

République Algérienne Démocratique et Populaire.
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique.

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Faculté de génie de la construction.

Département du génie civil.

Laboratoire Géo matériaux Environnement et
Aménagement (LGEA).

Mémoire de MASTER 2

Spécialité : génie civil.

Option : Géotechnique et environnement.

Présenté par : M^{elle} : AMEDDAH Chafia

Thème :

Influence de la perméabilité d'un milieu granulaire sur la
résistance au cisaillement.

Application aux matériaux : granite, grès, calcaire, sable
d'oued.

Encadré par Mr : MELBOUCI Bachir

Promotion: 2010/2011

Remerciements

Ce travail a été effectué au département de génie civil de l'université de Tizi-Ouzou.

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur B.MELBOUCI, professeure à l'université de Tizi-Ouzou, pour ses précieuses conseils, orientations, sa prise en charge pédagogique et sa patience.

Mes vifs remerciements vont également à monsieur M.BOUKHAROUBE Chargé de TP de laboratoire MDS de département Génie civil.

Je remercie chaleureusement mon très cher frère SALIM pour ses conseils et orientations.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous les enseignants du département du génie civil, ainsi que toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travaille à :

Mes très chers parents que dieu me les garde.

Mes frères et mes sœurs.

Mon neveu YAHIA.

Mes grandes mères.

Tous mes cousins et mes cousines.

Tous mes amis (es) et mes camarades.

CHAFIA

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

• PARTIE THEORIQUE

Ø Chapitre I : Etude géologique

I.1 Définition de la roche :2

I.1.1 Les roches magmatique2

I.1.2 Les roches sédimentaires2

I.1.3 Les roches métamorphiques3

I-2 Définition des matériaux choisis :

a) Granite.....3

b) Grès4

c) Calcaire.....5

d) Sable d'Oued.....7

I.3 Localisation géographique des matériaux étudiés :

A. Granite.....8

B. Grès9

C. Calcaire.....10

I-4 Les lieux d'extraction des matériaux étudiés :.....10

Ø Chapitre II : production des granulats.

II.1 Définition des granulats.....11

II.2-Types de granulats :.....11

a. Granulats naturels.....11

b. Granulats artificiels.....13

II.3-La production des granulats :.....14

| | |
|--|----|
| II.3.1-L'extraction :..... | 15 |
| II.3.1.1- L'extraction en terrain meuble :..... | 15 |
| En site terrestre (milieu sec) : | 15 |
| En site immergé (milieu hydraulique) :..... | 15 |
| II.3.1.2-L'extraction des roches massives :..... | 16 |
| II.3.2-Le traitement :..... | 16 |
| II.3.2.1-Concassage :..... | 17 |
| II.3.2.2-Criblage :..... | 17 |
| II.3.2.3- Lavage :..... | 18 |
| II.3.2.4:- Stockage :..... | 18 |
| II.3.2.5-La distribution | 18 |

Ø Chapitre III : Généralités sur la perméabilité :

| | |
|---|----|
| III.1Définition. | 19 |
| III.2Loi de Darcy. | 19 |
| III.3-Les facteurs influents sur la valeur du coefficient de perméabilité : | |
| III.3.1La granulométrie | 20 |
| III.3.2La forme des grains..... | 21 |
| III.3.3L'indice des vides..... | 21 |
| III.3.4-Le degré de saturation :..... | 21 |
| III.4-Mesure de la perméabilité au laboratoire :..... | 21 |
| III.4.1Perméamétrie à charge constante..... | 21 |
| III.4.2Perméamétrie à charge variable..... | 22 |

| | |
|---|----|
| III.5-Mesure de la perméabilité in-situ:..... | 23 |
| A. Essais de pompage..... | 23 |
| B. Essai de LEFRANC..... | 23 |
| C. Essai LUGEON..... | 24 |

Ø Chapitre IV : Généralités sur la résistance au cisaillement :

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 26 |
| IV.1-Définition de la résistance au cisaillement des granulats..... | 26 |
| IV.2-Les contraintes sur plan de cisaillement:..... | 26 |
| IV.2-1.Rappel Mécanique des milieux continus..... | 26 |
| IV.2-2Représentation plane – Cercle de Mohr..... | 27 |
| IV.3-Les contraintes à la rupture et les paramètres de résistance au cisaillement : | |
| IV.3-1 Courbe intrinsèque..... | 28 |
| IV.3-2 Critère de Coulomb..... | 29 |
| IV.3-3 Relations entre les paramètres physiques et les contraintes principales..... | 29 |
| IV.3.4-Les facteurs influents sur les paramètres de la résistance au cisaillement..... | 29 |
| A- Dans les sols pulvérulents..... | 30 |
| B- Les sols cohérents ou fins..... | 31 |
| IV.4-Mesure au laboratoire des caractéristiques de rupture :..... | 32 |
| IV.4.1Essais de cisaillement rectiligne direct à la boîte..... | 32 |
| IV.4.2Les essais de cisaillement rectiligne (direct) alterné à la boîte :. | 33 |
| IV.4.3Essais à l'appareil triaxial de révolution :..... | 34 |

| | |
|---|----|
| IV.4.4- Essais de compression simple..... | 35 |
| IV.4.5- Essais au scissomètre de laboratoire..... | 36 |
| IV.5-Conditions d'essais - principales caractéristiques mécaniques d'un sol : | |
| IV.5.1-Essai non consolidés non drainé..... | 37 |
| IV.5.2-Essai Consolidé drainé..... | 38 |
| IV.5.3-Caractéristiques consolidées non drainées..... | 39 |

• PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre V : Identification des matériaux :

| | |
|---|----|
| V.1- Analyse granulométrique :..... | 40 |
| V.1.1- Définition :..... | 40 |
| V.1.1.1 Tamisage..... | 40 |
| V.1.1.2 Sédimentométrie..... | 41 |
| V.1.2 Equipement nécessaire..... | 41 |
| V.1-3 Description de l'essai..... | 42 |
| V.1-4 Présentation de courbes granulométriques..... | 46 |
| V.1.5 Les paramètres granulométriques :..... | 50 |
| Les diamètres significatifs..... | 50 |
| Coefficients d'uniformité et de courbure..... | 50 |
| V.1.6 Interprétation des résultats..... | 51 |
| V.2-Mesure des caractéristiques physiques des granulates :..... | 52 |
| V.2.1 Masse volumique des grains solides | 52 |
| V.2.2 Mesure de la teneur en eau..... | 54 |
| V.2.3 Mesure de la masse volumique sèche..... | 54 |

| | |
|---|----|
| V.2.4Autres caractéristiques physiques..... | 56 |
| V.2.4.1-Indice des vides | |
| V.2.4.2-La porosité | |
| V.2.4.3-Le degré de saturation : | |
| Chapitre VI :Essai de Perméabilité-Essai de cisaillement. | |
| IV.I. Essai de perméabilité..... | 57 |
| IV.2.1Appareillage..... | 57 |
| IV.2.2Mode opératoire..... | 57 |
| IV.2.3Interprétation des résultats..... | 59 |
| VI.2_Essai de cisaillement :..... | 60 |
| IV.2.1Description de la boite de cisaillement..... | 60 |
| IV.2.2-Principe de l'essai..... | 60 |
| IV.2.3Exploitation des résultats. | 69 |
| Conclusion générale | 71 |

Liste de figures

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure (I-1) : La roche granite..... | 3 |
| Figure (I-2) : La roche grès..... | 5 |
| Figure (I-3) : La roche calcaire..... | 6 |
| Figure (II-1) Les différents types de granulats..... | 11 |
| Figure (II-2) Les procédures de fabrication des granulats..... | 14 |
| Figure (II-3) Extraction en terrain meuble..... | 15 |
| Figure (II-4) Extraction des roches massives..... | 16 |
| Figure (II-5) Concassage à mâchoire..... | 17 |
| Figure (II-6) :concasseur à percussion..... | 17 |
| Figure (II-7) Lavage des granulats..... | 18 |
| Figure (II-8) Stockage des granulats..... | 18 |
| | |
| Figure (III-1) Expérience de Darcy(<i>J.M.TECHOUANI NANA, 1990</i>)..... | 19 |
| Figure (III-2) Perméamètre à charge constante..... | 21 |
| Figure (III-3) Perméamètre à charge variable..... | 22 |
| Figure(III-4) Détermination de la perméabilité par pompage (<i>V.ROBITAILLE1997</i>). | 23 |
| Figure (III-5) Essai LEFRANC..... | 24 |
| Figure (III-6) Essai Lugeon (<i>J-P .MAGNAN. 1999</i>) | 25 |
| Figure(IV.1) : contrainte sur une facette..... | 26 |
| Figure (IV.2) Composantes du tenseur des contraintes en un point..... | 27 |
| Figure (IV.3) Cercle de Mohr..... | 27 |
| Figure (IV.4) Plan physique..... | 28 |
| Figure (IV.5) Courbe intrinsèque..... | 28 |
| Figure (IV.6) Droite de coulomb..... ;..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figure (IV.7) Cercle de Mohr et enveloppe de rupture..... | 29 |
| Figure (IV.8) Boite de cisaillement au cours d'essai..... | 33 |
| Figure (IV.9): Changement de volume de sol pulvérulent pendant le cisaillement..... | 33 |
| Figure (IV.10) Courbe intrinsèque d'un sol cohérent dans un essai de cisaillement directe alterné à la boite..... | 34 |
| Figure (IV.11): appareil triaxial..... | 35 |
| Figure (IV.12): Champs de contrainte à l'appareil triaxial..... | 35 |
| Figure (IV.13): Essai de compression simple. | 36 |
| Figure (IV.14): Scissomètre de laboratoire..... | 37 |
| Figure (IV.15) Moment M du couple de rotation en fonction de l'angle de rotation α | 37 |
| Figure (IV.16) Essai non consolidé non drainé(K. MEFTAH ,2008) | 38 |
| Figure (IV.17): Essai consolidé drainé(K. MEFTAH ,2008)..... | 38 |
| Figure (IV.18): Essai consolidé non drainé(K. MEFTAH ,2008)..... | 39 |
| Figure (V.1) Courbes granulométriques Sable d'oued | 47 |
| Figure (V.2) Courbes granulométriques granite..... | 48 |
| Figure (V.3) Courbes granulométriques grés | 49 |
| Figure (V.4) Courbes granulométriques calcaire..... | 50 |
| Figure (VI.1) : Boite de cisaillement | 61 |
| Figure (VI.2) Courbes contrainte-déformation sable d'oued..... | 63 |
| Figure (IV.3) Courbes contrainte-déformation granite..... | 64 |
| Figure (IV.4) Courbes contrainte-déformation grés..... | 64 |
| Figure (IV.5) Courbes contrainte-déformation calcaire..... | 65 |

| | |
|--|----|
| Figure (IV.6) Courbe Déformation –variation de volume sable d’oued..... | 65 |
| Figure (IV.7) Courbe Déformation –variation de volume granite..... | 66 |
| Figure (IV.8) Courbe Déformation –variation de volume grés..... | 66 |
| Figure (IV.9) Courbe Déformation –variation de volume calcaire..... | 67 |
| Figure (IV.10) La droite intrinsèque sable d’oued..... | 67 |
| Figure (IV.11) La droite intrinsèque granite..... | 68 |
| Figure (IV.12) La droites intrinsèques grés..... | 68 |
| Figure (IV.13) La droite intrinsèque calcaire..... | 69 |
| Figure I :matériaux étudiés..... | 77 |
| Figure II :Analyse granulométrique par tamisage..... | 78 |
| Figure III : la boite de cisaillement | 79 |
| Figure IV : Le dispositif de l’essai de perméabilité | 80 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau (I.1) : Localisation du granite dans la wilaya de Tizi-Ouzou..... | 8 |
| Tableau (I.2) : Localisation des grés dans la wilaya de Tizi-ouzou..... | 9 |
| Tableau (III .1) : Les valeurs de coefficient de perméabilité (J-p MAGNAN.1999.).. | 20 |
| Tableau(IV.1) :Angle de frottement Interne effectif des sols pulvérulents sec (d'après Lambe et Whitman,1979,et Bowles,1984)..... | 30 |
| Tableau (IV.2) facteurs influents sur les paramètres de la résistance au cisaillement (J-p MAGNAN.1999) | 32 |
| Tableau (V.1) : Les résultats de tamisage de sable d'oued. | 43 |
| Tableau (V.2) : Les résultats de tamisage de granite..... | 44 |
| Tableau (V.3) : Les résultats de tamisage grès..... | 45 |
| Tableau (V.4) : Les résultats de tamisage calcaire..... | 46 |
| Tableau (V.5) : Les diamètres significatifs. | 51 |
| Tableau (V.6) : Coefficients d'uniformité et de courbure..... | 51 |
| Tableau (V.7) Les résultats de l'essai da pycnomètre pour sable d'oued..... | 53 |
| Tableau (V.8) Les résultats de l'essai da pycnomètre pour calcaire..... | 54 |
| Tableau (V.9) Les résultats de l'essai da pycnomètre pour granite..... | 54 |
| Tableau(V.10) Les résultats de l'essai da pycnomètre pour grès..... | 54 |
| Tableau (V.11) les teneurs en eau des différents échantillons..... | 55 |
| Tableau (V.12) les résultats obtenus sont montrés sur le tableau suivant..... | 56 |
| Tableau (V.13) : caractéristiques physiques..... | 57 |
| Tableau (VI.1) :résultats d'essai de perméabilité de Sable d'oued..... | 59 |
| Tableau (VI.2) :résultats d'essai de perméabilité de calcaire | 59 |
| Tableau (VI.3) : résultats d'essai de perméabilité de granite..... | 59 |
| Tableau (VI.4) : résultats d'essai de perméabilité de grès..... | 59 |
| Tableau (VI.5) : classification des coefficients de perméabilité..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Tableau (VI.6): Variation des contraintes tangentielles maximales et angles de frottement interne..... | 71 |
| Tableau I: variation de perméabilité en fonction de (j) | 72 |
| Tableau II : variation de perméabilité en fonction de τ_{\max} | 72 |

Liste des symboles

Liste des symboles

| Notation | Définition | Dimension |
|-----------------|---|--------------------|
| K | Coefficient de perméabilité | m/s |
| Q | Débit de filtration | cm ³ /s |
| h | Perte de charge | m |
| L | Langur | m |
| i | Gradient hydraulique. | Sans |
| S | Section de l'échantillon | m ² |
| s | Section de tube gradué | m ² |
| q | Volume d'eau traversé par l'échantillon | m ³ |
| t | Temps de saturation. | s |
| C _f | Coefficient de forme. | m |
| C _c | Coefficient de courbure | sans |
| C _U | Coefficient d'uniformité | sans |
| d | Dimension minimale | mm |
| D | Dimension maximale | mm |
| D ₁₀ | diamètres correspondants aux tamisât de 10% | µm |
| D ₃₀ | diamètres correspondants aux tamisât de 30% | µm |
| D ₆₀ | diamètres correspondants aux tamisât de 60% | µm |
| e | Indice des vides | sans |
| M _w | Masse d'eau | g |
| M _s | Masse des grains solides | g |
| n | Porosité | % |
| S _r | Degrés de saturation. | % |
| V | Volume totale de l'échantillon | Cm ³ |
| V _s | Volume des grains solides | Cm ³ |
| V _t | Volume totale | Cm ³ |
| V _V | Volume des vides | Cm ³ |
| ω | Teneur en eau | sans |
| ρ _s | Masse volumique des grains solide | g/cm ³ |
| ρ _d | Masse volumiques sèche | g/cm ³ |
| φ | Angle de frottement | degrés |
| σ | Contrainte normale totale | KPa |
| σ ₁ | Contrainte principale majeure | KPa |

| | | |
|------------|---------------------------------------|------------|
| σ_2 | Contrainte principale intermédiaire | KPa |
| σ_3 | Contrainte principale mineure. | KPa |
| τ | Contrainte de cisaillement. | KPa |
| C | cohésion | KPa |
| σ' | Angle effectif | KPa |
| C' | Cohésion effectif | KPa |
| C_U | Resistance au cisaillement non drainé | KPa |
| C_C | Resistance au cisaillement drainé | KPa |
| M | Moment de torsion | N.cm |
| K_C | Constante de croisillon | KPa / N.cm |

Introduction générale

Introduction :

Au cours de ces dernières années, le domaine du génie civil en particulier celui du bâtiment et des travaux publics ont connu une évolution rapide conduisant à une demande de plus en plus importante en quantité et en qualité de matériau, tels que les ciments, les aciers et les granulats. Ces derniers utilisés sous leurs aspects naturels, sont de plus en plus rares, résultat d'une forte demande et d'un usage anarchique, ce qui a poussé à la recherche d'autres ressources telle que la fabrication des granulats par concassage.

C'est un procédé faisant un sujet inépuisable d'étude et de recherche afin de mieux connaître le comportement et les caractéristiques de chacun des granulats qui en résulte, et de faire une comparaison avec des matériaux déjà définies.

Comme la perméabilité et la résistance au cisaillement sont des critères qui jouent un rôle important dans le choix des granulats, ce qui a suscité à traiter le thème suivant « l'influence de la perméabilité sur la résistance au cisaillement d'un milieu granulaire ».

Notre mémoire comporte deux parties :

La Première partie présente une synthèse théorique et composée de quatre chapitres :

Le premier Chapitre est consacré pour l'étude géologique des matériaux étudiés.

Le deuxième Chapitre comporte des définitions et des types de milieu granulaire.

Des généralités sur la perméabilité et la résistance au cisaillement sont présentées respectivement dans le troisième et le quatrième chapitre.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale, qui se divise en deux chapitres qui définissent les différents essais effectués sur les matériaux traités, l'appareillage utilisé et la présentation des résultats ainsi que leur interprétation.

Partie théorique

CHAPITRE I

Etude géologique des matériaux étudiés

Introduction :

Depuis des temps reculés, l'art de construction est lié à l'usage des roches. Le génie civil fait usage de ces matériaux sous la forme de granulats, constituant de base de ses techniques. Les caractéristiques des granulats dépendent de plusieurs paramètres tels que la nature de la roche d'origine. Ce chapitre comporte les définitions et les caractéristiques des matériaux étudiés.

I.1-Définition des roches :

Les roches sont des milieux solides polycristallins, hétérogènes très complexes, composés de grains qui appartiennent à une dizaine d'espèces minérales et qui sont de taille et de forme variées. Les propriétés des roches dépendent de la nature et de l'état d'altération des minéraux. [8]

On distingue trois types de roches :

I .1.1- Les roches magmatiques :

Les roches magmatiques se forment quand un magma se refroidit et se solidifie, avec ou sans cristallisation complète des minéraux le composant. Cette solidification peut se produire :

- En profondeur : cas des roches magmatiques plutoniques dites aussi « intrusives » qui se sont refroidies en profondeur, lentement et sans dégazage dans la chambre magmatique, et sont holocristallines. [2]
- À la surface : cas des roches magmatiques volcaniques dites « extrusives » ou « effusives » qui se sont refroidies brutalement en surface après une éruption volcanique, et sont hémi cristallines. [2]
- Les roches filoniennes : elles sont intermédiaires entre les roches extrusives et intrusives, et ayant subi un dégazage partiel. [2]

I.1.2- Les roches sédimentaires :

Elles sont des roches exogènes, c'est-à-dire qui se forment à la surface de la Terre et qui résultent de l'accumulation en couches et du compactage de débris d'origine minérale (dégradation d'autres roches), organique, sous l'action l'érosion, aux effets du vent, de l'eau, des alternances climatiques (gels - dégels), etc.

I.1.3- Les roches métamorphiques :

Les roches métamorphiques sont formées par la recristallisation (et généralement la déformation) des roches sédimentaires ou des roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches, ce qui entraîne une réorganisation chimique, et donc minéralogique, de la roche. Ces transformations se font à l'état solide, c'est-à-dire sans fusion de la roche (magmatisme).

Les roches métamorphiques ont des caractéristiques très différentes selon leur composition, la température atteinte, la vitesse et la manière avec lesquelles elles refroidissent. Ce qui donne plus de 700 variétés différentes de roches métamorphiques . [2]

I.2- Définition des différents matériaux :

a) Définition de Granite :

Le granite est une roche éruptive intrusive dure formée de grains plus ou moins volumineux et qui se compose essentiellement de feldspath , de quartz et de mica .



Figure (I-1) : La roche granite.

Ø Principaux minéraux du granite :

Le granite est composé des trois minéraux suivants :

- **Quartz :** C'est un minéral très dur résiste mal aux chocs et très riche en silicium. il se présente en phénocristaux ou en bloc, il est de forme et de taille variable.

