %	12 %	15 %	18 %	22 %
$P_h + T$ [g]	6153	6269	6366	6361	6317
T [g]	4562				
P_h [g]	1591	1707	1804	1799	1755
V [dm ³]	0,939				
ρ [kg/m ³]	1694	1818	1921	1916	1869
ρ_d [kg/m ³]	1570	1621	1670	1624	1533

TABLE 3.6 – Résultats des essais Proctor pour la détermination des masses volumiques sèches

FIGURE 3.11 – Courbe de la teneur en eau w en fonction de la masse volumique sèche ρ_d obtenue par essai Proctor

L'optimum Proctor vaut :

$$w_{opt} = 15,3\% \quad (3.11)$$

La masse volumique sèche maximale a une valeur de :

$$\rho_{d,opt} = 1652 \text{ kg/m}^3 \quad (3.12)$$

Ces valeurs sont caractéristiques d'un sol limoneux.

Chapitre 4

Étude expérimentale

Dans ce chapitre, les matériaux utilisés pour l'étude expérimentale, ainsi que leur préparation, seront présentés. Ensuite, les essais effectués en laboratoire seront décrits. Parmi ces essais figurent l'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial. Finalement, la procédure de caractérisation des racines sera développée.

4.1 Matériaux

Pour mener à bien l'étude expérimentale, deux matériaux sont nécessaires. En effet, l'objectif de ce travail étant d'évaluer l'amélioration de la résistance mécanique des sols grâce aux racines, les matériaux requis sont donc un sol et des racines.

4.1.1 Sol

Le sol utilisé dans ce travail est celui qui a été caractérisé dans le chapitre précédent, à savoir un sol limoneux de faible plasticité.

4.1.2 Racines

En ce qui concerne les racines, deux plantes différentes ont été choisies : le trèfle blanc (*Trifolium repens*) et le plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*). Ces deux plantes ont été sélectionnées pour plusieurs raisons. La première est qu'elles sont couramment présentes en Belgique, que ce soit dans les prés ou les jardins, ce qui démontre leur capacité à pousser facilement dans la région. La deuxième est leur croissance rapide. En effet, il fallait des plantes qui puissent grandir rapidement afin de pouvoir réaliser des essais dans le temps imparti du travail. Enfin, il était crucial de choisir des plantes adaptées à un type de sol similaire à celui utilisé dans l'étude.

Le système racinaire du plantain est de type pivotant, bien qu'il soit peu développé et accompagné de racines fibreuses. En revanche, le système racinaire du trèfle est proche de la surface du sol et se compose de racines fasciculées denses [CRAAQ, 2024]. Étant donné que les deux types de racines sont différents, il était intéressant de les tester pour observer s'il existe des différences en termes de résistance mécanique.

4.2 Préparation des matériaux

Avant de disposer d'échantillons à tester, il est nécessaire de préparer les matériaux.

4.2.1 Préparation des caisses

La première étape de préparation consiste à fabriquer les contenants dans lesquels les plantes pourront pousser. Ces contenants sont des caisses en bois initialement utilisées pour transporter les carottages. Chaque caisse mesure 10,5 cm de hauteur, 22,3 cm de largeur et 100,6 cm de longueur. Le matériel nécessaire à cette préparation comprend :

- Un malaxeur (FIGURE 4.1);
- Du Sable;
- Une brosse;
- Un géotextile en feutre.



FIGURE 4.1 – Malaxeur

Quatre caisses ont été préparées car il a été décidé de réaliser des tests sur trois durées de croissance différentes. Une caisse est destinée à chaque semaine de test plus une caisse de secours en cas de problème. La procédure pour préparer une caisse suit les étapes suivantes :

1. Couper les cordes qui maintiennent le couvercle à la boîte et retirer le complètement;
2. Brosser la caisse pour enlever les anciens résidus de terre;
3. Placer une couche de géotextile au fond de la caisse en remontant légèrement sur les bords;
4. Ajouter une couche de sable d'un centimètre d'épaisseur;
5. Placer une deuxième couche de géotextile par-dessus en laissant dépasser légèrement à l'extérieur de la caisse;
6. Broyer la terre avec le malaxeur pour éliminer les gros grains et obtenir une texture fine;
7. Remplir la caisse de terre, en laissant un espace de deux centimètres entre la surface de la terre et le bord de la caisse;
8. Compacter la terre avec les mains;
9. Refermer la caisse avec le couvercle pour faciliter son transport.

Ces étapes sont répétées pour chaque caisse. Une caisse est visible à la FIGURE 4.2.

Il a été décidé de placer un géotextile au fond de la caisse pour faciliter l'extraction de l'échantillon. En effet, si l'échantillon est difficile à glisser vers l'extrémité, il peut être saisi en soulevant le géotextile. De plus, le géotextile assure la séparation entre la couche de sable drainante et le sol tout en permettant le passage de l'eau. Pour favoriser la croissance des racines, il est conseillé d'avoir un niveau de compactage du sol faible, c'est-à-dire éloigné de l'optimum Proctor. Dans notre étude, le compactage du sol a été réalisé manuellement pour répondre à cette exigence. La teneur en eau du sol a été mesurée à 18,9%. En connaissant le volume du sol contenu dans la caisse ainsi que sa masse correspondante, la densité sèche obtenue a pu être calculée et s'élève à 894 kg/m^3 .



FIGURE 4.2 – Caisse servant de contenant pour les plantes

4.2.2 Préparation des cylindres

Des cylindres ont également été préparés comme contenants pour faciliter la création des échantillons destinés à l'essai triaxial. Étant donné que cet essai nécessite des échantillons de forme cylindrique, il a été jugé plus pratique de faire pousser directement les échantillons dans cette forme plutôt que de découper des cylindres à partir d'une caisse, par exemple. Les cylindres utilisés proviennent également de matériaux récupérés précédemment utilisés par le laboratoire de géotechnologies. Leur diamètre intérieur est de 5 cm et leur hauteur de 12 cm.

La préparation d'un cylindre consiste à fixer et coller un morceau de géotextile en feutre autour de l'extrémité inférieure, ce qui permet de créer un fond au tube et d'empêcher la terre de s'échapper. Ensuite, le cylindre est rempli de terre et compacté à la main.

4.2.3 Croissance des racines

Pour obtenir des racines, il est nécessaire de faire germer les graines. La germination d'une plante requiert principalement de la lumière, de la chaleur, de l'eau et des nutriments. Étant donné que la procédure de germination a commencé pendant la période hivernale, il a fallu trouver un endroit où ces conditions étaient réunies. Grâce à la collaboration de l'Institut de Botanique de l'Université de Liège, les plantes ont pu être placées dans des serres, offrant ainsi des conditions optimales pour leur croissance. Il est important de savoir que chaque plante a été préparée et a grandi dans les mêmes conditions. Cependant, les paramètres appliqués dans les serres ne sont pas connus, car l'objectif était simplement d'obtenir des plantes, et donc des racines, qui grandissent, peu importe les conditions dans lesquelles cela se produisait.

Avant de démarrer la phase de croissance des semis nécessaires aux tests expérimentaux, une phase préliminaire a été réalisée afin de déterminer le taux de germination de chaque espèce et de vérifier que les conditions dans lesquelles elles étaient cultivées leur convenaient. Cette phase préliminaire a également permis de déterminer la durée de croissance idéale entre l'étape de graine et celle de plante pour que ces dernières puissent être utilisées comme échantillons. Il a été observé au cours de cette phase que le sol se desséchait rapidement, ce qui freinait voire stoppait la germination et la croissance des plantes. Par conséquent, il a été décidé d'utiliser un autre substrat, composé principalement de tourbe, pour la germination des semis jusqu'à ce que les plantes soient prêtes à être transplantées dans nos caisses de sol pour établir les échantillons. Les graines germent d'abord dans des godets (FIGURE 4.3) pendant deux semaines, puis elles seront transplantées dans de petits pots (FIGURE 4.4) où elles resteront trois semaines avant une dernière transplantation dans nos caisses en bois et cylindres. Ce processus a été jugé le plus adapté pour nos plantes. En effet, commencer la germination dans des godets puis les transférer dans de petits pots permet de maintenir l'humidité et la chaleur du sol, favorisant une germination optimale. De plus, l'espace restreint encourage un développement racinaire compact, facilitant ainsi les transplantations ultérieures.



FIGURE 4.3 – Godets de plantain



FIGURE 4.4 – Petits pots de plantain et trèfle

La phase de croissance des racines a consisté à faire pousser 230 semis de trèfle et 230 semis de plantain. Ce nombre a été choisi en fonction du nombre de plantes nécessaires par échantillon, en prévoyant une marge de sécurité en cas de problèmes. En ce qui concerne les caisses, comme celles-ci mesurent un mètre de long et font 22 cm de large, elles ont été divisées en cinq sections approximatives de 20×20 cm, chacune subdivisée en quatre carrés de 10×10 cm. Dans chacun de ces carrés, cinq plantes ont été disposées en quinconce.

Les trois caisses destinées aux essais contenaient chacune trois carrés de 20×20 cm avec du trèfle et un carré avec du plantain. La dernière section comportait deux carrés de 10×10 cm, également plantés de plantain. Le nombre de plantains était inférieur à celui des trèfles en raison d'un problème lors de la première transplantation, qui a entraîné la perte d'un tiers des plantes. De nouveaux semis ont été réalisés immédiatement après mais ils avaient deux semaines de retard de croissance par rapport aux autres. La caisse de secours contenait un carré de 20×20 cm de trèfle, un autre de plantain, ainsi qu'un carré de 10×10 cm de plantain. Le reste de l'espace a été complété par les plantes ayant un temps de croissance réduit. La composition des trois caisses de test a été soigneusement choisie pour garantir la disponibilité du nombre minimum de petits carrés nécessaires à la réalisation d'un essai de cisaillement et à la caractérisation des racines. Les autres carrés servent de réserve en cas de problèmes ou de dommages lors de la procédure de fabrication des échantillons qui sera expliqué dans la section suivante. Les quatre caisses sont visibles à la FIGURE 4.5.



FIGURE 4.5 – Quatre caisses contenant du plantain et du trèfle

Les cylindres étaient au nombre de quatre pour chaque espèce. Dans chaque cylindre, trois plantes ont été disposées en triangle. De plus, des cylindres transparents ont été remplis de la même façon de trèfle ou de plantain, ce qui a permis d'observer l'évolution des racines en temps réel. Pour réaliser un essai triaxial, il était nécessaire que l'échantillon cylindrique soit entièrement rempli de racines sur toute sa hauteur. Ne sachant pas combien de temps cela prendrait, ces cylindres transparents ont été utilisés pour suivre l'avancement. La FIGURE 4.6 montre les cylindres.



FIGURE 4.6 – Cylindres de plantain et de trèfle

L'étape de transplantation des plantes dans les caisses ou les cylindres était délicate, car il était crucial de ne pas endommager les racines lors de la manipulation. Le matériel nécessaire était un tournevis plat et un mètre, la procédure établie pour une caisse a été la suivante :

1. Mesurer et diviser la caisse en cinq zones carrées de 20×20 cm en traçant légèrement une ligne avec le tournevis ;
2. Subdiviser chaque carré de 20×20 cm en quatre carrés de 10×10 cm en traçant légèrement une ligne avec le tournevis ;
3. Creuser des trous en quinconce dans chaque petit carré ;
4. Retirer délicatement une plante du petit pot à l'aide du tournevis en effectuant un mouvement de levier ;
5. Tapoter doucement les racines de la plante contre la paume de la main pour enlever un maximum de terre ;
6. Frotter délicatement la masse racinaire avec les doigts pour retirer les résidus de terre ;
7. Placer la plante dans l'un des trous ;
8. Remplir le trou avec de la terre et tasser fermement autour de la plante pour éliminer l'air ;
9. Répéter les étapes 4 à 8 jusqu'à ce que la caisse soit remplie ;
10. Arroser la caisse.

La procédure pour les cylindres est similaire, à l'exception qu'il suffit de réaliser trois trous disposés en triangle.

4.3 Préparation des échantillons

Dans cette section, la préparation des échantillons destinés aux essais de cisaillement direct et triaxial est détaillée.

4.3.1 Essai cisaillement direct

Pour réaliser un essai complet de cisaillement direct, trois échantillons sont nécessaires. Un échantillon correspond à un carré de 10×10 cm provenant de l'une des caisses. Il faut donc sortir chaque échantillon un à un de la caisse. Le matériel nécessaire est constitué de :

- Un moule métallique carré de 20×20 cm ;
- Un moule carré métallique de 10×10 cm utilisé habituellement pour mettre l'échantillon dans la boîte de Casagrande ;
- Plusieurs plaques en plastiques rigides de 20×20 cm ;
- Un morceau de frigolite de 20×20 cm ;
- Un cutter ;
- Deux spatules ;
- Une latte ;
- Un morceau de géotextile ;
- Un grand récipient ;
- Des cristallisoirs.

