

الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة البليدة 1

UNIVERSITE DE BLIDA1

كلية التكنولوجيا

Faculté de technologie

قسم الهندسة المدنية

Département de génie civil



MEMOIRE DE MASTER EN GENIE CIVIL

Spécialité : Géotechnique

Développement d'un Programme en Python pour l'Analyse des Résultats d'Essais Géotechniques en Laboratoire

Soutenue par :

Mohamed Akram Bendahib

.....

U. SAAD DAHLEB BLIDA

Président

.....

U. SAAD DAHLEB BLIDA

Examineur

Pr.Younes Abed

U.SAAD DAHLEB BLIDA

Promoteur

BLIDA, Juillet 2025

ملخص :

يقدم مشروع نهاية الدراسة «Geo_Code_Lab» تطبيقًا مبتكرًا للحاسوب الشخصي مصممًا لأتمام تحليل ثلاثة اختبارات جيوتقنية معملية: التحليل الحبيبي بالغربة، اختبار القص المباشر، واختبار الضغط الثلاثي المحوري. يستهدف التطبيق المهندسين الجيوتقنيين، حيث يحسب المعلمات الأساسية مثل معامل الانتظام (Cu) والانحناء (Cc)، التماسك (c)، زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ)، ودوائر موهر، مع إنشاء منحنيات حبيبية ومخططات موهر-كولوم ورسوم بيانية. يعزز هذا الحل الدقة ويقلل من وقت المعالجة لمشاريع الأساسات، الردميات، أو المنحدرات.

تطوير التطبيق تطلب مواجهة تحديات برمجية، منها تحويل الصيغ الرياضية المعقدة (مثل معيار موهر-كولوم) إلى خوارزميات موثوقة، إدارة أخطاء البيانات التجريبية، وتحسين الأداء لمعالجة كميات كبيرة من البيانات. تم التغلب على هذه العقبات باستخدام بايثون للحسابات، ماتبلوتليب للتصور البياني، وتكينتر لواجهة مستخدم مريحة وسهلة الوصول حتى لغير المبرمجين.

اعتمد المنهج المتبع تحليلًا دقيقًا لاحتياجات المهندسين الجيوتقنيين، تصميم نموذج خوارزمي قوي، تطويرًا تكراريًا مع اختبارات وحدات، والتحقق من النتائج بمقارنتها مع الحسابات اليدوية. تم تصميم كل اختبار بدقة: الغربة تنتج منحنيات النسبة المئوية للمار، والقص المباشر يحسب $\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$. أظهرت الاختبارات موثوقية عالية وتقليصًا كبيرًا في زمن التحليل.

يتميز Geo_Code_Lab بواجهته البديهية، تقاريره الموحدة، وإمكانية تطويره لدمج اختبارات أخرى أو معايير دولية. يقدم هذا المشروع، الذي يجمع بين الحوسبة والهندسة المدنية، حلاً عمليًا ومبتكرًا يجذب المحترفين الساعين لتحسين التحليل الجيوتقني بكفاءة ودقة.

الكلمات المفتاحية: الجيوتقنية، تحليل الحبيبات، الاختبار الثلاثي المحاور، اختبار القص المباشر، بايثون، Geo_Code_Lab

Résumé :

Le projet de fin d'études « Geo_Code_Lab » présente une application PC innovante conçue pour automatiser l'analyse de trois essais géotechniques de laboratoire : l'analyse granulométrique par tamisage, l'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial. Destinée aux ingénieurs géotechniciens, Geo_Code_Lab calcule des paramètres essentiels comme les coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c), la cohésion (c), l'angle de frottement (ϕ), et les cercles de Mohr, tout en générant des courbes granulométriques, des diagrammes de Mohr-Coulomb. Cette solution améliore la précision et réduit le temps de traitement pour les projets de fondations, remblais ou pentes.

Le développement a nécessité de relever plusieurs défis de programmation, notamment la transcription de formules complexes (critère de Mohr-Coulomb) en algorithmes fiables, la gestion des erreurs de données expérimentales, et l'optimisation pour traiter de grands volumes de données. Ces obstacles ont été surmontés grâce à Python pour les calculs, Matplotlib pour la visualisation et Tkinter pour une interface utilisateur ergonomique, accessible même aux non-programmeurs.

La méthodologie adoptée comprend une analyse des besoins des géotechniciens, la conception d'un modèle algorithmique robuste, un développement itératif avec tests unitaires, et une validation par comparaison avec des calculs manuels. Chaque essai est modélisé précisément : le tamisage produit des courbes de passant, le cisaillement direct applique $\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$. Les tests ont démontré une fiabilité élevée et une réduction significative du temps d'analyse.

Geo_Code_Lab se distingue par son interface intuitive, ses rapports standardisés et son potentiel d'évolution pour intégrer d'autres essais ou normes internationales. Ce projet, à la croisée de l'informatique et du génie civil, propose une solution pratique et innovante, captivante pour les professionnels cherchant à optimiser l'analyse géotechnique avec efficacité et précision.

Mots clés : Géotechnique ,Analyse granulométrique ,Essai triaxial, cisaillement direct, Python, Geo_Code_Lab

Summary :

The final year project "Geo_Code_Lab" introduces an innovative PC application designed to automate the analysis of three key geotechnical laboratory tests: sieve analysis, direct shear test, and triaxial test. Aimed at geotechnical engineers, Geo_Code_Lab calculates critical parameters such as the uniformity coefficient (C_u), curvature coefficient (C_c), cohesion (c), friction angle (ϕ), and Mohr circles, while generating granulometric curves, Mohr-Coulomb diagrams, and standardized graphical reports. This solution enhances accuracy and reduces processing time for foundation, embankment, or slope projects.

The development process faced several programming challenges, including translating complex formulas (e.g., Mohr-Coulomb criterion) into reliable algorithms, handling experimental data errors, and optimizing performance for large datasets. These obstacles were overcome using Python for calculations, Matplotlib for visualization, and Tkinter for an ergonomic, user-friendly interface accessible even to non-programmers.

The methodology involved a thorough analysis of geotechnical engineers' needs, designing a robust algorithmic model, iterative development with unit testing, and validation through comparison with manual calculations. Each test was precisely modeled: sieve analysis produces passing percentage curves, the direct shear test computes $\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$, and the triaxial test simulates confinement conditions (UU, CU, CD) to determine c , ϕ , and Mohr circles. Testing demonstrated high reliability and significant time savings.

Geo_Code_Lab stands out with its intuitive interface, standardized reports, and potential for expansion to include additional tests or international standards. Bridging computer science and civil engineering, this project offers a practical and innovative solution, captivating professionals seeking to optimize geotechnical analysis with efficiency and precision.

Keywords: Geotechnics, Sieve analysis, Triaxial test, Direct shear test, Python, Geo_Code_Lab

Remerciements

À l'issue de la réalisation de ce Projet de Fin d'Études, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu, guidé et inspiré tout au long de ce parcours.

En premier lieu, je rends hommage à ma chère mère et à mon père, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices et les encouragements constants ont été le socle de ma réussite. À toute ma famille, je vous adresse mes remerciements les plus sincères pour votre présence et votre soutien indéfectible.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mon promoteur, Pr. Abed Younes, pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et son engagement tout au long de ce projet. Mes remerciements s'étendent aux membres du jury, dont l'expertise et les remarques pertinentes ont contribué à enrichir ce travail.

Enfin, je souhaite adresser un hommage particulier et émouvant à la regrettée Mme Mahdaoui Razika, dont la mémoire restera à jamais gravée dans mon cœur. C'est grâce à son soutien, sa bienveillance et son dévouement que j'ai pu mener à bien mes études. Ce projet est, en partie, un témoignage de ma gratitude envers elle.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet, je vous dis merci du fond du cœur.

Dédicace

À mes chers amis, ma grande famille, et tous ceux qui ont partagé avec moi les bancs de l'université dans cette belle aventure qu'est la promotion 2024-2025 en géotechnique, je dédie ce travail. Vos rires, vos encouragements et votre solidarité ont illuminé ce chemin.

*Au laboratoire **LCTP** de Médéa, un immense merci pour m'avoir offert un cadre d'apprentissage et d'expérimentation exceptionnel, où j'ai pu donner vie à mes idées.*

À toutes les personnes qui m'ont soutenu dans la réalisation de ce Projet de Fin d'Études, par un conseil, un sourire ou une aide précieuse, je vous adresse ma gratitude la plus sincère.

Un hommage tout spécial à mon ami Sidahmed Mellouah, dont l'aide inestimable et l'amitié fidèle ont été des piliers dans ce projet. Merci pour ton soutien indéfectible, qui a fait toute la différence.

Ce travail est le vôtre autant que le mien. Avec tout mon cœur, merci.

Table des matières

ملخص :	2
Résumé :	3
Summary :	6
Remerciements.....	6
Dédicace	7
Liste des Figures.....	11
Liste des Tableaux.....	12
Liste des symboles	13
Symboles liés à l'analyse granulométrique (Essai de tamisage) :	13
Symboles liés à l'essai de cisaillement direct :	13
Symboles liés à l'essai triaxial :	13
Symboles liés aux limites d'Atterberg :	14
Symboles liés à la teneur en eau :	14
Symboles liés à l'essai Proctor (Compactage) :	14
Symboles liés à l'essai œdométrique :	14
Symboles liés à la perméabilité :	14
Symboles liés à l'essai de compression simple :	14
Symboles liés à l'essai de gonflement :	14
Symboles généraux :	14
Introduction Générale :	15
Chapitre 1 : Présentation des Essais Géotechniques de Laboratoire et Dépouillement des Résultats	1
Introduction :	1
1.1. Essais Géotechniques de Laboratoire	1
1.1.1Analyse granulométrique	1
1.1.2.Limites d'Atterberg :	1
1.1.3.Teneur en eau :	2
1.1.4. Essai Proctor (compactage) :	2
1.1.5. Essai de cisaillement direct :	2
1.1.6. Essai triaxial :.....	2
1.1.7. Essai œdométrique :	2
1.1.8. Mesure de la perméabilité :	3
1.1.9. Essai de compression simple :	3
1.1.10. Essai de gonflement :	3
1.2.1. Présentation des résultats :	3
1.2.2. Normes de référence :	4
1.2.3. Applications des données :	4

Conclusion	5
Chapitre 2 : Présentation des Essais Géotechniques proposés pour la programmation	6
Introduction :	6
2.1. Essais Géotechniques proposés pour la programmation	6
2.1.1. Essai de cisaillement direct	6
2.1.2. Essai triaxial :	8
2.1.3. Essai de tamisage (Analyse granulométrique) :	10
Conclusion :	11
Chapitre 3 : Présentation de la Procédure de Dépouillement et Élaboration des Organigrammes	12
Introduction :	12
3.1Présentation de la procédure de dépouille propose :	12
3.1.1. Analyse Granulométrique	12
3.1.2. Essai Triaxial.....	13
3.1.3. Essai de Cisaillement Direct :	14
3.2. Aspects techniques du dépouillement :	15
3.3. Les organigrammes du chaque module :	16
3.3.1Organigramme du code de cisaillement direct :	16
3.3.2. Organigramme du code de l'essai triaxial :	18
3.3.3. Organigramme du code de l'essai tamisage :	20
Chapitre 4 : Création et Présentation des Modules Geo_Code_Lab	22
Introduction :	22
4.1.Caractéristiques de Python :	22
4.2. Utilisations principales :	22
4.3. Avantages de python:	23
4.4. Limites de python:	23
4.5. La signification de l'appellation du programme (GEO code Lab) ????	23
4.6.Les modules de GEO code Lab :	23
4.7.Défis et Approches dans le Développement de Geo_Code_Lab avec Python :	23
Chapitre 5 : Tutoriel : GeoCode_Lab	29
1. Aperçu général de l'application :	29
2. Structure du programme	29
3. Comment utiliser l'application	31
4. Exemple d'utilisation	32
5. Dépannage	33
6. Améliorations possibles	33
Chapitre 6: Exemples de Calcules des Modules de Geo_Code_Lab	34
6.1.Exemple de calcule pour chaque module :	34
6.1.1.Exemple de calcule pour le module 1 :	34

6.1.2. Exemple de calcul pour le module 2 :	36
6.1.3.Exemple de calcul pour le module 3 :	38
Conclusion Générale.....	40
Références des Normes Géotechniques :	41

Liste des Figures

<i>Figure 2.1 : Courbes de chargement d'un essai de cisaillement directe.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2.2 : Droite de Mohr-Coulomb d'un essai de cisaillement directe.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2.3: exemple des cercles de Mohre essai triaxial.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2.4: exemple de la courbe granulométrie.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4.1 :le cercle de Mohr de Geo_Code_Lab avec le problème de point pik</i>	<i>24</i>
<i>Figure 4.2: Exultions avant modification.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 4.3: Icône de Geo_Code_Lab.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 4.4: Exécution de Geo_Code_Lab.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 4.5: Menu principal de Geo_Code_Lab.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 4.6: Module1 de Geo_Code_Lab.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4.7: Module 2 de Geo_Code_Lab.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4.8: Module 3 de Geo_Code_Lab.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 4.9: Page d'aide de Geo_Code_Lab.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 5.1: Donnes de l'essai de tamisage</i>	<i>34</i>
<i>Figure 5.2: Résultat de l'essai de tamisage.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 5.3: Courbe granulométrie.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 5.4: les donnes de l'essai triaxial</i>	<i>36</i>
<i>Figure 5.5: résultat de l'essai triaxial.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 5.6: Courbe divatorique de l'essai triaxial.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 5.7: Cercles de Mohr pour l'essai triaxial</i>	<i>37</i>
<i>Figure 5.8: Donnes de l'essai cisaillement direct.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 5.9: Résultat de l'essai de cisaillement direct</i>	<i>38</i>
<i>Figure 5.10: Courbes contrainte tangentielle en fonction du déplacement latéral.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 5.11: Droite de Mohr-Coulomb de l'essai cisaillement direct.....</i>	<i>39</i>

Liste des Tableaux

*Tableau 1: Données de l'essai de tamisage*_____34

Liste des symboles

Symboles liés à l'analyse granulométrique (Essai de tamisage) :

- **Cu** : Coefficient d'uniformité
- **Cc** : Coefficient de courbure
- **D₁₀** : Diamètre effectif pour lequel 10 % des particules passent (en mm).
- **D₃₀** : Diamètre pour lequel 30 % des particules passent (en mm).
- **D₆₀** : Diamètre pour lequel 60 % des particules passent (en mm).
- **% Fines** : Pourcentage de particules inférieures à 0,063 mm.

Symboles liés à l'essai de cisaillement direct :

- **τ** : Contrainte de cisaillement (en kPa ou N/mm²)
- **σ_n** : Contrainte normale appliquée (en kPa).
- **c** : Cohésion du sol (en kPa ou N/mm²).
- **ϕ** : Angle de frottement interne (en degrés).
- **F** : Effort de cisaillement mesuré (en N).
- **A** : Section de l'échantillon (en mm²).
- **δ_h** : Déplacement horizontal (en mm).
- **δ_v** : Tassement vertical (en mm).
- **τ_{max}** : Contrainte de cisaillement maximale à la rupture.
- **Sc** : Surface corrigée
- **DL** : Déplacement latéral (en mm).
- **T** : Force tangentielle (en N).

Symboles liés à l'essai triaxial :

- **σ_1** : Contrainte axiale principale (en kPa).
- **σ_3** : Contrainte de confinement (pression horizontale, en kPa).
- **σ_d** : Contrainte déviatorique,
- **q** : Contrainte déviatorique (équivalent à σ_d , en kPa).
- **q_{max}** : Contrainte déviatorique maximale.
- **ϵ** : Déformation axiale (en %).
- **u** : Pression interstitielle (en kPa, mesurée dans les essais CU).
- **c** : Cohésion (en kPa).
- **ϕ** : Angle de frottement interne (en degrés).
- **σ_v** : Contrainte verticale (en kPa).
- **σ_h** : Contrainte horizontale (en kPa).

- **Symboles liés aux limites d'Atterberg :**

- **WL** : Limite de liquidité (en %).
- **WP** : Limite de plasticité (en %).
- **WR** : Limite de retrait (en %).
- **IP** : Indice de plasticité (en %).

Symboles liés à la teneur en eau :

- **w** : Teneur en eau (en %)
- **m_h** : Masse de l'échantillon humide (en g).
- **m_s** : Masse de l'échantillon sec (en g).

Symboles liés à l'essai Proctor (Compactage) :

- **ρ_d** : Masse volumique sèche
- **ρ_h** : Masse volumique humide (en g/cm³ ou t/m³).
- **w_{opt}** : Teneur en eau optimale (en %).
- **$\rho_{d\max}$** : Densité sèche maximale (en g/cm³ ou t/m³).

Symboles liés à l'essai œdométrique :

- **C_v** : Coefficient de consolidation (en m²/s).
- **C_c** : Indice de compression.
- **C_s** : Indice de gonflement.
- **σ_p** : Contrainte de préconsolidation (en kPa).

Symboles liés à la perméabilité :

- **k** : Coefficient de perméabilité (en m/s)
- **Q** : Débit d'eau (en m³/s).
- **L** : Longueur de l'échantillon (en m).
- **A** : Section transversale (en m²).
- **h** : Hauteur de charge hydraulique (en m).
- **t** : Temps (en s).