Le quartz est incolore lorsqu'il est pur et se teinte lorsqu'il contient des impuretés tels que le quartz jaune, rose, violet, brun.

- **Feldspath** : les feldspaths font partie des aluminosilicates de potassium, de sodium, de calcium. il existe en deux couleurs, blanc ou rose. il est très dur mais il n'est pas stable.

- **Les micas** : ils ont la forme des petites plaques circulaires ou hexagonales, de couleur brillante ou noir.

On distingue deux types :

- Ø Le mica noir ou biotite : très abondant dans le granite

- Ø Le mica blanc : rare dans le granite, il est caractérisé par une résistance à de très grandes températures.

Ø Les types de granite

Les granites varient selon leur composition minéralogique et la grandeur des cristaux. On peut distinguer :

- **Le granite normal** : formé de quartz, feldspath et mica noir, il peut être gris ou rose suivant la couleur de feldspath. [20]

- **Granite à deux micas** : formé de quartz, feldspath, mica noire et mica blanc.

- **Granite porphyroïde** : qui diffère du granite normal par la grandeur des cristaux. [20]

- **La granulite** : c'est le granite où le mica blanc est remplacé par le mica noir.

- **La pegmatite** : c'est une roche silicatée dont les cristaux sont de grande taille. Elle remplit habituellement les fissures. [20]

b) Définition de Grés :

Le Grès est une roche sédimentaire formée de grains de sable liés par le ciment. Celui-ci peut être siliceux, calcaire, argileux, ferrugineux ou autre .C'est la composition de ce liant qui détermine en générale la tenue, la compacité, la solidité des grés. [4]

Ø Composition minéralogique :

Les principaux minéraux essentiels constituant les grés sont le **quartz**, le **feldspath**, et le **mica**.



Figure (I-2) : La roche grès.

Ø Classification des Grés :

La nature et la qualité des ciments vont donner les différentes caractéristiques des grés :

- **Les grés quartzeux** : dont les éléments sont des grains de quartz de faible dimension, reliés par ciment siliceux et pouvant être cohérents, friables, fins ou grossiers. [4]

- **Les grés psammites** : ou les grains de quartz sont réunis par ciment argileux le plus souvent micacé. Le mica étant concentré sur des surfaces planes, ce qui donne à la roche une facilité prononcée. [4]

- **Les grés argileux** : à fragments de quartz et de schistes solidement reliés par une gangue argileuse ou argilosiliceuse. [4]

- **Les grés argilo-calcaires ou macignos.**

- **Les grés ferrugineux** : dont les grains sont agglutinés par de l'oxyde de fer généralement hydraté. [4]

- **Les grés-verts** : à ciment calcaire marneux ou argileux dont la couleur provient des grains de glauconie. [4]

- **Les grés calcaires** : sables quartzeux cimenté par du carbonate de chaux.

c) Définition de Calcaire :

Les calcaires sont des roches sédimentaires, facilement solubles dans l'eau. Ils sont composés d'au moins 70 % de calcite et peuvent contenir de la silice, de l'argile et de la matière organique ainsi quelques autres minéraux dont les plus courants

sont la dolomite. Lorsque la roche comporte une proportion non négligeable d'argile, on parle plutôt de marne.

Le calcaire est reconnaissable par sa teinte blanche et généralement la présence de fossiles.

Les calcaires se forment par accumulation, au fond des mers, à partir des coquillages et squelettes des micros algues.



Figure (I-3) : La roche calcaire.

Ø Classification des calcaires :

- ✓ Selon les proportions de calcite et de dolomite on a :
 - Calcaire pur : 100% à 95% de calcite, 5% de dolomite maximum .
 - Calcaire magnésien avec 5% à 100% de dolomite ou avec 5% à 10% de Mg^{+2} , non exprimé sous forme de dolomite .
- ✓ selon les milieux de dépôts : on distingue les calcaires marins (pélagiques à néritique), et les calcaires continentaux, calcaires lacustres fluviaux, croutes calcaires de certains sols.
- ✓ Selon les grains on a des :
 - calcaires à grains fins ou très fins (micrites, calcaire micro cristallin à cristaux de 20µm environ, calcaire lithographique ou sublithographique)
 - calcaire à grains plus grossiers (calcaire plus cristallin à cristaux > 64ou100µm en général dus à des recristallisation, calcaire **microgrenus** à cristaux de 100à250 µm , calcaire grenus)
- ✓ Selon les structures on distingue :

-les calcaires massifs ou lités, et toutes les variétés de calcaire pisolitique, graveleux, noduleux, et les calcaires à nodule ou à accident phosphatés, siliceux (calcaire à silex).

-La présence de matériel terrigène conduit à distinguer des calcaires sableux siliceux, argileux, avec passage progressif aux roches détritiques calcaires, en particulier aux calcirudites et calcarémites aussi carbonatés (roches) notamment pour les classifications.

d) Sable d'oued :

Les sables proviennent de la désagrégation des roches préexistantes. Selon la composition minéralogique on distingue :

-Sables siliceux : constituée essentiellement de grains de quartz (SiO_2).

-Sables calcaires : sont des sables comporte des grains de quartz et des grains de calcaire.

-Sables argileux : dont lesquels les grains de quartz sont mélangés avec des grains d'argile.

-Sables ferrugineux : dont lesquels les grains de quartz sont liés par des oxydes de fer.

Le sable d'oued a une composition très variable, mais, en générale, il renferme des grains de quartz et de nombreux petits fragments de même couleur que les roches qui entourent l'oued.

I.3-Localisation géographique des matériaux du granite, grès et calcaire dans la wilaya de Tizi-Ouzou :

A. Localisation du granite dans la wilaya de Tizi Ouzou :

D'après l'étude qui a été faite en 2000 par l'office National de Recherche Géologique et Minières de BOUMERDES (O.R.G.M), les principaux gisements dans la région de Tizi-Ouzou sont :

Tableau (I-1) : Localisation du granite dans la wilaya de Tizi Ouzou. [7]

| N° du gîte | Nom de gîte | substance | Réserves ou paramètres estimatif |
|-------------------|--------------------|------------------|--|
| 52 | Tizi-talkht | Pegmatites | Filonnets et amas de pegmatites |
| 53 | Azouza | Pegmatites | Deux (02) filons d'épaisseurs respectives 1,2 et 1,5 m |
| 54 | Souk-el-arba | Pegmatites | Filons larges de (10m) et long de 20m |
| 55 | Labra nat trathen | Pegmatites | Amas pegmatites long de 40m |
| 56 | Abouda bouade | Pegmatites | 6,7 millions de tonnes |
| 57 | Boudjima | Pegmatites | Amas et filons (affleurement de 25 de hauteur et suivi sur 10-15m le long de la piste) |
| 58 | Akerou | Pegmatites | Grand affleurement d'amas de pegmatites (1 ,5X1Km) |

B. Localisation des grés dans la wilaya de Tizi-ouzou :

Tableau (I-2) : Localisation des grés dans la wilaya de Tizi-ouzou. [7]

| N° du gîte | Nom de gîte | substance | Réserves ou paramètres estimatif |
|-------------------|--------------------|----------------------|--|
| 32 | Tabourt nat degane | Grés siliceux | 10 millions de tonnes |
| 33 | Aourir | Grés siliceux | 7 millions de tonnes |
| 34 | Ghallam | Grés quartzeux | 5 millions de tonnes |
| 35 | Moknea | Grés quartzeux | 2monticules de dimension 1000X600X120m et850X250X80m |
| 36 | Bouzeguene | Grés quartzeux | Massif de dimension 500X700m |
| 37 | Oued boghni | Grés siliceux | >10 millions de m ³ |
| 38 | Boghni | Grés quartzeux | 2,5 millions de m ³ |
| 39 | Souk el tlata | Grés silico-argileux | Réserve importante |
| 40 | El kalaa | Grés quartzeux | Monticule de dimension 250X250X50 |
| 41 | Tedles | Grés quartzeux | 9millions de tonnes |

| | | | |
|----|-------------|---------------|---|
| 42 | Zegzou | Gés | 2barres de gés d'une dizaines de mètre (flanc droit de l'oued) |
| 43 | Ait rahouna | Grés siliceux | C ₁ =6,96 millions de tonnes C ₂ =9,7 millions de tonnes |

C. Localisation du calcaire dans la wilaya de Tizi-Ouzou :

-Massif d'Azrou : où affleure des calcaires intéressants pour granulats, d'ailleurs cette substance y est exploitée pour ces derniers. Au sud de ce massif , il existe toute une série de crêtes d'altitude 1600m à 1956 m , formées de roches dolomitiques , qui se poursuivent jusqu'au col de Tirourda.

-Massif d'Adrar Timesouin : Au nord- est de Tizi – N'Kouilal, affleurent tout le long de la route des formations de calcaire dolomitique à relief peu accidenté. À la base de ces crêtes , les roches se débitent en blocs moyens à gros ; ces zones constitueraient des réserves non négligeables, pour matières premières à granulats.

Il existe deux gisements de calcaire jurassique dans la wilaya de Tizi-Ouzou (**Bouadnane -Azerou Tidjer**) qui sont à présent en activité. On les exploite dans un volume restreint pour des agrégats et des pierres de taille.

I.4-Les origines des matériaux :

✓ **Lieux d'extraction de granite :** Notre échantillon est extrait de la région de Boudjima à 1 Km du chef lieu de la commune de Boudjima, à 27km du chef lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.

✓ **Lieux d'extraction de grès :** L'échantillon a été extrait dans la région de « YAKOUREN ».

✓ **Lieux d'extraction de calcaire :** L'échantillon a été prélevé dans la région d'EL Hachimia wilaya de Bouira.

✓ **Sable d'oued :** L'échantillon a été prélevé dans l'oued de sébaou.

CHAPITRE II

Production des granulats

II.1-Définition des granulats :

Les granulats sont des grains minéraux appelés fillers, sablons, sables, gravillons ou graves, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 80 mm , destiné à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées et des remblais.



Figure (II-1) : Les différents types de granulats.

II.2-Les types des granulats :

Les granulats peuvent être naturels ou artificiels.

a. Granulats naturels :

Granulats d'origine minérale n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique. Ils proviennent de roche sédimentaire, siliceuses ou calcaire, de roche métamorphique telles que les quartzs et quartzites ; ou des roches éruptives telles que les basaltes, les granites ou les porphyres.

Indépendant de leur origine minéralogique on classe les granulats en deux catégories :

- ✓ les granulats alluvionnaires.
- ✓ les granulats concassés.

- ▼ **Les granulats alluvionnaires** : sont d'origine sédimentaire, dont la forme a été acquise par l'érosion ; parmi ce type de granulats, on peut trouver les catégories suivantes :
 - Les granulats de rivière : ils proviennent de la désagrégation naturelle de roche comme : granite, gneiss, grès, etc. Les parties tendres de ces roches ont disparu, tandis que les parties dures ont subi usure progressives, à cause de la vitesse de courant qui en effet a ainsi provoqué la séparation des particules en éliminant les fines .Il est donc recommandé de compléter leur granulométrie pour la fabrication du béton.
 - Les granulats de carrière : ils proviennent de dépôts géologiques ou de bancs alluvionnaires et contiennent un pourcentage de fines plus élevé que les granulats de rivière, mais généralement ont une granulométrie très étendue.
 - Les granulats de dunes : ils sont constitués par des matériaux très fins, généralement siliceux, accumulés par le vent.
 - Les granulats de mer : ils peuvent être utilisés à condition d'être lavés et exemptés de coquillage.Ils contiennent des sels minéraux qui risquent de provoquer des efflorescences ultérieures à la surface des travaux en élévation.

- ▼ **Les granulats concassés** : sont obtenus par abatage de concassage, ce qui leur donne des formes angulaires .ils proviennent de roche saines, dures compactes, résistante au gel et indécomposable. A cause de concassage, ils contiennent plus d'éléments fins que les granulats roulés, demandent donc plus de gâchage. Parmi ce type de granulats, on peut trouver les catégories suivantes :
 - Les basaltes : sont des roches éruptives de très bonne qualité pour les bétons.

 - Les calcaires : ils sont attaquables par des acides. Les calcaires durs donnent de bons granulats concassés, mais ils sont à éviter pour des bétons dans le milieu agressif.

-Les granites : ils s'altèrent avec le temps, mais les pierres compactes non fissurés peuvent fournir des bons granulats pour le béton.

-Les grès : le type de grès trop poreux est friable, ne sont pas bon pour les bétons ; donc seuls les grès durs sont utilisable.

- Les quartzs : ils sont constitués par de la silice cristallisée qui donne des granulats durs, peu déformables.

-Les porphyres : ils fournissent un matériau dur, surtout sous la forme de gravier, très bons pour le béton.

b. Granulats artificiels :

Ils sont d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres.

Parmi ce type de granulats on peut trouver les suivants :

-Les laitiers : ou scorie de haut fourneau sont des co-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer.

Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles :

- Laitier cristallisé : sont des granulats de couleur grise obtenu par refroidissement lent à l'air, de la gangue prévenant de la fusion des minerais de fer au haut fourneau et soumis à un concassage et à un criblage.
- Laitier granulé : granulats obtenu par refroidissement brusque dans un accès d'eau de la gangue provenant de la fusion des minerais de fer au haut fourneau.il a la même composions chimique que la laitier cristallisé mais a une structure vitreuse.

-Les cendrées et cendres volantes : proviennent de chaudières industrielles à charbon.

-Les briquillons : sont obtenus par le concassage de terre cuite telle que vieilles brique provenant de démolition.

-**Les granulats lourds** : sont élaborés industriellement et ont des hautes caractéristiques .Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois ou de granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallage industriels.ils s'appellent :la barytine , la magnétite, la limonite ,la pyrite de fer ,ainsi que les déchets ferreux ,acier, fonte, ayant des densités de 4000 à 7000Kg/m³.

-**Les granulats allégés** : Ces granulats légers sont allégés par expansion ou frittage et ils présentent des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants.

-**Les granulats très légers** : ils sont d'origine végétale et organique (la pierre ponce, liège, etc.) aussi bien que minérale (bois, polystyrène expansé).

II.3-La production des granulats :

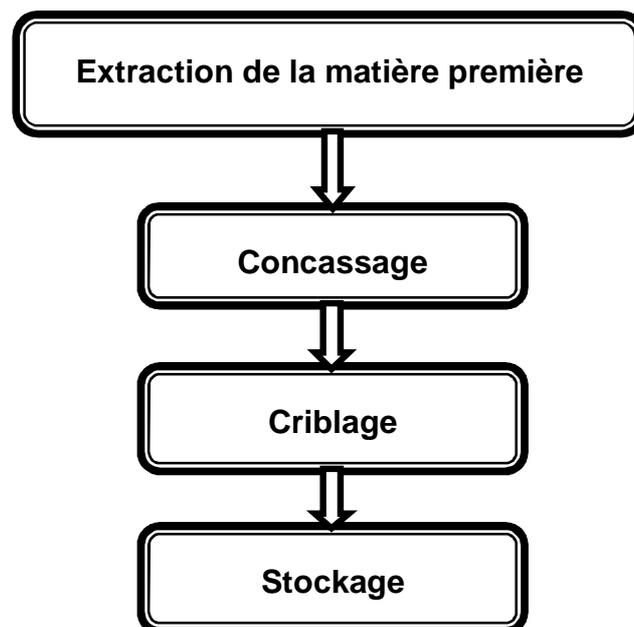


Figure (II-2) : Les procédures de fabrication des granulats.

La production des granulats nécessite deux principaux types d'opération :
l'extraction et le traitement.

II.3.1-L'extraction :

L'extraction s'effectue dans des carrières qui utilisent des techniques différentes selon qu'il s'agit de roches massives ou meubles, soit à sec, soit en milieu hydraulique. [6]

-Le décapage : c'est retirer les terrains situés au dessus de niveaux à exploiter :

- Terre végétale.
- Roches plus ou moins altérées.
- Niveaux stériles.

Les matériaux de découverte, terre végétales et matériaux stériles, doivent être stockés indépendamment de façon à pouvoir être réutilisés lors du réaménagement de la carrière, sans pour autant gêner les différentes phases de l'exploitation. [6]

II.3.1.1-L'extraction en terrain meuble :



Figure (II-3): Extraction en terrain meuble.

- **En site terrestre (milieu sec) :**

Quand le gisement de granulats alluvionnaires se situe au-dessus du niveau d'eau (nappe phréatique, eau de la rivière), on exploite directement les matériaux avec les engins traditionnels des travaux publics tels que des pelles ou des chargeuses.

- **En site immergé (milieu hydraulique) :**

L'extraction peut être réalisée par des engins flottants : drague à godets, à grappin ou drague suceuse. Dans le cas de site immergé peu profond, exploitation pourra avoir depuis la rive avec des pelles à câble équipées en draglines, des pelles hydrauliques ou des excavateurs à godets. Le dragage ramène à la surface le tout

venant qui est ensuite chargé sur bateaux, sur camions ou sur bandes transporteuses en bord de rive. [6]

II.3.1.2-L'extraction des roches massives :



Figure (II-4) : Extraction des roches massives.

Dans ce type de gisement compact, l'extraction des roches nécessite l'emploi des explosifs. Les tirs de mines provoquent l'abattage d'une grande quantité de matériaux éclatés.les éclats de roche sont ensuite chargés et transportés au centre de traitement, procéder à un tir nécessite un plan de tir comprenant :

- le forage de trous.
- le choix des explosifs
- le déclenchement du tir

II.3.2-Le traitement :

Une fois extrait, les matériaux sont transportés jusqu'au site de traitement où Intervient le scalpage. Cette opération consiste à trier les éléments indésirables : les blocs, l'argile, etc.

Cette phase comporte les opérations suivantes :

- Concassage
- Criblage
- Lavage
- Stockage

II.3.2.1-Concassage :

Le produit scalpé est concassé : il passe de l'état de bloc à l'état de pierre. L'opération est renouvelée une ou plusieurs fois pour réduire le produit.

Il existe différents types de concasseurs :

- 1-concasseurs à mâchoires.
- 2-concasseurs à percussion.
- 3-concasseurs à projection centrifuge.
- 4-concasseurs giratoires.



Figure (II-5):Concasseur à mâchoire.



Figure (II-6) Concasseur à percussion.

II.3.2.2-Criblage :

Le criblage est l'opération qui permet de séparer un ensemble de granulats en deux sous-ensembles, l'un contenant les éléments plus gros d'une dimension donnée, l'autre les plus fins.

Les deux fonctions principales de cette opération sont :

- le criblage technique destiné à orienter les granulats dans une installation de production soit vers des broyeurs, soit vers le criblage final. [8]
- le criblage de classement destiné à trier les produits, suivant des spécifications dimensionnelles donnés en catégories marchandes. [8]

II.3.2.3-Lavage :

Le lavage des matériaux tout-venant après extraction permet l'élimination de l'essentielle des éléments polluants ; le lavage assure un approvisionnement des concasseurs et broyeurs en gros matériaux propres, condition indispensable à l'obtention de granulats concassés et broyés de propreté satisfaisante. Le lavage

peut permettre également la revalorisation des matériaux éliminés à l'étage primaire, apportant ainsi un accroissement de production qui peut être important. [3]



Figure (II-7) : Lavage des granulats.

II.3.2.4-Stockage :

En fin de traitement, on obtient des produits de qualité répondant à des critères bien précis :

- Nature des granulats : calcaire, silice,....
- Forme des grains : anguleux, arrondis.
- Granulométrie précise ou fourchette granulométrique.

Une fois réduit, traités et classés, les granulats sont acheminés vers les aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou silos.



Figure (II-) : Stockage des granulats.

II.3.2.5-La distribution :

Les granulats sont livrés à une clientèle généralement de proximité (usines de produits en béton, centrales de fabrication d'enrobés, chantiers routiers, etc.), l'essentiel du transport se faisant par la route.

CHPITRE III

Généralités sur la perméabilité

Introduction :

L'eau libre se déplace dans le sol à travers un réseau poreux connecté constitué de canaux, de pores et de fissures. Plus l'eau circule rapidement et plus le sol est perméable.

Dans un sol dont les vides sont obstrués, il ya pas d'écoulement : c'est un sol imperméable.

III.1-Définition de la perméabilité :

On définit la perméabilité, la capacité d'un sol ou d'un massif de se laisser traverser par un fluide (généralement l'eau). Elle s'exprime par un coefficient appelé coefficient de perméabilité qui égale au rapport de la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique.

III.2- Loi de Darcy :

La première loi d'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux a été formulée par Darcy en 1854.