Après avoir récupéré une des caisses dans les serres, la procédure suivante est réalisée avec délicatesse :

1. Placer la caisse sur une table ;
2. Ouvrir la caisse par l'un de ses petits côtés ;
3. Insérer le grand moule métallique autour de la section de 20×20 cm la plus proche de l'extrémité ouverte de la caisse ;
4. Découper, à l'aide du cutter, la portion d'échantillon délimitée par le moule ;
5. Positionner une plaque en plastique rigide à l'extrémité ouverte de la caisse ;
6. Faire glisser doucement le moule, et ainsi l'échantillon, hors de la caisse, en veillant à ce qu'il repose bien sur la plaque en plastique ;
7. Découper et enlever les feuilles des plantes de manière à laisser qu'un centimètre de tige visible ;
8. Insérer la plaque de frigolite dans le moule contenant l'échantillon ;
9. Retourner l'échantillon de sorte que le côté soutenu par la frigolite soit placé sur la table ;
10. Positionner le géotextile sur la face où se trouve la plaque en plastique. Veiller à laisser dépasser suffisamment de géotextile de chaque côté de l'échantillon pour faciliter sa manipulation ;
11. Retourner à nouveau l'échantillon et le plonger dans un récipient contenant un petit fond d'eau pendant 15 minutes ;
12. Retirer l'échantillon de l'eau et le déposer face frigolite sur la table ;
13. Enlever le géotextile et patienter 15 minutes pour permettre à l'eau de se diffuser vers le fond de l'échantillon ;
14. Remettre l'échantillon dans sa position initiale et retirer délicatement la frigolite, puis le grand moule ;
15. Insérer légèrement le petit moule sur l'un des carrés de 10×10 cm de l'échantillon ;
16. Découper le petit échantillon autour de son moule à l'aide des spatules ;
17. Faire glisser ce petit échantillon sur une autre plaque en plastique à l'aide des spatules ;
18. Enfoncer le moule de 10×10 cm jusqu'à ce qu'il y ait 1,5 cm entre lui et la surface ;
19. Couper la base de l'échantillon en dessous du moule à l'aide du cutter ;
20. Faire glisser une spatule en dessous du moule de manière à poser l'échantillon dessus ;
21. Placer l'échantillon découpé sur une nouvelle plaque en plastique ;
22. Compacter l'échantillon pour s'assurer que le moule soit bien rempli ;
23. Couper le surplus d'échantillon au-dessus du moule à l'aide du cutter ;
24. Compacter de nouveau et araser l'échantillon ;
25. Peser la plaque avec l'échantillon dans son moule et noter la masse ;
26. Placer l'échantillon dans la boîte de Casagrande, comme expliqué dans la section 4.4.1 ;
27. Peser la plaque et le moule vides pour calculer et noter la masse de l'échantillon ;
28. Déposer les morceaux de surplus dans un cristalliseur taré à l'avance ;
29. Peser le cristalliseur et placer le 24h à l'étuve ;
30. Peser le cristalliseur pour calculer la teneur en eau de l'échantillon.

Pour les deux autres échantillons, recommencer la procédure à partir de l'étape 15. Les étapes sont visibles aux FIGURES 4.7, 4.8, 4.9 et 4.10

Lors de la procédure, l'échantillon doit tremper dans l'eau car il est trop sec pour être manipulé. En effet, s'il n'est pas humidifié, il devient très difficile d'enfoncer les petits moules ou de découper les surplus.

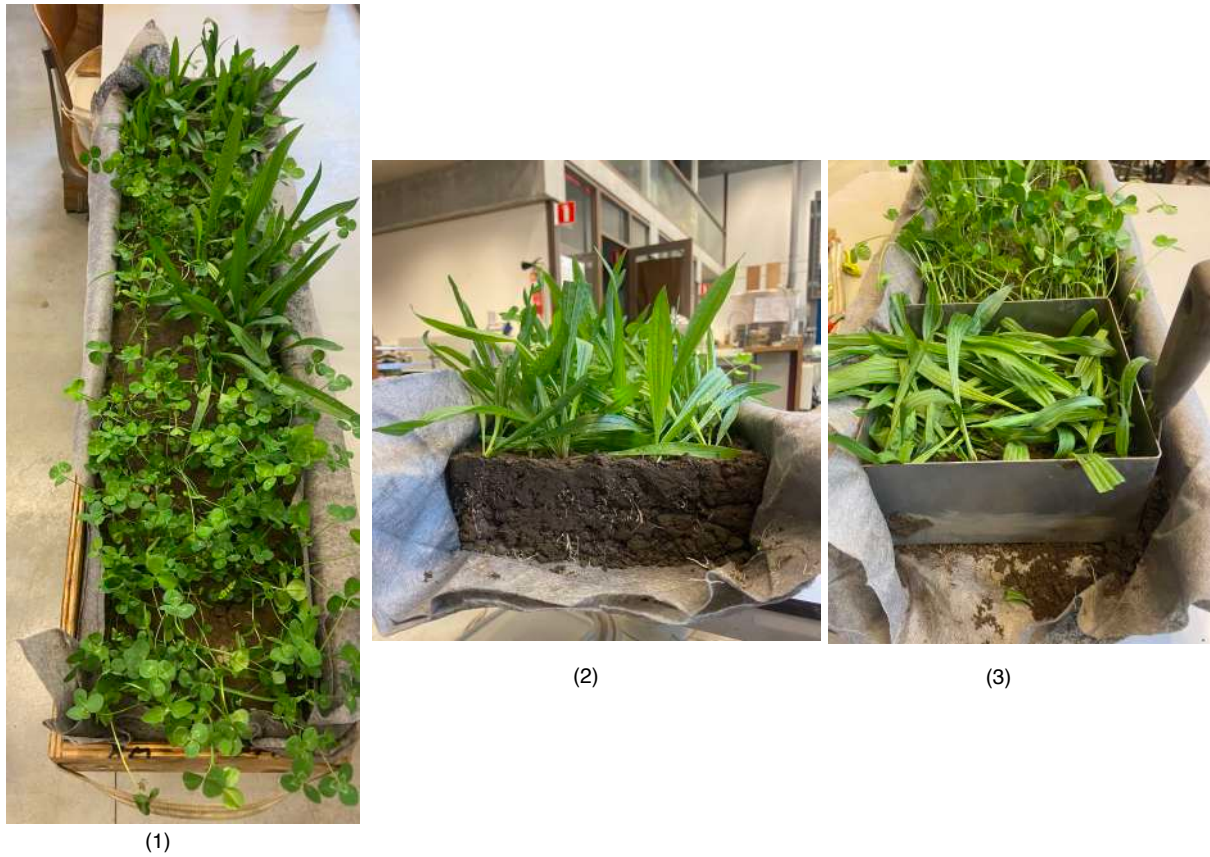


FIGURE 4.7 – Échantillon cisaillement direct : étapes 1, 2 et 3



FIGURE 4.8 – Échantillon cisaillement direct : étapes 6 et 7



(8)



(11)



(13)

FIGURE 4.9 – Échantillon cisaillement direct : étapes 8, 11 et 13



(14), (15)



(17), (19), (21)



(24)

FIGURE 4.10 – Échantillon cisaillement direct : étapes 14, 15, 17, 19, 21 et 24

4.3.2 Essai triaxial

Pour réaliser un essai triaxial complet, trois échantillons cylindriques sont nécessaires. Ces échantillons sont prélevés à partir des cylindres contenant le sol et les plantes. Le matériel requis inclut une petite lame pour scie, une latte et un cristalliseur. La procédure pour préparer un échantillon est la suivante :

1. Couper et enlever les feuilles des plantes présentes dans l'échantillon ;
2. Extraire l'échantillon du cylindre (FIGURE 4.11) ;
3. Mesurer la hauteur et le diamètre de l'échantillon ;
4. Couper, à l'aide de la petite scie, le surplus de terre d'une hauteur d'environ 1,5 centimètres se situant au niveau des feuilles afin d'obtenir une hauteur d'échantillon entre 9 et 10 centimètres ;
5. Peser l'échantillon et noter la valeur obtenue ;
6. Placer le morceau de terre coupé dans un cristalliseur préalablement taré ;
7. Peser le cristalliseur et placer le à l'étuve pendant 24h ;
8. Peser le cristalliseur pour déterminer la teneur en eau de l'échantillon.

La procédure est répétée pour les autres échantillons. La FIGURE 4.12 montre un échantillon prêt pour l'essai triaxial.



FIGURE 4.11 – Échantillon triaxial : étape 2



FIGURE 4.12 – Échantillon final pour essai triaxial

4.4 Essais effectués

Dans le cadre de ce travail, deux types d'essais ont été réalisés au laboratoire de géotechnologies de l'Université de Liège. Le premier est un test de cisaillement direct et le second est un essai triaxial. Les deux essais permettent de déterminer la cohésion et l'angle de frottement d'un sol grâce au critère de rupture de Mohr-Coulomb.

4.4.1 Essai de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct permet de mesurer la résistance d'un sol au cisaillement, et d'en déduire un angle de frottement ainsi qu'une cohésion caractérisant cette résistance. Ces paramètres sont essentiels dans les études de stabilité des terrains, comme celles des talus [ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023c].

Dans le cadre de ce travail, l'essai de cisaillement direct a été effectué avec des échantillons carrés de 10×10 cm immergés dans l'eau afin d'éliminer l'effet de succion des racines. Le matériel nécessaire pour l'essai est constitué de :

- Une boîte de Casagrande (FIGURE 4.13) ;
- Un banc de cisaillement (FIGURE 4.14) ;
- Des capteurs pour les mesures de déplacement vertical et horizontal ;
- Des pierres poreuses ;
- Un moule carré métallique de 10×10 cm.



FIGURE 4.13 – Boîte de Casagrande



FIGURE 4.14 – Banc de cisaillement

L'essai consiste à placer l'échantillon préparé (Section 4.3.1) entre deux plaques de maintien perforées, entourées de pierres poreuses, dans une boîte de cisaillement de Casagrande. Cette boîte est composée de deux demi-boîtes : la supérieure est fixe tandis que l'inférieure est mobile. Le plan de cisaillement de l'échantillon correspond au plan de séparation des deux demi-boîtes. Une fois la boîte placée dans l'appareil de cisaillement, elle est fixée et immergée dans de l'eau distillée pour saturer l'échantillon. La saturation est atteinte lorsqu'il n'y a plus de variation dans le déplacement vertical mesuré par les capteurs de la machine. À ce stade, l'essai peut commencer. Les capteurs de déplacement sont remis à zéro, et la phase de consolidation est lancée. Cette phase consiste à appliquer une force verticale N constante sur l'échantillon à l'aide de poids. La phase de consolidation se termine lorsqu'un plateau est observé dans le déplacement vertical. Ensuite, la phase de cisaillement commence. Le déplacement horizontal de la boîte est libéré et une force horizontale T croissante est appliquée par un vérin hydraulique ou mécanique sur la partie inférieure jusqu'à la rupture de l'échantillon [CHARLIER et al., 2017 ; ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES, 2023c]. La FIGURE 4.15 représente le principe de l'essai de cisaillement.

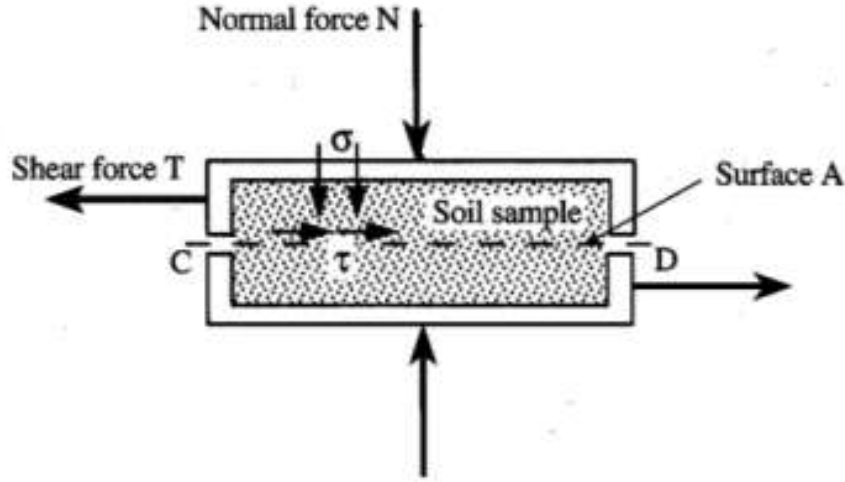


FIGURE 4.15 – Principe de l'essai de cisaillement direct [FRANÇOIS, 2024]

Dans le cadre de nos essais, la contrainte normale appliquée est de 23, 45, et 83 kPa pour les trois échantillons. Les résultats obtenus permettent de tracer les graphiques de l'évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal ainsi que de l'évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale. Sur ce dernier graphique, un pic ou un palier apparaît pour chaque courbe, correspondant à la rupture de l'échantillon testé. Cette valeur de rupture correspond au maximum du rapport entre la contrainte tangentielle et la contrainte normale. En reliant ces trois pics par interpolation, on obtient la droite du critère de Mohr-Coulomb, qui permet de calculer la cohésion c et l'angle de frottement ϕ de l'échantillon par l'équation suivante [CHARLIER et al., 2017] :

$$\tau = \tan\phi \cdot \sigma_N + c \quad (4.1)$$

4.4.2 Essai triaxial

L'essai de compression triaxiale, couramment appelé essai triaxial, permet d'évaluer le comportement du sol lors du cisaillement. Cet essai offre la possibilité de contrôler plusieurs paramètres essentiels, notamment la contrainte de confinement, la contrainte axiale et la pression interstitielle de l'échantillon. Une fois ces paramètres connus, l'état de contrainte peut être représenté de manière claire à l'aide d'un cercle de Mohr sur le diagramme approprié [FRANÇOIS, 2024].