Symboles liés à l'essai de compression simple :

- **q_u** : Résistance à la compression non confinée (en kPa)
- **F_{max}** : Force maximale à la rupture (en N).
- **c_u** : Cohésion apparente (en kPa).

Symboles liés à l'essai de gonflement :

- **Indice de gonflement** : Variation de hauteur exprimée en pourcentage.

Symboles généraux :

- **E** : Module de déformation (en kPa ou MPa, mentionné dans l'essai triaxial).

Introduction Générale :

Le projet de fin d'études (PFE) intitulé « Geo_Code_Lab » s'inscrit à l'intersection du génie civil et de l'informatique, proposant une application novatrice pour automatiser l'analyse des résultats d'essais géotechniques en laboratoire. Cette initiative répond à un besoin crucial des ingénieurs géotechniciens : rationaliser le traitement des données issues d'essais complexes, tels que l'analyse granulométrique, l'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial, afin d'améliorer la précision, de réduire le temps d'analyse et de standardiser les résultats conformément aux normes internationales (ASTM, NF, Eurocode 7). En exploitant la puissance de Python, avec des bibliothèques comme NumPy, Pandas, Matplotlib et Tkinter, Geo_Code_Lab offre une interface utilisateur intuitive, des calculs automatisés et des visualisations graphiques (courbes granulométriques, cercles de Mohr, diagrammes de Mohr-Coulomb), facilitant ainsi la prise de décision pour la conception d'ouvrages de génie civil, tels que les fondations, les remblais ou les talus.

Ce mémoire est structuré en six chapitres, chacun abordant un aspect clé du projet. Le **Chapitre 1** présente une vue d'ensemble des essais géotechniques de laboratoire, détaillant leurs objectifs, leurs méthodologies et leur importance dans la caractérisation des sols, tout en introduisant les méthodes de dépouillement des résultats. Le **Chapitre 2** se concentre sur les trois essais programmés dans Geo_Code_Lab (cisaillement direct, triaxial et tamisage), expliquant leurs principes, équipements, procédures et applications dans l'ingénierie géotechnique. Le **Chapitre 3** décrit les procédures de dépouillement implémentées dans l'application, accompagnées d'organigrammes qui illustrent les algorithmes de calcul pour chaque essai. Le **Chapitre 4** détaille le développement technique de Geo_Code_Lab, mettant en lumière les caractéristiques de Python, les défis rencontrés (notamment la traduction des équations géotechniques en code et la conception de l'interface graphique), ainsi que la collaboration avec des experts pour surmonter ces obstacles. Le **Chapitre 5** propose un tutoriel complet pour l'utilisation de l'application, expliquant la structure des modules, les étapes de saisie des données, et la consultation des résultats et graphiques. Enfin, le **Chapitre 6** illustre des exemples concrets de calculs effectués par chaque module, démontrant la fiabilité et l'efficacité de Geo_Code_Lab à travers des résultats visuels et numériques.

Ce projet ne se contente pas de répondre à un besoin technique ; il illustre également la synergie entre la géotechnique et les technologies numériques, offrant une solution évolutive qui peut intégrer de nouveaux essais ou normes à l'avenir. Geo_Code_Lab ambitionne de devenir un outil incontournable pour les laboratoires géotechniques, en optimisant l'analyse des sols et en contribuant à la conception d'ouvrages durables et sécurisés.

Chapitre 1 : Présentation des Essais Géotechniques de Laboratoire et Dépouillement des Résultats

Introduction :

Les essais géotechniques de laboratoire jouent un rôle essentiel dans l'étude des propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des sols et des roches. Ces tests, réalisés dans des conditions contrôlées, permettent d'obtenir des données précises pour caractériser les matériaux géologiques et orienter les choix de conception dans les projets de génie civil, tels que la construction de fondations, de routes ou d'ouvrages souterrains. Cette caractérisation est cruciale pour garantir la sécurité, la stabilité et la durabilité des structures. Ce chapitre présente une vue d'ensemble des principaux types d'essais géotechniques réalisés en laboratoire, leurs objectifs, leurs méthodologies et leur importance dans l'analyse des comportements des sols face aux contraintes imposées par les projets d'ingénierie.

1.1. Essais Géotechniques de Laboratoire

1.1.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique détermine la répartition des tailles des particules d'un sol (sable, limon, argile) par tamisage pour les sols grossiers ou sédimentométrie pour les sols fins. Pour le tamisage, on calcule les pourcentages de refus et de passant cumulés pour chaque tamis, puis on trace la courbe granulométrique (diamètre en fonction de % passant). En sédimentométrie, la loi de Stokes est appliquée pour déterminer la taille des particules en fonction du temps de sédimentation. Les résultats incluent les coefficients d'uniformité et de courbure, ainsi que la classification du sol selon les systèmes de classification, tels que, USCS .

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1.1)$$

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (1.2)$$

1.1.2. Limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg mesurent les limites de consistance d'un sol fin, incluant la limite de liquidité (WL), la limite de plasticité (WP) et la limite de retrait (WR), pour évaluer son comportement plastique. La limite de liquidité (WL) est déterminée par le nombre de coups au dispositif de Casagrande ou par un essai au cône de pénétration pour atteindre une fermeture de fissure standard. La limite de plasticité (WP) correspond à la teneur en eau à laquelle le sol devient friable et non plastique lors d'un roulage à 3 mm. L'indice de plasticité ($IP = WL - WP$) permet de classer le sol, par exemple comme argile plastique ou limon. Les résultats sont représentés sur un diagramme de plasticité (IP en fonction de WL) pour une classification selon la A-line.

1.1.3. Teneur en eau :

La teneur en eau mesure la quantité d'eau dans un échantillon de sol, exprimée en pourcentage du poids sec. On pèse l'échantillon humide (m_h) et sec (m_s) après étuvage à 105°C. La formule utilisée est La teneur en eau (w %) est essentielle pour d'autres essais comme le compactage ou l'évaluation de la cohésion.

$$w = \left[\frac{(m_h - m_s)}{m_s} \right] \times 100 \quad (1.3)$$

1.1.4. Essai Proctor (compactage) :

L'essai Proctor évalue la densité sèche maximale ($\rho_d^{\max}$) et la teneur en eau optimale (w_{opt}) d'un sol compacté, utilisé pour les remblais ou fondations. L'échantillon est compacté à différentes teneurs en eau dans un moule standard avec une énergie définie. La densité sèche est calculée par la formule La courbe Proctor (ρ_d en fonction de w) est tracée pour identifier $\rho_d \max$ et w_{opt} . Les résultats servent à contrôler le compactage sur chantier, souvent à 95 % de $\rho_d^{\max}$.

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{(1 + w)} \quad (1.4)$$

1.1.5. Essai de cisaillement direct :

L'essai de cisaillement direct mesure la résistance au cisaillement d'un sol, caractérisée par la cohésion (c) et l'angle de frottement (ϕ), sous différentes contraintes normales. Une contrainte normale (σ_N) est appliquée, suivie d'un cisaillement progressif jusqu'à rupture. La contrainte de cisaillement à rupture (τ) est mesurée, et le critère de Mohr-Coulomb est tracé. Les résultats fournissent c (kPa) et ϕ (°), utiles pour analyser la stabilité des pentes ou fondations.

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (1.5)$$

1.1.6. Essai triaxial :

L'essai triaxial évalue les paramètres de résistance au cisaillement (c , ϕ) et le comportement du sol sous confinement, en simulant des conditions in situ. Une pression de confinement (σ_3) et un effort axial (σ_1) sont appliqués jusqu'à rupture. Les cercles de Mohr sont calculés pour différentes conditions (UU, CU, CD), permettant de déterminer c et ϕ via le critère de Mohr-Coulomb. Les résultats incluent les paramètres de résistance et le module de déformation (E) pour le dimensionnement.

1.1.7. Essai œdométrique :

L'essai œdométrique mesure la compressibilité et la consolidation d'un sol sous chargement vertical en une dimension. Des charges incrémentales sont appliquées, et les tassements sont mesurés. Le coefficient de consolidation (C_v) est calculé via la méthode de Casagrande ou Taylor. L'indice de compression (C_c), l'indice de gonflement (C_s) et la contrainte de préconsolidation (σ_p) sont déterminés. Ces résultats permettent de prévoir les tassements à long terme et le comportement du sol.

1.1.8. Mesure de la perméabilité :

La mesure de la perméabilité détermine la capacité d'un sol à laisser passer l'eau, exprimée par le coefficient de perméabilité (k). L'essai est réalisé à charge constante ou variable dans un perméamètre, en appliquant la loi de Darcy : La valeur de k (m/s) est utilisée pour analyser les écoulements, le drainage ou la stabilité.

1.1.9. Essai de compression simple :

L'essai de compression simple mesure la résistance à la compression non confinée (q_u) d'un sol cohérent, comme l'argile. Un chargement axial est appliqué jusqu'à rupture, et q_u est calculé par la formule , où F_{max} est la force maximale et A la section. La cohésion apparente est estimée par Les résultats indiquent la résistance à court terme pour les sols saturés.

$$q_u = \frac{F_{max}}{A} \quad (1.6)$$

$$c_u \approx \frac{q_u}{2} \quad (1.7)$$

1.1.10. Essai de gonflement :

L'essai de gonflement évalue le potentiel de gonflement des sols argileux en contact avec l'eau. La déformation verticale est mesurée sous contrainte ou en condition libre. L'indice de gonflement, exprimé en pourcentage de variation de hauteur, est calculé. Les résultats permettent d'identifier les risques pour les fondations, notamment avec les sols expansifs.

1.2. Méthodes de dépouillement des résultats :

Le dépouillement des résultats en géotechnique consiste à analyser, interpréter et présenter les données issues d'essais in situ ou en laboratoire afin de fournir des informations exploitables pour la conception et la validation des projets d'ingénierie. Cette étape est cruciale pour garantir la fiabilité des paramètres géotechniques utilisés dans les calculs de stabilité, de tassement ou de drainage. Voici une présentation détaillée des méthodes de dépouillement, incluant les outils de présentation, les normes de référence et les applications des données.

1.2.1. Présentation des résultats :

Les résultats des essais géotechniques sont généralement organisés de manière claire et visuelle pour faciliter leur interprétation par les ingénieurs et les décideurs. Les formats les plus couramment utilisés incluent :

Graphiques :

Courbes : Les courbes sont utilisées pour représenter l'évolution de paramètres mesurés, comme la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale (essai triaxial) ou la pression interstitielle en fonction du temps (essai de consolidation). Par exemple, une courbe de consolidation permet de déterminer le coefficient de consolidation (C_v) et le tassement prévisionnel.

Diagrammes : Les diagrammes en barres ou en secteurs sont employés pour comparer des propriétés comme la granulométrie ou les indices de plasticité entre différents échantillons de sol.

Profils géotechniques : Des coupes géologiques ou des profils de paramètres (ex. : module de déformation, résistance au pénétromètre) sont tracés pour visualiser les variations des propriétés du sol avec la profondeur ou l'espace.

Tableaux récapitulatifs :

Les tableaux synthétisent les données brutes et calculées, comme les valeurs de cohésion (c), d'angle de frottement interne (ϕ), ou de compressibilité (C_c). Ils permettent une comparaison rapide entre échantillons ou entre résultats d'essais différents (ex. : essai pressiométrique et essai CPT). Ces tableaux incluent souvent des statistiques descriptives (moyennes, écarts-types) pour évaluer la variabilité des données.

Cartographies

Dans le cas d'études de sites étendus, les résultats peuvent être présentés sous forme de cartes géotechniques, montrant par exemple la répartition spatiale des types de sols ou des paramètres de résistance.

1.2.2. Normes de référence :

Les procédures de dépouillement et d'interprétation des résultats sont encadrées par des normes internationales et nationales, garantissant l'uniformité et la reproductibilité des analyses. Parmi les normes les plus utilisées, on trouve :

- ASTM (American Society for Testing and Materials) : Fournit des protocoles pour les essais comme l'essai de cisaillement direct (ASTM D3080) ou l'essai de perméabilité (ASTM D2434).
- NF (Normes Françaises) : En France, les normes NF, comme la NF P94-110 pour l'essai pressiométrique, définissent les méthodes de calcul des paramètres comme le module pressiométrique (EM) ou la pression limite (PL).
- Eurocode 7 : Cette norme européenne guide l'interprétation des résultats pour la conception géotechnique, en mettant l'accent sur les facteurs de sécurité et les méthodes de calcul (ex. : stabilité des pentes, capacité portante des fondations).

Ces normes spécifient les méthodes de mesure, les formules de calcul, les seuils d'acceptabilité et les critères d'interprétation, assurant ainsi que les résultats sont cohérents et comparables à l'échelle internationale.

1.2.3. Applications des données :

Les données dépouillées servent à plusieurs objectifs dans les projets géotechniques :

Classification des sols :

Les résultats d'essais comme l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg ou l'essai Proctor permettent de classer les sols selon des systèmes comme l'USCS (Unified Soil Classification System) ou le LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées). Par exemple, un sol avec un indice de plasticité élevé sera classé comme argileux, ce qui influencera les choix de conception.

Calcul des paramètres de conception :

Stabilité : Les paramètres comme la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (ϕ), obtenus par des essais triaxiaux ou de cisaillement direct, sont utilisés pour évaluer la stabilité des talus, des murs de soutènement ou des fondations.

Tassement : Les essais de consolidation (œdomètre) fournissent des paramètres comme le coefficient de consolidation (C_v) et l'indice de compression (C_c), essentiels pour estimer le tassement des fondations sous charge.

Drainage : Les essais de perméabilité permettent de déterminer le coefficient de perméabilité (k), crucial pour concevoir des systèmes de drainage ou évaluer les risques de liquéfaction.

Validation des modèles géotechniques :

Les données expérimentales sont comparées aux prédictions des modèles théoriques ou numériques (ex. : modèles éléments finis). Par exemple, les résultats d'un essai CPT (Cone Penetration Test) peuvent être utilisés pour calibrer un modèle de capacité portante d'une fondation profonde.

Conclusion

Ce chapitre offre un panorama complet des principales méthodes d'essais géotechniques, incluant l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, la teneur en eau, l'essai Proctor, le cisaillement direct, l'essai triaxial, l'essai œdométrique, la perméabilité, la compression simple et l'essai de gonflement. Chaque méthode est essentielle pour caractériser les propriétés des sols, telles que la répartition granulométrique, la plasticité, la résistance au cisaillement, la compressibilité et la perméabilité, indispensables pour des décisions d'ingénierie éclairées. Les techniques de dépouillement, encadrées par des normes comme ASTM, NF et Eurocode 7, garantissent des résultats fiables et reproductibles. Ces résultats sont présentés sous forme de graphiques, tableaux et profils géotechniques, facilitant la classification des sols (ex. : USCS) et la détermination des paramètres de conception pour la stabilité, le tassement et le drainage. Les données soutiennent la conception et la validation des projets géotechniques, assurant des solutions sûres et efficaces pour les fondations, talus et autres structures. En intégrant ces méthodes d'essais et leur analyse rigoureuse, les ingénieurs peuvent évaluer précisément le comportement des sols et minimiser les risques dans les projets de construction.

Chapitre 2 : Présentation des Essais Géotechniques proposés pour la programmation

Introduction :

Dans le domaine du génie civil, la compréhension des propriétés mécaniques et physiques des sols est essentielle pour concevoir des ouvrages durables et sécurisés. Ce chapitre se consacre à l'étude de trois essais géotechniques fondamentaux intégrés en tant que modules dans un programme de calcul de génie civil : l'essai de cisaillement direct, l'essai triaxial et l'essai de tamisage. Ces essais permettent respectivement d'évaluer la résistance au cisaillement des sols, leurs comportements sous contraintes complexes, et leur granulométrie. En combinant les résultats de ces essais, les ingénieurs peuvent modéliser avec précision le comportement des sols et optimiser les conceptions structurales. Ce chapitre explore les principes, les méthodologies et l'intégration de ces essais dans un environnement numérique, mettant en lumière leur rôle crucial dans l'analyse géotechnique moderne.

2.1. Essais Géotechniques proposés pour la programmation

2.1.1. Essai de cisaillement direct

Définition et objectif :

L'essai de cisaillement direct mesure la résistance au cisaillement d'un sol (cohésion c et angle de frottement interne ϕ) en simulant la rupture le long d'un plan prédéfini. Il est utilisé pour évaluer la stabilité des pentes, des remblais, ou des fondations.

Principe :

Un échantillon de sol est placé dans une boîte de cisaillement carrée ou circulaire, divisée en deux parties (supérieure et inférieure). Une contrainte normale est appliquée verticalement, et un effort horizontal est exercé pour provoquer un cisaillement le long du plan de séparation.

Équipement :

- Boîte de cisaillement (généralement 60 x 60 mm ou 100 x 100 mm pour les sols fins, plus grande pour les sols graveleux).
- Dispositif de chargement vertical (poids ou vérin).
- Système de cisaillement horizontal (moteur ou vérin).
- Capteurs pour mesurer les déplacements (horizontal et vertical) et les efforts.