Darcy avait réalisé une série d'expérience sur une conduite verticale de hauteur 2,5m et de diamètre 35cm remplie de sable. Il a mesuré à la fois la perte de charge et le débit de filtration (Q) correspondant en régime permanent entre les deux extrémités de la conduite. [19]

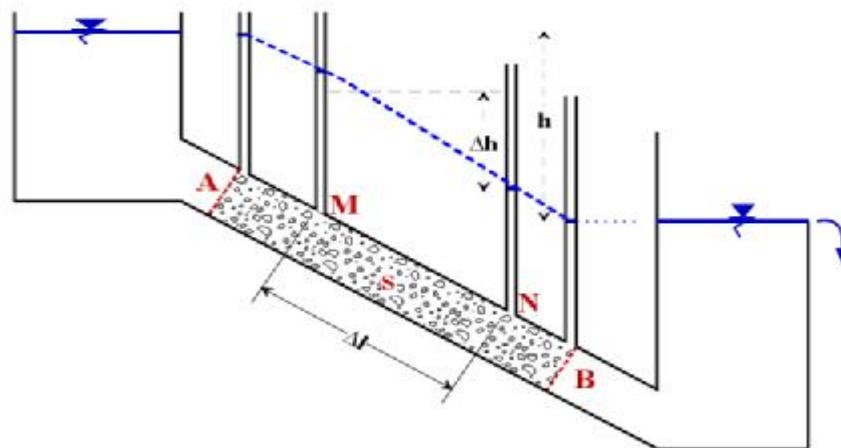


Figure (III-1) : Expérience de Darcy.

Darcy constate que le rapport de débit par unité d'aire (Q/S) est proportionnel à la perte de charge, et inversement proportionnel à la hauteur (L) séparant les deux points (A) et (B).

$$\frac{Q}{S} = K \cdot \frac{h}{L} \dots\dots\dots(1)$$

- $\frac{Q}{S} = V$ est appelée vitesse de filtration du fluide à travers la section S .
- $i = \frac{h}{L}$: Gradient hydraulique, c'est la perte de charge par unité de longueur.
- K : représente le coefficient de perméabilité du sol et de fluide, il s'exprime en m/s .

Les valeurs de K sont très diverses suivant la nature du sol.

**Tableau (III .1) : Les valeurs de coefficient de perméabilité
(Jean-Pierre MAGNAN.1999.)**

| Type de sol | Gravier | Sable | Limons (silt) | Argile |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------------------|------------|
| K (m /s) | 10^0 | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-11} |
| Méthode de mesure en laboratoire | Perméamètre à charge constante | | Perméamètre à charge variable | |

Remarque :

Le gradient est obligatoire négatif car la charge ne peut que décroître dans le sens de l'écoulement .si l'on veut que K soit positive il faut introduire le signe (-) dans la formule(1) .

III.3-Les facteurs influents sur la valeur du coefficient de perméabilité :

Le coefficient de perméabilité peut être influencé par plusieurs paramètres qui sont :

III.3.1-La granulométrie : un sol composé de grosses particules comporte des vides importants, et l'eau s'y écoule rapidement.

La forme de la courbe granulométrique peut influencer aussi sur la perméabilité par exemple, un sable à granulométrie serrée, se caractérisant par la présence de vides

importants, aura un coefficient supérieur à celui d'un sable comportant la même grosseur maximale de particule, mais dont la granulométrie étalée, ce qui suppose des vides beaucoup plus petits. [18]

III.3.2-La forme des grains : La forme des grains a également une influence sur la perméabilité : un sol dont les particules sont angulaires sera moins perméable qu'un sol dont les particules sont arrondies. [18]

III.3.3-L'indice des vides : L'indice des vides correspond à la quantité de vides à l'intérieur d'un sol. Plus est élevé, plus le sol est perméable.

III.3.4-Le degré de saturation : Le degré de saturation représente le pourcentage du volume des vides occupé par l'eau. Le coefficient de perméabilité atteint sa valeur maximale lorsque le sol est complètement saturé.

III.4-Mesure de la perméabilité en laboratoire :

La mesure de la perméabilité des sols en laboratoire s'effectue à l'aide d'un appareil appelé perméamètre selon deux procédures, dites «à charge constante » et « à charge variable ».

III.4.1-Perméamètre à charge constante :

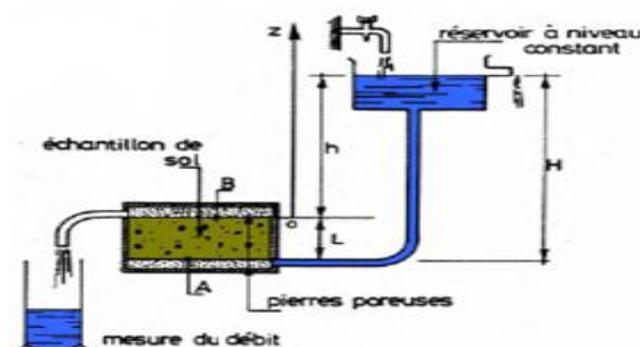


Figure (III .2) : Perméamètre à charge constante.

Il convient pour des sols très perméables (Sables et graviers). Pour exécuter l'essai, on crée un gradient hydraulique à l'intérieur de l'échantillon et l'eau s'écoule à travers le sol. La charge Δh reste constante.

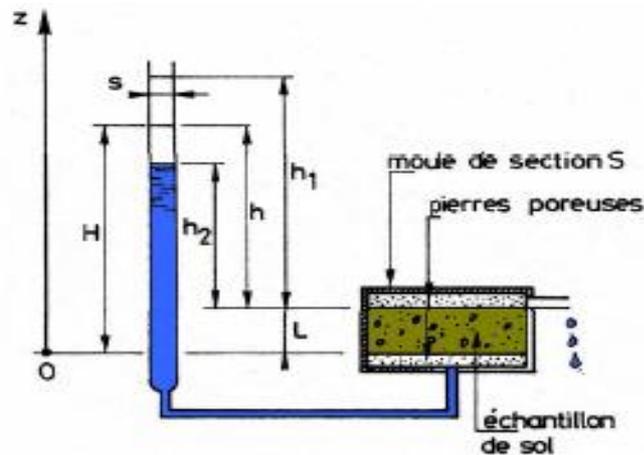
La vitesse de décharge est déterminée en mesurant le volume d'eau (q) qui traverse un échantillon pendant le temps (t) .

Le débit de filtration :
$$Q = \frac{q}{t}$$

Loi de Darcy :
$$V = \frac{Q}{S} = K.i$$

La perméabilité du sol vaut :
$$K = \frac{Q}{S.i} = \frac{q.L}{S.t.h}$$

III.4.2-Perméamètre à charge variable :



Figure(III.3): Perméamètre à charge variable.

Ce type d'essai est utilisé pour les sols fins (argiles) de faible perméabilité. On commence par amener l'échantillon à saturation. Le moule est alors plein d'eau et relié au tube gradué. On constate que le niveau d'eau baisse dans le tube et on mesure le temps (t) qui s'écoule entre les niveaux (h_1) et (h_2) , ces deux niveaux étant repérés par rapport au niveau de l'ajutage de sortie.

Si (S) est la section de l'échantillon et (s) celle du tube gradué, le débit (Q) sera égal à : $Q = S.V$

Le volume d'eau qui sort de l'échantillon est égal à la diminution de volume dans le tube : $dv = Q.dt = -s.dh$

On remplace Q:
$$S.K.\frac{h}{L}.dt = -s.dh.$$

$$K = \frac{s}{S} \cdot \frac{L}{dt} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

III.5-Mesure de la perméabilité in-situ:

A. Essais de pompage : (NFP94-130)

L'essai consiste à forer un puits à travers la formation perméable jusqu'à substratum. Des piézomètres sont disposés autour de puits. On pompe alors avec un débit constant (Q) jusqu'à ce que l'on ait atteint un régime permanent. On mesure le débit pompé ainsi que le niveau de l'eau dans le puits et dans les piézomètres. [18]

Domaine d'utilisation:

- Les sols grenus.
- Les sols fins ou rocheux traversés par un réseau de discontinuité.

La perméabilité s'exprime par la formule de Dupuit : $K = Q \cdot \frac{\ln(\frac{B}{A})}{p(b^2 - a^2)}$

A : Rayon du puits.

B : Rayon de rabattement de la nappe.

a : La hauteur de du niveau d'eau à l'intérieur du puits.

b : La hauteur de la nappe.

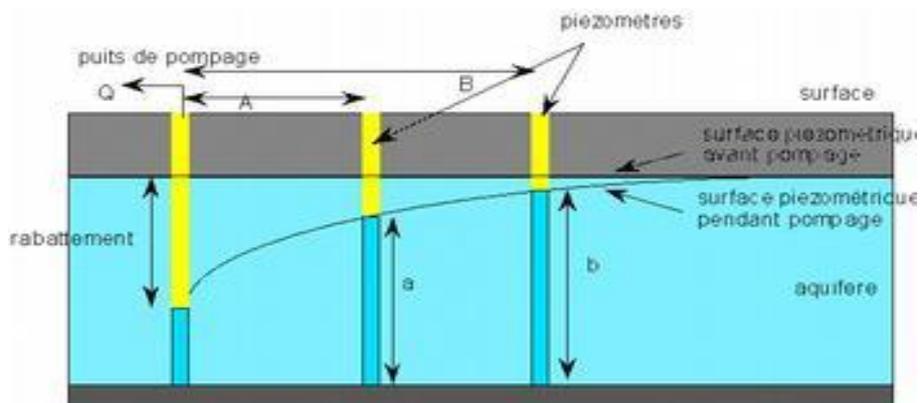


Figure (III .4) : Détermination de la perméabilité par pompage. (V.ROBITAILLE1997)

B. Essai de LEFRANC : (NFP94-132)

Cet essai est réservé essentiellement aux sols pulvérulents et il se réalise comme suit :

On enfonce dans le sol un tube cylindrique de parois imperméable dont l'extrémité inférieure plonge dans une cavité de rayon « r » et on y injecte de l'eau à débit constant Q. [10]

Les résultats de cet essai nous donnent :
$$K = \frac{Q}{C_f \cdot H}$$

Avec C_f : coefficient de forme qui a pour valeur $C_f = 4pr$ pour une cavité sphérique de rayon r.

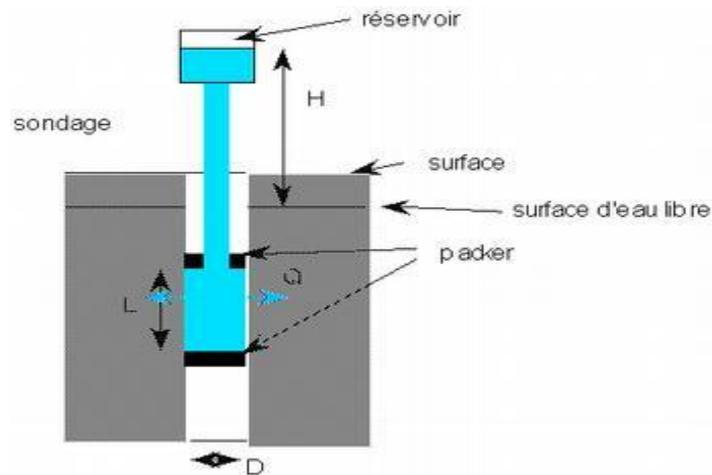


Figure (III.5) : Essai LEFRANC.

C. Essai LUGEON : (NFP94-131)

Cet essai est utilisé pour préciser la perméabilité et le degré de fracturation des massifs rocheux. L'essai consiste à envoyer de l'eau sous pression dans une tranche de sondage isolé par un ou deux obturateurs. Le résultat de l'essai s'exprime en Lugeon. [10]

1 Lugeon = débit de 1 litre par minute injecté dans un tronçon de forage de 1,00m sous une pression de 1MPa , maintenue constante pendant 10 minutes.

on peut alors appliquer l'équation :
$$K = \left(\frac{1}{p}\right) \cdot Q \cdot \frac{\ln \frac{R}{r}}{L \cdot H}$$

K : est exprimé en (m/s).

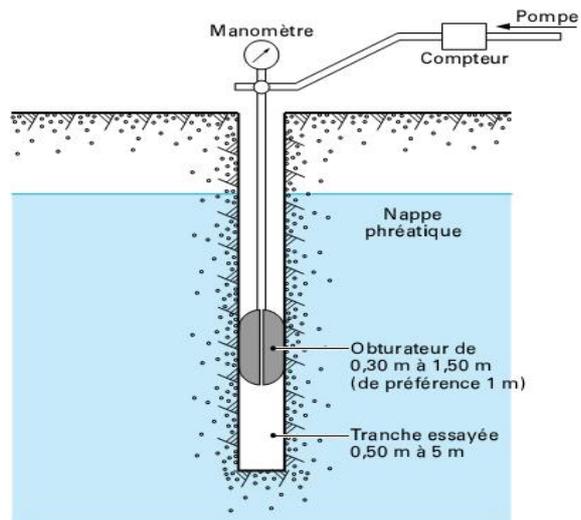
Q : Débit en m³/s.

R : Rayon d'action de l'essai, estimé à 200 mètres.

r : Rayon du forage (de la chambre) en mètre.

L : Hauteur de la chambre en mètre.

H : Charge hydraulique en mètres d'eau .



Figure(III.6) : Essai Lugeon (J-P .MAGNAN. 1999)

CHAPITRE IV

Généralités sur la Résistance au cisaillement des granulats

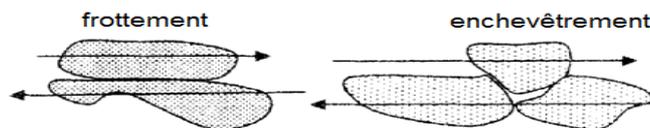
Introduction :

Les sols sont constitués de particules indépendantes les unes des autres. Cependant, lorsqu'une force est appliquée dans le but de les déplacer, les particules du sol s'y opposent, développant une résistance appelée « résistance au cisaillement », engendrée par l'arrangement des particules.

IV.1-Définition de la résistance au cisaillement des granulats:

La résistance au cisaillement est produite par le frottement, l'enchevêtrement et la cohésion des particules, elle dépend de la dimension, de la forme, de la surface spécifique et des caractéristiques de la surface des particules.

Plus la charge perpendiculaire au plan de cisaillement est élevée, plus les particules se rapprochent les unes des autres et plus la résistance au cisaillement est grande. [18]



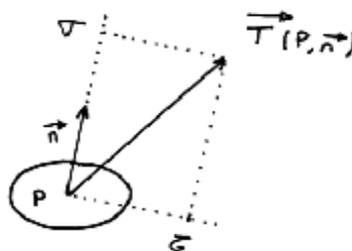
IV.2- Les contraintes sur un plan de cisaillement :

IV .2.1- Rappel Mécanique des milieux continus :

La contrainte en un point P situé à l'intérieur d'un milieu continu se définit par rapport à une facette passant par ce point.

La contrainte sur une facette donnée se décompose en :

- Contrainte normale suivant la normale \vec{n} : S_n .
- Contrainte tangentielle suivant le plan de la facette \vec{t} : t_n



Figure(IV.1) : contrainte sur une facette.

Chapitre IV..... Généralités sur la résistance au cisaillement des granulats.

L'état de contraintes au point P est défini par un tenseur appelé tenseur des contraintes. Il existe en point trois plans privilégiés pour lesquels la contrainte est uniquement normale ($t = 0$). Ils sont appelés plans principaux et sont orthogonaux.

Les contraintes normales correspondantes sont les contraintes principales notées : s_1, s_2, s_3

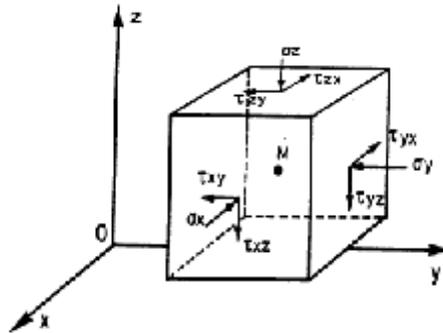


Figure (IV.2) : Composantes du tenseur des contraintes en un point.

IV .2.2- Représentation plane – cercle de Mohr :

Pour étudier l'état de contraintes en un point on utilise une représentation graphique du vecteur \vec{T} , dans un système d'axes (s, t) . Les points représentant les contraintes principales ($t = 0$) sont donc sur l'axe (Os)

Lorsque le plan de facette tourne autour d'une direction principale, l'extrémité du vecteur contrainte décrit dans le plan (s, t) un cercle, appelé « cercle de Mohr ». [5]

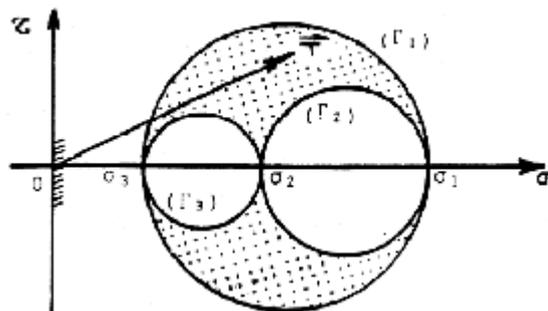


Figure (IV.3) : Cercle de Mohr.

Lorsque dans le plan physique la normale \hat{n} tourne d'un angle (a), l'extrémité du vecteur contrainte tourne d'un angle ($2a$) sur le cercle de Mohr.

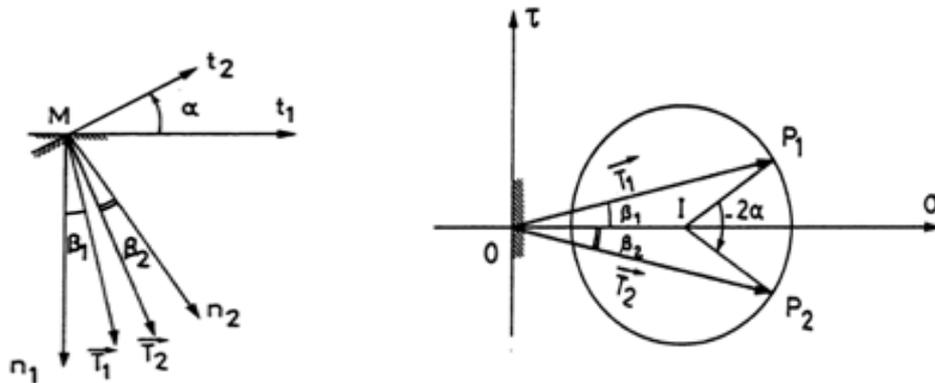


Figure (IV.4) : Plan physique

IV.3-Les contraintes à la rupture et les paramètres de résistance au cisaillement :

IV.3.1- Courbe intrinsèque:

le physicien Charles Coulomb mena des études sur la stabilité des sols en réalisant des expériences de cisaillement à la boîte qui lui permirent d'évaluer la résistance au cisaillement des sols à la rupture le long d'un plan de cisaillement.

Il remarqua que les cercles correspondant à la rupture, obtenus en augmentant progressivement le déviateur des contraintes (le déviateur des contraintes correspond au diamètre du cercle ($q = s_1 - s_3$)) admettent une même courbe enveloppe de rupture appelée courbe intrinsèque.

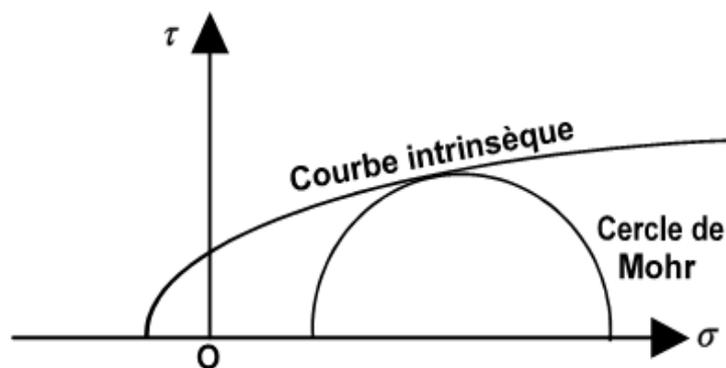


Figure (IV.5) : courbe intrinsèque.

IV.3.2- équations de Coulomb :

L'expérience montre que la courbe intrinsèque d'un sol est constituée par deux demi droites symétriques par rapport à l'axe (Os) appelées « droites de Coulomb ». [5]

L'équation de coulomb et de la forme : $t = C + S \tan j$

C : cohésion

φ : Angle de frottement

- **Sols pulvérulents** : la demi-droite passe par l'origine des axes ;
- **Sols cohérent** : la demi-droite ne passe pas par l'origine des axes.