Pour notre étude, un essai triaxial consolidé drainé a été réalisé. L'échantillon de sol, préparé en forme de cylindre (voir Section 4.3.2), est d'abord équipé de bandes de papier filtre sur ses parois extérieures pour améliorer la saturation, puis placé entre des pierres poreuses connectées au système de drainage. Un capuchon est ensuite placé sur la pierre poreuse supérieure, et l'échantillon est entouré d'une membrane en caoutchouc avant d'être inséré dans une cellule de confinement [FRANÇOIS, 2024]. Un schéma ainsi qu'une photo de l'appareil triaxial sont présentés aux FIGURES 4.16 et 4.17.

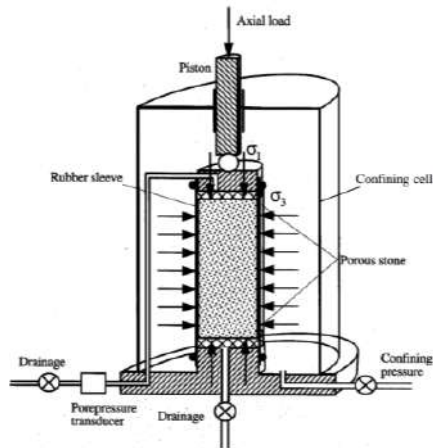


FIGURE 4.16 – Schéma de l'appareil triaxial
[FRANÇOIS, 2024]



FIGURE 4.17 – Appareil triaxial

L'essai triaxial se déroule en plusieurs étapes distinctes [FRANÇOIS, 2024] :

- Phase de saturation : Avant de procéder aux essais triaxiaux, il est crucial de saturer l'échantillon de sol. Pour ce faire, de l'eau sous pression est injectée dans l'échantillon par un côté du circuit de drainage, tandis que les bulles d'air sont évacuées par l'autre côté qui est ouvert. Pour éviter que la membrane en caoutchouc gonfle, la pression de confinement doit être appliquée de façon à être au moins égale à la pression d'eau appliquée. La saturation de l'échantillon est considérée comme atteinte lorsque le sol ne contient plus d'air, c'est-à-dire quand le débit d'eau injectée égale celui de l'eau évacuée.
- Application de la pression de confinement : La pression de confinement est appliquée uniformément dans toutes les directions, créant ainsi une pression isotrope dans la cellule de confinement (avec $\sigma_1 = \sigma_3$). Durant cette phase, les valves du système de drainage sont ouvertes pour permettre au sol de se consolider en évacuant l'eau excédentaire. Une fois que le débit d'eau expulsé devient presque nul, la consolidation est jugée complète. Le changement de la contrainte effective est alors égal à la variation de la pression de confinement.
- Phase de compression : Durant cette étape, la contrainte axiale (σ_1) est augmentée tandis que la pression de confinement (σ_3) reste constante. Afin de réaliser un essai en conditions consolidées drainées, les circuits de drainage sont ouverts et la pression interstitielle induite par le chargement se dissipe progressivement grâce à l'application lente de la compression. En conséquence, la pression interstitielle se stabilise uniformément à travers l'échantillon et est équivalente à la pression exercée par le circuit de drainage, qui est généralement égale à zéro.

L'objectif de l'essai triaxial est de déformer et de cisiller un échantillon de sol en appliquant une différence entre la contrainte axiale et la pression de confinement, créant ainsi une contrainte déviatorique ($q = \sigma_1 - \sigma_3$). Cette contrainte est évaluée à l'aide du cercle de Mohr, qui grandit à mesure que la contrainte axiale augmente, jusqu'à atteindre la contrainte déviatorique maximale que le sol peut supporter avant de se rompre. Pour déterminer le critère de rupture, trois essais avec différentes pressions de confinement sont réalisés. Dans le cadre de notre travail, les pressions de confinement qui ont été appliquées sont de 20, 50 et 100 kPa. Les cercles de Mohr obtenus permettent de tracer une enveloppe de rupture, représentée par une droite tangente aux cercles, définissant les paramètres de résistance du sol comme expliqué précédemment dans la méthode du cisaillement direct (FIGURE 4.18) [FRANÇOIS, 2024].

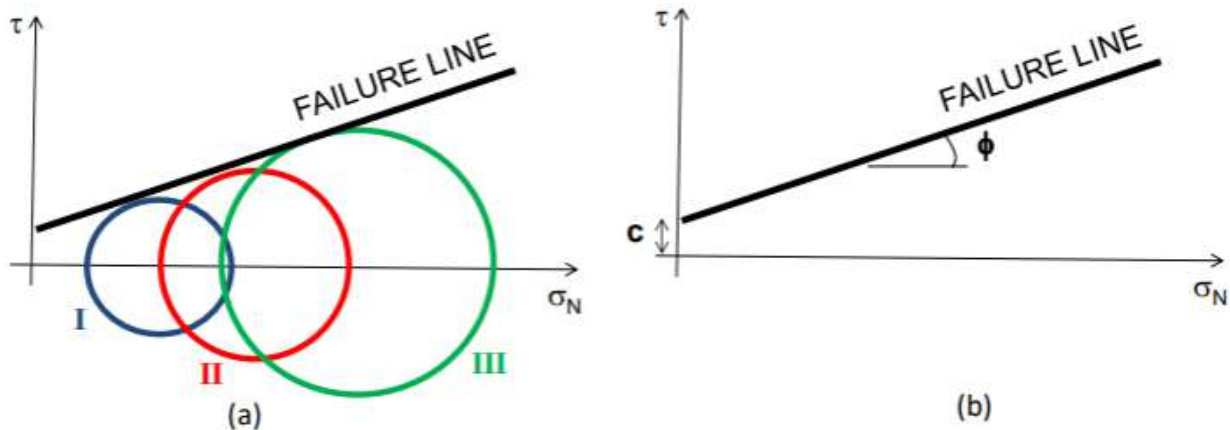


FIGURE 4.18 – (a) L'enveloppe de rupture et (b) les paramètres de résistance déduits [FRANÇOIS, 2024]

4.5 Caractérisation des racines

Afin de faire le lien entre la résistance mécanique du sol végétalisé et les racines qui le composent, il est nécessaire de caractériser ces racines. Cette section décrira donc le processus de récupération des racines d'un échantillon de 10×10 cm prélevé dans une caisse. Les procédures pour caractériser la distribution du réseau racinaire seront ensuite détaillées.

4.5.1 Récupération des racines

Comme expliqué précédemment, une caisse contient des carrés de plantes pour les essais de laboratoire ainsi que d'autres pour la caractérisation des racines. Il a été choisi de prélever des échantillons distincts mais ayant grandi dans les mêmes conditions car la mesure est destructive. En effet, pour caractériser les racines, il est nécessaire de les retirer du sol, ce qui rend l'échantillon inutilisable pour les essais mécaniques. La caractérisation des racines s'est toujours déroulée le lendemain du test de cisaillement, ce qui signifie que la caisse contenant les carrés de plantes est déjà ouverte.

Le matériel utilisé est le suivant :

- Un moule métallique carré de 20×20 cm ;
- Un moule carré métallique de 10×10 cm utilisé habituellement pour mettre l'échantillon dans la boîte de Casagrande ;
- Plusieurs plaques en plastiques rigides de 20×20 cm ;
- Deux spatules ;
- Un cutter ;
- Un morceau de géotextile ;
- Un grand récipient ;
- Un seau rempli d'eau.

La procédure de récupération des racines est la suivante :

1. Insérer le grand moule métallique autour de la section de 20×20 cm la plus proche de l'extrémité ouverte de la caisse ;
2. Découper, à l'aide du cutter, la portion d'échantillon délimitée par le moule ;
3. Positionner une plaque en plastique rigide à l'extrémité ouverte de la caisse ;
4. Faire glisser doucement le moule, et ainsi l'échantillon, hors de la caisse, en veillant à ce qu'il repose bien sur la plaque en plastique ;
5. Poser la plaque soutenant l'échantillon sur un morceau de géotextile en laissant suffisamment de matière dépasser de chaque côté pour faciliter la manipulation ;
6. Soulever l'échantillon en le tenant par le géotextile et plonger le dans un récipient contenant un fond d'eau pendant 15 minutes ;
7. Retirer l'échantillon de l'eau et attendre 15 minutes ;
8. Retirer délicatement le grand moule ;
9. Insérer légèrement le petit moule sur l'un des carrés de 10×10 cm de l'échantillon ;
10. Découper le petit échantillon autour de son moule à l'aide des spatules ;
11. Faire glisser ce petit échantillon sur une autre plaque en plastique à l'aide des spatules ;
12. Découper les feuilles des cinq plantes à ras de la surface du sol et les placer à l'écart sur une plaque en plastique, en indiquant le numéro de chaque plante ;
13. Prendre le bloc de sol enraciné restant et le plonger délicatement dans un seau rempli d'un fond d'eau pendant cinq minutes pour enlever le sol entourant les racines ;
14. Retirer l'échantillon du seau avec douceur et changer l'eau du seau (FIGURE 4.19) ;
15. Répéter les étapes 13 et 14 jusqu'à obtenir les cinq réseaux racinaires débarrassés de toute terre ;
16. Placer les racines sur une planche en notant le numéro de chaque plante (FIGURE 4.20).



FIGURE 4.19 – Récupération des racines : étape 14 (les cinq racines sont entourées en rouge)



FIGURE 4.20 – Récupération des racines : étape 16

Lors du lavage des racines, même si la procédure est réalisée avec précaution, il y a inévitablement des pertes. Bien que ces pertes soient minimales et n'aient pas été quantifiées, il est important de les mentionner pour en tenir compte dans l'interprétation des résultats.

4.5.2 Mesure de la biomasse

Maintenant que les échantillons ont été lavés, la caractérisation peut commencer. L'un des critères choisis est la biomasse, qui correspond à l'ensemble de la masse de la plante provenant de l'échantillon de sol. La biomasse peut être exprimée en poids sec ou frais [LAROUSSE, 2024]. Elle se divise également en biomasse aérienne pour la partie au-dessus du sol et en biomasse racinaire pour les racines. Dans ce travail, la biomasse sera exprimée en poids frais, car cette méthode est plus simple et permet de limiter les pertes de matière. La mesure de la biomasse a été choisie pour caractériser les racines car elle est facile et rapide à réaliser, et elle montre clairement la croissance du réseau racinaire. En effet, lorsqu'il se développe, le réseau racinaire s'allonge et peut former d'autres racines secondaires, ce qui augmente automatiquement la masse.

Après avoir lavé les échantillons comme décrit dans la section précédente, un délai d'une heure s'est écoulé avant de commencer les mesures de biomasse. La procédure de mesure est identique pour les parties aérienne et racinaire. Tout d'abord, il faut tarer une plaque en plastique rigide. Ensuite, cette plaque est placée sur la balance pour servir de support aux parties à peser. Il suffit alors de placer chaque partie, une à une, sur la plaque et de les peser pour déterminer leur biomasse en grammes.

4.5.3 Mesure de la largeur et de l'angle d'ouverture

Après la mesure de la biomasse, il est possible de déterminer la largeur du réseau racinaire ainsi que son angle d'ouverture. Ces deux méthodes ont été choisies pour quantifier la densité du réseau racinaire. En effet, un réseau plus dense entraîne une plus grande distance entre les racines aux extrémités et un angle d'ouverture plus large. Pour effectuer ces mesures, deux approches ont été utilisées :

- Première méthode (FIGURE 4.21) : Les racines ont été placées de manière à être couchées dans un récipient transparent rempli d'un fond d'eau, avec une latte au fond pour servir d'échelle de mesure. L'eau permet aux racines de se disposer naturellement, comme si elles étaient encore dans le sol. Toutefois, comme les racines sont à plat dans le fond du récipient, les mesures de la largeur sont en deux dimensions. Cela a pour effet d'aplatir le réseau racinaire, ce qui peut entraîner une surestimation de la largeur et de l'angle d'ouverture par rapport à la réalité.
- Deuxième méthode (FIGURE 4.22) : Pour obtenir une mesure plus réaliste en trois dimensions, les racines ont été complètement immergées dans un récipient rempli d'eau, avec une latte pour l'échelle. Cette approche permet de mesurer la largeur et l'angle d'ouverture du réseau racinaire de manière plus proche de leur disposition naturelle dans le sol.