Procédure :

- Préparation de l'échantillon : Sol reconstitué (compacté à une densité donnée) ou intact, placé dans la boîte.
- Application d'une contrainte normale (σ_N) constante (ex. : 50, 100, 200 kPa).
- Cisaillement : Déplacement horizontal à vitesse contrôlée (ex. : 0,1 à 1 mm/min, selon la norme et le type de sol).

- Mesure des paramètres : Effort de cisaillement (F), déplacement horizontal (ΔH), et éventuellement tassement vertical (ΔV).
- Répétition pour différentes contraintes normales (au moins 3 essais).

Dépouillement des résultats :

- Contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

où F est l'effort mesuré et A la section de l'échantillon.

- Courbe de cisaillement : Tracer τ en fonction de ΔH pour chaque contrainte normale.
- Identifier la contrainte maximale ($\tau_{\max}$) ou la contrainte résiduelle, $\tau_{\text{résid}}$ (pour les sols argileux).
- Critère de Mohr-Coulomb : Tracer $\tau_{\max}$ en fonction de σ_N pour chaque essai. La droite obtenue suit l'équation :

$$\tau = c + \sigma_N \tan(\varphi) \quad (2.2)$$

- c (cohésion, en kPa) : ordonnée à l'origine.
- φ (angle de frottement, en degrés) : pente de la droite ($\tan^{-1}(\text{pente})$).

Résultats typiques :

- Sols granulaires : $c \approx 0$, $\varphi = 30-40^\circ$.
- Sols cohérents : $c > 0$, $\varphi = 15-30^\circ$.
- Analyse des déformations : Tassement ou dilatation (pour les sols denses).

Normes :

ASTM D3080, NF P94-071, Eurocode 7.

Avantages et limites de l'essai :

Avantages : Simple, rapide, adapté pour les sols granulaires et cohérents.

Limites : Plan de rupture imposé, ne simule pas les conditions triaxiales in situ, sensible à la préparation de l'échantillon.

Exemple de courbe :

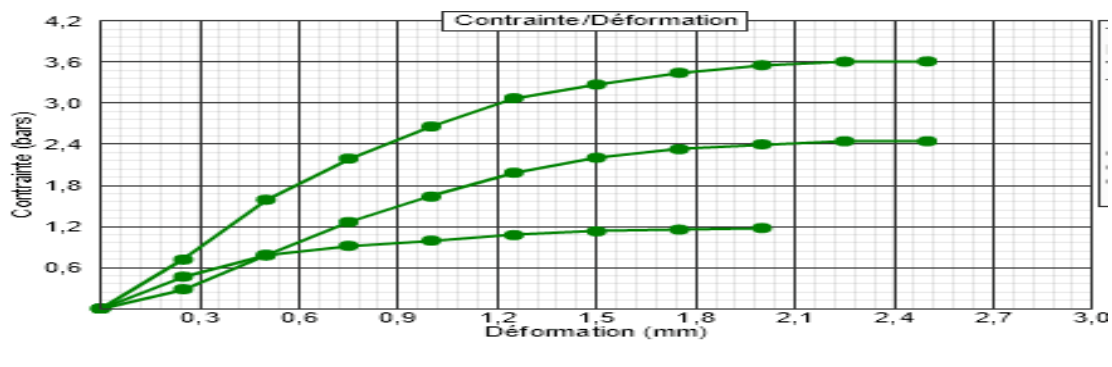


Figure 0.1 : Courbes de chargement d'un essai de cisaillement directe

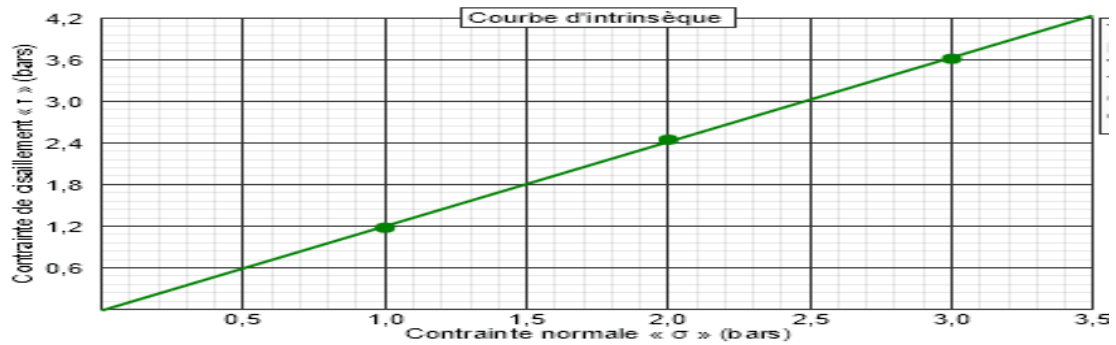


Figure 0.2 : Droite de Mohr-Coulomb d'un essai de cisaillement directe

2.1.2. Essai triaxial :

Définition et objectif :

L'essai triaxial évalue les paramètres de résistance au cisaillement (c , ϕ) et le comportement mécanique d'un sol sous confinement, en reproduisant des conditions proches de celles in situ. Il est utilisé pour le dimensionnement des fondations, talus, et ouvrages de soutènement.

Principe :

Un échantillon cylindrique est soumis à une pression de confinement isotrope (σ_3) dans une cellule remplie de fluide, puis à un chargement axial (σ_1) jusqu'à rupture. Plusieurs types d'essais existent : non consolidé non drainé (UU), consolidé non drainé (CU), consolidé drainé (CD).

Équipement :

- Cellule triaxiale avec membrane en caoutchouc pour envelopper l'échantillon.
- Système de pression (eau ou air) pour appliquer σ_3 .
- Vérin pour le chargement axial.
- Capteurs pour mesurer la contrainte axiale, la déformation, et la pression interstitielle (pour CU/CD).
- Système de drainage (pour CD).

Procédure :

- Préparation : Échantillon cylindrique (ex. : 38 mm de diamètre, 76 mm de hauteur) intact ou reconstitué.
- Saturation (pour CU/CD) : Injection d'eau pour saturer l'échantillon.
- Consolidation (pour CU/CD) : Application de σ_3 pendant un temps suffisant pour permettre la dissipation des pressions interstitielles.

Chargement :

UU : Chargement rapide sans consolidation ni drainage.

CU : Consolidation préalable, chargement sans drainage (mesure de la pression interstitielle).

CD : Consolidation, chargement lent avec drainage.

Mesure des paramètres : Contrainte axiale (σ_1), déformation axiale (ϵ), pression interstitielle (u , pour CU).

Répétition pour différentes valeurs de σ_3 (ex. : 100, 200, 300 kPa).

Dépouillement des résultats :

- Contrainte déviatorique, mesurée à la rupture

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.3)$$

- Cercles de Mohr : Pour chaque essai, tracer le cercle de Mohr avec :

$$Diamètre = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.4)$$

$$Centre = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (2.5)$$

- Critère de Mohr-Coulomb : Tracer l'enveloppe de rupture tangente aux cercles. La droite donne :

$$\tau = c + \sigma \times \tan(\varphi) \quad (2.6)$$

Paramètres spécifiques :

- UU : Cohésion non drainée (c_u), $\varphi \approx 0$ pour les sols saturés.
- CU : c et φ effectifs, pression interstitielle à la rupture.
- CD : c' et φ' effectifs, comportement drainé à long terme.
- Module de déformation (E) : Calculé à partir de la pente de la courbe σ_d en fonction ϵ .

Résultats typiques :

Sols granulaires : $c \approx 0$, $\varphi = 30-45^\circ$.

Argiles : $c > 0$, $\varphi = 10-30^\circ$ (selon drainage).

Normes :

ASTM D2850 (UU), D4767 (CU), D7181 (CD), NF P94-074.

Avantages et limites :

Avantages : Simule les conditions in situ, polyvalent (UU, CU, CD), mesure des pressions interstitielles.

Limites : Équipement complexe, temps long pour CU/CD, nécessite des échantillons de qualité.

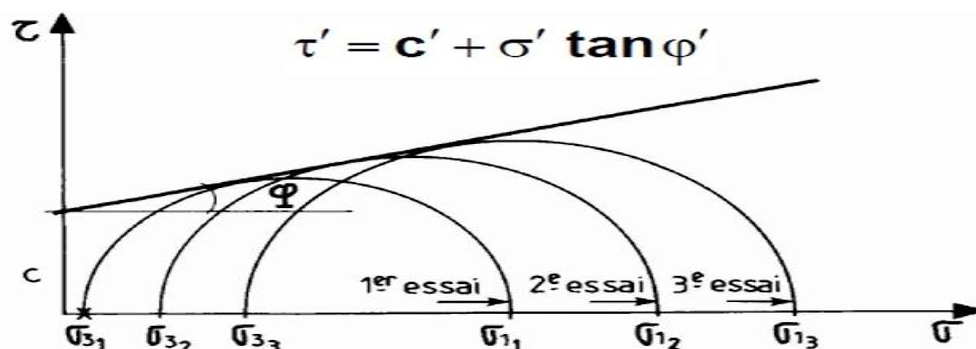


Figure 0.3: exemple des cercles de Mohr essai triaxial

2.1.3. Essai de tamisage (Analyse granulométrique) :

Définition et objectif :

L'essai de tamisage détermine la répartition des tailles des particules d'un sol grossier (graviers, sables) en les passant à travers une série de tamis à mailles décroissantes. Il sert à classer le sol et à évaluer son aptitude pour des usages comme les remblais ou les bétons.

Principe :

Un échantillon de sol sec est passé à travers une colonne de tamis empilés, agités mécaniquement. Les particules sont séparées selon leur taille, et le poids retenu sur chaque tamis est mesuré.

Équipement :

- Tamis normalisés (ex. : ouvertures de 0,08 mm à 80 mm, selon normes).
- Tamiseuse mécanique (vibrante ou rotative).
- Balance de précision.
- Bac de récupération (fond).

Procédure :

- Préparation : Séchage de l'échantillon (105°C) et pesée initiale (m_{total}).
- Tamisage : Placement de l'échantillon sur le tamis supérieur, agitation pendant 5-10 minutes.
- Pesée des fractions retenues sur chaque tamis (m_i) et dans le bac.
- Vérification : Somme des masses ($\sum m_i \approx m_{total}$ (écart < 1 %)).

Dépouillement des résultats :

- Pourcentage retenu :

$$retenu (\%) = \frac{m_i}{m_{total}} \times 100 \quad (2.7)$$

- Pourcentage passant :

$$passant (\%) = 100 - retenu_{cumulé} (\%) \quad (2.8)$$

- Courbe granulométrique : Tracer le passant (%) en fonction du diamètre des mailles (échelle logarithmique pour les diamètres).

Paramètres clés :

- D10, D30, D60 : Diamètres pour lesquels 10 %, 30 %, et 60 % du sol passent.
- Coefficient d'uniformité :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.9)$$

- Coefficient de courbure :

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} \quad (2.10)$$

- Classification : Selon Cu et Cc, et systèmes comme USCS :
- $Cu < 6$ (sol uniforme) ou > 6 (sol bien gradué).
- Cc entre 1 et 3 (sol bien gradué).

Résultats typiques : Ex. : Sable fin ($D_{50} \approx 0,2-0,6$ mm), gravier ($D_{50} > 2$ mm).

Normes :

ASTM D6913, NF P94-056, EN ISO 17892-4.

Avantages et limites :

Avantages : Simple, rapide, reproductible.

Limites : Inadapté pour les sols fins ($< 0,08$ mm, nécessite sédimentométrie), sensible à la qualité du tamisage.

Exemple de la courbe :

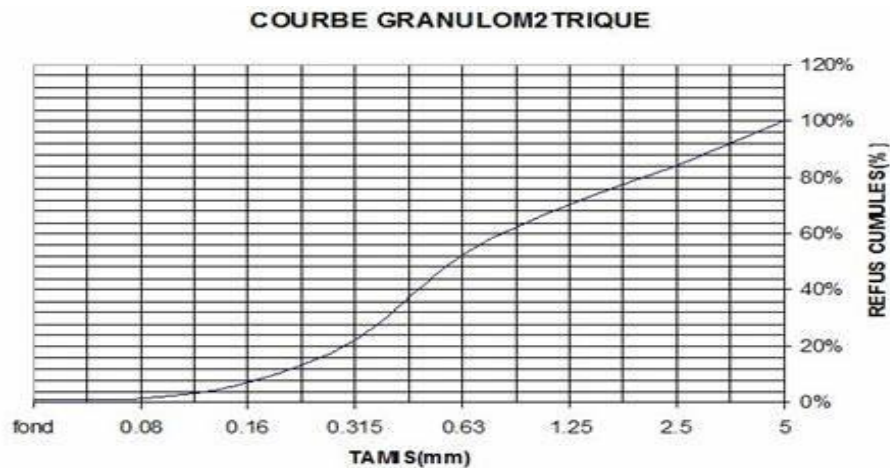


Figure 0.4: exemple de la courbe granulométrie

Synthèse et remarques :

Cisaillement direct : Idéal pour des analyses rapides de résistance, mais limité par le plan de rupture imposé.

Triaxial : Plus représentatif des conditions in situ, mais complexe et coûteux.

Tamissage : Fondamental pour la classification granulométrique, mais complémentaire à la sédimentométrie pour les sols fins.

Les résultats sont utilisés pour le dimensionnement (stabilité, tassement) et la classification des sols selon des normes (ex. : Eurocode 7).

Conclusion :

Les essais de cisaillement direct, triaxial et de tamissage constituent des piliers fondamentaux de l'analyse géotechnique, offrant des données essentielles pour caractériser les propriétés mécaniques et physiques des sols. Leur importance en génie civil c'est de permet aux ingénieurs de modéliser avec précision le comportement des sols sous diverses conditions de contraintes et de granulométrie.

Chapitre 3 : Présentation de la Procédure de Dépouillement et Élaboration des Organigrammes

Introduction :

Le chapitre suivant présente la procédure de dépouillement des résultats des trois essais géotechniques implémentés dans L'application GeoCode_Lab, elle est développée en Python, propose une interface utilisateur intuitive avec des fonctionnalités de saisie, de calcul automatisé et de visualisation graphique des résultats. Cette section détaille les étapes de dépouillement, les formules utilisées, ainsi que les aspects techniques de l'interface et des calculs, offrant ainsi une vue d'ensemble des capacités de l'application pour le traitement des données géotechniques.

3.1Présentation de la procédure de dépouille propose :

La procédure de dépouillement des résultats dans l'application **GeoCode_Lab** concerne trois essais géotechniques : **Analyse Granulométrique**, **Essai Triaxial**, et **Essai de Cisaillement Direct**. Voici une présentation détaillée de la procédure pour chaque essai, telle qu'implémentée dans le code Python fourni :

3.1.1. Analyse Granulométrique

Objectif : Déterminer la répartition granulométrique d'un sol, calculer les paramètres (D10, D30, D60, Cu, Cc) et fournir une classification USCS.

Procédure de dépouillement :

Saisie des données :

L'utilisateur entre les masses retenues (en grammes) pour une série de tamis de tailles décroissantes : 20, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 mm.

Entrée de la masse totale de l'échantillon et de la masse passant au tamis de 0.063 mm (fines).

Les données sont saisies dans l'onglet "Saisie des données" via des champs d'entrée.

Calculs :

- Calcul du refus cumulé : somme cumulative des masses retenues par chaque tamis.
- Calcul du pourcentage de passant :

$$passant (\%) = 100 - \left(\frac{refus_{cumulé}}{masse_{totale}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

- Ajout du pourcentage de fines (basé sur la masse passant à 0.063 mm).

Détermination des diamètres caractéristiques :

D10, D30, D60 : diamètres pour lesquels 10 %, 30 %, et 60 % de la masse passent, calculés par interpolation linéaire sur une échelle logarithmique des tailles de tamis.

Calcul des coefficients :

- **Coefficient d'uniformité (Cu) :** $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$
- **Coefficient de courbure (Cc) :** $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$

Classification USCS basée sur le pourcentage de fines et les coefficients Cu et Cc :

- Fines < 5 % : GW (grave bien graduée) si $Cu > 4$ et $1 \leq Cc \leq 3$, sinon GP (grave mal graduée).
- $5\% \leq \text{Fines} < 12\%$: SW (sable bien gradué) si $Cu > 6$ et $1 \leq Cc \leq 3$, sinon SP (sable mal gradué).
- Fines $\geq 12\%$: SC ou SM (sable argileux/limoneux).

Affichage des résultats :

- Dans l'onglet "Résultats" : affichage des valeurs de D10, D30, D60, Cu, Cc, pourcentage de fines, et classification USCS.
- Dans l'onglet "Graphiques" : tracé de la courbe granulométrique (% passant en fonction diamètre des grains en échelle logarithmique), avec des lignes verticales pour D10, D30, D60, et des zones colorées pour indiquer les fractions fines, sable, et grave.
- Les paramètres C_u , C_c et la classification sont annotés sur le graphique.

3.1.2. Essai Triaxial

Objectif :

Déterminer les paramètres de résistance au cisaillement (angle de frottement ϕ et cohésion c) à partir des données de contraintes et déformations de trois essais triaxiaux.