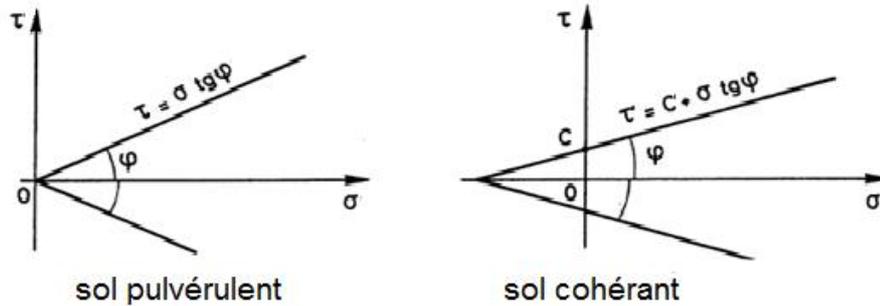


Figure (IV.6) : Droite de coulomb.

Si les axes du diagramme de Mohr représentent les contraintes effectives, l'équation s'écrit : $t' = C' + S' \tan j'$

IV.3.3- Relations entre les paramètres (c et j) et les contraintes principales (S_1, S_2, S_3) :

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

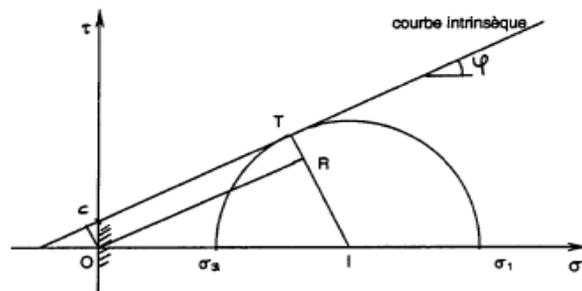


Figure (IV.7) : Cercle de Mohr et enveloppe de rupture.

IV.3.4- Les facteurs influents sur les paramètres de la résistance au Cisaillement :

A. Les sols pulvérulents :

Dans les sols pulvérulents, l'équation de coulomb prend la forme : $t = S \cdot \tan(j)$.

La valeur de l'angle de frottement dépend essentiellement de la compacité du sol, de sa granulométrie et de la forme de ses grains.

- Plus les particules d'un sol sont angulaires, plus l'angle (j) est important.
- La compacité du sol constitue le facteur d'influence le plus important :
Lorsqu'elle augmente, l'indice des vides diminue et l'angle de frottement augmente.
- Un sol à granulométrie étalée aura un angle (j) supérieur à celui qui présente une granulométrie serrée. [19]

Tableau (IV.1) : Angle de frottement Interne effectif des sols pulvérulents sec (d'après Lambe et Whitman,1979,et Bowles,1984) .

| Type de sol | Angle de frottement interne effectif j' (en degré) | | | |
|--|---|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | Etat lâche | | Etat dense (compact) | |
| | Particules arrondies | Particules angulaires | Particules arrondies | Particules angulaires |
| Gravier | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Gravier et sables | 36 | 42 | 40 | 48 |
| Sable à granulométrie étalée | 34 | 39 | 40 | 45 |
| Sable fin à moyen à granulométrie serrée | 30 | 35 | 37 | 43 |
| Sable silteux | 25 à 35 | | 30 à 36 | |
| silt | 28 à 32 | | 30 35 | |

B. Les sols cohérents ou fins :

L'équation de coulomb prend la forme : $t = c + S \tan(j)$

Les sols cohérents étant peu perméables. Les paramètres de la résistance au cisaillement sont surtout influencés par les conditions de drainage et la teneur en eau.

Quand le drainage est nul, l'eau demeure emprisonnée dans les vides du sol .Si, de surcroît, le sol est saturé, ce qui souvent le cas des argiles, aucune consolidation n'est possible après l'augmentation des contraintes .En effet, l'eau étant incompressible, elle empêche les particules de se rapprocher quand elle occupe tous les vides de sol. Dans de telle condition, lorsque les contraintes augmentent, la résistance au cisaillement ne change pas ; seules les pressions inertielles augmentent.

Quelles que soient les contraintes principales agissant à la rupture, la résistance au cisaillement intrinsèque du sol devient une constante : c'est la résistance au cisaillement non drainé. [19]

Lorsque le drainage est possible et que le sol est en cours de consolidation, son volume diminue ; ainsi, les particules se rapprochent et la résistance au cisaillement augmente.

Les surpressions interstitielles étant nulles, les efforts appliqués sont transmis en total au squelette du sol et les contraintes induites sont des **contraintes effectives**.

Les caractéristiques de résistance au cisaillement du sol, ainsi obtenues, sont appelées caractéristiques drainées et seront exploitées dans les calculs de stabilité des sols dits à **long terme**. [19]

La teneur en eau du sol agit elle aussi de façon importante sur la valeur des paramètres de la résistance au cisaillement.Les sols argileux à teneur en eau élevée ont une consistance molle et une résistance au cisaillement faible.par contre, les argiles faiblement humides présentent une consistance relativement raide et une résistance au cisaillement assez élevée. [19]

Tableau (IV.2) : Les facteurs influents sur les paramètres de la résistance au cisaillement.

| Type de sol | Perméabilité | Type de calcul | Caractéristique | Contrainte induite | Pression interstitielle | Drainage |
|-----------------|----------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|-------------------------|----------|
| Sol pulvérulent | Forte à moyenne | Long terme | Drainées | Effectives | U=0 | Autorisé |
| | faible | Long terme et court terme | | | | |
| Sol fin | Faible à très faible | Long terme et court terme | Non drainées | Totales | U ¹ 0 | empêché |

IV.4-Mesure au laboratoire des caractéristiques de rupture :

Les caractéristiques de cisaillement des sols sont déterminées en laboratoire sur des éprouvettes prélevées dans des carottes de sol ou préparées spécialement à cette fin, dans le cas des matériaux de remblai ou de sols que l'on ne sait pas prélever à l'état intact.

Cinq principaux types d'essais sont utilisés pour déterminer en laboratoire les caractéristiques de la résistance au cisaillement des sols:

- les essais de cisaillement rectiligne (direct) à la boîte.
- Les essais de cisaillement rectiligne (direct) alterné à la boîte.
- Les essais à l'appareil triaxial de révolution.
- Les essais de compression simple.
- Les essais au scissomètre de laboratoire.

IV.4.1-Essais de cisaillement rectiligne (direct) à la boîte (NF P94 – 071- 1): [11]

Cet essai consiste à provoquer une rupture de l'échantillon suivant un plan imposé.

L'échantillon est placé dans une boîte constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre.

On applique sur l'échantillon un effort normal de compression N , verticalement par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant T horizontalement en déplaçant la demi-boîte inférieure.

Un comparateur mesure la variation de hauteur de l'échantillon.

L'objet de cet essai est d'obtenir les caractéristiques de résistance au cisaillement (cohésion, angle de frottement interne).

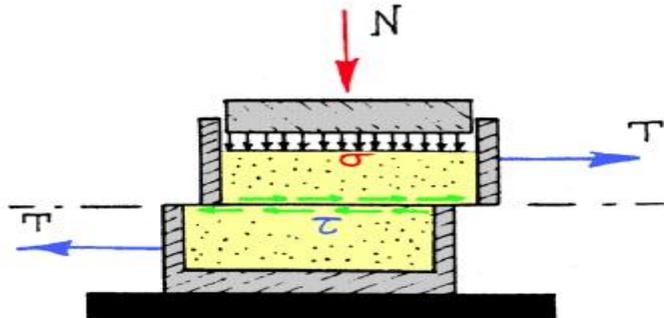


Figure (IV.8): Boite de cisaillement au cours d'essai

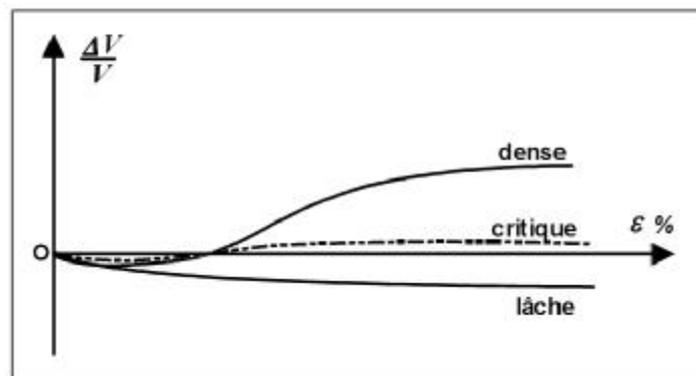


Figure (IV.9): Changement de volume de sol pulvérulent pendant le cisaillement.

Dans l'essai de cisaillement direct les conditions de drainage ne sont pas maîtrisées, Elles dépendent de la perméabilité du sol et de la vitesse d'essai.

IV.4.2-Essai de cisaillement rectiligne alterné à la boite (NFP 94 - 071 -2):

Cet essai dérive l'essai de cisaillement direct à la boite pour caractériser le frottement sur les surfaces de ruptures dans les pentes naturelles, dans le cas où les deux massifs de sol en contact ont subi un déplacement relatif important.

Si lors de l'essai, des déplacements très importants sont imposés, de l'ordre du décimètre, la résistance au cisaillement diminue pour atteindre un nouveau palier correspondant à de nouvelles caractéristiques dite résiduelles C_r et j_r . [10]

Chapitre IV..... Généralités sur la résistance au cisaillement des granulats.

Comme l'essai est long, et n'est réalisé que sur des sols argileux, la saturation de l'échantillon de sol nécessite que la boîte soit immergée dans une enceinte pleine d'eau.

L'essai est effectué dans des conditions drainées, c'est-à-dire avec une vitesse de déplacement relatif des demi boîtes très faible, adaptée à la perméabilité du sol.

Il comporte deux phases:

- Une phase de consolidation sous l'effort normal N .
- Une phase de cisaillement alterné d'amplitude constante, prolongée jusqu'à ce que l'effort de cisaillement T se stabilise.

L'exploitation des résultats est identique à celui de l'essai de cisaillement direct à la boîte : on reporte sur un diagramme de Mohr (s, t) les valeurs des contraintes normale et tangentielle en fin d'essai. On exécute au moins trois essais.

$$s = \frac{N}{A} \quad \text{et} \quad t = \frac{T}{A}$$

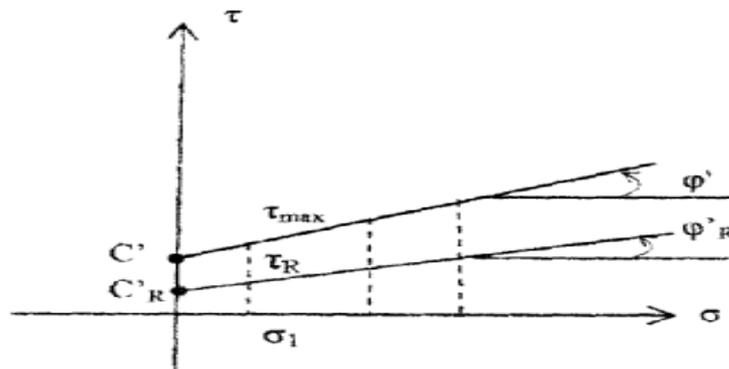


Figure (IV.10): Courbe intrinsèque d'un sol cohérent dans un essai de cisaillement direct alterné à la boîte.

IV.4.3-Essais à l'appareil triaxial (NF P 94 - 070 et NF P 94 - 074):

L'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique, il consiste à appliquer un champ de contrainte uniforme qui a pour composantes une contrainte radiale

$$s_3 = s_2 = -p \quad \text{et} \quad \text{une contrainte axiale } s_1 .$$

On exerce d'abord une pression hydrostatique d'intensité s_3 sur l'ensemble de l'éprouvette par l'intermédiaire de l'eau qui remplit la cellule. Ensuite, on

applique un déviateur $s_1 - s_3$ par l'intermédiaire d'un piston dans la direction axiale de l'échantillon.

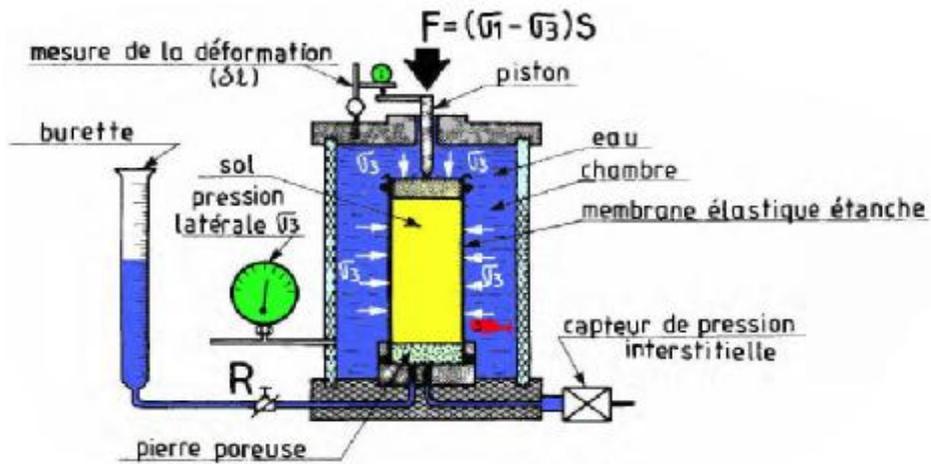


Figure (IV.11): Appareil triaxial.

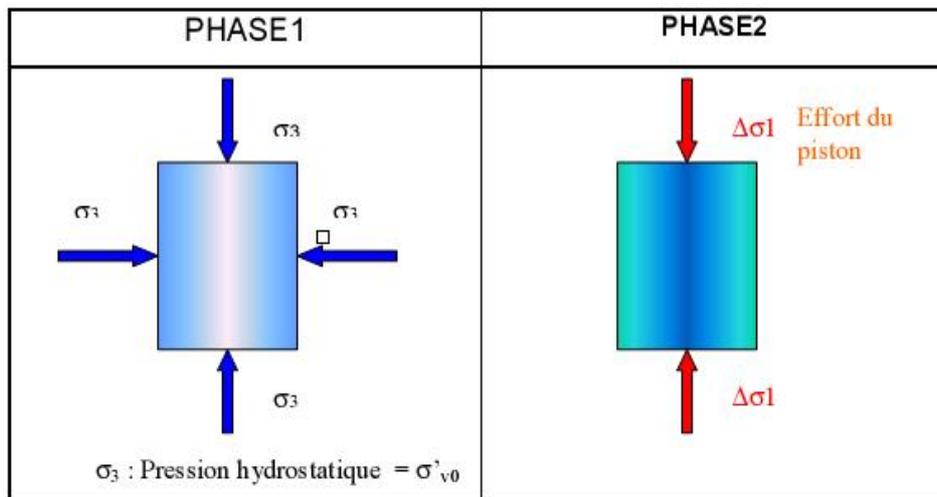


Figure (IV.12): Champs de contrainte à l'appareil triaxial

En répétant l'essai pour différentes valeurs de s_3 , plusieurs cercles de Mohr peuvent être déterminés. IL est alors possible de tracer la courbe intrinsèque.

IV.4.4- Essais de compression simple :

Il consiste à comprimer jusqu'à l'écrasement un échantillon cylindrique de sol entre les deux plateaux d'une presse.

La contrainte axiale à la rupture est une contrainte principale majeure, elle est appelée résistance à la compression simple et notée R_C .

Le cercle de Mohr correspondant à la rupture en compression simple passe par l'origine et a comme diamètre R_C . [19]

Dans le cas d'une argile saturée non drainée pour laquelle $\phi=0$: $C_u = R_C/2$

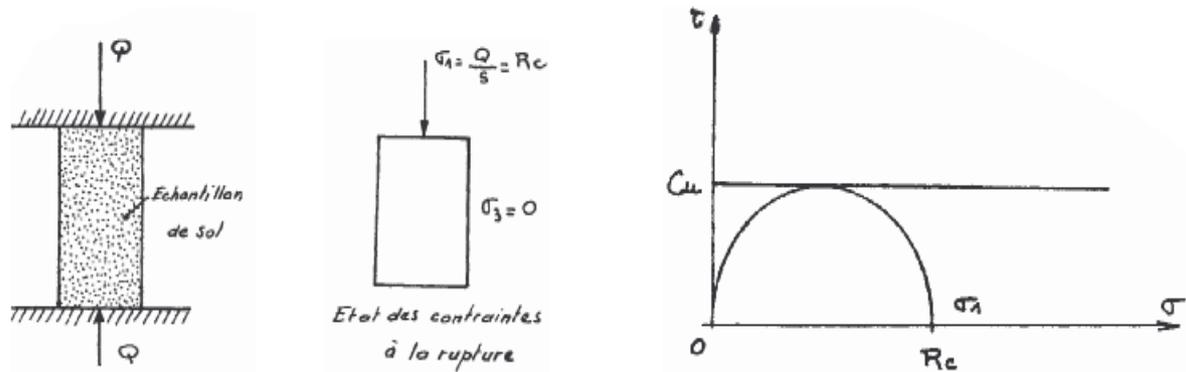


Figure (IV.13): Essai de compression simple.

IV.4.5- Essais au scissomètre de laboratoire (NF P 94 - 072) :

Le scissomètre de laboratoire est moins utilisé que les autres appareils, parce qu'il applique au sol une sollicitation plus difficile à définir.

L'équipement est composé d'une tige métallique munie à son extrémité d'une ou plusieurs pales, l'ensemble est enfoncé par pression dans l'éprouvette de sol, puis soumis à un couple de torsion autour de l'axe de la tige, à vitesse angulaire de rotation constante.

Il permet de mesurer le moment de torsion M exercé en tête de tige, et tracer la courbe de variation de ce moment en fonction de l'angle de rotation α .

Cette courbe en générale présente un maximum, dont on admet qu'il correspond à la rupture du sol. [18]

Cet essai donne une valeur indicative de la résistance des sols fins cohérents

au cisaillement non drainé :

$$C_u = \frac{6.M}{p.D^2(3.H.D)} = K_C.M$$

C_u : Résistance au cisaillement non drainée (KPa).

M : Moment de torsion $N.cm$

K_C : Constante du croisillon ($KPa / N.cm$)

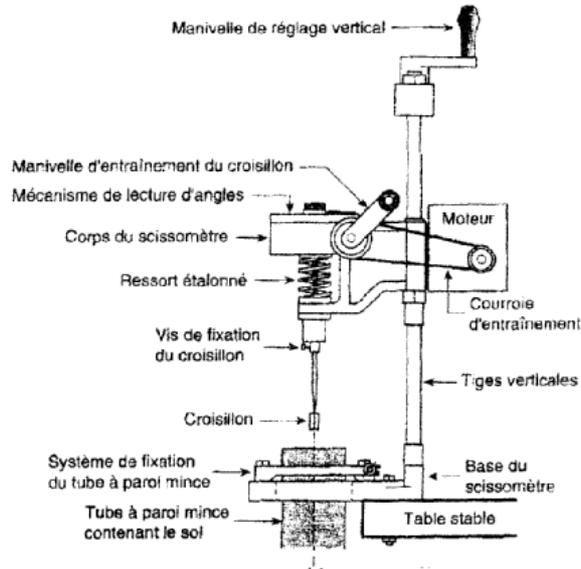


Figure (IV.14): Scissomètre de laboratoire (V.ROBITAILLE1997)

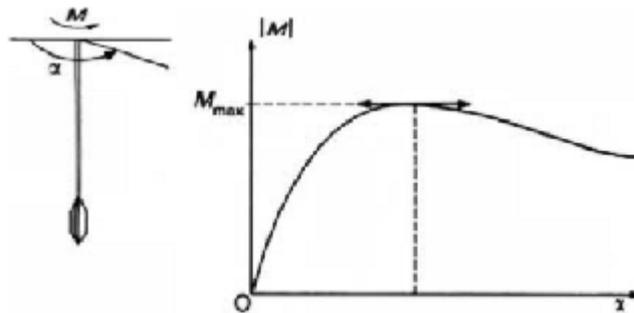


Figure (IV.15): Moment M du couple de rotation en fonction de l'angle de rotation α .
(V.ROBITAILLE1997)

IV.5-Conditions d'essais et principales caractéristiques mécaniques d'un sol :

IV.5.1-Essai non consolidé non drainé (UU) : (Unconsolidated and Undrained)

L'éprouvette ne subit aucune consolidation, ni aucun drainage préalable, sous la contrainte normale de cisaillement.

Chapitre IV..... Généralités sur la résistance au cisaillement des granulats.