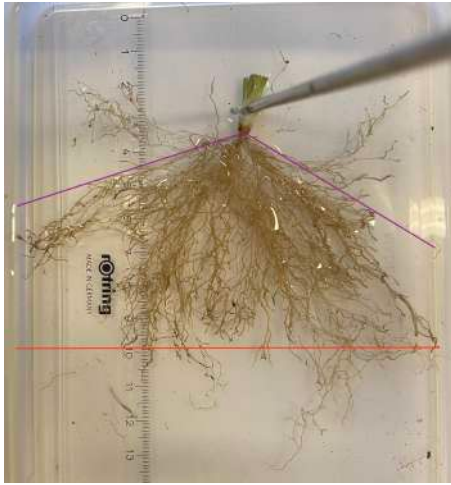


FIGURE 4.21 – Méthode 1

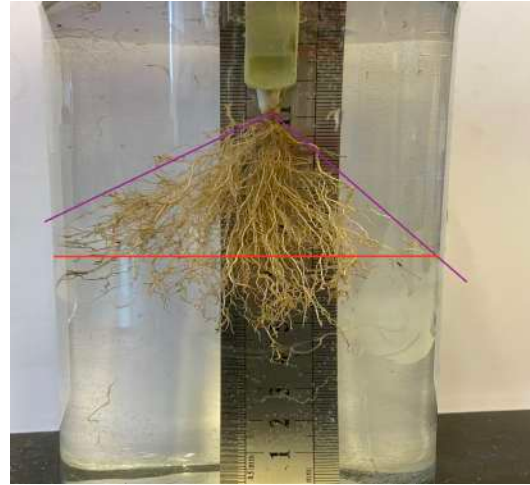
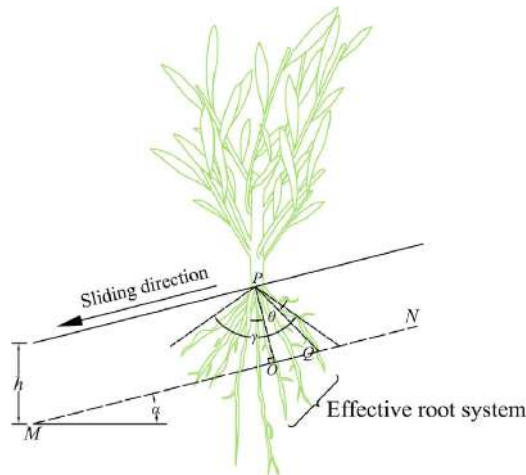


FIGURE 4.22 – Méthode 2

Ces méthodes ont été élaborées en observant le réseau racinaire, qui peut être simplifié en un cône dont la pointe part de la base de la tige et s'ouvre vers les profondeurs du sol. La largeur du réseau correspond à la distance entre les racines les plus éloignées (ligne rouge), tandis que l'angle d'ouverture représente l'angle au sommet du cône (lignes mauves) comme illustré à la FIGURE 4.23. La mesure de cet angle d'ouverture a été appliquée dans la littérature de LI et al., 2024, ce qui démontre que ce paramètre est pertinent pour caractériser efficacement la structure du réseau racinaire.

FIGURE 4.23 – Illustration du cône racinaire ainsi que de l'angle d'ouverture γ [LI et al., 2024]

Dans le cadre de cette étude, les deux méthodes ont été appliquées aux cinq racines contenues dans l'échantillon de 10×10 pour chaque espèce. Pour chaque racine, deux photos ont été prises : la première photo est prise avec la racine dans sa position initiale, tandis que la deuxième photo est prise après avoir fait tourner la racine de 90 degrés autour de son axe. Cette rotation permet de mesurer toutes les configurations possibles du cône racinaire. Une moyenne des résultats est ensuite calculée. Ces données seront ensuite comparées aux mesures de biomasse et de résistance mécanique afin de déterminer s'il existe effectivement une corrélation entre ces paramètres.

Chapitre 5

Résultats et interprétation

Ce chapitre présente et analyse les résultats obtenus à partir des essais mentionnés dans le chapitre précédent. Pour commencer, les essais préliminaires effectués seront décrits. Ensuite, les résultats des essais de cisaillement et triaxiaux seront étudiés en détail. Enfin, une corrélation sera établie avec la caractérisation des racines.

5.1 Cisaillement direct - Essais préliminaires

Avant de se lancer dans les essais définitifs de ce travail, des essais préliminaires ont été effectués afin d'évaluer la faisabilité de l'étude. En effet, ces essais ont permis d'obtenir une première estimation des valeurs de cohésion et d'angle de frottement du sol, ainsi que de vérifier que sa résistance au cisaillement pouvait être renforcée. Pour cela, un premier essai de cisaillement direct sur le sol a été réalisé. Ensuite, le sol a été mélangé avec du foin pour évaluer l'effet du renforcement. Enfin, afin de se rapprocher des essais de cisaillement définitifs à venir, un essai sur un rouleau de gazon a été mené. Cet essai a permis de concevoir et d'élaborer la procédure détaillée dans la section 4.3.1, relative à la préparation des échantillons pour les essais de cisaillement.

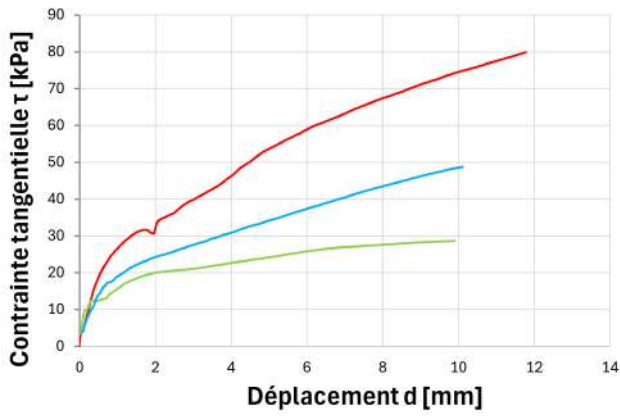
Le renforcement par fibres est une technique appliquée à divers matériaux. Dans notre cas, des fibres végétales de foin ont été utilisées afin de simuler un effet similaire à celui des racines. Étant donné que le foin est déjà un matériau sec, il n'a pas été séché avant la réalisation de l'échantillon. Une quantité minimale de foin, soit 2,6 grammes pour 305 grammes de sol a été utilisée. Le foin a été découpé en petites fibres d'un centimètre et mélangé au sol pour obtenir un mélange homogène. Le dernier essai a été réalisé sur un rouleau de gazon, ce qui diffère du sol utilisé pour les autres essais. Cet essai a pour but d'évaluer les valeurs typiques d'un sol renforcé avec des racines peu profondes, afin de donner une indication du potentiel d'augmentation de la résistance pour les futurs essais.

Les trois essais de cisaillement réalisés ont été effectués en condition non saturée. Contrairement à la procédure expliquée dans la section 4.4.1, aucune eau distillée n'a été ajoutée lorsque la boîte de Casagrande contenant l'échantillon a été placée dans l'appareil de cisaillement. Le reste de la procédure est demeuré identique, et les échantillons utilisés étaient des carrés de 10×10 cm. Les contraintes normales appliquées étaient de 23, 45 et 83 kPa. Comme expliqué dans le déroulement de l'essai, les graphiques de l'évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif, ainsi que de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale, ont été établis à partir des résultats obtenus. Les valeurs de cohésion et d'angle de frottement, qui caractérisent la résistance du sol, ont ainsi pu être calculées. Ces graphiques et données intrinsèques sont présentés dans la FIGURE 5.1 et dans la TABLE 5.1.

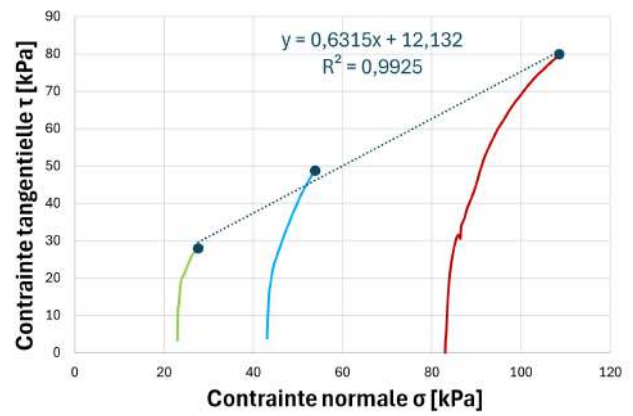
En observant la FIGURE 5.1, il ressort que les courbes présentent une tendance similaire. En effet, pour chaque essai, la contrainte tangentielle continue d'augmenter jusqu'à la fin de l'essai, et la contrainte maximale est également atteinte à ce moment-là. Cela pourrait suggérer que l'essai a été arrêté en raison de la limite de déplacement de l'appareil, empêchant ainsi une évaluation complète de la résistance des échantillons. A la TABLE 5.1, il ressort que le renforcement par le foin permet d'augmenter la cohésion mais diminue l'angle de frottement interne. Le gazon, qui possède une cohésion proche de celle de notre sol, présente un angle de frottement plus élevé. L'hypothèse selon laquelle les racines améliorent les deux paramètres intrinsèques des sols est donc formulée. En ce qui concerne le renforcement avec les fibres naturelles, selon LIU et al., s. d., celles-ci augmentent également les deux paramètres, bien que l'effet sur l'angle de frottement ϕ soit faible. Dans notre cas, la diminution observée de ϕ pourrait s'expliquer par le fait que les fibres végétales facilitent le glissement entre les particules de sol en offrant une surface de contact plus lisse que celle des particules elles-mêmes.

	Cohésion c [kPa]	Angle de frottement ϕ [°]
Sol naturel	12,1	32,3
Sol et foin	15,5	29,5
Sol et gazon	12,5	37,2

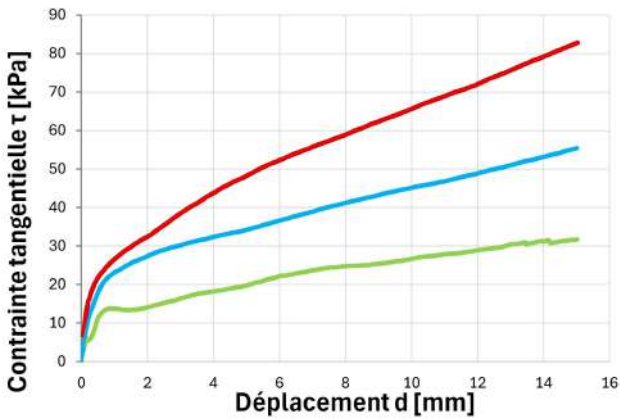
TABLE 5.1 – Cohésion et angle de frottement obtenus par les essais préliminaires de cisaillement en conditions non saturées



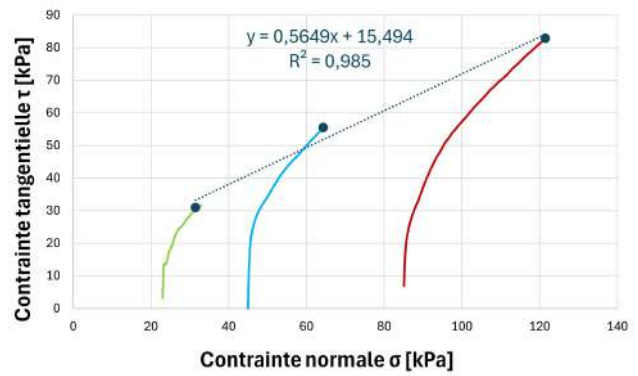
(a) Sol naturel



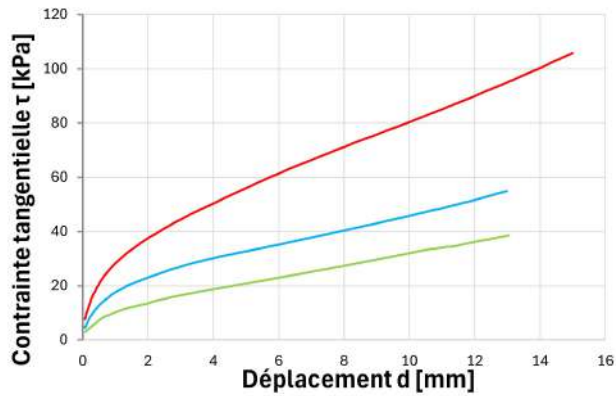
(b) Sol naturel



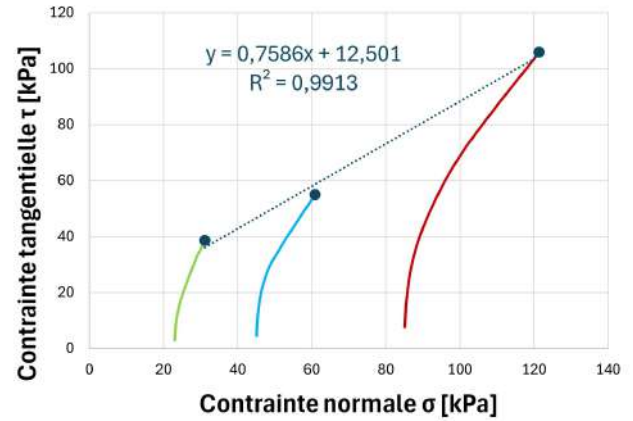
(c) Sol et foin



(d) Sol et foin



(e) Sol et gazon



(f) Sol et gazon



(g) Légende

FIGURE 5.1 – Essais préliminaires : (a), (c), (e) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b), (d), (f) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale

5.2 Cisaillement direct - Essais principaux

Les essais principaux de cisaillement ont été réalisés sur des échantillons saturés afin que les paramètres intrinsèques ne soient pas influencés par la succion. L'étude de cisaillement direct a été menée sous les mêmes conditions pour chaque essai, avec des contraintes appliquées de 23, 45, et 83 kPa, et une vitesse de 6 mm/h. Les essais sur les échantillons végétalisés ont été réalisés après une, trois et quatre semaines de croissance dans les caisses. Cela correspond en réalité à une croissance totale des plantes de six, huit et neuf semaines. Pour l'analyse des résultats, le temps sera noté en fonction du temps passé dans les caisses.