Procédure de dépouillement :

Saisie des données :

- Pour chaque essai (1, 2, 3), l'utilisateur entre :
- Les déformations axiales ε (%) pour 4 points.
- Les contraintes verticales σ_v (kPa) pour 4 points.
- Les contraintes horizontales σ_h (kPa) pour 4 points.
- Les données sont saisies dans l'onglet "Saisie des données".

Calculs :

- Calcul de la contrainte déviatorique q pour chaque point des trois essais.
- Identification de la contrainte déviatorique maximale ($q_{\max}$) pour chaque essai et des contraintes correspondantes (σ_v , σ_h).
- Calcul des paramètres de résistance (ϕ et c) via une régression linéaire optimisée :
- Centres des cercles de Mohr : $\frac{\sigma_v + \sigma_h}{2}$
- Rayons des cercles de Mohr : $\frac{\sigma_v - \sigma_h}{2}$

- Optimisation par la méthode Nelder-Mead pour trouver la droite intrinsèque ($\tau = \sigma \times \tan(\varphi) + c$) qui minimise la distance aux cercles de Mohr.
- Conversion de φ (pente) en angle de frottement en degrés :

$$angle = \arctan(\varphi) * \frac{180}{\pi} \quad (3.2)$$

Affichage des résultats :

- Dans l'onglet "Résultats" : affichage des contraintes maximales ($q_{\max}$, σ_v , σ_h) pour chaque essai, ainsi que l'angle de frottement φ (en degrés) et la cohésion c (en kPa).
- Dans l'onglet "Graphiques" :

Courbe déviatorique : Tracé de $q = f(\varepsilon)$ pour les trois essais.

Cercles de Mohr : Tracé des cercles de Mohr pour chaque essai (basé sur σ_1 et σ_3 au point de $q_{\max}$) avec la droite intrinsèque superposée, annotée avec φ et c .

3.1.3. Essai de Cisaillement Direct :

Objectif : Déterminer les paramètres de résistance au cisaillement (angle de frottement φ et cohésion c) à partir des données de forces tangentielles, déplacements latéraux, et contraintes verticales.

Procédure de dépouillement :

Saisie des données :

- Pour chaque essai (1, 2, 3), l'utilisateur entre :
- Les forces tangentielles $T(N)$ pour 6 points.
- Les déplacements latéraux D_L (mm) pour 6 points.
- Entrée des contraintes verticales σ_1 , σ_2 et σ_3 (kPa) appliquées pour chaque essai.
- Les données sont saisies dans l'onglet "Saisie des données".

Calculs :

- Calcul de la surface corrigée Sc (en mm^2) pour chaque point, en supposant une section initiale de 60x60 mm :

$$Sc = (60 - D_L) * \frac{60}{1000} \quad (3.3)$$

- Calcul de la contrainte tangentielle τ , pour chaque point.

$$\tau = \frac{T}{Sc} \quad (3.4)$$

- Identification de la contrainte tangentielle maximale $\tau_{\max}$ pour chaque essai.
- Calcul des paramètres de résistance (φ et c) par régression linéaire :

Données :

- Contraintes normales $N = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ et contraintes tangentielles $\tau = [\tau_{\max1}, \tau_{\max2}, \tau_{\max3}]$.
- Résolution de l'équation $\tau = \varphi\sigma + c$ par la méthode des moindres carrés.
- Conversion de φ en angle de frottement : $angle = \arctan(\varphi) * 180 / \pi$.

Affichage des résultats :

- Dans l'onglet "Résultats"

Affichage de l'angle de frottement φ (en degrés), de la cohésion c (en N/mm²), et de l'équation de la droite de Mohr-Coulomb.

Tableau récapitulatif des contraintes normales σ et des contraintes tangentielles $\tau_{\max}$ pour chaque essai.

- Dans l'onglet "Graphiques" :

Courbe de cisaillement : tracé de $\tau = f(DL)$ pour les trois essais, avec indication des points $\tau_{\max}$.

Droite de Mohr-Coulomb : tracé des points $(\sigma, \tau_{\max})$ avec la droite de régression, annotée avec φ et c .

Interface Utilisateur

Écran de démarrage : Affiche un logo, une animation de remplissage d'une fiole (représentant le chargement), et des informations sur l'application.

Menu principal : Permet de choisir entre les trois essais ou d'accéder à l'aide.

Structure des essais :

Chaque essai a trois onglets : **Saisie des données**, **Résultats**, et **Graphiques**.

Les onglets "Résultats" et "Graphiques" sont désactivés jusqu'à ce que les calculs soient effectués.

Aide : Une fenêtre contextuelle fournit des instructions sur l'utilisation de chaque module et un contact pour le support.

3.2. Aspects techniques du dépouillement :

Gestion des erreurs : Si des valeurs non numériques ou invalides sont entrées, un message d'erreur s'affiche.

Bibliothèques utilisées :

- **tkinter** : pour l'interface graphique.
- **matplotlib** : pour les graphiques (courbes granulométriques, cercles de Mohr, courbes de cisaillement).
- **numpy** : pour les calculs numériques (cumul, interpolation, régression).
- **scipy.optimize** : pour l'optimisation de la droite intrinsèque dans l'essai triaxial.

Visualisation : Les graphiques sont intégrés via FigureCanvasTkAgg pour une interaction fluide avec l'interface tkinter.

Résumé

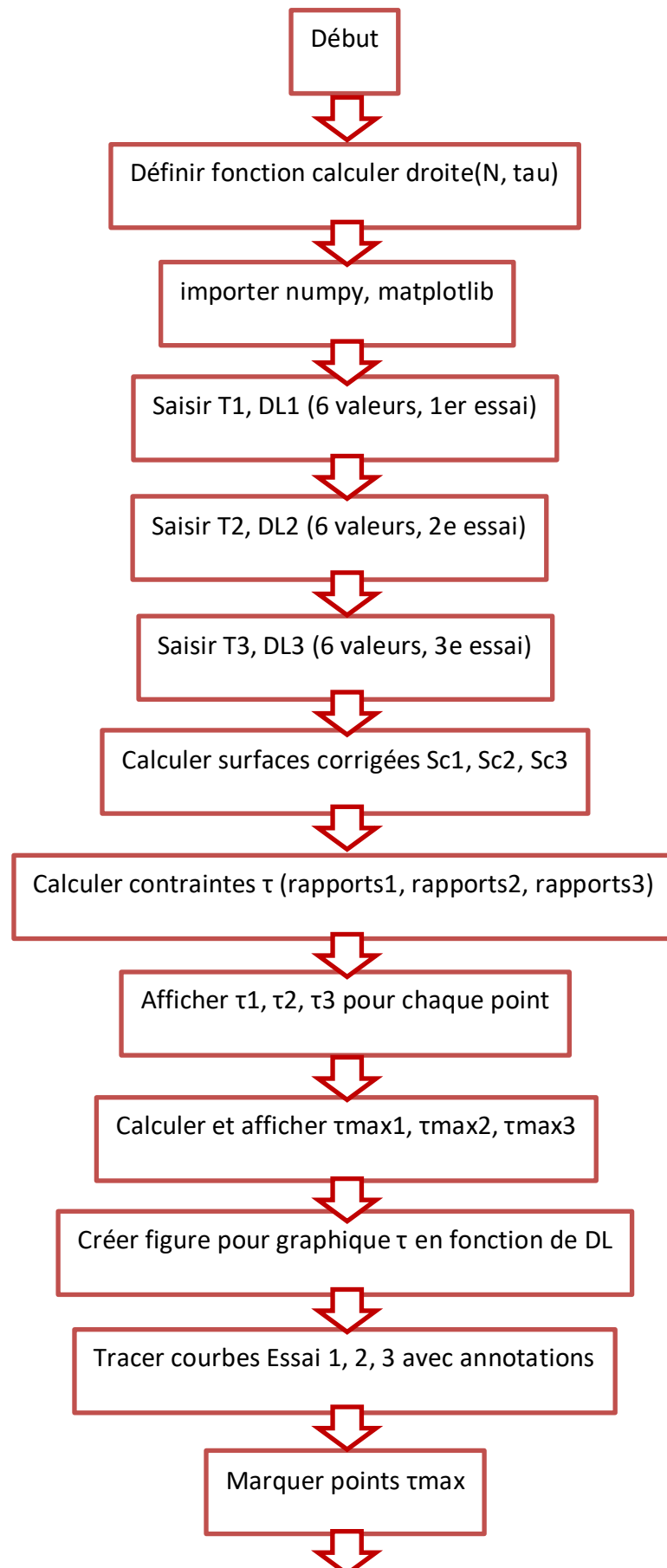
L'application **GeoCode_Lab** automatise le dépouillement des données géotechniques pour trois essais clés, en fournissant :

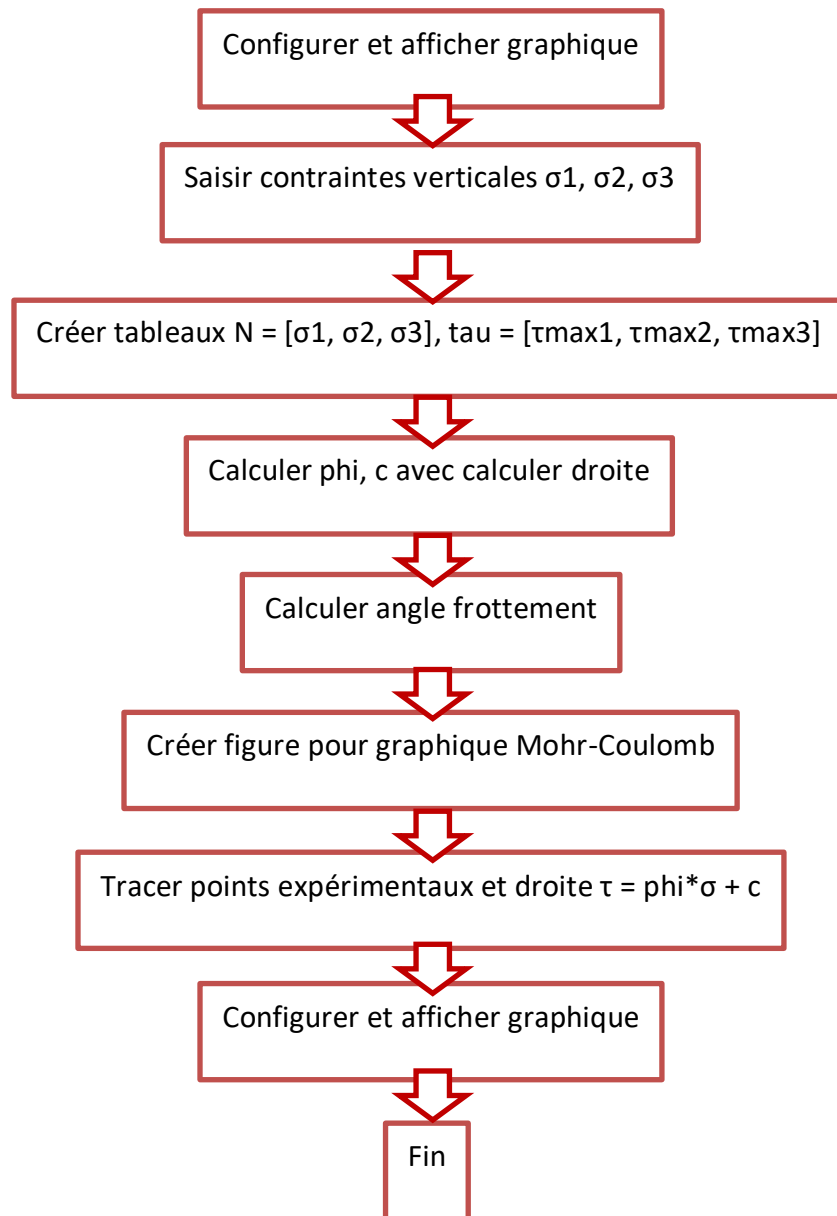
- Une interface conviviale pour la saisie des données.
- Des calculs précis pour les paramètres granulométriques (C_u , C_c , D_{10} , D_{30} , D_{60}) et de résistance (ϕ , c).
- Des visualisations graphiques claires (courbes granulométriques, cercles de Mohr, droites de Mohr-Coulomb).
- Une classification des sols selon le système USCS pour l'analyse granulométrique.

Cette procédure garantit une analyse rapide et fiable des résultats, avec une présentation visuelle adaptée aux besoins des ingénieurs en géotechnique.

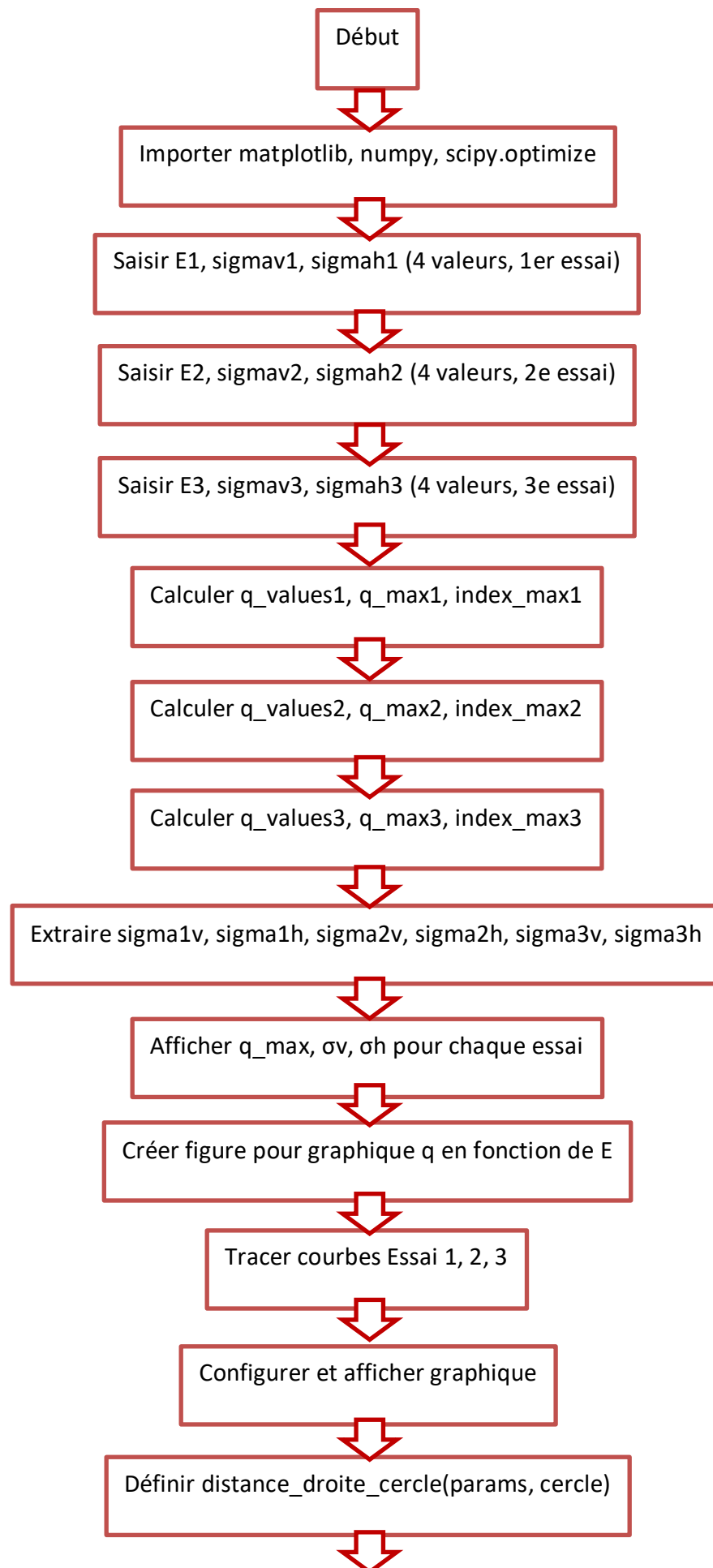
3.3. Les organigrammes du chaque module :