Cet essai rapide correspondant au comportement **court terme**, permet d'estimer la cohésion non drainée C_U , l'angle de frottement interne j_U (caractéristiques apparentes). [12]

Dans le cas des sols cohérent saturés, la courbe intrinsèque est une droite horizontale et la résistance au cisaillement ne varie pas : $t = C_U$

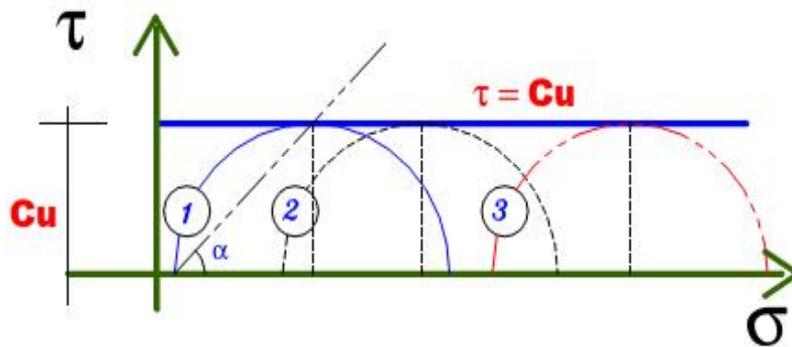


Figure (IV.16): Essai non consolidé non drainé. (K. MEFTAH ,2008)

Les caractéristiques apparentes (C_U, j_U) sont mesurées, soit par un essai triaxial non consolidé non drainé, soit par un essai de cisaillement non consolidé rapide.

IV.5.2-Essai consolidé drainé (CD) :

Les pressions interielles se dissipent au fur et à mesure ($u = 0$).

Cet essai lent, correspondant au comportement à **long terme** du sol, conduit à déterminer les contraintes effectives : $t = s' . \tan(j')$

C' : Cohésion effective.

j' : L'angle de frottement effectif.

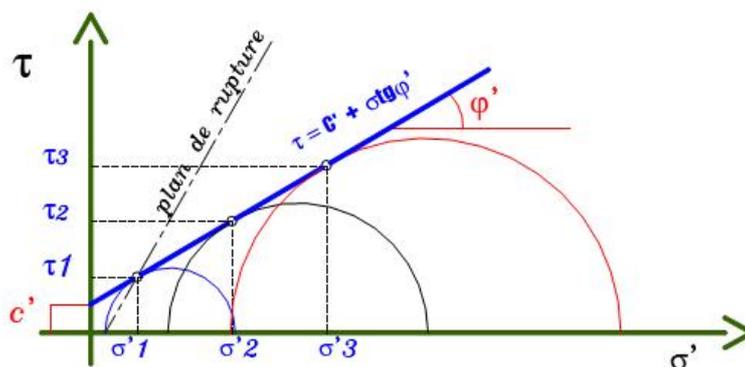


Figure (IV.17): Essai consolidé drainé. (K. MEFTAH ,2008)

Les caractéristiques effectives (c', j') sont mesurées soit par un essai triaxial consolidé drainé (CD), soit par un essai triaxial consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle ($CU + u$), soit par un essai de cisaillement consolidé lent.

IV.5.3-Essai consolidé non drainé (CU):

L'échantillon est tout d'abord consolidé sous une contrainte isotrope jusqu'à dissipation des pressions interstitielles, puis le drainage est fermé, et la contrainte verticale est augmentée jusqu'à la rupture, tout en mesurant les variations de la pression interstitielle. [12]

Ces caractéristiques sont mesurées, soit par un essai triaxial consolidé non drainé (CU), soit par un essai de cisaillement consolidé rapide.

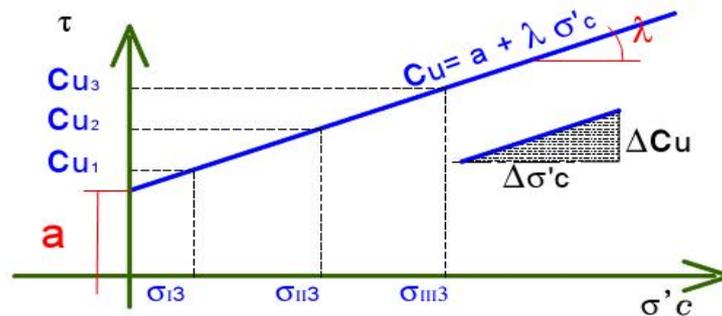


Figure (IV.18): Essai consolidé non drainé. (K. MEFTAH, 2008)

Partie expérimentale

CHAPITRE V

Essais d'identification

Introduction :

Les matériaux sont extraits sous forme de blocs qui sont soumis au concassage pour obtenir des grains de différents diamètres.

Une étude d'identification a été réalisée au laboratoire de génie civil.

Cette étude comporte les essais suivants :

- Analyse granulométrique
- Mesure des caractéristiques physiques.

V.1-Analyse granulométrique :

V.1.1-Définition :

L'analyse granulométrique consiste à déterminer les différents diamètres des grains qui constituent un granulat. Elle s'effectue par deux opérations :

- Tamisage.
- Sédimentométrie.

V.1.1.1Tamisage :

Le tamisage consiste à faire passer une quantité de sol à travers une série de tamis emboîtés les uns sur les autres et classés dans l'ordre décroissant des ouvertures de haut en bas. On peut réaliser l'opération par voie sèche (pour les sols pulvérulents) ou par voie humide (pour les sols cohérents). Dans ce cas, il faudra sécher les matériaux retenus par chaque tamis avant pesage.

On appelle **tamisât** la partie des grains qui traverse le tamis et **refus** celle qui y est retenue. Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré.

Les résultats de l'analyse sont exprimés sous forme d'une courbe appelée **courbe granulométrie**, en portant les ouvertures des tamis en abscisse sur une échelle logarithmique, et les pourcentages des tamisât cumules en ordonnée, sur une échelle arithmétique.

Pour aboutir à classer notre matériau on doit calculer les coefficients granulométriques suivants :

- **Le coefficient d'uniformité :(coefficient de HAZEN) :** est égal au rapport entre les diamètres correspondants respectivement aux tamisât de 10%et et de 60%

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- **Le coefficient de courbure :** qui traduit la forme plus ou moins régulière de la

courbure et vaut
$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{(d_{60} \times d_{10})}$$

On reconnait trois classe de granulométrie suivant la valeur de C_U :

$C_U < 2$ granulométrie très serrée.

$2 \leq C_U \leq 5$ granulométrie serrée.

$5 < C_U$ granulométrie étalée.

V.1.1.2-Sédimentométrie :

L'opération s'effectue pour les sols ayant des particules fines (de diamètre $< 0,08\text{mm}$), on prélève une quantité de fraction fine de sol que l'on place dans une solution défloculante .Le sol étant dispersé par agitation mécanique ,pour homogénéisation ,on effectue la mesure de la densité à l'intervalle de temps régulier à l'aide d'un « densimètre torpille » .L'interprétation se fait en utilisant la loi de Stockes qui donne la vitesse de chute d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux. [1]

V.1.2-Equipement nécessaire :

La procédure effectuée au laboratoire c'était le tamisage, et les équipements utilisés sont :

- Les tamis de classes 6,3 , 5 , 4 , 3,15 , 2,5 , 2 , 1,6 , 1 , 0,5 , 0,315 , 0,08.
- Un vibro-tamis électrique.
- Une balance.
- La masse de chaque matériau : $M = 1500\text{g}$

$$(M (\text{Kg}) \geq 0,2 D)$$

Avec : D la plus grande dimension de la série utilisée.

Dans notre cas $D=6,3$

V.1.3-Description de l'essai :

On classe une série de tamis par ordre décroissant de haut vers le bas , on verse l'échantillon en haut de la colonne de tamis et on fait vibrer l'ensemble à l'aide de vibro-tamis pendant 10 mn et à une fréquence de 50 Hz. On pèse le refus de chaque tamis et on détermine le pourcentage des tamisât cumulées.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau (V.1) : Les résultats de tamisage de sable d'oued.

| Diamètre de tamis (mm) | Refus (g) | refus cumulé (g) | refus cumulé (%) | tamisât cumulé (%) |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 6,30 | 8,30 | 8,3 | 0,55 | 99,45 |
| 5,00 | 7,40 | 15,7 | 1,04 | 98,96 |
| 4,00 | 54 ,0 | 69,7 | 4,64 | 95,36 |
| 3,15 | 75,90 | 145,6 | 9,7 | 90,3 |
| 2,50 | 138,8 | 284,4 | 18,96 | 81,04 |
| 2,00 | 117,1 | 401,5 | 26,76 | 73,24 |
| 1,60 | 183,1 | 584,6 | 38,97 | 61,03 |
| 1,00 | 438,9 | 1023,5 | 68,23 | 31,77 |
| 0,50 | 316,0 | 1339,1 | 89,3 | 10,7 |
| 0,315 | 83,20 | 1422,7 | 94,84 | 5,16 |
| 0,08 | 66,40 | 1489,1 | 99 ,27 | 0,73 |
| fond | 9,10 | 1498,2 | 99,88 | 0,12 |

Tableau (V.2) : Les résultats de tamisage de granite

| Diamètre de tamis (mm) | Refus (g) | refus cumulé (g) | refus cumulé (%) | tamisât cumulé (%) |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 6,30 | 4,1 | 4,1 | 0,27 | 99,73 |
| 5,00 | 108,3 | 112,4 | 7,49 | 92,51 |
| 4,00 | 59,2 | 171,6 | 11,44 | 88,56 |
| 3,15 | 152,7 | 324,3 | 21 ,61 | 78,39 |
| 2,50 | 182,2 | 506,5 | 33,76 | 66,24 |
| 2,00 | 85,7 | 592,2 | 39,48 | 60,52 |
| 1,60 | 293,2 | 885,4 | 59,02 | 40,98 |
| 1,00 | 444,2 | 1329,6 | 88,64 | 11,36 |
| 0,50 | 79 | 1408,6 | 93,9 | 6,1 |
| 0,315 | 47,1 | 1455,7 | 97,04 | 2,96 |
| 0,08 | 27,6 | 1483,3 | 98,88 | 1,12 |
| fond | 6,7 | 1490 | 99,33 | 0,76 |

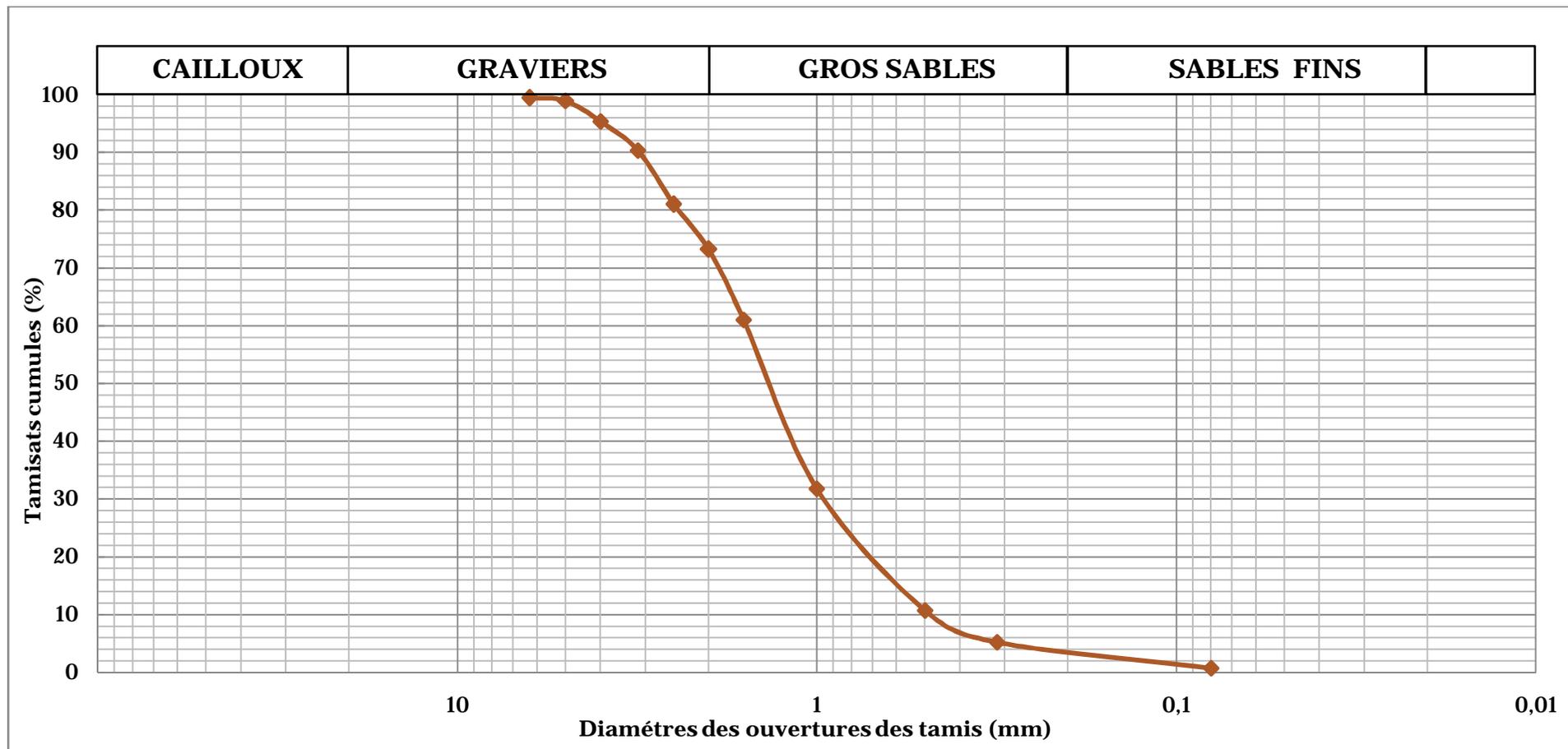
Tableau (V.3) : Les résultats de tamisage de grès.

| Diamètre de tamis (mm) | Refus (g) | refus cumulé (g) | refus cumulé (%) | tamisât cumulé (%) |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 6,30 | 79 ,6 | 79,6 | 5,30 | 94,7 |
| 5,00 | 75,4 | 155 | 10,33 | 89,67 |
| 4,00 | 219,1 | 374,1 | 24,94 | 75,06 |
| 3,15 | 183,2 | 557,3 | 37,15 | 62,85 |
| 2,50 | 88,1 | 645,4 | 43,02 | 56,98 |
| 2,00 | 40,6 | 686 | 45,73 | 54,27 |
| 1,60 | 208,2 | 894,2 | 59,61 | 40,39 |
| 1,00 | 192,1 | 1086,3 | 72,42 | 27,58 |
| 0,50 | 80,8 | 1167,1 | 77,80 | 22,2 |
| 0,315 | 146,7 | 1313,8 | 87,58 | 12,42 |
| 0,08 | 161,7 | 1475,5 | 98,36 | 1,64 |
| fond | 23,9 | 1499,4 | 99,96 | 0,04 |

Tableau (V.4) : Les résultats de tamisage de calcaire.

| Diamètre de tamis (mm) | Refus (g) | refus cumulé (g) | refus cumulé (%) | tamisât cumulé (%) |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 6,30 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 5,00 | 14,7 | 14,7 | 0,98 | 99,02 |
| 4,00 | 252,1 | 266,8 | 17,78 | 82,22 |
| 3,15 | 111,7 | 378,5 | 25,23 | 74,77 |
| 2,50 | 171,5 | 550 | 36,66 | 63,34 |
| 2,00 | 54,4 | 604,4 | 40,29 | 59,71 |
| 1,60 | 370,4 | 974,8 | 64,98 | 35,02 |
| 1,00 | 512,3 | 1487,1 | 99,14 | 0,86 |
| 0,50 | 6,2 | 1493,3 | 99,55 | 0,45 |
| 0,315 | 1,5 | 1494,8 | 99,65 | 0,35 |
| 0,08 | 2,8 | 1497,6 | 99,84 | 0,16 |
| fond | 2 | 1499,6 | 99,97 | 0,03 |

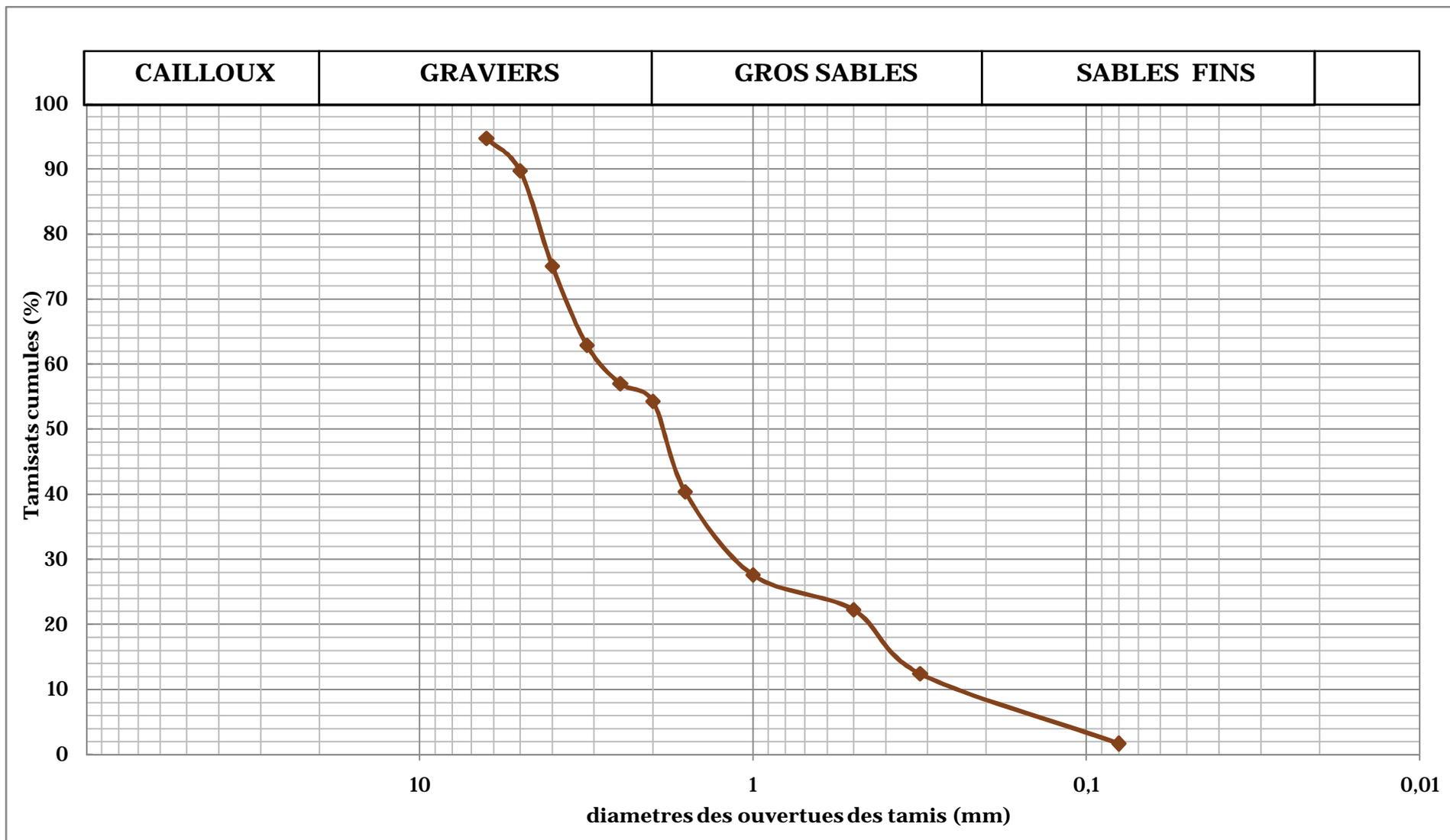
V.1.4 : Présentation de courbes granulométriques :



Figure(V.1) : courbe granulométrique de Sable d'oued.



Figure(V.3) Courbes granulométriques granite.



Figure(V.4) : Courbe granulométrique grès.



Figure(V.2) : Courbe granulométrique de calcaire.

V.1.5 Les paramètres granulométriques :

Après avoir effectué une analyse granulométrique sur chaque échantillon et tracé leur courbe granulométriques, les diamètres significatifs ont été déduits et les coefficients d'uniformité et de courbure ont été calculés.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau (V.5) : Les diamètres significatifs.

| Matériau | Diamètres | |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Sable d'oued | D ₆₀ |
| D ₃₀ | | 0,98 |
| D ₁₀ | | 0,48 |
| Granite | D ₆₀ | 2 |
| | D ₃₀ | 1,5 |
| | D ₁₀ | 0,95 |
| Grès | D ₆₀ | 2,9 |
| | D ₃₀ | 1,2 |
| | D ₁₀ | 0,25 |
| Calcaire | D ₆₀ | 2 |
| | D ₃₀ | 1,5 |
| | D ₁₀ | 1,2 |

Tableau (V.6) : Coefficients d'uniformité et de courbure.

| Matériau | $C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ | $C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ |
|--------------|-------------------------------|--|
| Sable d'oued | 3,29 | 1,28 |
| Granite | 2,1 | 1,73 |
| Grès | 11,6 | 1,98 |
| Calcaire | 1,66 | 0,93 |

V.1.6- Interprétation des résultats :

La classification sera basée sur les normes de classification des granulats du Laboratoire Central des Ponts des Chaussées(LCPC).