Pour chaque matériau, les graphiques de l'évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif, ainsi que de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale, ont été tracés et sont présentés aux FIGURES 5.2, 5.3 et 5.4. Étant donné que les conditions d'application sont identiques, la légende des graphiques (FIGURE 5.2c) ne sera pas répétée pour chaque figure. Pour les courbes $(\sigma; \tau)$, la contrainte maximale correspondant au rapport maximal τ/σ est représentée par des points bleus. Ces points permettent de tracer la droite de Mohr-Coulomb. La pente de cette droite correspond à la tangente de l'angle de frottement, tandis que l'ordonnée à l'origine représente la cohésion. Les paramètres obtenus sont résumés dans les TABLES 5.2, 5.3 et 5.4. Dans cette section, chaque matériau sera analysé séparément, suivi d'une discussion comparative des résultats.

5.2.1 Sol naturel

Le sol naturel, qui est un limon de faible plasticité, présente une cohésion faible de 1,8 kPa avec un angle de frottement interne de $33,7^\circ$ (TABLE 5.2). Comparé aux résultats du test préliminaire, la saturation n'a pas eu d'impact significatif sur l'angle de frottement mais a entraîné une diminution de la cohésion, ce qui est cohérent avec les observations de MASEKANYA, 2008. La FIGURE 5.2a montre que la contrainte tangentielle tend à se stabiliser sous forme de plateau dans le plan (déplacement, τ), tandis que la FIGURE 5.2b indique que la contrainte maximale présente un pic pour chaque essai dans le plan (σ, τ) , ce qui suggère que la rupture a été atteinte.

	Cohésion c [kPa]	Angle de frottement ϕ [°]
Sol naturel	1,8	33,7

TABLE 5.2 – Cohésion et angle de frottement obtenus par essai de cisaillement sur le sol naturel

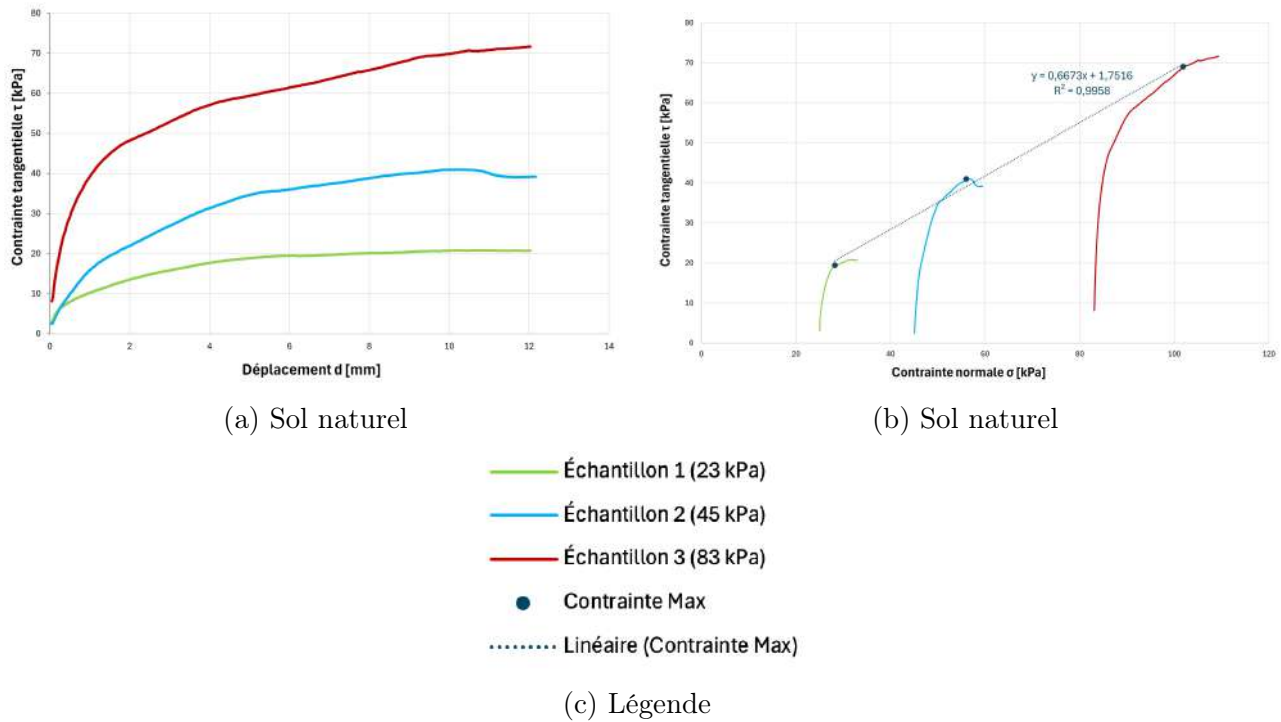


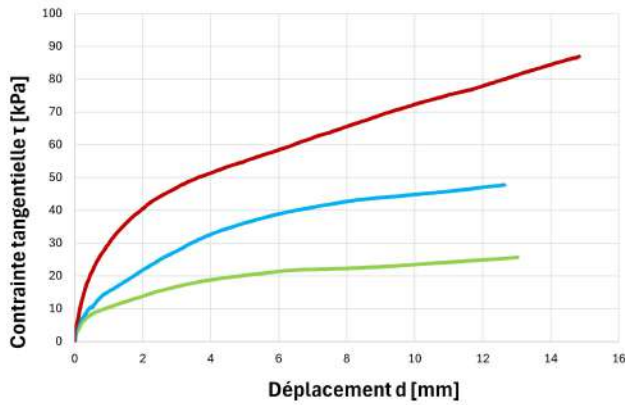
FIGURE 5.2 – Sol naturel : (a) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale

5.2.2 Sol et plantain

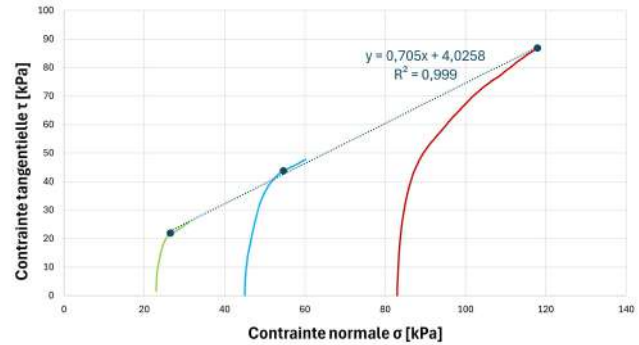
Dans le cas du sol renforcé par des racines de plantain, les graphiques de la FIGURE 5.3 montrent une tendance similaire, où la contrainte maximale est atteinte en fin d'essai, ce qui suggère que la rupture du matériau n'a peut-être pas été pleinement réalisée. Malgré cela, la TABLE 5.3 indique une augmentation progressive de la résistance au cisaillement au fil des semaines. La cohésion augmente significativement dès la première semaine et continue de croître par la suite, tandis que l'angle de frottement, après une hausse initiale, diminue au cours des semaines suivantes.

	Cohésion c [kPa]	Angle de frottement ϕ [°]
Semaine 1	4	35,2
Semaine 3	6,8	34,6
Semaine 4	7,6	32,7

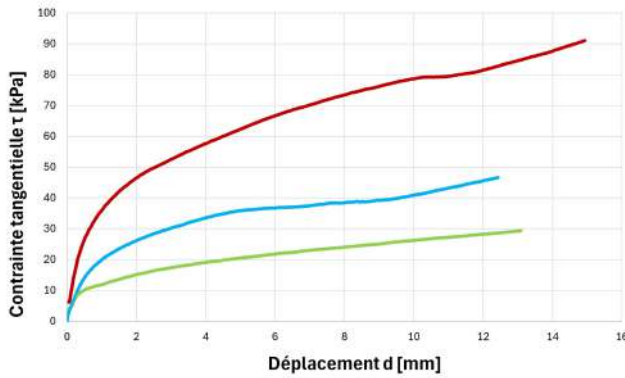
TABLE 5.3 – Cohésion et angle de frottement obtenus par essai de cisaillement sur le plantain



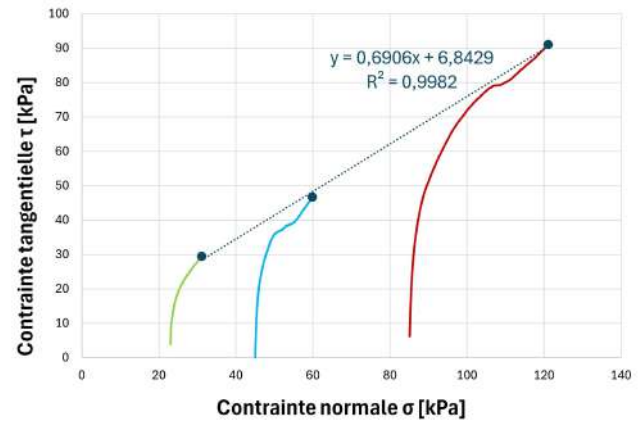
(a) Plantain semaine 1



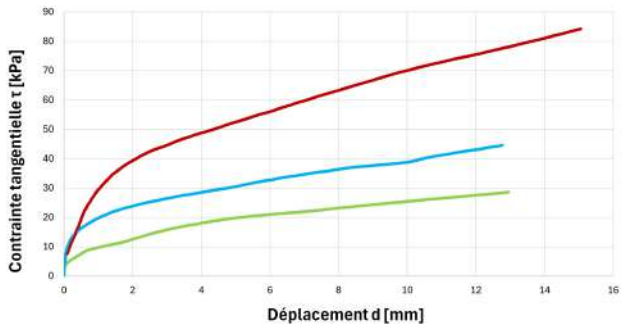
(b) Plantain semaine 1



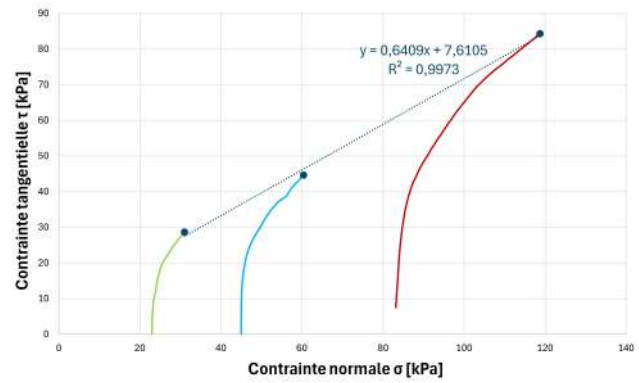
(c) Plantain semaine 3



(d) Plantain semaine 3



(e) Plantain semaine 4



(f) Plantain semaine 4

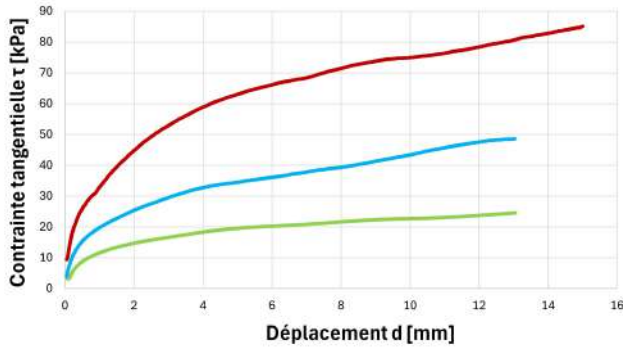
FIGURE 5.3 – Plantain : (a), (c), (e) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b), (d), (f) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale

5.2.3 Sol et trèfle

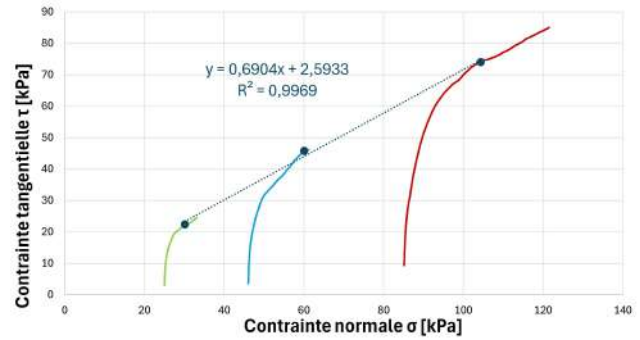
Dans le cas du trèfle, les échantillons des semaines une et trois permettent d'évaluer la résistance au cisaillement du sol. En effet, un pic de contrainte est observé tandis qu'à la dernière semaine, la rupture n'a peut-être pas été pleinement atteinte, comme le suggère la FIGURE 5.4. La TABLE 5.4 montre également une augmentation de la résistance au cisaillement, liée à une hausse de la cohésion. Cette augmentation est cependant moins marquée que celle observée pour le plantain. En ce qui concerne l'angle de frottement, il apparaît que celui-ci reste relativement constant au fil des semaines.