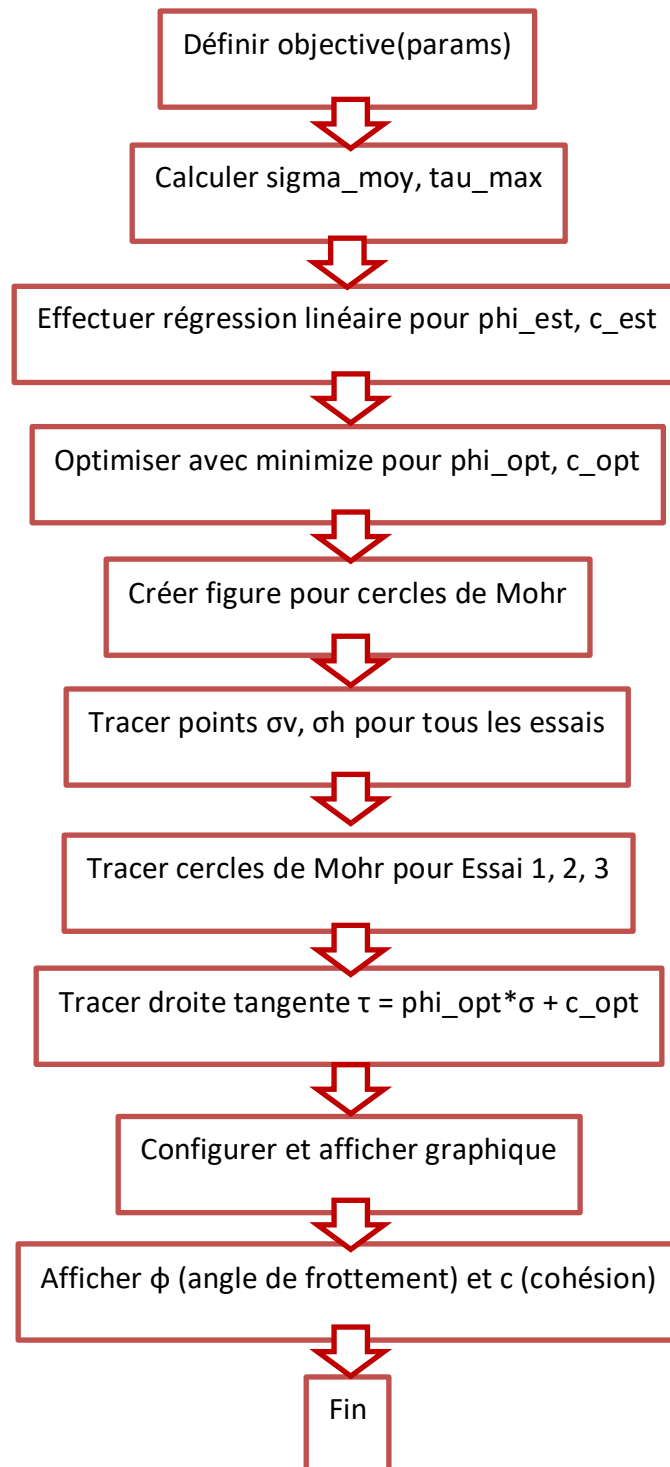
3.3.1 Organigramme du code de cisaillement direct :



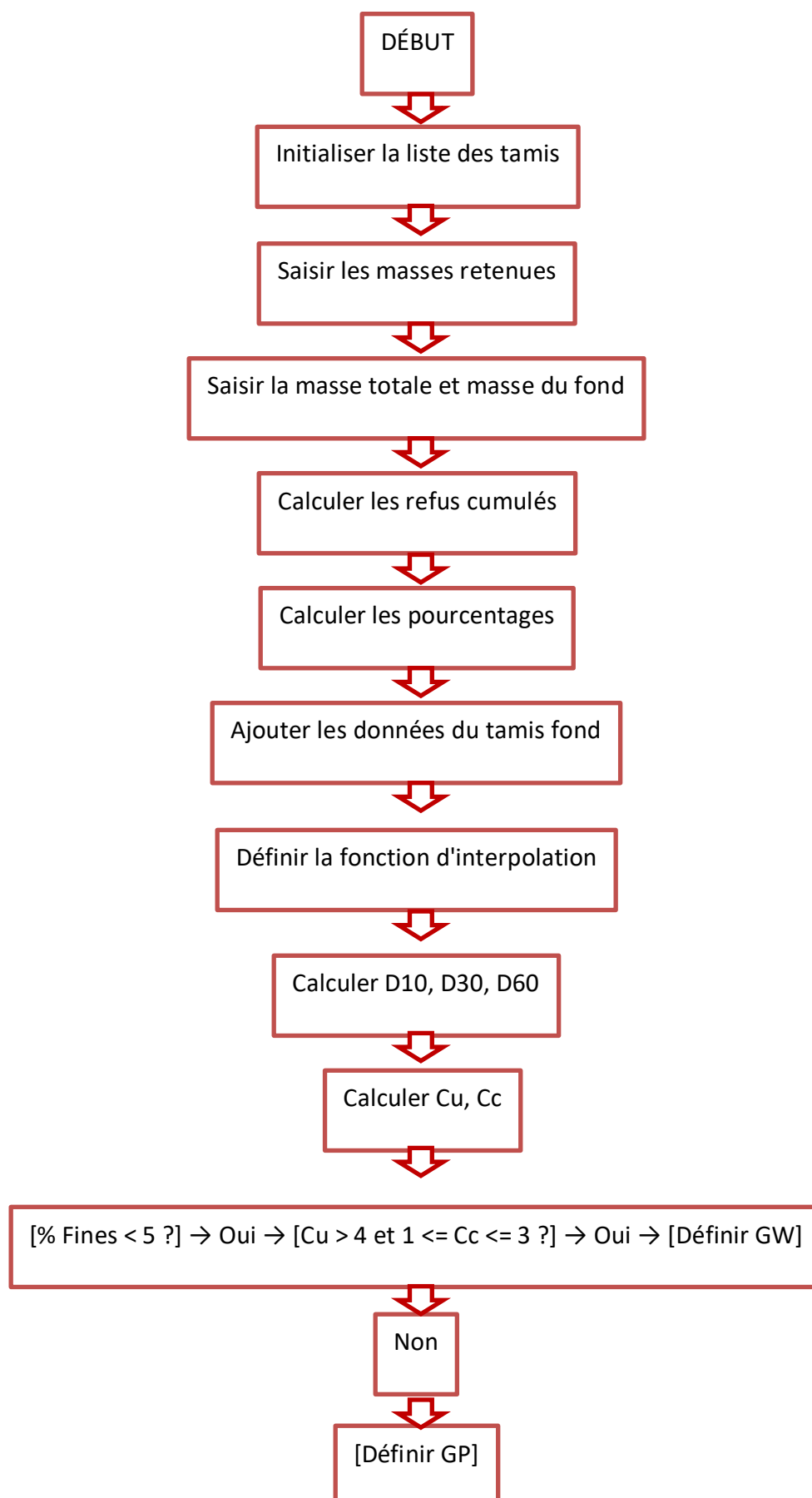


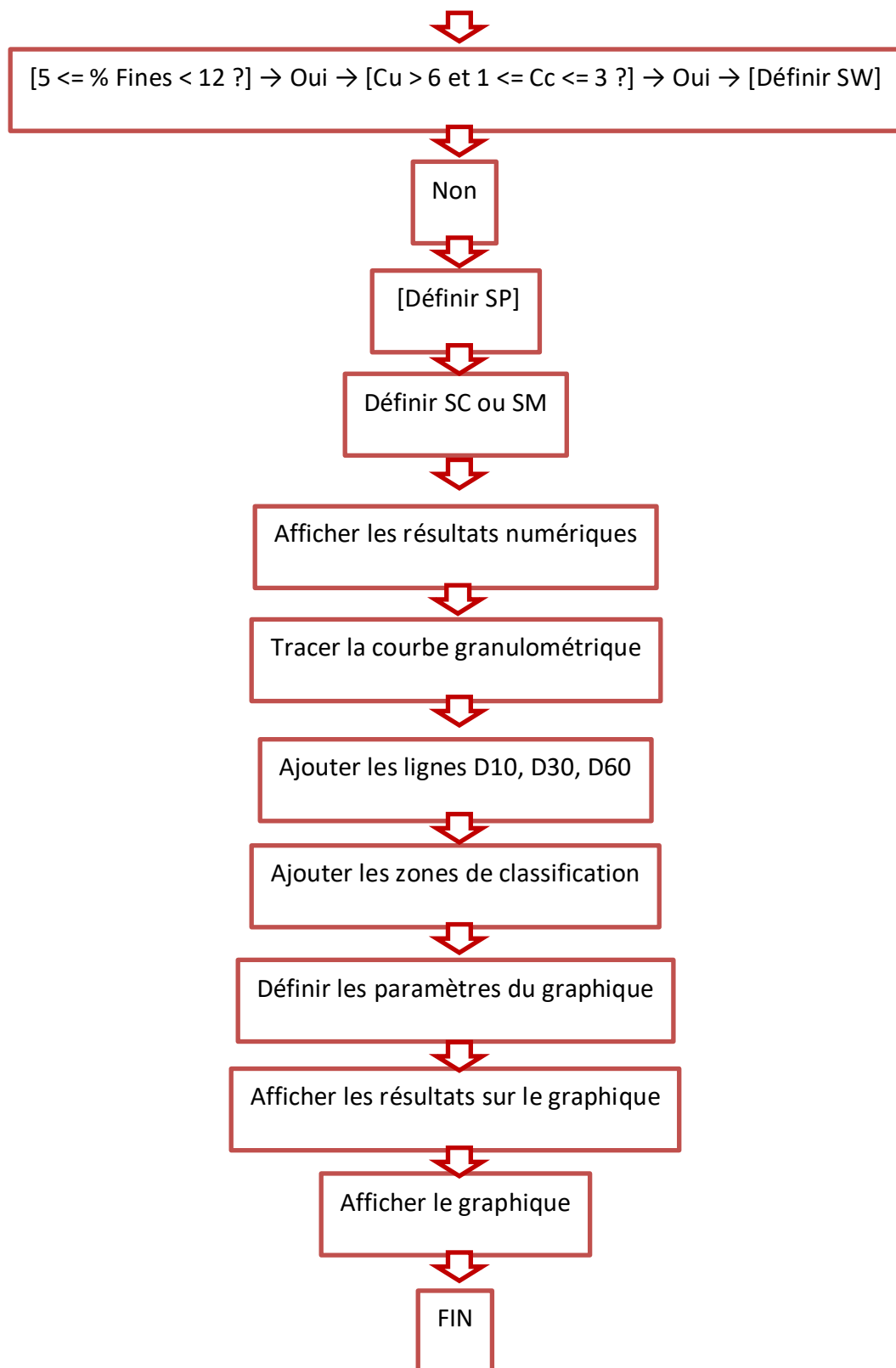
3.3.2. Organigramme du code de l'essai triaxial :





3.3.3. Organigramme du code de l'essai tamisage :





Conclusion: Ce chapitre explique les procédures de dépouillement implémentées dans Geo_Code_Lab pour les trois essais. L'analyse granulométrique calcule les paramètres (D10, D30, D60, Cu, Cc) et classe les sols (USCS). L'essai triaxial utilise la méthode Nelder-Mead pour optimiser la droite de Mohr-Coulomb, tandis que l'essai de cisaillement direct applique une régression linéaire pour déterminer c et ϕ . Les organigrammes détaillent la logique des modules, assurant une exécution claire et efficace. L'interface utilisateur intuitive (onglets pour saisie, résultats, graphiques) améliore l'accessibilité et la fiabilité des analyses.

Chapitre 4 : Création et Présentation des Modules Geo_Code_Lab

Introduction :

L'application Geo_Code_Lab a été développée avec une architecture modulaire, utilisant principalement Python pour sa polyvalence et son écosystème riche en bibliothèques scientifiques. Des outils comme NumPy pour les calculs numériques, Pandas pour la gestion des données et Matplotlib pour la visualisation des résultats d'essais géotechniques (granulométrie, limites d'Atterberg, essais de compression, etc.) garantissent des performances optimales. Chaque module est conçu comme une unité autonome, ce qui simplifie la maintenance, les mises à jour et l'intégration de nouvelles fonctionnalités. L'interface utilisateur, développée avec PyQt pour une expérience fluide ou Tkinter pour une approche légère, assure une navigation intuitive adaptée aux ingénieurs géotechniciens. Le processus de création a adopté une méthodologie agile, avec des cycles itératifs intégrant les retours d'experts en génie civil. Des tests unitaires rigoureux et une validation continue des calculs assurent la robustesse, la précision et la conformité aux normes géotechniques, répondant ainsi aux exigences des projets d'ingénierie.

4.1. Caractéristiques de Python :

Syntaxe claire et lisible : Python privilégie une syntaxe simple et intuitive, ce qui le rend facile à apprendre et à utiliser, même pour les débutants. L'indentation est utilisée pour structurer le code, remplaçant les accolades ou mots-clés comme dans d'autres langages.

Interprété : Python exécute le code ligne par ligne sans compilation préalable, ce qui facilite le débogage et permet un développement rapide.

Multi-paradigme : Il supporte la programmation orientée objet (classes, objets), impérative, et fonctionnelle.

Typage dynamique : Pas besoin de déclarer le type des variables ; Python les détermine à l'exécution.

Bibliothèques riches : Python dispose d'une vaste bibliothèque standard et de nombreux modules tiers (via PyPI), couvrant des domaines comme le web (Django, Flask), l'analyse de données (Pandas, NumPy), l'intelligence artificielle (TensorFlow, PyTorch), et plus encore.

Portabilité : Python est multiplateforme (Windows, macOS, Linux) et utilisé dans divers domaines : développement web, science des données, automatisation, IA, etc.

Communauté active : Une communauté mondiale importante contribue à son développement, avec une abondance de tutoriels, forums, et ressources.

4.2. Utilisations principales :

Science des données et IA : Grâce à des bibliothèques comme Pandas, Scikit-learn, et TensorFlow.

Développement web : Avec des frameworks comme Django ou Flask.

Automatisation : Scripts pour automatiser des tâches répétitives.

Jeux et graphisme : Utilisé avec Pygame ou d'autres outils.

4.3. Avantages de python:

Facilité d'apprentissage et lisibilité.

Grande flexibilité et productivité.

Écosystème riche et évolutif.

4.4. Limites de python:

Moins performant que les langages compilés comme C++ pour les tâches intensives.

Moins adapté pour le développement mobile natif.

Python est un choix idéal pour les débutants comme pour les experts, grâce à sa simplicité et sa puissance

4.5. La signification de l'appellation du programme (GEO code Lab) ????

Donc, j'ai créé une appli en Python qui s'appelle `Geo_Code_Lab` pour faire des calculs d'essais de labo en génie civil. Le nom, il veut dire quoi ? Ben, Geo, ça parle des trucs de géotechnique, genre les sols, les roches, tout ce qui touche au terrain dans le génie civil. Code, c'est parce que c'est programmé, ça fait des calculs automatiques avec Python. Et Lab, ça montre que c'est pour les tests qu'on fait en labo, comme les essais de compression ou Proctor. En gros, `Geo_Code_Lab`, c'est une appli qui bosse sur les données des essais géotechniques en labo avec du code .

4.6. Les modules de GEO code Lab :

L'application *Geo_Code_Lab*, développée en Python, est un outil spécialisé pour automatiser les calculs des essais de laboratoire en géotechnique, intégrant trois modules distincts : l'essai de tamisage, l'essai de cisaillement direct et l'essai de cisaillement triaxial. En entrant les données brutes issues des tests de laboratoire comme intrants, le programme traite ces informations pour fournir des résultats précis et essentiels. Pour les essais de cisaillement, *Geo_Code_Lab* calcule des paramètres clés tels que la cohésion et l'angle de frottement, cruciaux pour évaluer la résistance des sols. Pour l'essai de tamisage, il génère la courbe granulométrique et détermine le type de sol, facilitant ainsi l'analyse des propriétés géotechniques. Cette application, grâce à sa conception intuitive et à la puissance de Python, offre une solution efficace pour les ingénieurs en génie civil, optimisant l'analyse des données de laboratoire.

4.7. Défis et Approches dans le Développement de Geo_Code_Lab avec Python :

Au cours du développement de l'application *Geo_Code_Lab*, j'ai rencontré plusieurs défis liés à la programmation, un domaine qui ne relève pas de mon expertise principale, le génie civil. En tant qu'ingénieur civil, je suis plus à l'aise avec les concepts géotechniques qu'avec le codage. Auparavant, j'avais collaboré avec M. Abed Younes sur des projets utilisant Fortran, un langage que j'ai expérimenté par le passé. Cependant, Fortran, bien qu'efficace à une époque, s'est révélé limité et peu adapté aux besoins modernes en raison de son manque de flexibilité et de ses bibliothèques moins riches. C'est pourquoi nous avons opté pour Python, un langage plus moderne, polyvalent et soutenu par une vaste communauté, idéal pour développer une application comme *Geo_Code_Lab*. Cependant, la transition

vers Python a été un défi, car je n'avais jamais travaillé avec ce langage auparavant, et son apprentissage a nécessité un effort considérable.

L'un des principaux obstacles rencontrés lors du développement de l'application concernait la logique même du programme. Un logiciel, aussi puissant soit-il, reste un outil qui exécute des instructions précises : par exemple, si vous entrez « 1+1 », il retourne « 2 ». Cependant, la difficulté réside dans la capacité du programmeur à traduire des concepts complexes, comme les équations géotechniques ou les abréviations spécifiques au domaine, en un code logique et fonctionnel. Le logiciel est, par essence, « bête » et nécessite une discipline rigoureuse pour structurer correctement les instructions. Parmi les défis techniques, l'essai triaxial a posé un problème particulièrement ardu, notamment dans la détermination de la droite de tangente des trois cercles de Mohr. Pour résoudre cette question, j'ai adopté une approche consistant à identifier la valeur maximale de chaque cercle, correspondant aux points de pic des contraintes. Ensuite, j'ai tracé une droite de corrélation reliant ces trois points de pic pour déterminer des paramètres comme la cohésion et l'angle de frottement. Cependant, ce processus s'est heurté à des difficultés, notamment dans l'implémentation correcte de l'algorithme pour garantir que la droite de corrélation soit précise et représentative des données expérimentales. Ce problème a nécessité plusieurs itérations et ajustements pour assurer la fiabilité des résultats, mettant en lumière la complexité de traduire des concepts géotechniques en instructions programmables. En somme, malgré ces obstacles, le développement de *Geo_Code_Lab* a permis de mieux comprendre les exigences de la programmation et d'apprécier la puissance de Python pour répondre aux besoins spécifiques du génie civil.