Ø Sable d'oued :

Plus de 50% d'éléments ont un diamètre inférieur à 2 mm et moins de 5% d'éléments ont un diamètre inférieur à 0,08 mm.

$$C_U=3,29 \text{ et } C_C=1,26$$

D'après ces conditions, l'échantillon est classé comme étant **un sable propre mal gradué.**

Puisque $2 < C_U < 5$ ceci dit que l'échantillon a une granulométrie **serrée.**

Ø Granite :

Plus de 50% d'éléments ont un diamètre inférieur à 2 mm et moins de 5% d'éléments ont un diamètre inférieur à 0,08 mm.

$$C_U=2,1 \text{ et } C_C=1,73$$

D'après ces conditions, l'échantillon est classé comme étant **un sable propre mal gradué.**

$2 < C_U < 5$ donc l'échantillon a une granulométrie **serrée.**

Ø Grès :

Plus de 50% d'éléments ont un diamètre inférieur à 2 mm et moins de 5% d'éléments ont un diamètre inférieur à 0,08 mm .

$$C_U=11,6 \text{ et } C_C=1,98$$

D'après ces conditions, l'échantillon est classé comme étant **un sable propre bien gradué.**

$5 < C_U$ donc l'échantillon a une granulométrie **étalée.**

Ø Calcaire:

Plus de 50% d'éléments ont un diamètre inférieur à 2 mm et moins de 5% d'éléments ont un diamètre inférieur à 0,08 mm.

$$C_U=1,66 \text{ et } C_C=0,93$$

D'après ces conditions, l'échantillon est classé comme étant **un sable propre mal gradué**.

Puisque $C_u < 2$ ceci dit que l'échantillon a une granulométrie **très serrée**.

V.2-Mesure des caractéristiques physiques des granulats :

V.2.1-la masse volumique des grains solides (NFP94-054) :

La masse volumique des grains solides est la masse de granulats secs (M_s) rapporté au volume absolu.
$$r_s = \frac{M_g}{V_g}$$

Il existe trois méthodes pour déterminer la masse spécifique :

-méthode par pesée hydrostatique, méthode de l'éprouvette, méthode au pycnomètre.

Cette mesure a été faite au laboratoire à l'aide de pycnomètre.

L'essai consiste à mesurer la masse du pycnomètre rempli d'eau (M_1) ensuite la masse du même pycnomètre dans lequel on a placé l'échantillon de sol et qu'on a rempli d'eau (M_2).

Le volume des grains solides est donné par :

$$V_g = (M_1 + M_g) - M_2$$

Aves : (M_g) : la masse des grains solides.

Tableau (V.7) Les résultats de l'essai de pycnomètre pour sable d'oued

| Masse | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 |
|----------------|----------------------|--------------|--------------|
| $M_g(g)$ | 497 | 497 | 497 |
| $M_1(g)$ | 1488,7 | 1488,7 | 1488,7 |
| $M_2(g)$ | 1802,2 | 1800,8 | 1800 |
| $V_g (cm^3)$ | 183,5 | 184,9 | 185,7 |
| $r_s (g/cm^3)$ | $r_s = 2,7$ | $r_s = 2,68$ | $r_s = 2,72$ |
| r_s moyenne | $r_s = 2,7 (g/cm^3)$ | | |

Tableau (V.8) Les résultats de l'essai de pycnomètre pour calcaire.

| Masse | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 |
|---|--|----------------------------|-----------------------------|
| M_g(g) | 388 | 388 | 388 |
| M₁(g) | 1488,7 | 1488,7 | 1488,7 |
| M₂(g) | 1732,5 | 1730,6 | 1731,8 |
| V_g(cm³) | 144,2 | 146,1 | 144,9 |
| r_s (g/cm³) | r_s = 2,69 | r_s =2,65 | r_s = 2,67 |
| r_s moyenne | r_s = 2,67 (g/cm³) | | |

Tableau (V.9) Les résultats de l'essai de pycnomètre pour granite.

| Masse | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 |
|---|--|----------------------------|-----------------------------|
| M_g(g) | 427 | 427 | 427 |
| M₁(g) | 1488,7 | 1488,7 | 1488,7 |
| M₂(g) | 1756,7 | 1755,7 | 1755,4 |
| V_g (cm³) | 159 | 160 | 160,3 |
| r_s (g/cm³) | r_s = 2,68 | r_s =2,66 | r_s = 2,66 |
| r_s moyenne | r_s = 2,66 (g/cm³) | | |

Tableau(V.10) Les résultats de l'essai de pycnomètre pour grès.

| Masse | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 |
|---|---|----------------------------|-----------------------------|
| M_g(g) | 360 | 360 | 360 |
| M₁(g) | 1488,7 | 1488,7 | 1488,7 |
| M₂(g) | 1711,9 | 1712,3 | 1710,8 |
| V_g (cm³) | 136,8 | 136,4 | 137,9 |
| r_s (g/cm³) | r_s = 2,63 | r_s =2,64 | r_s = 2,61 |
| r_s moyenne | r_s = 2,62(g/cm³) | | |

V.2.2 la teneur en eau (ω) (NF94-050) :

La teneur en eau est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur sa masse sèche.

$$w(\%) = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100$$

Tableau (V.11) les teneurs en eau des différents échantillons.

| Matériau | échantillon 1 | | échantillon 2 | | échantillon 3 | | ω moyennes (%) |
|---------------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| | P _h (g) | | P _h (g) | | P _h (g) | | |
| Sable d'oued | P _h (g) | 119,3 | P _h (g) | 112,3 | P _h (g) | 109,8 | $\omega=5,43$ |
| | P _s (g) | 113,1 | P _s (g) | 106,7 | P _s (g) | 103,9 | |
| | ω_1 (%) | 5,48 | ω_2 (%) | 5,24 | ω_3 (%) | 5,57 | |
| Granite | P _h (g) | 142,11 | P _h (g) | 186,7 | P _h (g) | 148,8 | $\omega =11,94$ |
| | P _s (g) | 126,7 | P _s (g) | 168,9 | P _s (g) | 131,5 | |
| | ω_1 (%) | 12,16 | ω_2 (%) | 10,53 | ω_3 (%) | 13,15 | |
| Calcaire | P _h (g) | 122,2 | P _h (g) | 161,2 | P _h (g) | 135,9 | $\omega =7,86$ |
| | P _s (g) | 114,5 | P _s (g) | 151,4 | P _s (g) | 123,1 | |
| | ω_1 (%) | 6,72 | ω_2 (%) | 6,47 | ω_3 (%) | 10,39 | |
| Grés | P _h (g) | 136,15 | P _h (g) | 123,4 | P _h (g) | 134,36 | $\omega =8,83$ |
| | P _s (g) | 124,6 | P _s (g) | 112,6 | P _s (g) | 124,8 | |
| | ω_1 (%) | 9,26 | ω_2 (%) | 9,59 | ω_3 (%) | 7,66 | |

V.2.3-Mesure de la masse volumique sèche :

C'est le rapport de masse des gains solides au volume total.

Cette mesure est effectuée au laboratoire à l'aide d'un moule caractérisé par :

- Une hauteur : h=15,1 cm.
- Un diamètre : $\phi=7,4$ cm.

L'essai consiste à mesurer la masse de moule vide (M_1), la masse de moule remplie de matériau (M_2), on déduit la masse de l'échantillon qui est égale à la différence entre M_1 et M_2 .

les résultats obtenus sont montrés sur le tableau suivant.

Tableau (V.12) Les masses volumiques sèches.

| Matériau | échantillon | V (cm3) | m (g) | r_d | $r_{d\text{ moy}}$ (g/cm ³) |
|--------------|-------------|---------|---------|-------|--|
| Sable d'oued | 1 | 649,09 | 1046,09 | 1,61 | 1,71 |
| | 2 | | 1128,5 | 1,73 | |
| | 3 | | 1160,3 | 1,78 | |
| granite | 1 | 649,09 | 1171,8 | 1,75 | 1,77 |
| | 2 | | 1143 | 1,76 | |
| | 3 | | 1171, | 1,8 | |
| calcaire | 1 | 649,09 | 1013,7 | 1,56 | 1,57 |
| | 2 | | 1029,1 | 1,58 | |
| | 3 | | 1021,1 | 1,57 | |
| grès | 1 | 649,09 | 1038,3 | 1,59 | 1,64 |
| | 2 | | 1079,3 | 1,66 | |
| | 3 | | 1089 | 1,67 | |

V.2.4-Autres caractéristiques physiques :

V.2.4.1-Indice des vides : C'est le rapport de volume des vides contenus dans les granulats au volume des grains solides.

L'indice des vides est donné par la formule suivante : $e = \frac{g_s}{g_d} - 1$

V.2.4.2-La porosité : C'est le rapport de volume des vides contenus dans les granulats

au volume des granulats, exprimé en pourcentage : $n = \frac{V_v}{V_t}$

V.2.4.3-Le degré de saturation : C'est le rapport de volume d'eau contenue dans les

granulats au volume des vides, exprimé en pourcentage : $S_r = \frac{V_w}{V_v} .100$

Tableau (V.13) : caractéristiques physiques.

| Matériau | e | n (%) | Sr(%) |
|---------------------|----------|--------------|--------------|
| Sable d'oued | 0 ,57 | 36,56 | 25,37 |
| Granite | 0,50 | 33,34 | 18,64 |
| Calcaire | 0 ,69 | 41,06 | 18,94 |
| Grès | 0, 59 | 37,38 | 20,34 |

CHAPITRE VI

Essai de perméabilité
Essai de cisaillement

IV.1. Essai de perméabilité :

Introduction :

Les essais en laboratoire apparaissent comme le moyen le plus simple, le plus rapide de déterminer le coefficient de perméabilité des sols. Les deux essais les plus couramment utilisés sont les essais de perméabilité à charge constante et à charge variable. Notre étude est basée sur les granulats, à cet effet le dispositif utilisé est un perméamètre à charge constante.

IV.1. 1.Appareillage:

Le perméamètre comporte :

- Une cellule de diamètre $\varphi=10\text{cm}$ et d'hauteur $L= 13\text{cm}$.
- Un réservoir d'eau sert à alimenter la cellule.
- En gardant la cellule dans un vase de sert à mesurer le volume d'eau.
- Un panneau de trois tubes en verre relie à la cellule à l'aide de tuyau.
- Un chronomètre pour mesurer le temps.

IV.1. 2.Description d'essai :

L'essai s'effectue en trois étapes :

- La mise en place de l'échantillon dans la cellule de perméamètre.
- La saturation de l'échantillon.

-la détermination de coefficient de perméabilité : $K = \frac{Q}{S.i} = \frac{q.L}{S.t.dh}$

Avec :

S : la section de l'échantillon qu'est égale à la section de la cellule.

$$S = 78,5\text{cm}^2$$

q : Volume d'eau traversé l'échantillon.

dh : La perte de charge $dh = h_1 - h_2$

i : Gradient hydraulique. $i = \frac{dh}{L}$

Chapitre VI.....Essai de perméabilité - essai de cisaillement.

Nous avons effectué trois essais pour chaque matériau :

Les coefficients de perméabilité calculés pour chaque matériau sont représentés sur les tableaux suivants:

Tableau (VI.1) : résultats d'essai de perméabilité (Sable d'oued)

| Essai | h₁ (m) | h₂ (m) | L (m) | q (cm³) | i | t (s) | K 10⁻³(m /s) |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------|---------------------------|----------|--------------|--------------------------------|
| 1 | 1,367 | 1,153 | 0,13 | 3023,21 | 1,64 | 160 | 1,46 |
| 2 | 1,373 | 1,16 | 0,13 | 3023,21 | 1,63 | 162 | 1,45 |
| 3 | 1,375 | 1,159 | 0,13 | 3023,21 | 1,66 | 164 | 1,41 |

Tableau (VI.2) : résultats d'essai de perméabilité (calcaire) .

| Essai | h₁ (m) | h₂ (m) | L (m) | q (cm³) | i | t (s) | K 10⁻³(m /s) |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------|---------------------------|----------|--------------|--------------------------------|
| 1 | 1,37 | 1,153 | 0,13 | 3023,21 | 1,67 | 160 | 1,44 |
| 2 | 1,373 | 1,16 | 0,13 | 3023,21 | 1,63 | 162 | 1,45 |
| 3 | 1,371 | 1,156 | 0,13 | 3023,21 | 1,65 | 165 | 1,43 |

Tableau (VI.3) : résultats d'essai de perméabilité (granite)

| Essai | h₁ (m) | h₂ (m) | L (m) | q (cm³) | i | t (s) | K 10⁻³(m /s) |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------|---------------------------|----------|--------------|--------------------------------|
| 1 | 1,36 | 1,146 | 0,13 | 3023,21 | 1,64 | 165 | 1,42 |
| 2 | 1,375 | 1,153 | 0,13 | 3023,21 | 1,7 | 160 | 1,41 |
| 3 | 1,379 | 1,156 | 0,13 | 3023,21 | 1,71 | 165 | 1,36 |

Tableau (VI.4) : résultats d'essai de perméabilité (grès).

| Essai | h_1 (m) | h_2 (m) | L (mm) | q (cm ³) | i | t (s) | $K10^{-3}$ (m /s) |
|-------|-----------|-----------|--------|----------------------|------|-------|-------------------|
| 1 | 1,375 | 1,154 | 0,13 | 3023,21 | 1,7 | 169 | 1,33 |
| 2 | 1,382 | 1,156 | 0,13 | 3023,21 | 1,73 | 201 | 1,10 |
| 3 | 1,38 | 1,155 | 0,13 | 3023,21 | 1,73 | 180 | 1,23 |

Interprétation des résultats :

Nous remarquons que la perméabilité varie d'un matériau à un autre.

Les résultats obtenus nous permettent de classer par ordre décroissant les variations des coefficients de perméabilité pour chaque matériau :

Tableau (VI.5) : Classification des coefficients de perméabilité

| Le matériau | Perméabilité (m/s) |
|--------------|----------------------------------|
| sable d'oued | $[1,41.10^{-3} - 1,46 .10^{-3}]$ |
| calcaire | $[1,43 .10^{-3} - 1,45.10^{-3}]$ |
| granite | $[1,36.10^{-3} - 1,42. 10^{-3}]$ |
| grès | $[1,10.10^{-3} - 1,33.10^{-3}]$ |

VI.2 Essai de cisaillement :

Introduction :

Ces essais ont été effectués sur les quatre type des matériaux (granite, grès, calcaire et sables d'oued) à l'état saturé sous des contraintes normales variant de 100 Kpa à 300 Kpa .

IV.2.1 Description de la boîte de cisaillement:

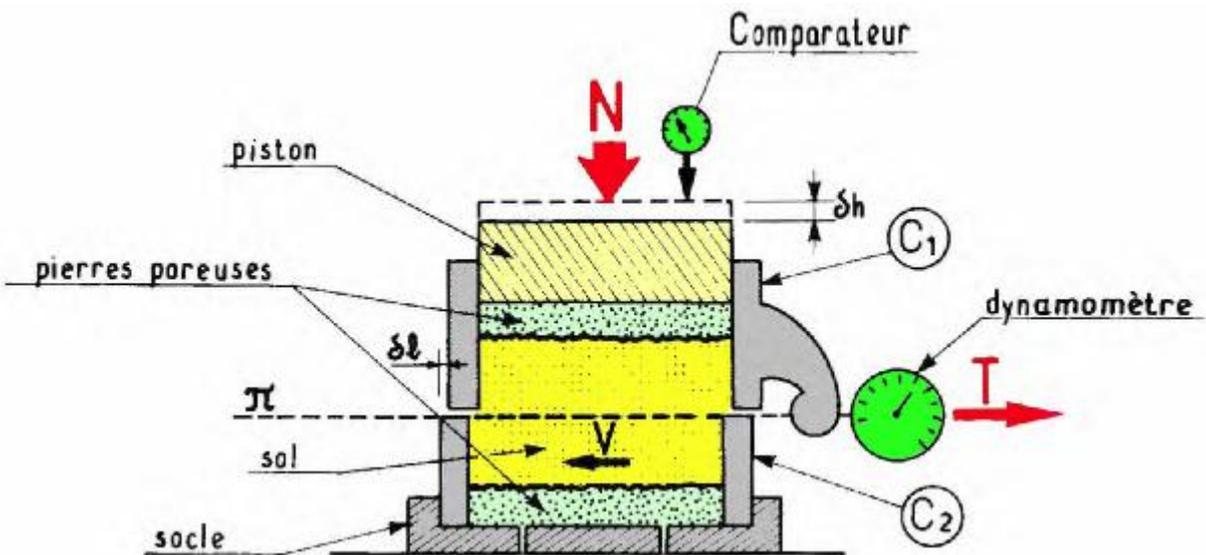


Figure (VI.1) :Boite de cisaillement .

Elle comporte essentiellement :

- Une demi- boîte inférieure munie d'une pierre poreuse plate, striée ou denté.
- Une demi- boîte supérieure
- Deux goupilles solidarissant les deux demi- boites avant l'essai.
- Les dimensions intérieures des demi- boites couramment utilisées sont de 6x6.
- Le dispositif de l'application de l'effort normal désiré.

Chapitre VI.....Essai de perméabilité - essai de cisaillement.

- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes.
- Un anneau dynamométrique indiquant les efforts de cisaillement.
- Un comparateur à 1/1000 de mm indiquant les déplacements horizontaux.
- Un comparateur de 1/100 de mm indiquant les déplacements verticaux.
- Un chronomètre pour prendre les lectures toutes les 15 secondes.

IV.2.2-Description de l'essai :

-Placer l'échantillon du sol dans la boîte de cisaillement constituée de deux demi boîtes indépendantes dont le plan de séparation forme un plan de glissement , correspondant au plan de cisaillement de notre échantillon .

-Appliquer sur la face supérieure de notre échantillon un effort vertical (N) résultant des poids placés sous l'appareil et représenté par une contrainte

normale $S = \frac{N}{A}$ maintenue constante pendant toute la durée de l'essai.

-En imposant un déplacement horizontal relatif entre les deux demi-boîtes à vitesse constante.

-prendre les lectures à des intervalles de temps réguliers à l'aide d'un chronomètre (chaque 15 seconde).

-prendre les lectures des déformations horizontales δL et verticales δv indiquées par les deux comparateurs.

-prendre la lecture F indiquée par l'anneau dynamométrique et l'effort de

cisaillement horizontale : $T = \frac{0,162 \cdot F}{100} (N)$

-arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante, ou elle continue à croître.

-déterminer la contrainte de cisaillement (t) par la relation : $t = \frac{T}{S_c} (N)$

Avec : $S_c = L(L - dL)$ Section corrigée.

IV.2.3-Les résultats des essais :

L'essai de cisaillement nous permet de tracer les courbes suivantes :

- Variation de la contrainte de cisaillement tangentielle (t) en fonction de la déformation horizontale (dL) .
- Variation de la déformation verticale (dV) en fonction de (dL) .
- Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale (S) .