	Cohésion c [kPa]	Angle de frottement ϕ [°]
Semaine 1	2,6	34,6
Semaine 3	2,9	32,8
Semaine 4	3,6	33,7

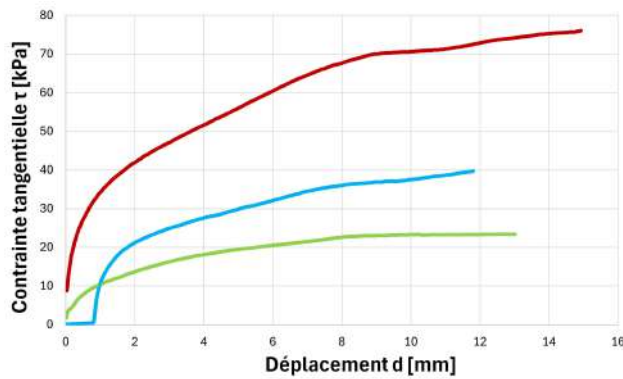
TABLE 5.4 – Cohésion et angle de frottement obtenus par essai de cisaillement sur le trèfle



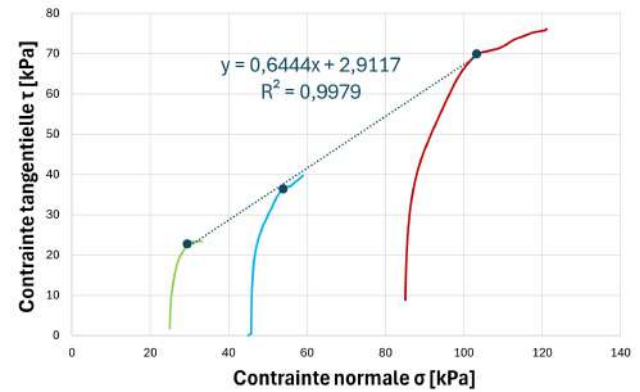
(a) Trèfle semaine 1



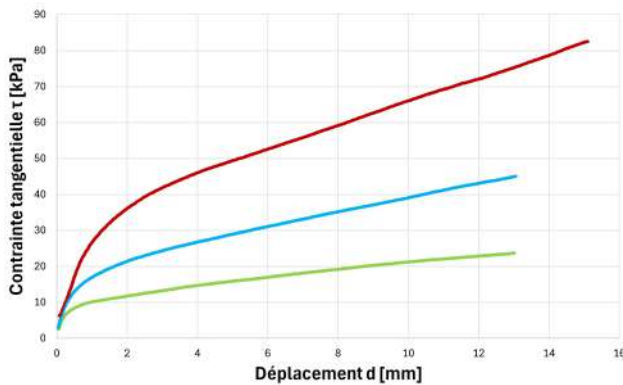
(b) Trèfle semaine 1



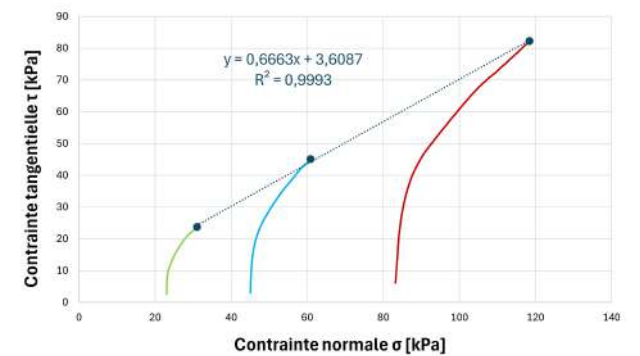
(c) Trèfle semaine 3



(d) Trèfle semaine 3



(e) Trèfle semaine 4



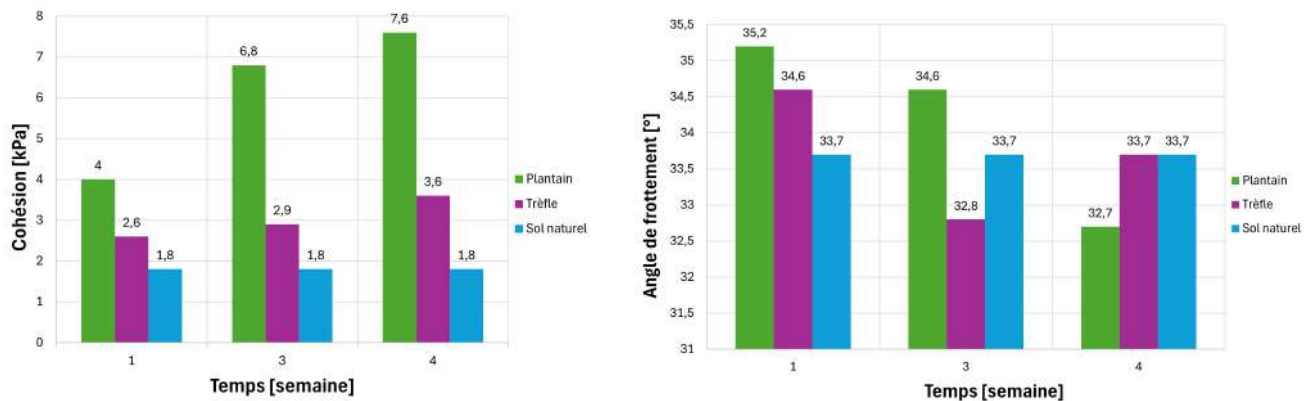
(f) Trèfle semaine 4

FIGURE 5.4 – Trèfle : (a), (c), (e) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement relatif - (b), (d), (f) Évolution de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale

5.2.4 Discussion

Pour faciliter la comparaison des résultats des essais de cisaillement, la FIGURE 5.5 a été élaborée. L'hypothèse initialement émise à partir des résultats des essais préliminaires, selon laquelle l'ajout de racines augmente à la fois la cohésion et l'angle de frottement du sol, peut être partiellement validée à la lumière des résultats obtenus. Les essais montrent clairement que la présence de racines entraîne une augmentation systématique de la cohésion du sol (FIGURE 5.5a). Cependant, l'impact sur l'angle de frottement est plus complexe à évaluer. Les valeurs obtenues pour l'angle de frottement varient entre $32,7^\circ$ et $35,2^\circ$ au fil des différents essais (FIGURE 5.5b). Cette faible variation suggère que les différences observées pourraient être dues aux limites de précision de la méthode d'essai plutôt qu'à une modification significative des propriétés du sol.

En examinant la FIGURE 5.5a, il apparaît que l'augmentation de la cohésion dans le sol renforcé par les racines de plantain est nettement plus significative, étant environ deux fois plus élevée que celle du trèfle pour une durée de croissance et des conditions similaires. De plus, en considérant conjointement la FIGURE 5.5a et la FIGURE 5.5b, il ressort que, pour une valeur d'angle de frottement identique ($34,6^\circ$) ou très proche ($32,7^\circ$ et $32,8^\circ$), la cohésion apportée par les racines de plantain est également supérieure à celle du trèfle. Cela pourrait s'expliquer par un réseau racinaire potentiellement plus dense dans le cas du plantain, comme cela sera confirmé dans la section 5.4. En plus de cette densité, la présence d'une racine pivotante chez le plantain tendrait à augmenter davantage la cohésion par rapport au système racinaire fibreux du trèfle, car le pivot renforcerait l'ancrage créant ainsi des liaisons supplémentaires entre les particules du sol [LOADES et al., 2010].



(a) Comparaison des cohésions obtenues par essai de cisaillement (b) Comparaison des angles de frottement obtenus par essai de cisaillement

FIGURE 5.5 – Comparaison de l'augmentation de résistance au cisaillement du plantain et du trèfle

5.3 Triaxial

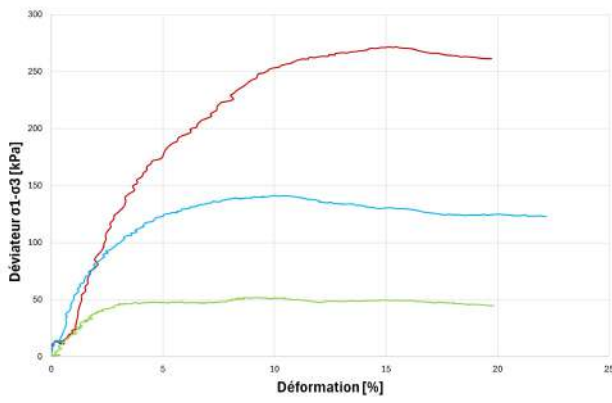
Les essais triaxiaux réalisés sont des essais consolidés drainés. Les pressions de confinement qui ont été appliquées valent 20, 50 et 100 kPa et la vitesse de l'essai était de 0,016 mm/min. Les échantillons de trèfle et plantain ont été testés après cinq semaines de croissance dans la caisse, ce qui correspond à une croissance totale de dix semaines. Pour chaque matériau testé, les graphiques de l'évolution du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale ainsi que l'enveloppe de rupture des cercles de Mohr ont été tracés et sont représentés à la

FIGURE 5.6. Les valeurs de cohésion et d'angle de frottement déduits de la droite de rupture pour chaque matériau sont repris à la TABLE 5.5.

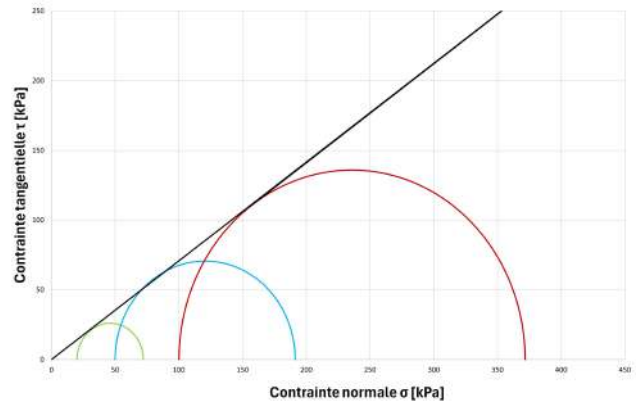
En examinant la TABLE 5.5, il est observé que le réseau racinaire semble induire une diminution de la résistance au cisaillement, comme le montre la diminution de l'angle de frottement tandis que la cohésion reste nulle. Les FIGURES 5.6a, 5.6c, et 5.6e montrent l'évolution du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale. Pour le sol naturel, un pic est atteint, indiquant la rupture, suivi d'une diminution des contraintes. En revanche, pour le plantain et le trèfle, aucun pic net n'est observé, ce qui suggère que la rupture n'est pas complètement atteinte. Notamment, la courbe de déformation pour le plantain montre une évolution plus prononcée par rapport à celle du trèfle. Il est important de noter que si l'essai avait été prolongé à un niveau de déformation plus élevé, il est probable que la résistance aurait continué à augmenter, ce qui pourrait potentiellement modifier les conclusions sur la résistance au cisaillement. Par conséquent, il convient de ne pas tirer de conclusions trop hâtives basées uniquement sur ces résultats. Néanmoins, la FIGURE 5.6 indique que la présence de racines permet au sol de se déformer davantage sans atteindre la rupture, suggérant ainsi une certaine amélioration de la capacité de déformation du sol renforcé par des racines.