Voici le problème de raisonnement des points pic :

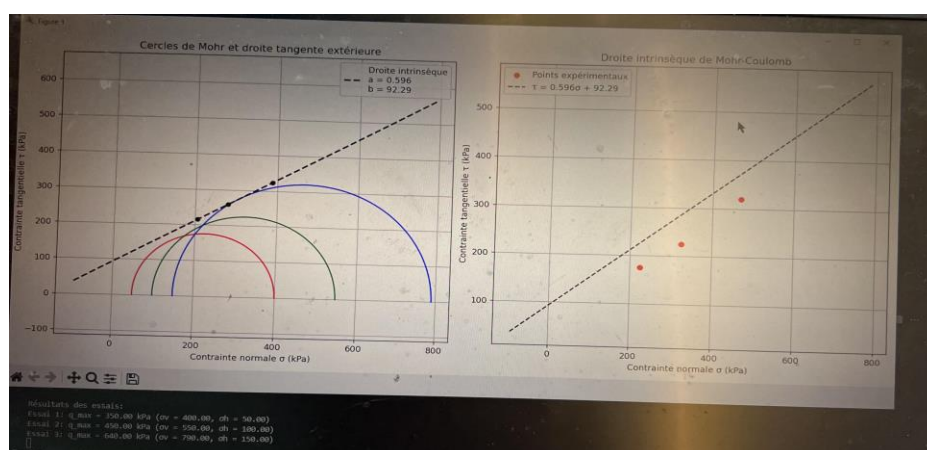


Figure 0.1 : le cercle de Mohr de *Geo_Code_Lab* avec le problème de point pik

Une fois la programmation de *Geo_Code_Lab* terminée, un nouveau défi s'est présenté : l'interface d'exécution. Par défaut, Python exécute les programmes dans une console en fenêtre noire, affichant des messages textuels, comme une demande de saisie de la date, suivis d'un espace pour entrer les données. Bien que fonctionnelle, cette approche manque de convivialité et de professionnalisme, surtout pour une application destinée à être utilisée par des ingénieurs en génie civil. Après de nombreuses réflexions, nous avons conclu que la solution la plus logique et professionnelle était de transformer

Geo_Code_Lab en une véritable application dotée d'une interface graphique moderne, incluant un nom, un menu intuitif et un logo représentatif. Cette idée a été concrétisée grâce à l'aide précieuse de mon ami, M. Sidahmed Mellouah, un développeur web expérimenté. Bien que son expertise se concentre principalement sur les sites web plutôt que sur les applications de bureau, sa contribution a été déterminante. Ensemble, nous avons travaillé intensément pour concevoir une interface utilisateur attrayante et fonctionnelle, adaptée aux besoins des utilisateurs. Ce processus a nécessité du temps et des efforts, mais le résultat final reflète une application plus accessible et professionnelle. Je suis profondément reconnaissant envers tous ceux qui m'ont soutenu dans ce projet, en particulier M. Sidahmed Mellouah, dont l'aide a été essentielle pour mener à bien cette réalisation. J'espère que Geo_Code_Lab répondra aux attentes des utilisateurs et facilitera les calculs géotechniques en laboratoire

```

-----
Masse retenue sur le tamis 20 mm (en g) : 0
Masse retenue sur le tamis 10 mm (en g) : 10
Masse retenue sur le tamis 5 mm (en g) : 20
Masse retenue sur le tamis 2 mm (en g) : 25
Masse retenue sur le tamis 1 mm (en g) : 37
Masse retenue sur le tamis 0.5 mm (en g) : 80
Masse retenue sur le tamis 0.25 mm (en g) : 20
Masse retenue sur le tamis 0.125 mm (en g) : 10
Masse retenue sur le tamis 0.063 mm (en g) : 13

Masse totale de l'échantillon (en g) : 122
Masse passant le tamis 0.063 mm (fond, en g) : 8

RÉSULTATS DE L'ANALYSE
-----
D10 = 0.857 mm
D30 = 1.132 mm
D60 = 2.510 mm
Coefficient d'uniformité Cu = 2.93
Coefficient de courbure Cc = 0.60
Pourcentage de fines (< 0.063 mm) = 6.6%
Classification USCS : SP (Sable mal gradué)

```

Figure 0.2: Exultions avant modification

- Version beta de notre application

voilà l'icone de notre application

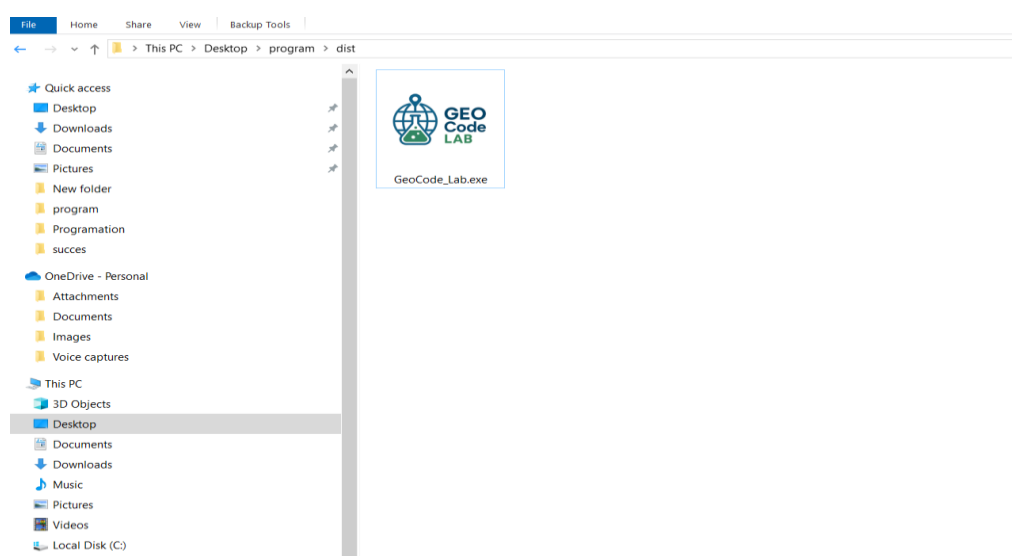


Figure 0.3: Icone de Geo_Code_Lab

Après avoir cliquer deux fois sur l'application en voit avoir ce petit intro de 5 secondes



Figure 0.4: Exécution de Geo_Code_Lab

Menu principal de l'application Geo_Code_Lab

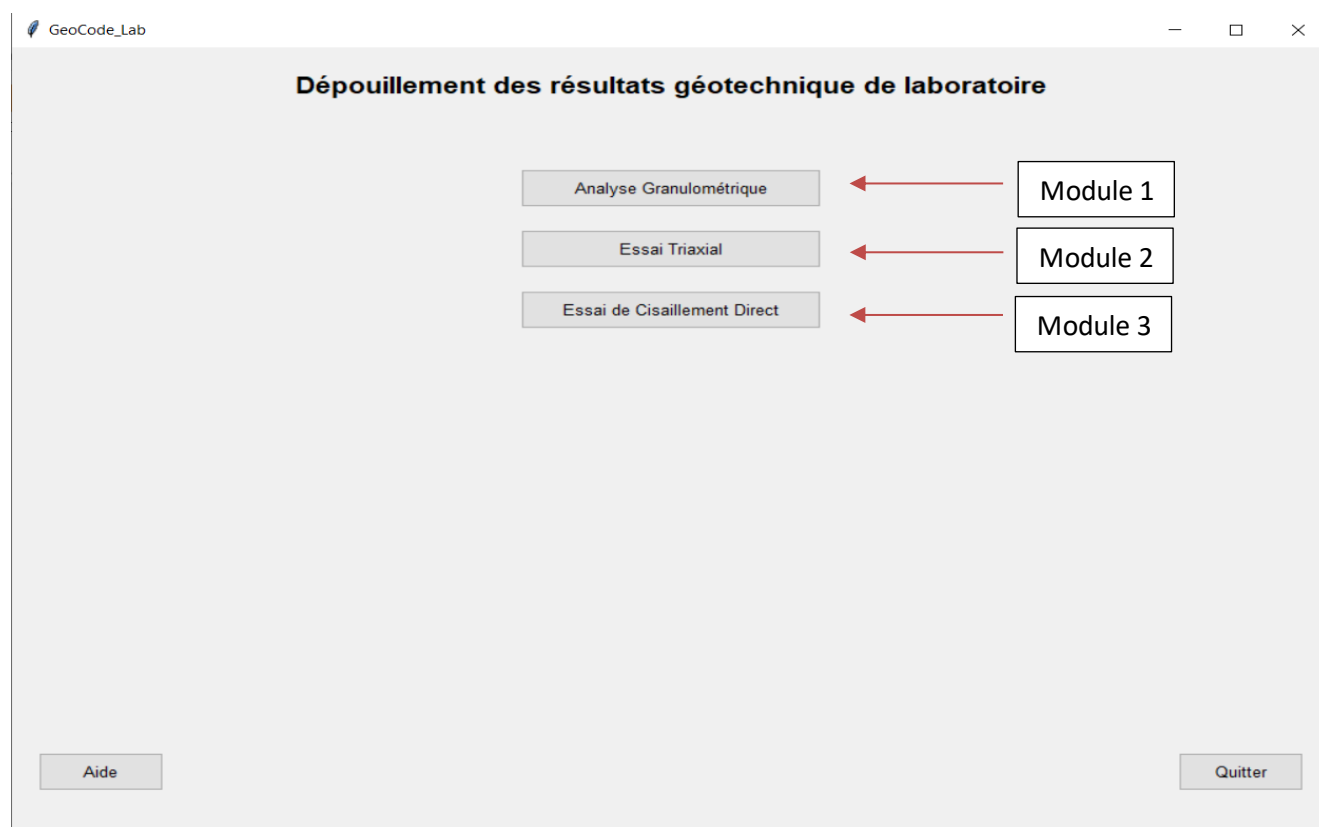


Figure 0.5: Menu principal de Geo_Code_Lab

Si vous choisir le module 1

GeoCode_Lab

Retour au menu

Analyse Granulométrique

Saisie des données Résultats Graphiques

Masses retenues (g)

Tamis 20 mm:

Tamis 10 mm:

Tamis 5 mm:

Tamis 2 mm:

Tamis 1 mm:

Tamis 0.5 mm:

Tamis 0.25 mm:

Tamis 0.125 mm:

Tamis 0.063 mm:

Autres masses (g)

Masse totale:

Masse fond (0.063 mm):

Calculer

Figure 0.6: Module1 de Geo_Code_Lab

Si vous choisir le module 2

GeoCode_Lab

Retour au menu

Essai Triaxial - Cercles de Mohr

Saisie des données Résultats Graphiques

1er Essai

	E (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)
1:			
2:			
3:			
4:			

2er Essai

	E (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)
1:			
2:			
3:			
4:			

3er Essai

	E (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)
1:			
2:			
3:			
4:			

Calculer

Figure 0.7: Module 2 de Geo_Code_Lab

Si vous choisissez le module 3

Figure 0.8: Module 3 de Geo_Code_Lab

Si vous cliquez sur Aide

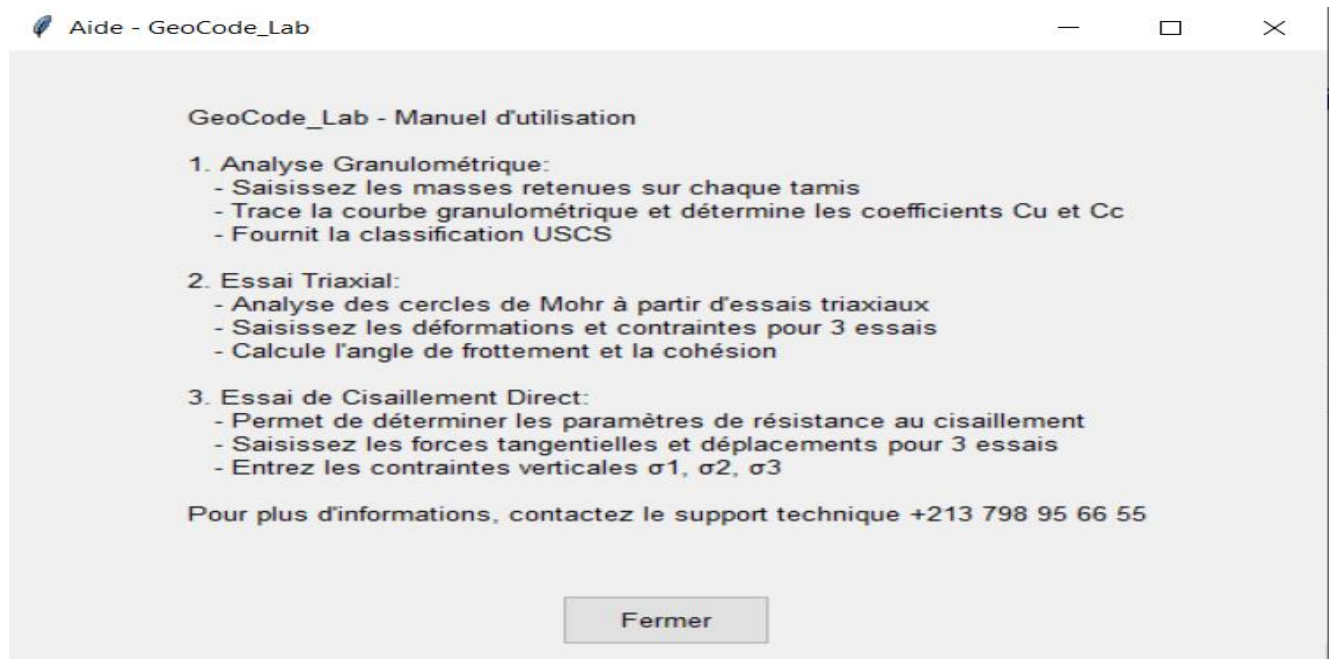


Figure 0.9: Page d'aide de Geo_Code_Lab

Conclusion: Ce chapitre décrit le développement de Geo_Code_Lab en Python, utilisant des bibliothèques comme NumPy, Pandas, Matplotlib, et Tkinter pour une architecture modulaire. Les avantages de Python (facilité d'apprentissage, écosystème riche) et ses limites (performances pour tâches intensives) sont discutés. Les défis, comme la traduction d'équations géotechniques complexes en code et la création d'une interface conviviale, ont été surmontés, rendant l'application accessible et professionnelle. Geo_Code_Lab se distingue par sa modularité et son potentiel d'évolution pour inclure d'autres essais.

Chapitre 5 : Tutoriel : GeoCode_Lab

1. Aperçu général de l'application :

GeoCode_Lab est une application graphique développée avec la bibliothèque **Tkinter** pour Python, intégrant des visualisations graphiques via **Matplotlib** et des calculs scientifiques avec **NumPy** et **SciPy**. Elle est conçue pour les ingénieurs en génie civil et les techniciens de laboratoire pour analyser les résultats d'essais géotechniques. L'application propose trois modules principaux :

Analyse granulométrique : Permet de calculer les paramètres granulométriques (D10, D30, D60, Cu, Cc) et de classer les sols selon le système USCS.

Essai triaxial : Analyse les contraintes et déformations pour déterminer l'angle de frottement (ϕ) et la cohésion (c) à partir des cercles de Mohr.

Essai de cisaillement direct : Calcule les paramètres de résistance au cisaillement (ϕ et c) à partir des contraintes normales et tangentielles.

L'interface graphique est conviviale, avec un écran d'accueil animé, un menu principal, et des onglets pour la saisie des données, les résultats, et les graphiques.

2. Structure du programme

Le programme est structuré autour d'une classe principale GeoCodeLabApp, qui gère l'interface et les fonctionnalités. Voici une vue d'ensemble des composants clés :

a. Initialisation et écran d'accueil :

Fonction : L'application commence par un écran d'accueil animé représentant un flacon de laboratoire qui se remplit progressivement (animation de chargement).

b. Menu principal:

Fonction : Permet de sélectionner l'un des trois modules (Analyse Granulométrique, Essai Triaxial, Essai de Cisaillement Direct).

Détails :

Le menu affiche trois boutons pour accéder aux modules, un bouton "Aide", et un bouton "Quitter".

Chaque bouton déclenche une méthode spécifique pour afficher l'interface du module sélectionné.

c. Interface des modules

Chaque module dispose de trois onglets :

Saisie des données : Pour entrer les données expérimentales.

Résultats : Affiche les résultats calculés (par exemple, D10, Cu, ϕ , c).

Graphiques : Présente les graphiques correspondants (courbes, cercles de Mohr, etc.).

Les onglets "Résultats" et "Graphiques" sont désactivés jusqu'à ce que les calculs soient effectués.

d. Modules spécifiques

1. Analyse Granulométrique

Saisie : L'utilisateur entre les masses retenues sur des tamis de tailles prédéfinies (20 mm à 0.063 mm), la masse totale, et la masse du fond (< 0.063 mm).