▼ Courbes contrainte-déformation $t = f(dL)$

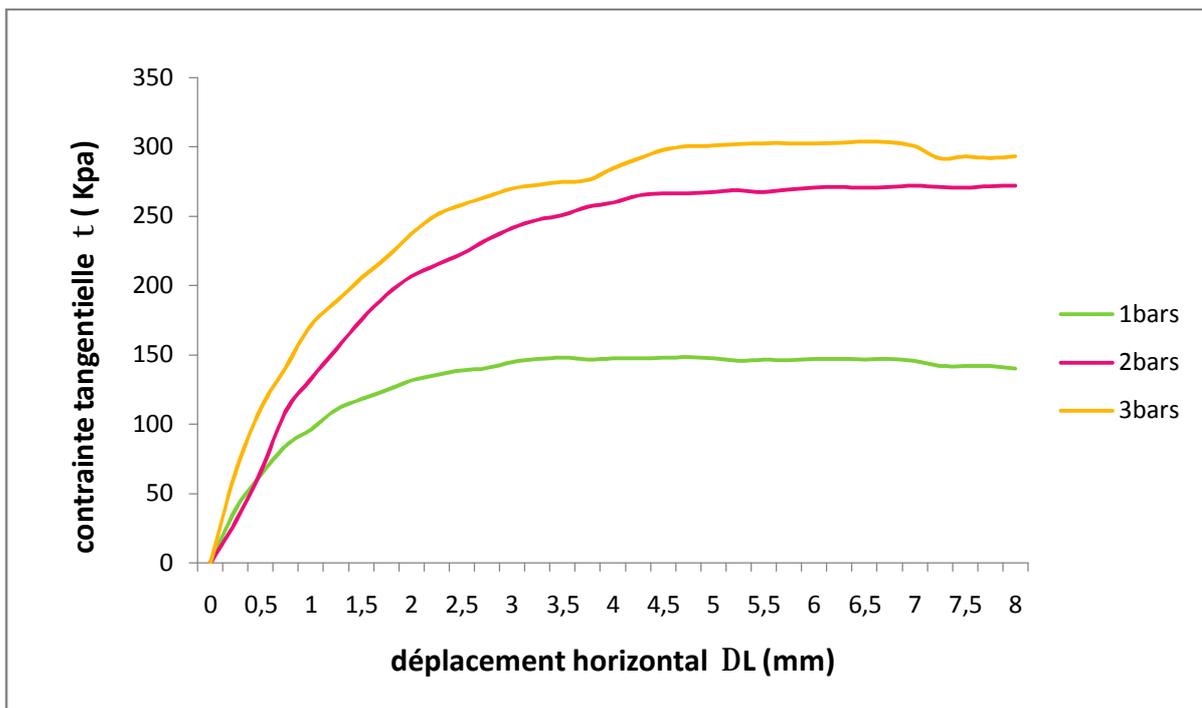


Figure (VI.2) : Courbes contraintes-déformations de sable d'oued

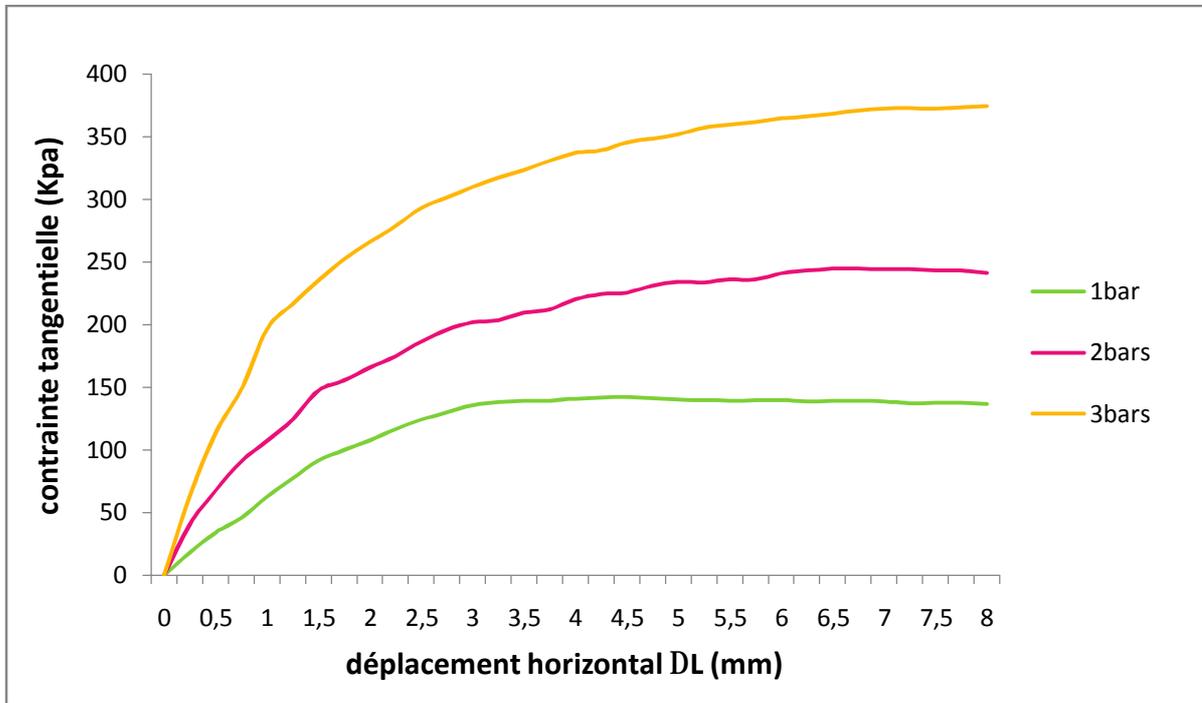


Figure (VI.3) : Courbes contraintes-déformations de granite.

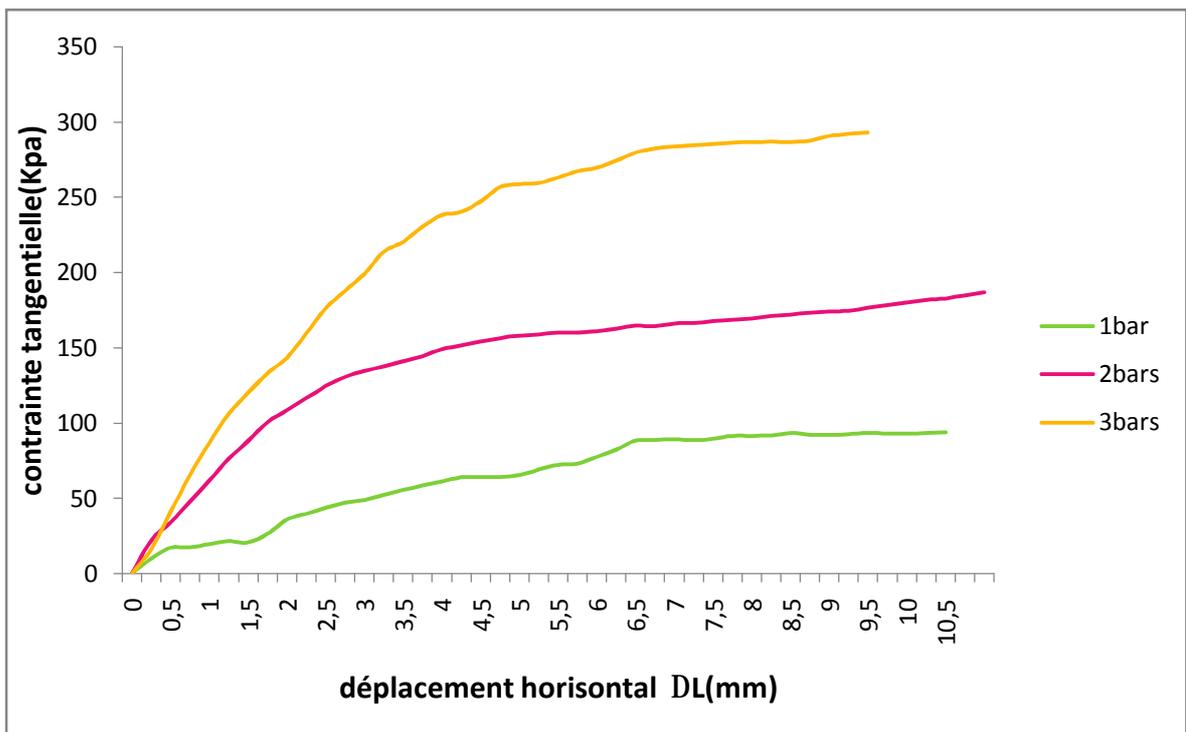


Figure (VI.4) : Courbes contraintes-déformations de grès.

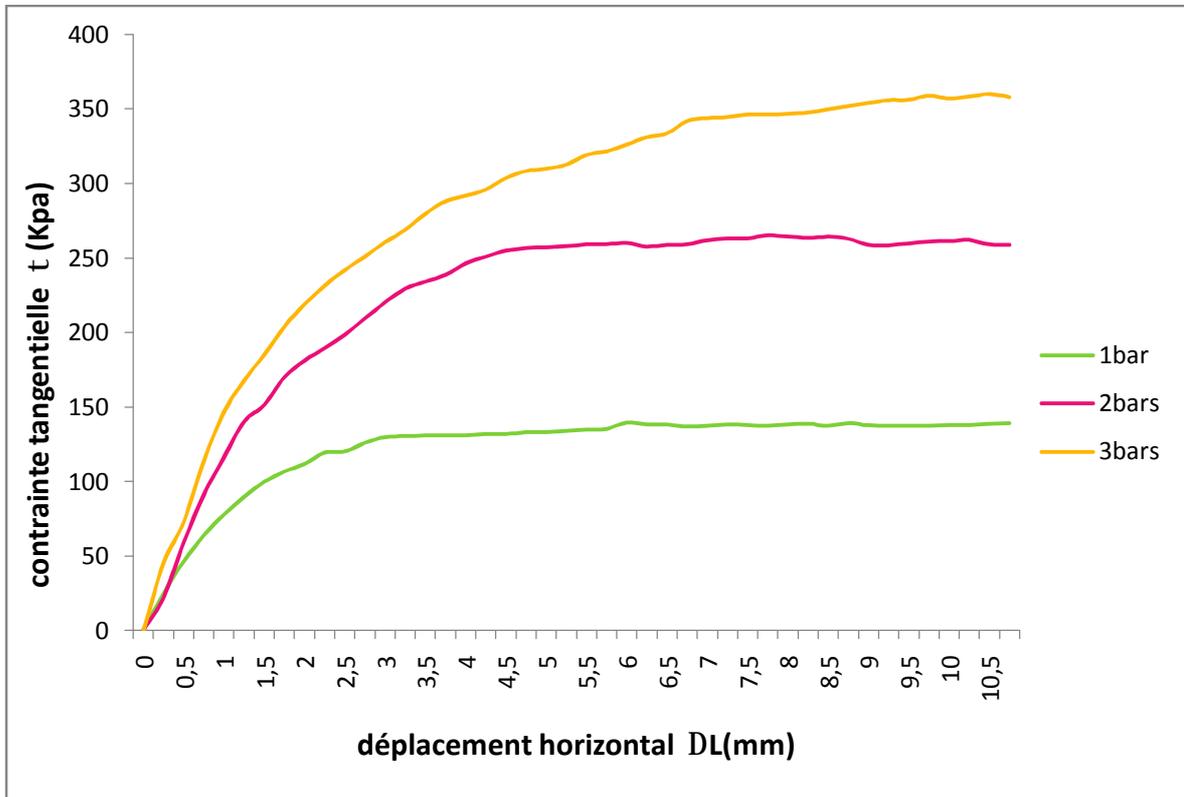


Figure (VI.5) : Courbes contraintes-déformations de calcaire.

✓ Courbes Déformation –variation de volume : $\frac{dV}{V} = f(dL)$

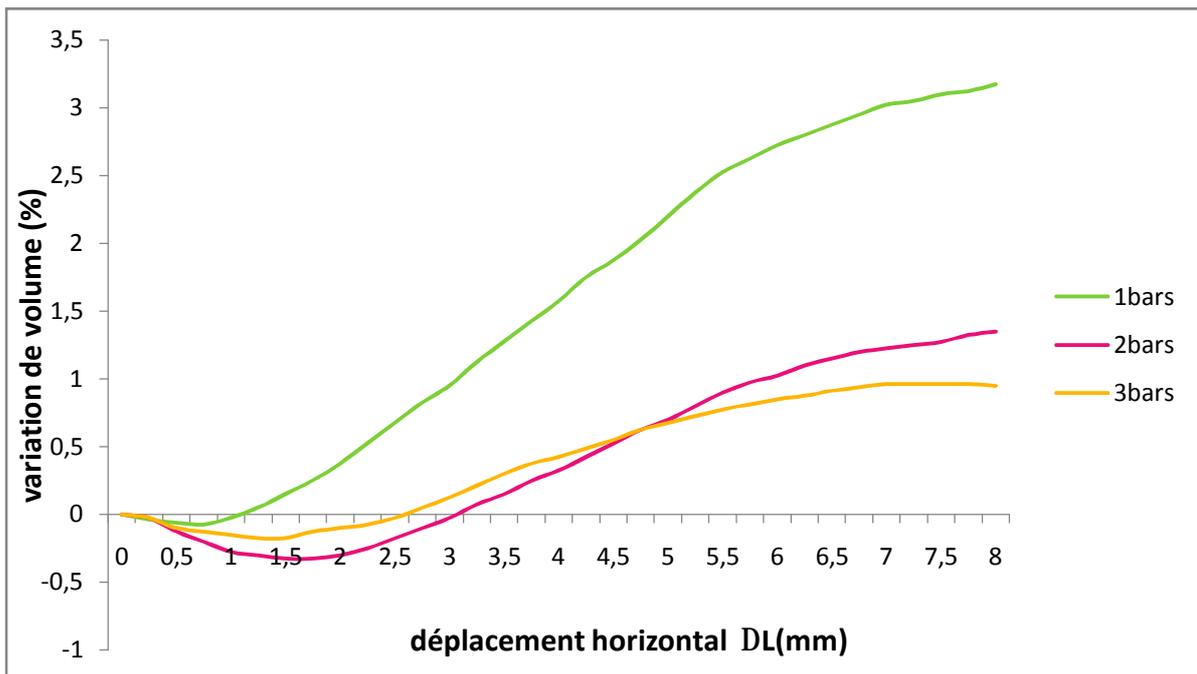


Figure (VI.6) Courbes Déformations –variations de volume (sable d'oued)

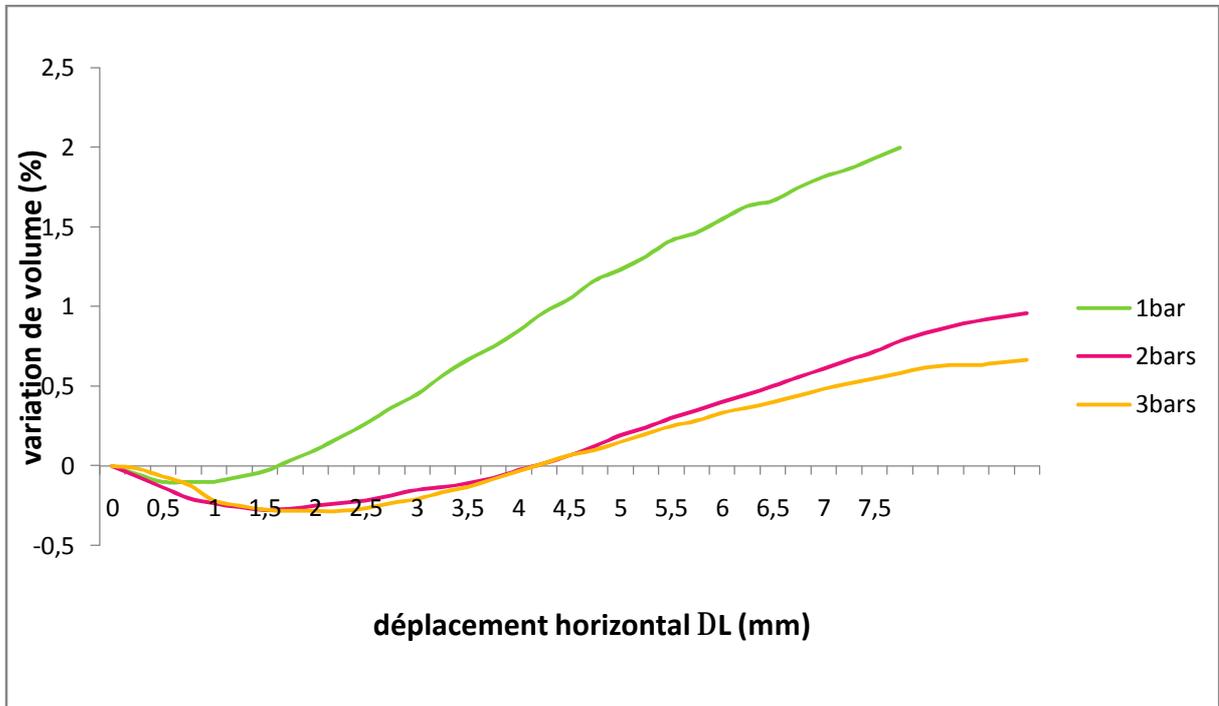


Figure (VI.7) :Courbes Déformations –variations de volume(granite)

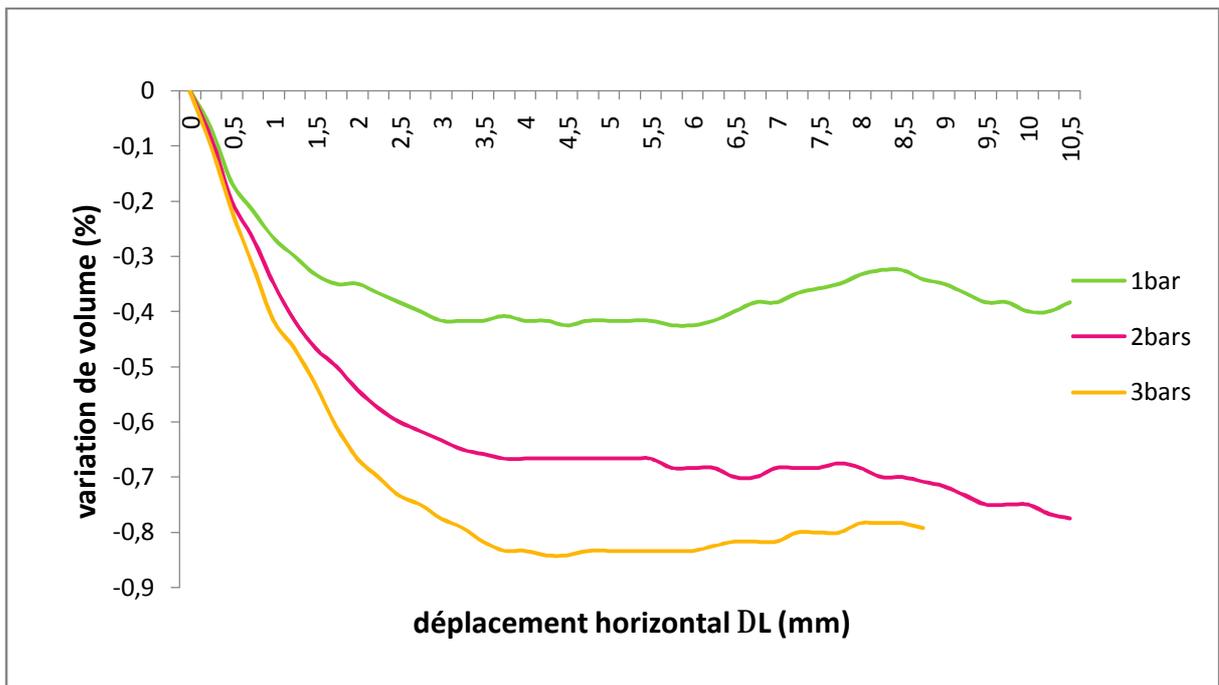


Figure (VI.8) :Courbes Déformations –variations de volume(grès)

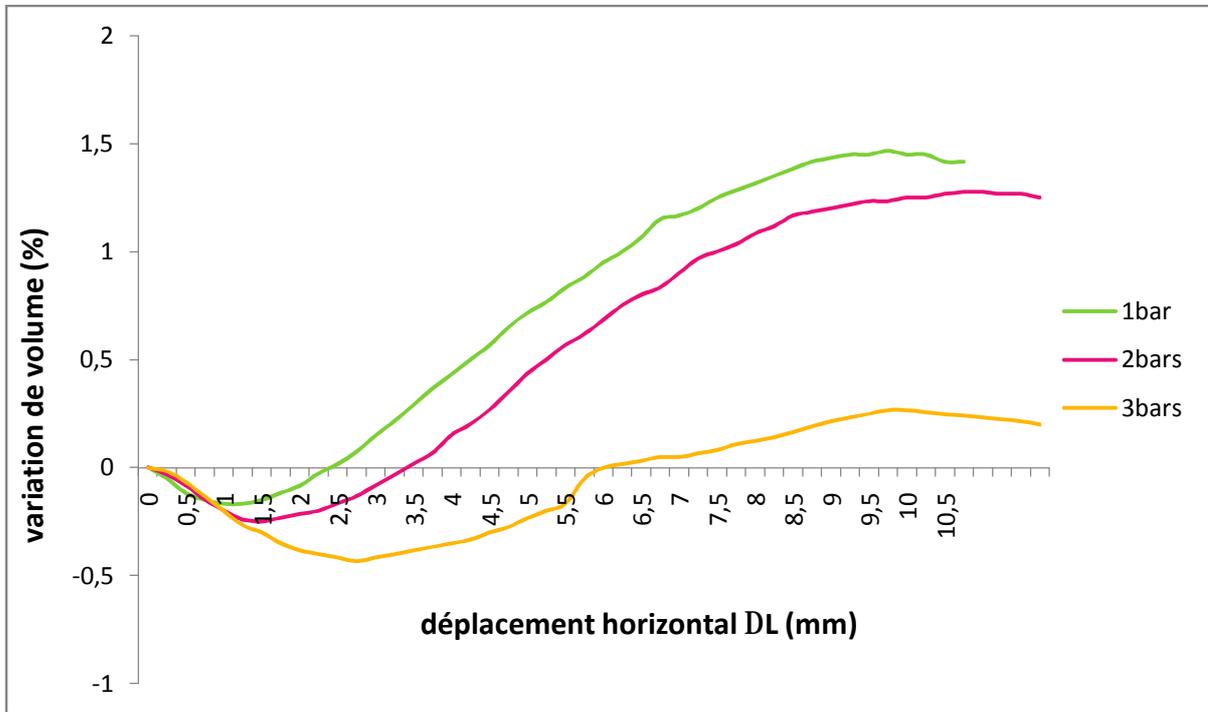


Figure (VI.9) : Courbes Déformations –variations de volume (calcaire)