	Cohésion c [kPa]	Angle de frottement ϕ [°]
Sol naturel	0	35,3
Plantain	0	31,4
Trèfle	0	29,7

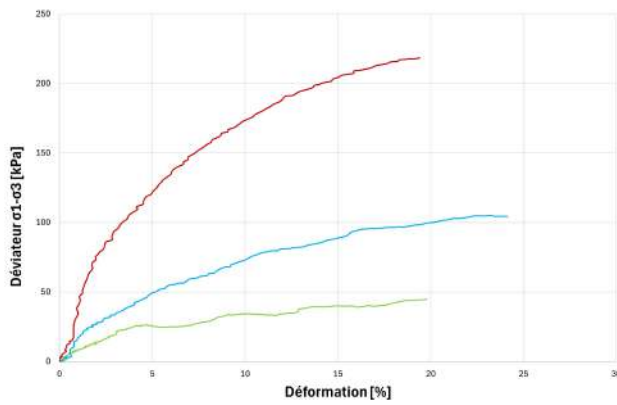
TABLE 5.5 – Cohésion et angle de frottement obtenus par essai triaxial



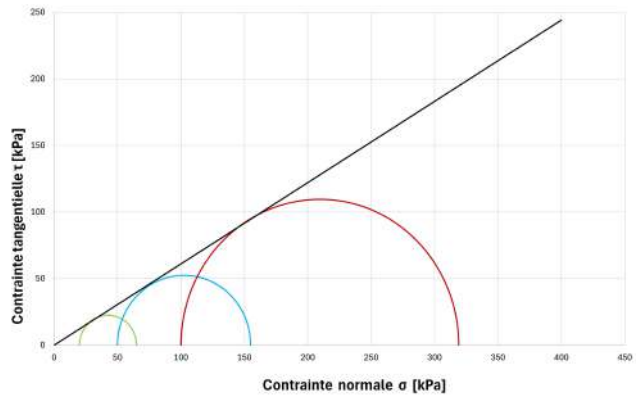
(a) Sol naturel



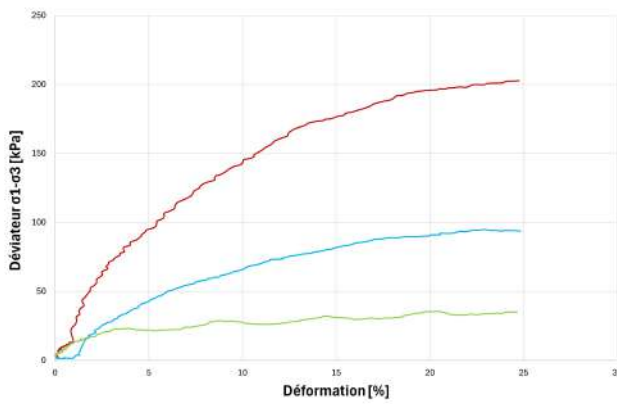
(b) Sol naturel



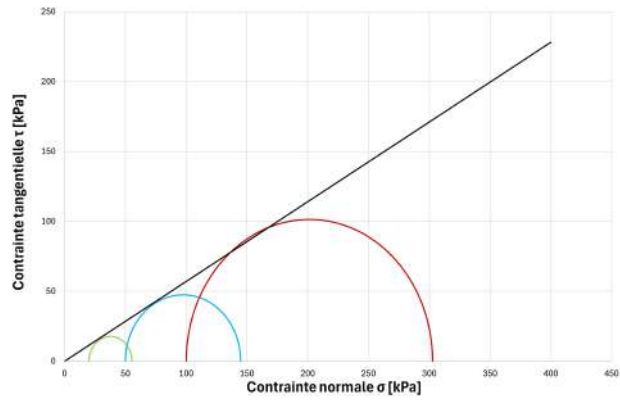
(c) Plantain



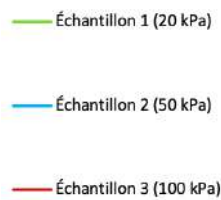
(d) Plantain



(e) Trèfle



(f) Trèfle



(g) Légende

FIGURE 5.6 – (a), (c), (e) Évolution du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale - (b), (d), (f) Enveloppe de rupture des cercles de Mohr

5.4 Caractérisation des racines

Les valeurs obtenues pour la biomasse ainsi que la largeur et l'angle d'ouverture, mesurés selon les méthodes 1 et 2, sont présentées dans les TABLES 5.6 et 5.7. Ces mesures ont été réalisées sur les cinq plantes d'un même échantillon, puis une moyenne a été calculée. Le choix de mesurer les cinq plantes et de calculer une moyenne permet de refléter plus fidèlement la réalité. En effet, les racines, en tant que matériau vivant, peuvent présenter des variations significatives, même dans des conditions de croissance identiques. Lors des mesures, des différences notables dans chaque paramètre ont été observées, ce qui a confirmé la nécessité de calculer une moyenne. Si une seule racine avait été mesurée, les résultats auraient été moins représentatifs de l'ensemble de l'échantillon. Les TABLES A.1, A.3 et A.2 de mesures détaillées sont fournies en annexe.

En observant la TABLE 5.6, il ressort une augmentation de la biomasse du trèfle au fil des semaines de croissance. Le plantain montre également une augmentation, mais sa biomasse maximale est atteinte à la troisième semaine plutôt qu'à la quatrième. En comparant ces résultats avec les mesures de largeur et d'angle d'ouverture présentées dans la TABLE 5.7, on constate qu'il n'y a pas d'augmentation significative à la troisième semaine. Cela suggère qu'aucun facteur externe n'a influencé la croissance des plantes de la caisse trois, car le trèfle montre une augmentation régulière avec le temps, tandis que la variation observée chez le plantain se manifeste uniquement en termes de masse. Un facteur pouvant expliquer cette variation de biomasse, sans affecter les largeurs et les angles de cohésion, est la teneur en eau des plantes. Les plantes étant des organismes vivants, elles absorbent de l'eau au cours de leur croissance et cette eau reste présente lorsqu'elles sont coupées pour mesurer la biomasse. Une hypothèse plausible est que la durée d'immersion des échantillons dans l'eau a été trop longue, augmentant ainsi l'humidité du sol et des racines plus que d'habitude. Il est également possible que le temps écoulé entre l'extraction des racines et la mesure de la biomasse ait été légèrement inférieur à une heure, ce qui aurait empêché l'évaporation complète de l'eau contenue dans les plantes.

En examinant la TABLE 5.6, on constate que la biomasse racinaire est systématiquement inférieure à la biomasse aérienne. La différence entre les mesures du plantain et du trèfle indique que le plantain est plus dense que le trèfle, ce qui confirme l'hypothèse formulée lors de la discussion sur les résultats de cisaillement. Cette observation est également corroborée par les mesures de la TABLE 5.7, où les valeurs sont systématiquement plus élevées pour le plantain que pour le trèfle, à durée de croissance équivalente. Ces résultats sont en accord avec la littérature, notamment l'étude de LOADES et al., 2010, qui souligne que les systèmes racinaires fasciculés, caractérisés par un enracinement relativement superficiel, produisent de nombreuses racines fines, entraînant des biomasses aérienne et racinaire plus faibles par rapport à d'autres types de systèmes racinaires.

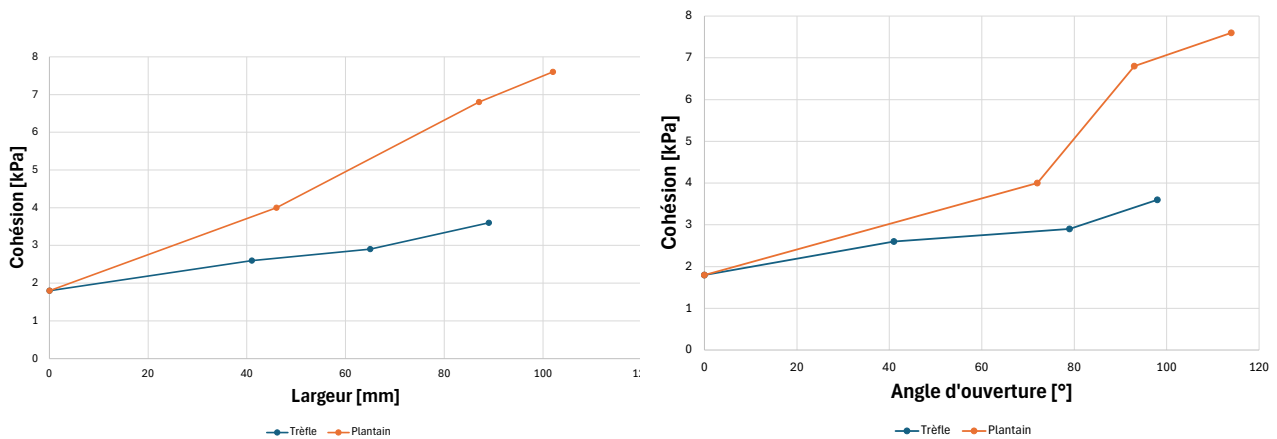
En conclusion, l'analyse de l'ensemble des résultats montre que les réseaux racinaires se densifient avec le temps, et que les systèmes pivotants dotés de racines fibreuses sont plus denses que les systèmes uniquement fasciculés. Cette augmentation de densité conduit à une résistance au cisaillement plus élevée par rapport au sol naturel. La FIGURE 5.7 illustre la corrélation entre l'augmentation de la cohésion et divers paramètres associés à la densité du réseau racinaire. Les graphiques montrent que la cohésion augmente avec la densité du réseau racinaire. En particulier, la FIGURE 5.7a révèle la corrélation la plus forte avec une tendance clairement linéaire. Cette tendance est suivie par les graphiques de la FIGURE 5.7b et de la FIGURE 5.7c, montrant des relations également significatives mais moins marquées. Tous ces résultats s'alignent avec ceux rapportés dans la littérature, comme en témoigne l'étude de ALI et OSMAN, 2008, par exemple.

	Moyenne biomasse aérienne [g]	Moyenne biomasse racinaire [g]
Plantain semaine 1	0,12	0,13
Plantain semaine 3	3,02	1,26
Plantain semaine 4	2,22	1,06
Trèfle semaine 1	0,10	0,07
Trèfle semaine 3	1,11	0,62
Trèfle semaine 4	1,24	0,86

TABLE 5.6 – Résultats des biomasses aériennes et racinaires du plantain et du trèfle

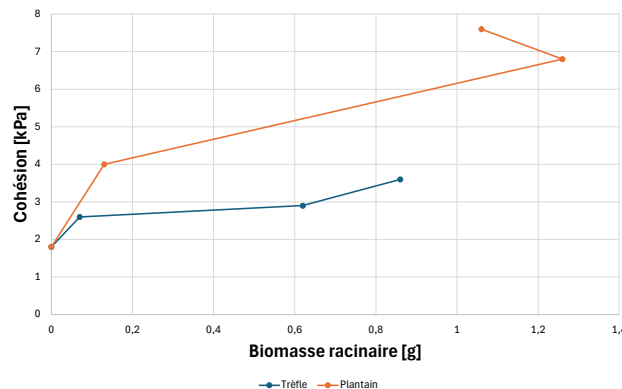
	Moyenne largeur [mm]	Moyenne angle ouverture [°]
Plantain semaine 1	46	72
Plantain semaine 3	87	93
Plantain semaine 4	102	114
Trèfle semaine 1	41	41
Trèfle semaine 3	65	79
Trèfle semaine 4	89	98

TABLE 5.7 – Résultats des largeurs et angles d'ouverture du plantain et du trèfle



(a) Évolution de la cohésion en fonction de la largeur

(b) Évolution de la cohésion en fonction de l'angle d'ouverture



(c) Évolution de la cohésion en fonction de la biomasse racinaire

FIGURE 5.7 – Évolution de la cohésion en fonction des paramètres caractérisant la densité du réseau racinaire

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Pour conclure ce travail de fin d'études, un résumé succinct des différents chapitres sera présenté. Ensuite, différentes perspectives de recherche seront abordées.

6.1 Conclusion

Ce travail a porté sur l'étude du renforcement mécanique du sol par les racines des plantes. L'objectif principal était de vérifier que les racines peuvent améliorer la résistance au cisaillement du sol, offrant ainsi une solution potentielle pour augmenter la stabilité des talus.

Dans un premier temps, une introduction générale a été fournie, mettant en évidence les défis contemporains liés à la stabilité des pentes. Cette section a souligné l'importance et l'intérêt de l'amélioration des sols, en particulier à travers le renforcement racinaire, comme solution pour prévenir les instabilités.

Ensuite, l'état de l'art a permis de définir les différents aspects pertinents à ce travail. Les divers types de réseaux racinaires et leur anatomie y sont décrits, et le rôle biomécanique des racines est expliqué en détail. Enfin, les aspects relatifs à la stabilité des pentes ont été examinés en détails.

L'identification du type de sol utilisé dans la partie expérimentale a été réalisée à l'aide de divers essais tels que la granulométrie, la sédimentométrie, les essais des limites d'Atterberg et un essai Proctor. Ces essais ont permis de déterminer que le sol utilisé est un limon de faible plasticité.

Ensuite, la méthodologie de préparation des matériaux a été décrite. Elle a consisté en la préparation de caisses en bois ainsi que de cylindres capables de contenir les plantes qui ont été cultivées en serre. La méthode de préparation des échantillons a également été détaillée. Enfin, les essais effectués ont été expliqués, et le processus de caractérisation des racines a été développé.

Finalement, les divers résultats de ces essais ont été analysés. Ils ont permis de conclure que les racines des plantes augmentaient effectivement la résistance au cisaillement. Cette augmentation de résistance est principalement due à l'accroissement de la cohésion, qui a été corrélée avec divers paramètres géométriques des racines caractérisant la densité du réseau racinaire comme la biomasse, la largeur et l'angle d'ouverture.