Calculs :

Calcule le refus cumulé et le pourcentage passant.

Détermine D10, D30, D60 (diamètres pour 10%, 30%, 60% passant) par interpolation logarithmique.

Calcule le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$) et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60})$).

Classe le sol selon le système USCS (par exemple, GW, SP, SC).

Résultats : Affiche D10, D30, D60, C_u , C_c , pourcentage de fines, et classification USCS.

Graphique : Trace la courbe granulométrique (diamètre en fonction de pourcentage passant) avec des annotations pour D10, D30, D60 et les zones de fines, sable, et gravier.

2. Essai Triaxial:

Saisie : L'utilisateur entre les déformations (ϵ , %), contraintes verticales (σ_v , kPa), et contraintes horizontales (σ_h , kPa) pour trois essais, chacun avec quatre points.

Calculs :

Calcule la contrainte déviatorique ($q = \sigma_v - \sigma_h$) pour chaque essai.

Identifie $q_{\max}$ pour chaque essai et les contraintes correspondantes (σ_v , σ_h).

Utilise une méthode d'optimisation (Nelder-Mead) pour déterminer l'angle de frottement (ϕ) et la cohésion (c) en ajustant une droite aux cercles de Mohr.

Résultats : Affiche $q_{\max}$, σ_v , σ_h pour chaque essai, ainsi que ϕ (en degrés) et c (en kPa).

Graphiques :

Courbe déviatorique : Trace q en fonction de ϵ pour les trois essais.

Cercles de Mohr : Dessine les cercles de Mohr pour chaque essai et la droite intrinsèque ($\tau = \phi \cdot \sigma + c$).

3. Essai de Cisaillement Direct:

Saisie : L'utilisateur entre les forces tangentielles (T , N), les déplacements latéraux (DL , mm) pour trois essais (six points chacun), et les contraintes verticales (σ_1 , σ_2 , σ_3 , kPa).

Calculs :

Calcule la surface corrigée ($Sc = (60 - DL) \cdot 60 / 1000 \text{ mm}^2$).

Détermine la contrainte tangentielle ($\tau = T / Sc$) pour chaque point.

Identifie $\tau_{\max}$ pour chaque essai.

Utilise une régression linéaire pour calculer ϕ (pente) et c (ordonnée à l'origine) de la droite de Mohr-Coulomb ($\tau = \phi \cdot \sigma + c$).

Résultats : Affiche φ (en degrés), c (en N/mm²), l'équation de la droite, et un tableau des contraintes (σ , τ).

Graphiques :

Courbe de cisaillement : Trace τ en fonction de DL pour les trois essais, avec $\tau_{\max}$ marqué.

Droite de Mohr-Coulomb : Trace les points expérimentaux (σ , τ) et la droite $\tau = \varphi \cdot \sigma + c$.

e. Aide et sortie

Aide : Ouvre une fenêtre avec un guide d'utilisation pour les trois modules et un numéro de contact fictif.

Sortie : Le bouton "Quitter" ferme l'application.

Effacement de la fenêtre : La méthode `clear_window` supprime tous les widgets avant d'afficher une nouvelle interface.

3. Comment utiliser l'application

Voici les étapes pour utiliser GeoCode_Lab :

Étape 1 : Lancer l'application

Étape 2 : Sélectionner un module

Dans le menu principal, cliquez sur l'un des boutons :

Analyse Granulométrique

Essai Triaxial

Essai de Cisaillement Direct

Vous pouvez également cliquer sur "Aide" pour des instructions ou "Quitter" pour fermer l'application.

Étape 3 : Saisir les données

Chaque module ouvre une interface avec trois onglets : "Saisie des données", "Résultats", et "Graphiques". Suivez ces étapes :

1. Analyse Granulométrique :

Entrez les masses retenues (en grammes) pour les tamis de 20 mm à 0.063 mm.

Entrez la masse totale et la masse du fond (< 0.063 mm).

Cliquez sur "Calculer" pour générer les résultats et graphiques.

2. Essai Triaxial :

Pour chaque essai (1, 2, 3), entrez quatre valeurs pour la déformation (ε , %), la contrainte verticale (σ_v , kPa), et la contrainte horizontale (σ_h , kPa).

Cliquez sur "Calculer".

3. Essai de Cisaillement Direct :

Pour chaque essai (1, 2, 3), entrez six valeurs pour la force tangentielle (T , N) et le déplacement latéral (DL, mm).

Entrez les contraintes verticales (σ_1 , σ_2 , σ_3 , kPa).

Cliquez sur "Calculer".

Étape 4 : Consulter les résultats

Une fois les calculs effectués, les onglets "Résultats" et "Graphiques" deviennent accessibles.

Résultats : Consultez les paramètres calculés (par exemple, D10, Cu, ϕ , c) dans des cadres organisés.

Graphiques : Visualisez les courbes (granulométrique, déviatorique, cisaillement) et les cercles de Mohr ou droites de Mohr-Coulomb.

Étape 5 : Naviguer

Cliquez sur "Retour au menu" pour revenir au menu principal.

Consultez l'aide pour plus d'informations ou quittez l'application.

4. Exemple d'utilisation

Exemple 1 : Analyse Granulométrique

1. Sélectionnez "Analyse Granulométrique".
2. Entrez les masses retenues, par exemple :

Tamis 20 mm : 0 g

Tamis 10 mm : 10 g

Tamis 5 mm : 20 g

Tamis 2 mm : 30 g

Tamis 1 mm : 40 g

Tamis 0.5 mm : 50 g

Tamis 0.25 mm : 30 g

Tamis 0.125 mm : 20 g

Tamis 0.063 mm : 10 g

Masse totale : 200 g

Masse fond : 10 g

Cliquez sur "Calculer".

Consultez les résultats (D10, D30, D60, Cu, Cc, classification USCS) et la courbe granulométrique.

Exemple 2 : Essai Triaxial

Sélectionnez "Essai Triaxial".

Pour le 1er essai, entrez :

ε (%) : [0.1, 0.2, 0.3, 0.4]

σ_v (kPa) : [100, 150, 200, 250]

σ_h (kPa) : [80, 80, 80, 80]

Répétez pour les essais 2 et 3 avec d'autres valeurs.

1. Cliquez sur "Calculer".

2. Consultez les contraintes déviatoriques, ϕ , c , et les graphiques (courbe déviatorique et cercles de Mohr).

Exemple 3 : Essai de Cisaillement Direct

1. Sélectionnez "Essai de Cisaillement Direct".
2. Pour le 1er essai, entrez :

T (N) : [100, 150, 200, 250, 300, 350]

DL (mm) : [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6]

σ_1 (kPa) : 100

3. Répétez pour les essais 2 et 3 avec $\sigma_2 = 200$ kPa, $\sigma_3 = 300$ kPa.
4. Cliquez sur "Calculer".
5. Consultez ϕ , c , l'équation de la droite, et les graphiques (courbe de cisaillement et droite de Mohr-Coulomb).

5. Dépannage

- **Erreur "Veuillez entrer des valeurs numériques valides"** : Assurez-vous que toutes les entrées sont des nombres (pas de lettres ni de champs vides).

6. Améliorations possibles

- **Exportation des résultats** : Permettre de sauvegarder les résultats et graphiques sous forme de fichiers (PDF, CSV).

Conclusion: Le tutoriel fournit une guide détaillé pour utiliser Geo_Code_Lab, de l'écran d'accueil animé au menu principal et aux modules spécifiques. Chaque module (analyse granulométrique, triaxial, cisaillement direct) est expliqué avec des instructions pour la saisie des données, les calculs, et l'interprétation des résultats (graphiques, tableaux). Les suggestions d'amélioration, comme l'exportation en PDF/CSV, indiquent le potentiel de la version bêta. Ce chapitre confirme que Geo_Code_Lab est une solution conviviale et efficace pour les ingénieurs, tout en ouvrant la voie à des développements futurs.

Chapitre 6: Exemples de Calculs des Modules de Geo_Code_Lab

6.1.Exemple de calcul pour chaque module :

6.1.1.Exemple de calcul pour le module 1 :

Les donnes :

Tableau 5.1: Donnes de l'essai de tamisage

Taille du Tamis (mm)	Masse retenue (g)
20	0
10	10
5	25
2	50
1	70
0.5	90
0.25	80
0.125	60
0.063	40
Fond (<0.063)	25
La masse totale	450

En choisir le module 1 et en vas remplir les donnes donne le programme

GeoCode_Lab

Retour au menu

Analyse Granulométrique

Saisie des données Résultats Graphiques

Masses retenues (g)

Tamis 20 mm: 0

Tamis 10 mm: 10

Tamis 5 mm: 25

Tamis 2 mm: 50

Tamis 1 mm: 70

Tamis 0.5 mm: 90

Tamis 0.25 mm: 80

Tamis 0.125 mm: 60

Tamis 0.063 mm: 40

Autres masses (g)

Masse totale: 450

Masse fond (0.063 mm): 25

Calculer

Figure 0.1: Donnes de l'essai de tamisage

Donc les résultats de ces données sont :

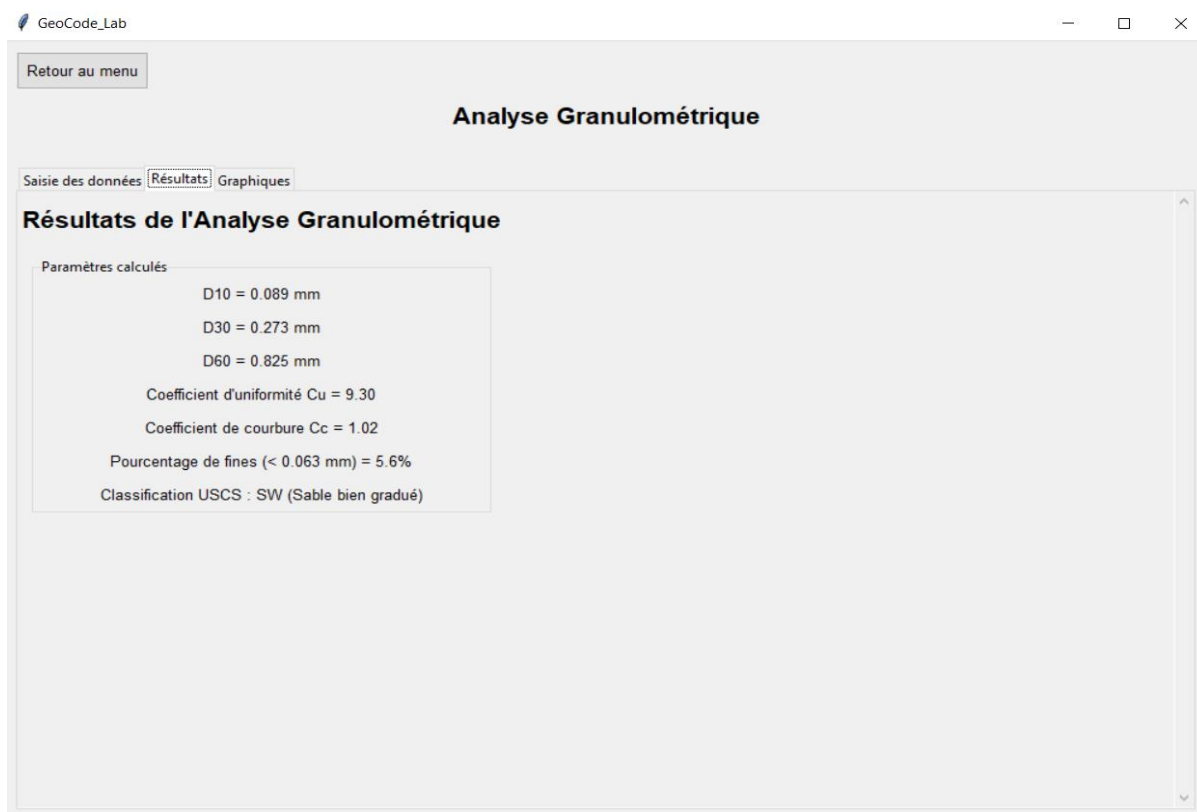


Figure 0.2: Résultat de l'essai de tamisage

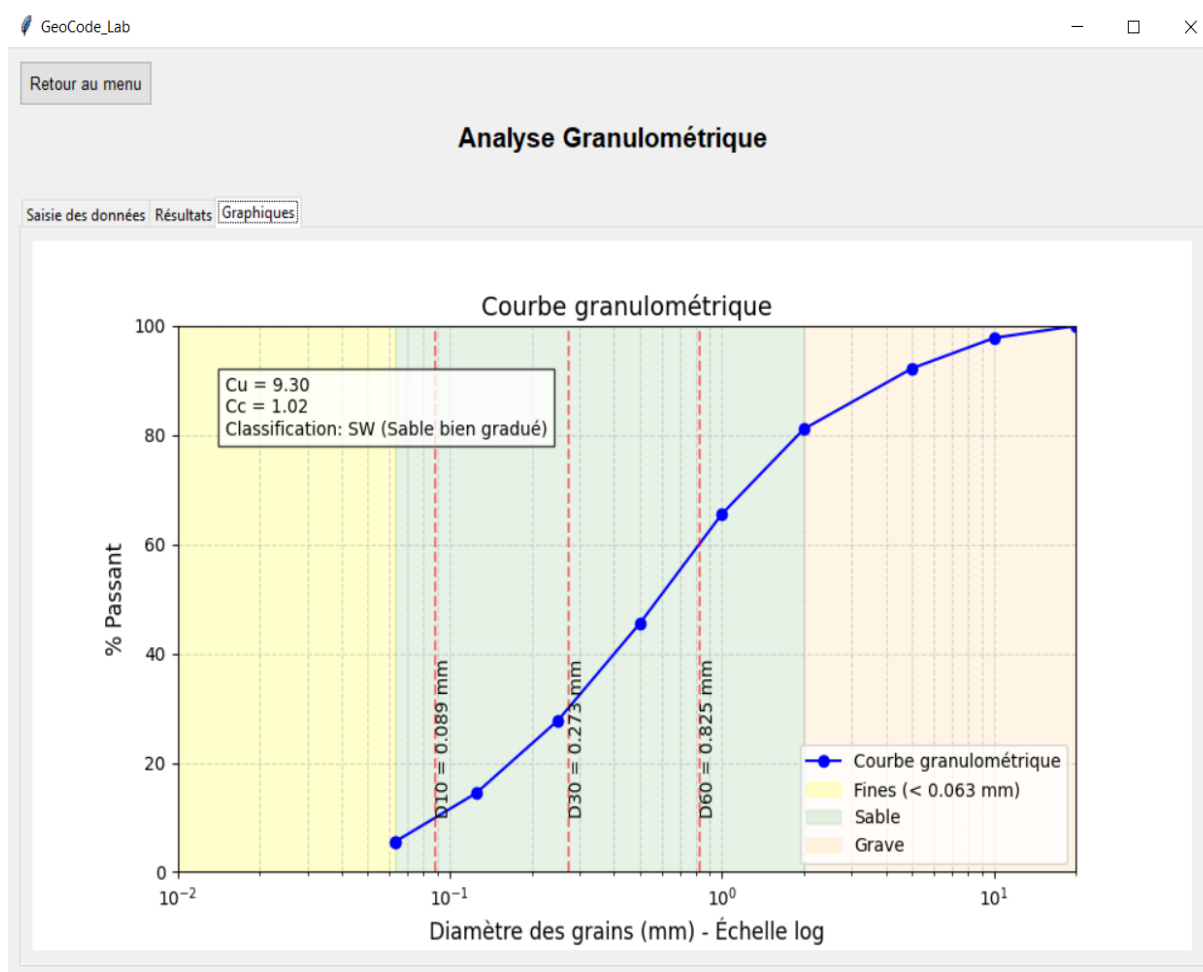


Figure 0.3: Courbe granulométrique

6.1.2. Exemple de calcul pour le module 2 :

En choisissant le module 2 et en remplissant les données, donne le programme

Essai Triaxial

Saisie des données | Résultats | Graphiques

1er Essai

	ε (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)
1:	-0.1	180	100
2:	-0.3	300	100
3:	-0.5	380	100
4:	-0.8	420	100

2er Essai

	ε (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)
1:	-0.2	350	200
2:	-0.6	550	200
3:	-1	700	200
4:	-1.5	780	200

3er Essai

	ε (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)
1:	-0.3	500	300
2:	-0.7	800	300
3:	-1.2	1000	300
4:	-2	1150	300

Calculer

Figure 0.4: les données de l'essai triaxial

Donc les résultats de ces données sont :