6.2 Perspectives

Dans ce travail, deux types de racines ont été analysés et testés au cisaillement. Il serait intéressant d'élargir cette étude en testant d'autres types de racines pour déterminer si des différences significatives de résistance se manifestent. Par ailleurs, lors de la croissance des racines en serre, les paramètres appliqués ont été choisis uniquement pour favoriser la croissance, sans analyse approfondie. Il pourrait être pertinent d'examiner l'influence de divers paramètres, tels que la chaleur, la lumière, l'eau ou l'apport de certains nutriments, sur la croissance des racines et, par conséquent, sur la densité du réseau racinaire. Ces observations pourraient alors être mises en relation avec la résistance au cisaillement, comme cela a été fait dans ce travail. De plus, il serait enrichissant de tester ces données de résistance dans un cas pratique de stabilité des pentes.

Pour caractériser l'augmentation de la résistance mécanique des sols, ce travail s'est concentré sur des essais de cisaillement. Il serait également intéressant de mesurer d'autres résistances, comme la résistance à la traction ou à l'arrachement. La caractérisation des racines a été réalisée à l'aide de mesures géométriques, telles que la biomasse, la largeur et l'angle d'ouverture. Il serait pertinent d'examiner d'autres paramètres, comme la longueur et le diamètre de chaque racine dans un réseau racinaire, pour mieux comprendre l'effet des racines sur la résistance du sol. Ces mesures pourraient être réalisées par tomographie ou rayons X, par exemple.

Finalement, la phase d'étude a été menée sur dix semaines de croissance des plantes. Il serait intéressant de prolonger cette période à six mois, voire un an, afin d'évaluer si l'augmentation de la résistance mécanique continue de croître avec la densité du réseau racinaire ou si elle se stabilise après un certain point. Une étude plus longue pourrait également être pertinente, car les données recueillies se rapprocheraient davantage des conditions réelles des racines présentes dans la nature.

Bibliographie

- ALI, F. H., & OSMAN, N. (2008). Shear Strength of a Soil Containing Vegetation Roots. *Soils and Foundations*, 48(4), 587-596. <https://doi.org/10.3208/sandf.48.587>
- ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES. (2023a). *Analyse granulométrique par tamisage (voie sèche ou voie humide)* (Rapport de laboratoire). ULiège - Université de Liège.
- ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES. (2023b). *Analyse sédimentométrique ou essai de levigation* (Rapport de laboratoire). ULiège - Université de Liège.
- ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES. (2023c). *Essai de cisaillement sol* (Rapport de laboratoire). ULiège - Université de Liège.
- ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES. (2023d). *Essai de limite de plasticité, liquidité, retrait : Limite d'Atterberg* (Rapport de laboratoire). ULiège - Université de Liège.
- ARGENCO - LABORATOIRE DE GÉOTECHNOLOGIES. (2023e). *Essai Proctor* (Rapport de laboratoire). ULiège - Université de Liège.
- CHARLIER, R. (2016). *Géotechnique Tome 2 : Ouvrages*. La Centrale des cours de la FSA.
- CHARLIER, R., COLLIN, F., & BOLLE, A. (2017). *Mécaniques des roches et des massifs rocheux*. La Centrale des cours de FSA.
- CRAAQ. (2024). *Identification de mauvaises herbes et autres plantes* [IRIIS phytoprotection]. <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/> Consulté le 11 août 2024.
- CRANG, R., LYONS-SOBASKI, S., & WISE, R. (2018). *Plant Anatomy : A Concept-Based Approach to the Structure of Seed Plants*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77315-5>
- EMADI-TAFTI, M., ATAIE-ASHTIANI, B., & HOSSEINI, S. M. (2021). Integrated impacts of vegetation and soil type on slope stability : A case study of Kheyroud Forest, Iran. *Ecological Modelling*, 446, 109498. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109498>
- FANARA, A. (2021). *Mécanique des sols et des roches - Manuel de laboratoire*.
- FORTIER, J.-F., FLORENTIN, A., & TERVER, D. (2023). *Cotylédon : définition et explications* [AquaPortail]. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/2435/cotyledon> Consulté le 7 juillet 2024.
- FRANÇOIS, B. (2024). *Géotechnique et infrastructures*. La Centrale des cours de FSA.
- JACQUEMART, A.-L., LEJEUNE, A., LOBET, G., QUINET, M., & ROBERFROID, O. (2024). *Morphologie végétale* [Biologie végétale]. <https://biologievegetale.be/morphologie-vegetale/> Consulté le 25 juillet 2024.
- JACQUEMART, A.-L., LUTTS, S., & QUINET, M. (s. d.). *Règne végétal* [Biologie végétale]. <https://biologievegetale.be/regne-vegetal/> Consulté le 25 juillet 2024.
- KUTSCHERA, L., & LICHTENEGGER, E. (1982). *Wurzelatlas mitteleuropäischer Gruenlandpflanzen, Band 1 : Monocotyledoneae*. Gustav Fischer Verlag.
- KUTSCHERA, L., & LICHTENEGGER, E. (2002). *Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*. Leopold Stocker Verlag.
- KUTSCHERA, L., SOBOTIK, M., LICHTENEGGER, E., & HAAS, D. (1997). *Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen*. Landesmuseum.

- LABERCHE, J.-C. (2020). *Biologie végétale*. Dunod. <https://www.cairn-sciences.info/biologie-vegetale--9782100814596.htm>
- LANN, T., BAO, H., LAN, H., ZHENG, H., YAN, C., & PENG, J. (2024). Hydro-mechanical effects of vegetation on slope stability : A review. *Science of The Total Environment*, 926, 171691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171691>
- LAROUSSE. (2024). *Identification de mauvaises herbes et autres plantes*. <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/biomasse/27100> Consulté le 14 août 2024.
- LI, Y., YANG, G., LIN, Y., ZHAO, T., DUAN, R., & LI, H. (2024). Research on the shallow landslide stability of vegetated slopes with expansive soils based on root morphology. *Ecological Modelling*, 496, 110808. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110808>
- LIU, S., WANG, Y., TIAN, H., SUN, S., ZHANG, L., ZHOU, R., & HAN, C. (s. d.). Mechanical properties and toughening effect of rice straw fiber-reinforced soil. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03511. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03511>
- LOADES, K. W., BENGOUGH, A. G., BRANSBY, M. F., & HALLETT, P. D. (2010). Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. *Ecological Engineering*, 36(3), 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.005>
- LÖBMANN, M. T., GEITNER, C., WELLSTEIN, C., & ZERBE, S. (2020). The influence of herbaceous vegetation on slope stability – A review. *Earth-Science Reviews*, 209, 103328. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103328>
- MASEKANYA, J.-P. (2008). *Stabilité des pentes et saturation partielle. Etude expérimentale et modélisation numérique* [Thèse de doctorat, Liège Université]. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/315291/1/Masekthese.pdf>
- MOROT-GAUDRY, J.-F., LEPINIEC, L., & PRAT, R. (2021). *Biologie végétale : Croissance et développement*. Dunod. https://www.cairn-sciences.info/feuilleter.php?ID_ARTICLE=DUNOD_MOROT_2021_01_0000a
- QUIROS, M. (2023). *Biomécanique de l'interaction racine-obstacle* [Thèse de doctorat, Sorbonne Université]. <https://theses.hal.science/tel-04137239>
- Roots of Plants* [FastGrowingTrees.com]. (s. d.). <https://www.fast-growing-trees.com/pages/roots-of-plants> Consulté le 24 juillet 2024.
- TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I. M., & MURPHY, A. (2015). *Plant Physiology and Development, Sixth Edition*. Sinauer Associates, Inc.
- VIANA, W. G., SCHARWIES, J. D., & DINNENY, J. R. (2022). Deconstructing the root system of grasses through an exploration of development, anatomy and function. *Plant, Cell & Environment*, 45(3), 602. <https://doi.org/10.1111/pce.14270>
- VRANCX, S. (2023). *Technique du soil mixing : Étude expérimentale et application au dimensionnement d'une paroi dans un sol limoneux* [Thèse de doctorat, Liège Université]. <http://hdl.handle.net/2268.2/17728>
- WU, W., SWITALA, B. M., ACHARYA, M. S., TAMAGNINI, R., AUER, M., GRAF, F., & KAMP, L. (2015). Effect of Vegetation on Stability of Soil Slopes : Numerical Aspect. In W. WU (Éd.), *Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows* (p. 163-177). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0_15

Annexe A

Résultats et interprétation

A.1 Caractérisation des racines

SEM 1 - P	aérienne (g)	racinaire (g)		SEM 1 - T	aérienne (g)	racinaire (g)
1	0,13	0,17		1	0,12	0,07
2	0,20	0,20		2	0,11	0,07
3	0,09	0,11		3	0,07	0,09
4	0,10	0,09		4	0,11	0,07
5	0,08	0,09		5	0,09	0,06
Moyenne	0,12	0,13		Moyenne	0,10	0,07
SEM 3 - P	aérienne (g)	racinaire (g)		SEM 3 - T	aérienne (g)	racinaire (g)
1	5,00	1,00		1	1,01	0,50
2	2,60	0,80		2	1,16	0,89
3	1,10	0,60		3	0,68	0,37
4	2,70	1,60		4	2,02	0,84
5	3,70	2,30		5	0,70	0,51
Moyenne	3,02	1,26		Moyenne	1,11	0,62
SEM 4 - P	aérienne (g)	racinaire (g)		SEM 4 - T	aérienne (g)	racinaire (g)
1	1,90	0,90		1	1,20	0,80
2	1,50	0,60		2	2,00	0,80
3	2,60	1,40		3	1,00	0,60
4	2,70	1,10		4	1,00	1,20
5	2,40	1,30		5	1,00	0,90
Moyenne	2,22	1,06		Moyenne	1,24	0,86

FIGURE A.1 – Mesure des biomasses aériennes et racinaires sur le trèfle et le plantain

SEM 1 - P	2D - largeur (mm)		2D - cône(°)		3D - largeur (mm)		3D - cône (°)	
	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2
1	59	56	87	86	45	41	52	84
2	55	36	94	62	35	64	71	92
3	70	50	86	73	46	52	88	93
4	54	57	74	119	40	35	61	43
5	29	31	62	72	40	33	75	65
Moyenne	53	46	81	82	41	45	69	75
Moyenne	50		82		43		72	
moyenne largeur		46	moyenne cône		77			
SEM 3 - P	2D - largeur (mm)		2D - cône(°)		3D - largeur (mm)		3D - cône (°)	
	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2
1	97	99	98	125	81	86	96	83
2	66	73	68	75	73	68	112	78
3	87	77	86	107	60	47	66	46
4	89	95	106	111	100	101	100	99
5	104	124	104	109	115	92	105	85
Moyenne	89	94	92	105	86	79	96	78
Moyenne	91		99		82		87	
moyenne largeur		87	moyenne cône		93			
SEM 4 - P	2D - largeur (mm)		2D - cône(°)		3D - largeur (mm)		3D - cône (°)	
	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2
1	103	100	116	109	102	74	107	77
2	94	81	107	89	74	98	87	81
3	116	124	156	131	105	107	114	121
4	99	108	125	116	94	106	100	117
5	119	127	164	153	98	108	87	121
Moyenne	106	108	134	120	95	99	99	103
Moyenne	107		127		97		101	
moyenne largeur		102	moyenne cône		114			

FIGURE A.2 – Mesure des largeurs et angles d'ouverture sur le plantain

SEM 1 - T	2D - largeur (mm)		2D - cône (°)		3D - largeur (mm)		3D - cône (°)	
	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2
1	43	35	71	42	43	38	41	49
2	21	14	31	17	37	30	40	37
3	55	50	43	40	58	30	45	35
4	54	45	48	48	30	39	32	43
5	61	47	50	32	46	49	34	45
Moyenne	47	38	49	36	43	37	38	42
Moyenne	43		42		40		40	
moyenne largeur		41	moyenne cône		41			
SEM 3 - T	2D - largeur (mm)		2D - cône (°)		3D - largeur (mm)		3D - cône (°)	
	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2
1	65	62	73	63	80	40	110	76
2	102	91	142	123	54	37	82	59
3	50	68	69	83	38	65	73	55
4	45	98	57	76	61	110	54	106
5	71	56	73	95	45	54	57	63
Moyenne	67	75	83	88	56	61	75	72
Moyenne	71		85		58		74	
moyenne largeur		65	moyenne cône		79			
SEM 4 - T	2D - largeur (mm)		2D - cône (°)		3D - largeur (mm)		3D - cône (°)	
	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2	photo 1	photo 2
1	82	75	125	103	87	77	106	126
2	84	83	93	86	70	88	92	83
3	102	73	100	69	89	92	90	93
4	103	118	99	80	83	103	86	92
5	97	96	134	122	109	76	98	80
Moyenne	94	89	110	92	88	87	94	95
Moyenne	91		101		87		95	
moyenne largeur		89	moyenne cône		98			

FIGURE A.3 – Mesure des largeurs et angles d'ouverture sur le trèfle