Essai Triaxial

Saisie des données | Résultats | Graphiques

Résultats des Essais Triaxiaux

Résultats des essais

Essai 1 - q_{max} : 320.00 kPa, σ_v : 420.00 kPa, σ_h : 100.00 kPa

Essai 2 - q_{max} : 580.00 kPa, σ_v : 780.00 kPa, σ_h : 200.00 kPa

Essai 3 - q_{max} : 850.00 kPa, σ_v : 1150.00 kPa, σ_h : 300.00 kPa

Paramètres de résistance

Angle de frottement $\varphi = 34.7^\circ$

Cohésion $c = 14.39$ kPa

Figure 0.5: résultat de l'essai triaxial

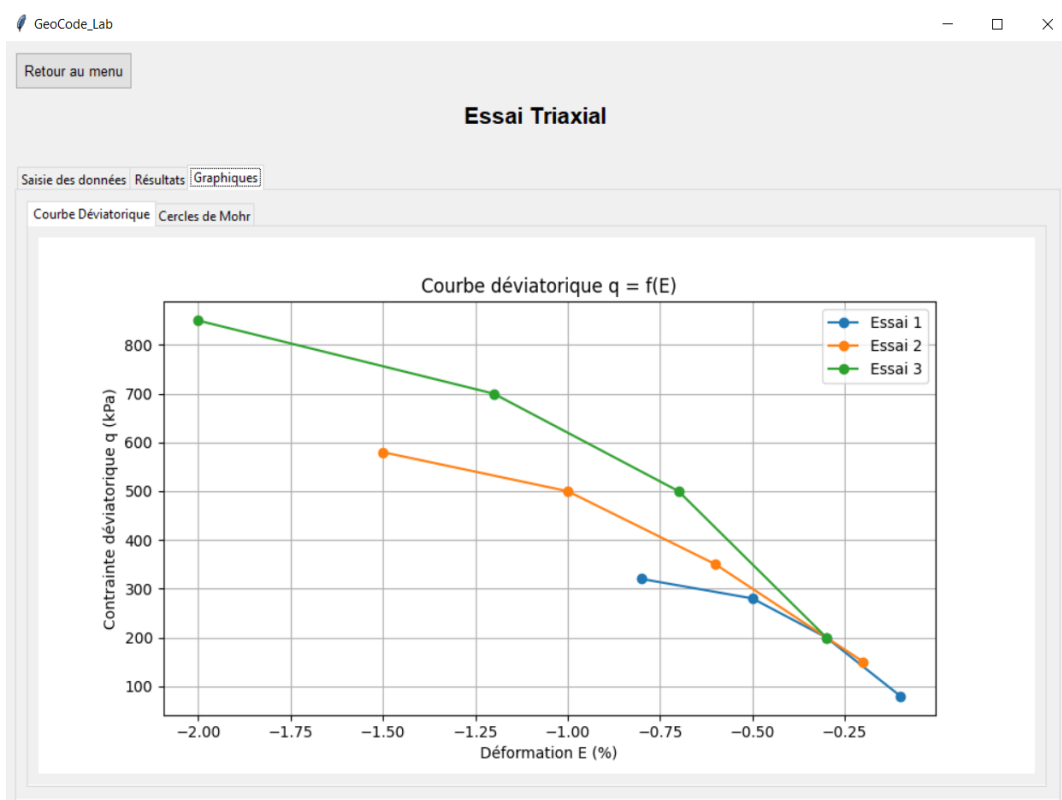


Figure 0.6: Courbe divotorique de l'essai triaxial

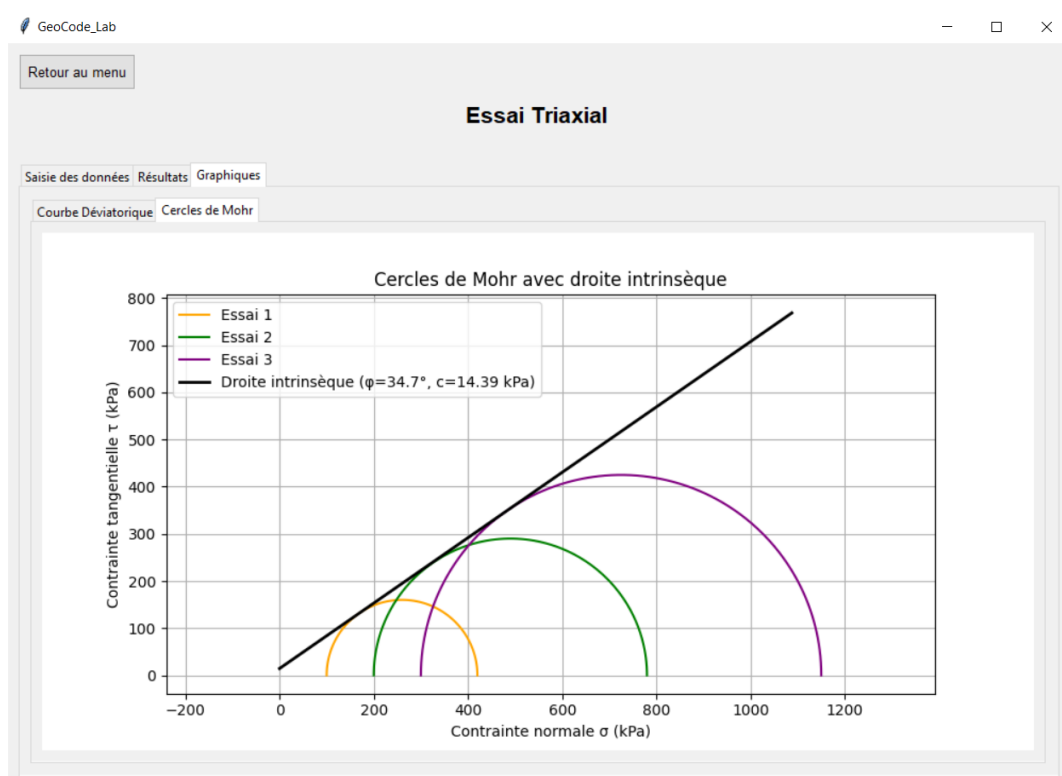


Figure 0.7: Cercles de Mohr pour l'essai triaxial

6.1.3.Exemple de calcul pour le module 3 :

En choisissant le module 3 et en y remplissant les données, le programme

Essai de Cisaillement Direct - Mohr-Coulomb

Saisie des données | Résultats | Graphiques

1er Essai

	T (N)	DL (mm)
1:	57.155	0.027
2:	199.069	0.545
3:	266.075	1.538
4:	217.038	3.152
5:	182.074	4.169
6:	174.28	4.989

2er Essai

	T (N)	DL (mm)
1:	80.537	0.027
2:	361.117	0.712
3:	494.588	2.279
4:	468.933	3.292
5:	443.819	3.896
6:	420.979	4.714

3er Essai

	T (N)	DL (mm)
1:	94.609	0.027
2:	505.629	0.878
3:	701.018	2.254
4:	704.157	2.664
5:	638.558	4.674
6:	617.991	5.07

Contraintes verticales (kPa)
 σ1: 100 σ2: 200 σ3: 300

Figure 0.8: Données de l'essai cisaillement direct

Donc les résultats de ces données sont :

Essai de Cisaillement Direct - Mohr-Coulomb

Saisie des données | Résultats | Graphiques

Résultats de l'Essai de Cisaillement Direct

Paramètres de résistance

Angle de frottement $\phi = 32.79^\circ$
 Cohésion $c = 12.2840 \text{ N/mm}^2$
 Équation de la droite: $\tau = 0.6442\sigma + 12.2840$

Données calculées

Essai	σ (kPa)	τ (N/mm ²)
Essai 1	100.0	75.85411606399597
Essai 2	200.0	142.80995362750704
Essai 3	300.0	204.68728198688436

Figure 0.9: Résultat de l'essai de cisaillement direct

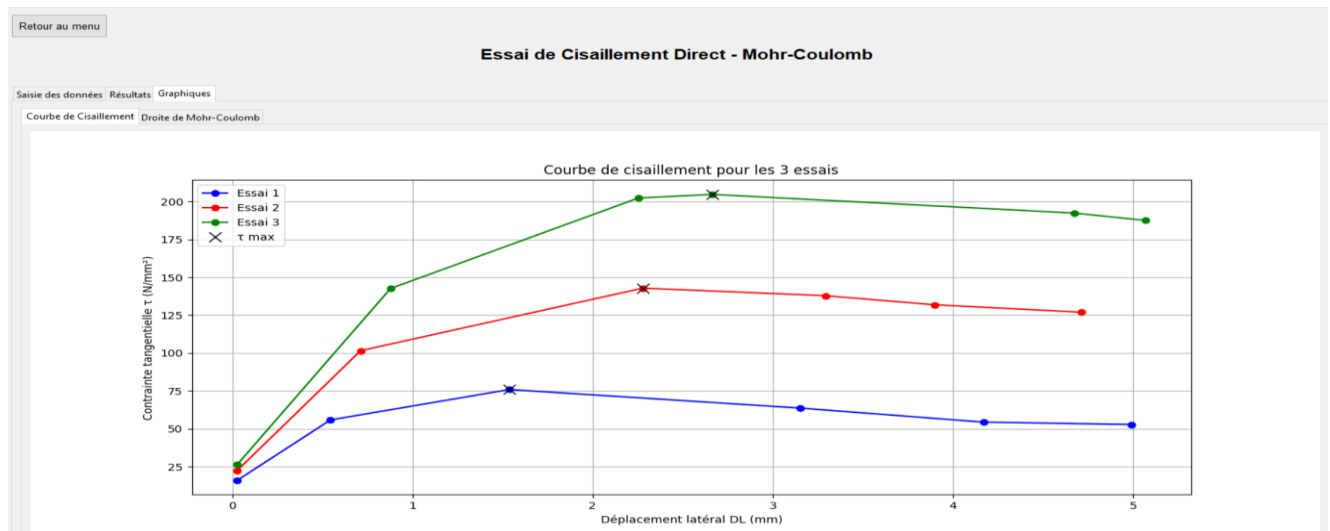


Figure 0.10: Courbes contrainte tangentielle en fonction du déplacement latéral

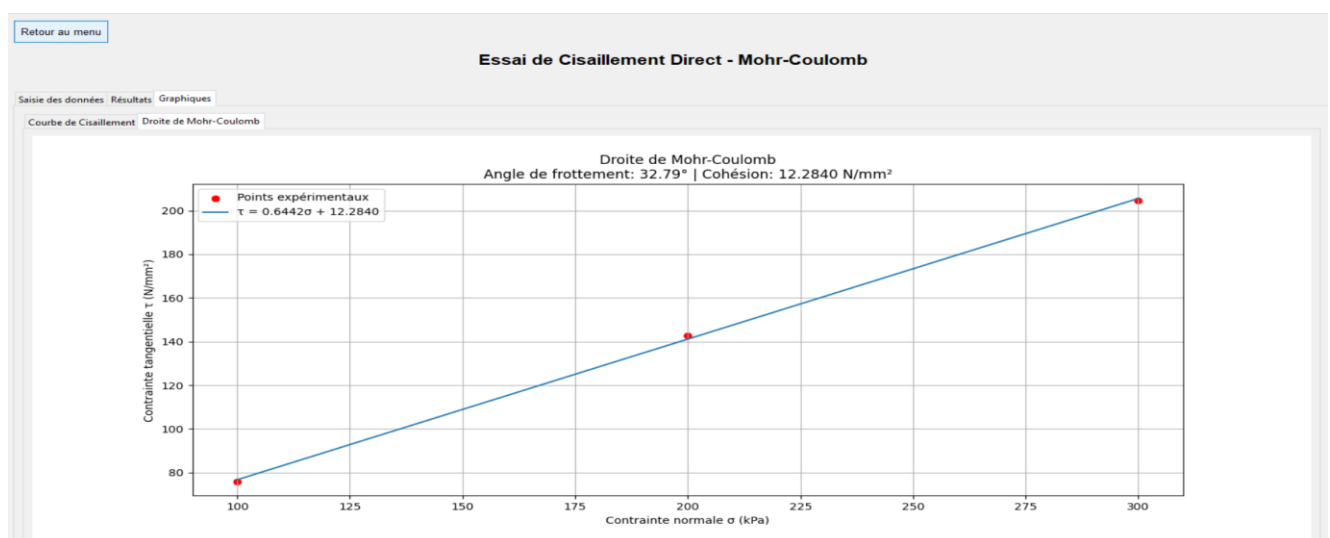


Figure 0.11: Droite de Mohr-Coulomb de l'essai cisaillement direct

Conclusion: Ce chapitre illustre le fonctionnement des modules à travers des exemples concrets. Pour l'analyse granulométrique, des données de tamisage (tailles de tamis de 20 mm à 0,063 mm, masse totale de 450 g) produisent une courbe granulométrique et des coefficients (C_u , C_c). L'essai triaxial calcule la contrainte déviatorique et les cercles de Mohr, tandis que l'essai de cisaillement direct génère la droite de Mohr-Coulomb. Ces exemples démontrent la précision et l'efficacité de Geo_Code_Lab dans le traitement des données géotechniques, avec des résultats visuels clairs.

Conclusion Générale

Le projet **Geo_Code_Lab** a abouti à la création d'un programme exécutable sur PC version bêta novatrice qui automatise avec succès l'analyse des essais géotechniques de tamisage, de cisaillement direct et triaxial, répondant ainsi aux besoins des ingénieurs géotechniciens pour des calculs rapides et fiables. En exploitant Python et des bibliothèques comme NumPy pour les calculs numériques, Matplotlib pour les visualisations graphiques (courbes granulométriques, diagrammes de Mohr-Coulomb) et Tkinter pour une interface utilisateur intuitive, l'application a permis de calculer des paramètres clés tels que les coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c), la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (ϕ), tout en générant des rapports standardisés. Les défis techniques, tels que la transcription des formules complexes (critère de Mohr-Coulomb) en algorithmes robustes, la gestion des erreurs de données et la conception d'une interface professionnelle, ont été surmontés grâce à une méthodologie rigoureuse, des tests unitaires et une collaboration avec un développeur expérimenté. Cette solution a démontré son efficacité en réduisant le temps de traitement, minimisant les erreurs et respectant les normes internationales comme ASTM, NF et Eurocode 7. Bien que cette version bêta constitue une base solide, elle ouvre des perspectives d'amélioration, notamment l'intégration de nouveaux essais (Proctor, œdométrique) et de normes supplémentaires. **Geo_Code_Lab** incarne une avancée significative à la croisée du génie civil et de l'informatique, offrant un outil pratique et évolutif qui modernise l'analyse géotechnique et contribue à la conception d'ouvrages fiables et durables.

Références des Normes Géotechniques :

1. ASTM (American Society for Testing and Materials) :

- ASTM D6913 : Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis (utilisé pour l'essai de tamisage).
- ASTM D3080 : Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (utilisé pour l'essai de cisaillement direct).
- ASTM D2850 : Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils (utilisé pour l'essai triaxial UU).
- ASTM D4767 : Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils (utilisé pour l'essai triaxial CU).
- ASTM D7181 : Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils (utilisé pour l'essai triaxial CD).
- ASTM D2434 : Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (mentionné pour les essais de perméabilité).

2. Normes Françaises (NF) :

- NF P94-056 : Analyse granulométrique par tamisage (utilisée pour l'essai de tamisage).
- NF P94-071 : Essai de cisaillement direct (utilisé pour l'essai de cisaillement direct).
- NF P94-074 : Essai triaxial (utilisé pour les essais triaxiaux).
- NF P94-110 : Essai pressiométrique (mentionné pour d'autres contextes géotechniques).

3. Eurocode 7 :

- EN 1997-1 : Eurocode 7 - Geotechnical Design - Part 1: General Rules (utilisé comme guide pour l'interprétation des résultats géotechniques, notamment pour la stabilité des pentes et la capacité portante des fondations).
- EN ISO 17892-4 : Geotechnical Investigation and Testing - Laboratory Testing of Soil - Part 4: Determination of Particle Size Distribution (utilisé pour l'essai de tamisage).

Références des Outils et Bibliothèques Logicielles :

4. Python et ses bibliothèques :

- Python : Langage de programmation utilisé pour le développement de l'application Geo_Code_Lab. Référence : Python Software Foundation, <https://www.python.org/>.
- NumPy : Bibliothèque pour les calculs numériques. Référence : Harris, C. R., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. Disponible sur : <https://numpy.org/>.
- Pandas : Bibliothèque pour la gestion des données. Référence : McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 51-56. Disponible sur : <https://pandas.pydata.org/>.

- Matplotlib : Bibliothèque pour la visualisation graphique. Référence : Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. Disponible sur : <https://matplotlib.org/>.
- SciPy : Bibliothèque pour les calculs scientifiques, notamment l'optimisation (méthode Nelder-Mead). Référence : Virtanen, P., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. Disponible sur : <https://scipy.org/>.
- Tkinter : Bibliothèque pour l'interface graphique. Référence : Documentation officielle Python, <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>.

Références Implicites des Méthodes et Concepts Géotechniques :

5. Critère de Mohr-Coulomb : Utilisé pour les essais de cisaillement direct et triaxial. Référence implicite : Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris.
6. Classification USCS (Unified Soil Classification System) : Utilisée pour l'analyse granulométrique. Référence implicite : ASTM D2487 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
7. Loi de Stokes : Utilisée pour la sédimentométrie (mentionnée dans l'analyse granulométrique). Référence implicite : Stokes, G. G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 9, 8–106.
8. Méthode de Casagrande : Utilisée pour les limites d'Atterberg et l'essai œdométrique. Référence implicite : Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13(8), 121–136.
9. Loi de Darcy : Mentionnée pour les essais de perméabilité. Référence implicite : Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Victor Dalmont.