✓ Les droites intrinsèques : $t = f(s)$

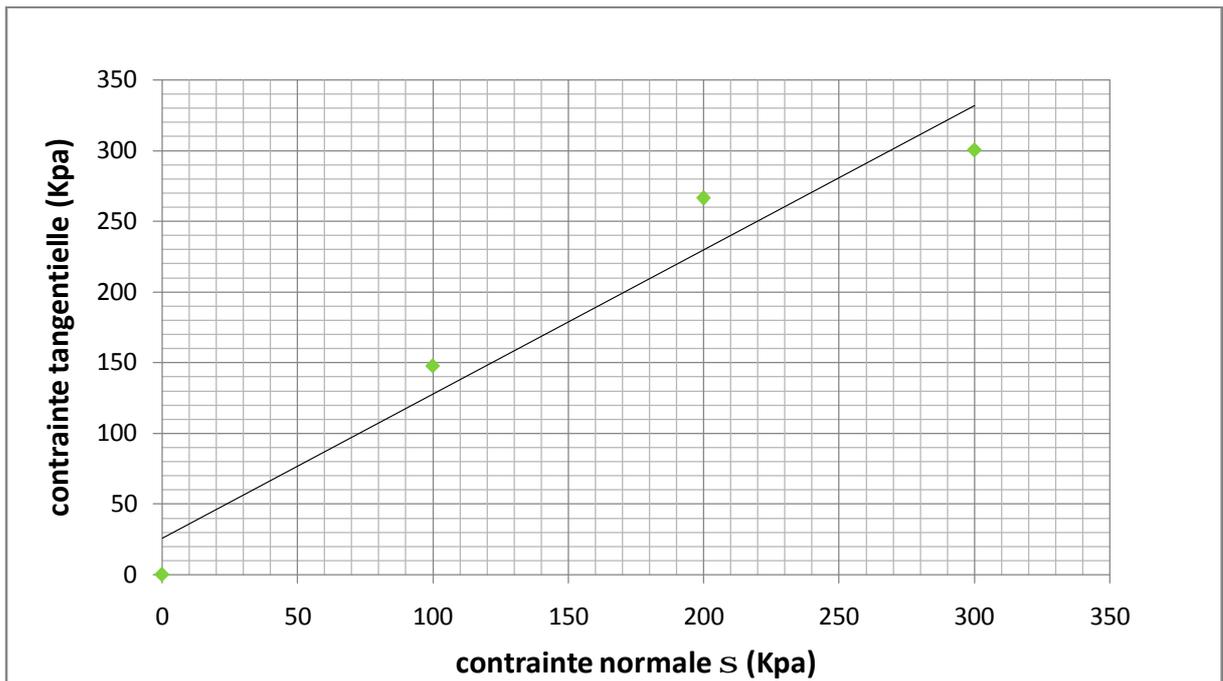


Figure (VI.10) La droite intrinsèque (sable d'oued)

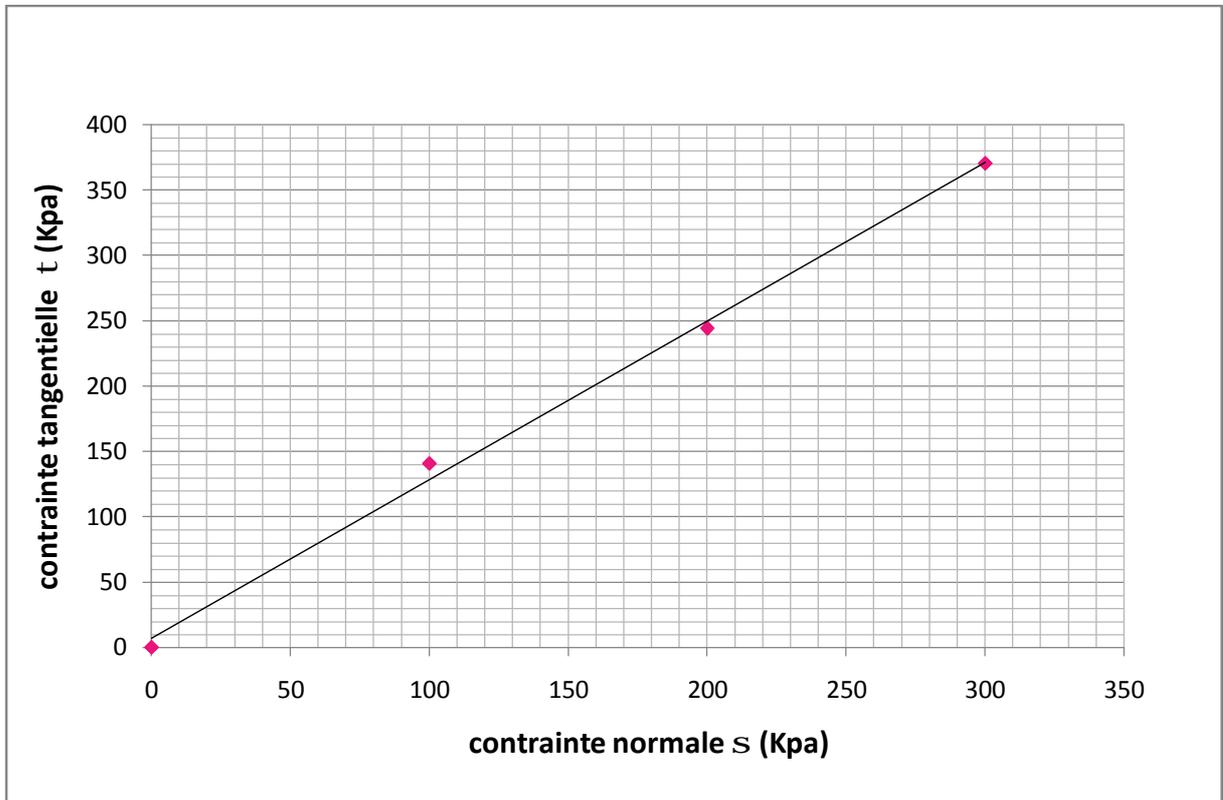


Figure (VI.11) Le droite intrinsèque (granite)

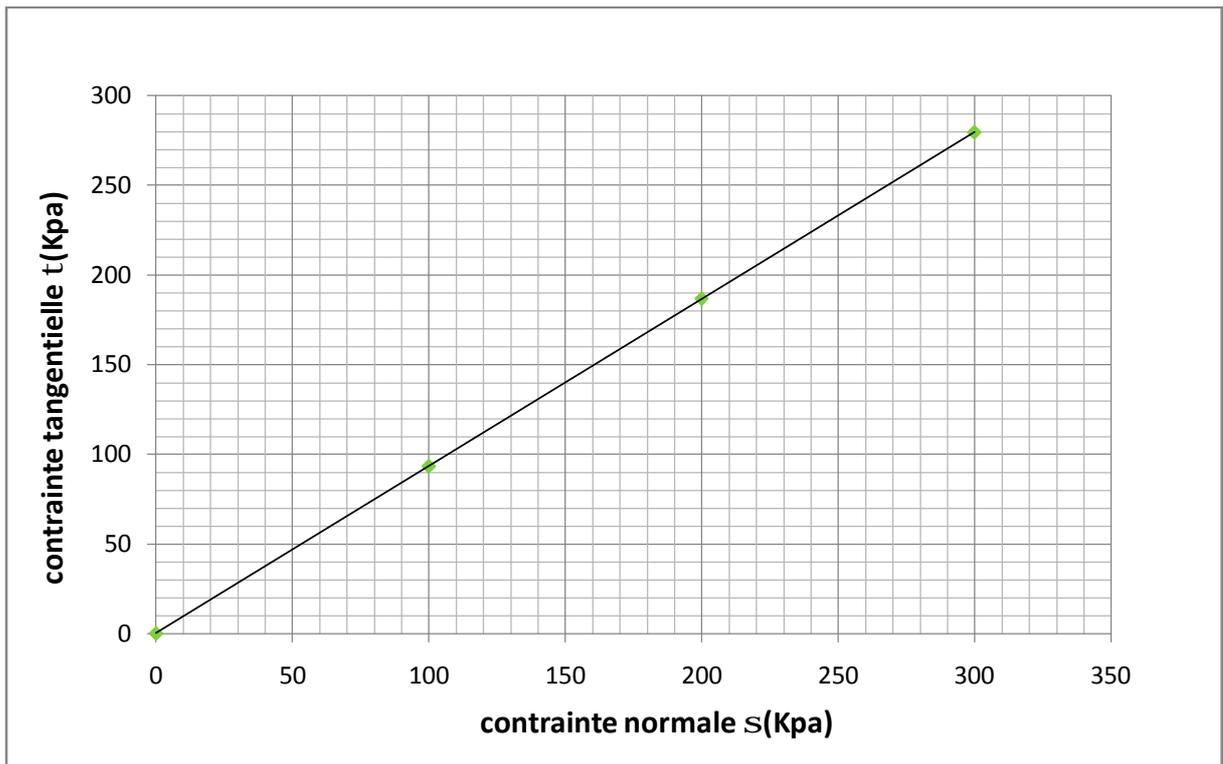


Figure (VI.12) La droite intrinsèque (grès)

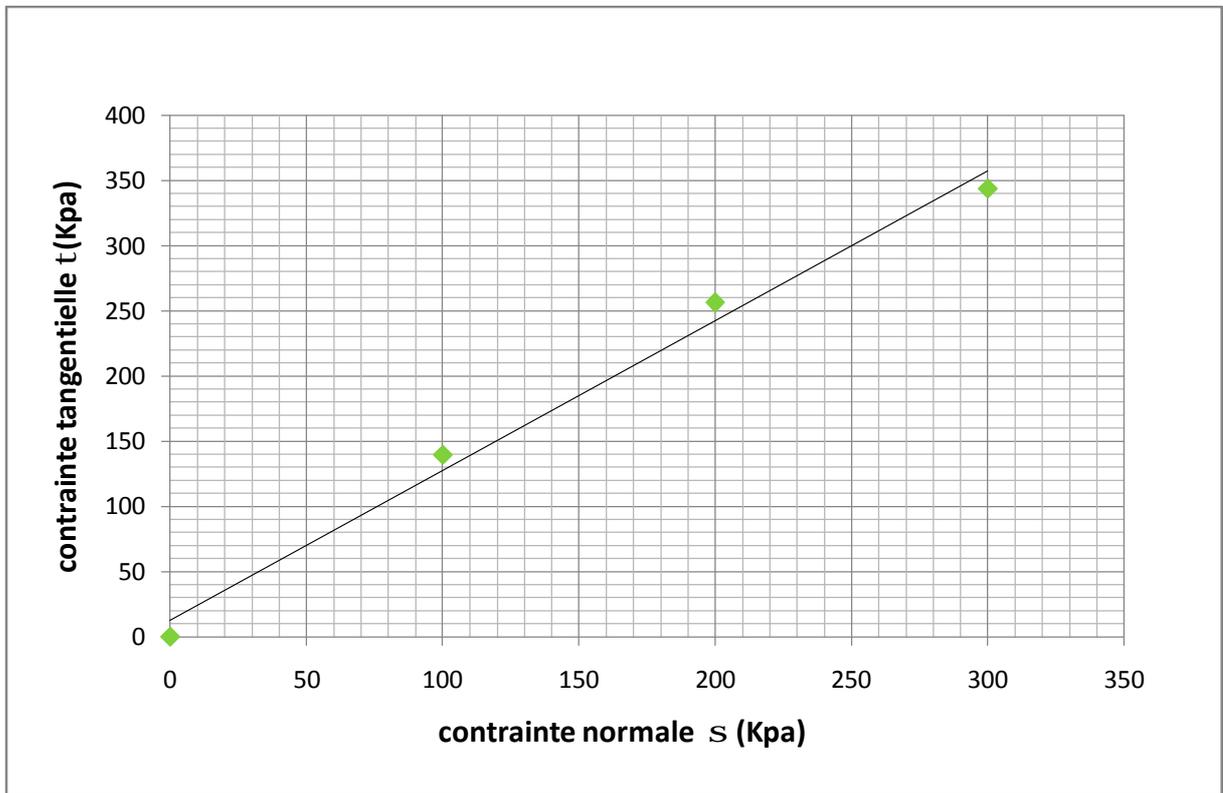


Figure (VI.13) La droite intrinsèque (calcaire)

Interprétation des résultats :

Ø D'après les courbes contraintes déformations, on constate que :

-la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale pour tous les matériaux, car l'application progressive des charges engendre un serrage et un frottement de plus en plus important entre les grains, ce qui provoque un déplacement horizontal difficile des grains les uns par rapport aux autres.

- Le grès présente une résistance au cisaillement faible, ceci se justifie par sa fragilité et à sa composition minéralogique (grains sableux cimentés entre eux). Le ciment permettant la liaison entre les grains n'est pas assez collant ce qui le rend facilement altérable sous de faibles pressions.

-le granite est le matériau le plus résistant au cisaillement par rapport aux autres matériaux , car il comporte des minéraux durs avec des proportions importantes tels que le quartz.

- la résistance du sable d'oued est faible par rapport à celle de granite et du calcaire car la présence d'eau et la forme arrondie de ses granulats facilitent le glissement des grains entre eux.

-La résistance au cisaillement est importante pour les matériaux concassés car la forme anguleuse et rugueuse provoque l'enchevêtrement entre les grains. A l'exception du grès.

Ø D'après les courbes de variation de volume :

-Nous remarquons la présence de deux phases (contractance-dilatance) pour tous les matériaux sauf pour le grès .

-Quant au grès nous constatons uniquement une contractance expliquant une diminution des vides donc une diminution de volume.

Ø D'après les droites intrinsèques :

-nous pouvons classer nos matériaux par ordre décroissant des valeurs de leurs angles de frottement interne comme suit :

- le granite : 50,45°
- le calcaire : 48,85°
- le sable d'oued : 45,51°
- le grès : 43,01°

Tableau (VI.6) : Variation des contraintes tangentielles maximales et angles de frottement interne.

| Matériau | τ_{\max} | Angle de frottement |
|---------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Granite | 370,64 | 50,45° |
| calcaire | 343,86 | 48,85° |
| SABLE D'oued | 300,54 | 45,51° |
| Grès | 279,58 | 43,01° |

Conclusion générale

Conclusion générale

Les résultats obtenus nous permettent de conclure qu'on peut établir une relation entre le paramètre de perméabilité (K) et les caractéristiques mécaniques (t_{max} et φ).

En effet le tableau ci-dessous montre les différentes valeurs de t_{max} des quatre matériaux en fonction de (K)

Tableau I: variation de perméabilité en fonction de τ_{max}

| Le matériau | perméabilité (K) (m/s) | τ_{max} (Kpa) |
|------------------------|--|--------------------|
| Le sable d'oued | [1,41 .10⁻³ - 1,46 .10⁻³] | 300,54 |
| Le calcaire | [1,43 .10⁻³ - 1,45 .10⁻³] | 343,86 |
| Le granite | [1,36 .10⁻³ - 1,42 .10⁻³] | 370,64 |
| Le grès | [1,10 .10⁻³ - 1,33 .10⁻³] | 279,58 |

Plus la résistance au cisaillement croit, plus le matériau devient compact et les vides diminuent, ce qui engendre une baisse de la perméabilité.

Plus le matériau est moins résistant, plus la compacité est plus importante lors de cisaillement et plus sa perméabilité diminue (cas du grès).

-Les variations de coefficient perméabilité pour chaque matériau en fonction de l'angle de frottement sont représentés sur le tableau suivant:

Tableau II : variation de perméabilité en fonction de (j)

| Le matériau | perméabilité (K) (m/s) | j ° |
|------------------------|--|--------------|
| Le sable d'oued | [1,41 .10⁻³ - 1,46 .10⁻³] | 45,51 |
| Le calcaire | [1,43 .10⁻³ - 1,45 .10⁻³] | 48,85 |
| Le granite | [1,36 .10⁻³ - 1,42 .10⁻³] | 50,45 |
| Le grès | [1,10 .10⁻³ - 1,33 .10⁻³] | 43,01 |

Plus le matériau est compact, plus il n'y a plus de possibilité aux grains de frotter (φ plus faible) plus la perméabilité est petite.

Conclusion générale

Plus le matériau est dilatant, plus l'angle de frottement (j) est important (il y a plus de possibilité aux grains de frotter donc φ plus élevé) et (K) plus élevé.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[20] **AMIRI. Z (2005)** (*Influence de la teneur eau sur les caractéristiques de la résistance au cisaillement (Application aux granulats des matériaux granite et schiste satiné)*). Thèse d'ingénieur d'état en Génie civil (option CCI) UMMTO.

[15] **ANTOINE.P et FABRE.D (1980)** (*Géologie appliquée au génie civil*) Edition MASSON. Paris.

[3] **ARCHIMBAUD.C, BERTHAIL.J, EXBRAYATJ-C , A.MISHELLANY (1990)** (*Granulats, Lavage des granulats et traitement des sables*). Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris

[1] **BENAISSA.A (1993)** (*Elément de mécanique des sols*). Office des publications universitaires. Ben-Aknoun (Alger).

[19] **BERTHAUD.Y, Buhan.P, Schmitt.N (2008)** (*Aide-mémoire mécanique des sols*) Edition DUNOD .Paris

[14] **BOUAZI.M (1999)**. (*Imperméabilisation des sols*) .Thèse d'ingénieur d'état en Génie civil (option construction hydraulique et Aménagement) UMMTO.

[4] **Centre d'assistance technique et de document (1980)**. Les pierres de France. Paris.

[5] **CORDARY .D(1994)** *Mécanique des sols*. EDITION LAVOISIER.Paris

[8] **DELLILE J-P, MOUTOT J-P (1990)** (*Granulats*) .Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris

[6] **GABRYSIK .F (2007)** (*Les granulats*) Edition Académie de Nancy-Metz , Strasbourg

[13] **LCPC (1987)** : *Essai de cisaillement à la boîte* -Méthodes d'essai N°21 .Laboratoire centrale des ponts et chassés.

[9] MAGNAN. J-P. (1999) (L'eau dans le sol –technique de l'ingénieur .traité construction, C212).

[10] MAGNAN. J-P. (1991) (résistance au cisaillement) Technique de l'ingénieur .traité construction, Paris , article C216 .

[12] MEFTAH.K (2008) .Cours Mécanique des sols Première version Septembre. (*www.Mécanique -sols.pdf*)

[16] Ponts et chaussées (2008). (CAHIER DE CHARGE Granulats et Sables) (CDC-GRA08) .administration des ponts et Chaussées. Laboratoire d'essais des matériaux.

[18] ROBITAILLE.V.TREMBLAY .D (1997) (*Mécanique des sols, théorie et pratique*) .Edition MODULO. Canada

[7] SEDKI .Fet CHELOUCHE .H (2005) (*Etude de la caractérisation de l'angle de frottement interne pour les matériaux (granite, schiste et grès)*) .Thèse d'ingénieur d'état en Génie civil (option CCI) UMMTO.

[11] TECHOUANI NANA.J.M (1999). (*Cours de mécanique des sols .Tome 1 Propriétés des sols*).institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement .Groupe EIER-ETSHER.

[17] TIDIAN.T (2002) (Etude expérimentale de la perméabilité des sols).Thèse d'ingénieur d'état en Génie civil (option CCI) UMMTO.

[2] YAKOUB. B (1994). (*cours de géologie*). Edition Aurassi. Drâa ben –khedda

Annexe

Les résultats des essais de cisaillement sur les matériaux étudié.

| Sable d'oued | | | | | | |
|---------------------|--------------|-------------|--------------|------------|--------------|-------------|
| s(Kpa) | s=100 | | s=200 | | s=300 | |
| DL | LA | LV | LA | LV | LA | LV |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 85 | -1,5 | 66 | -1 | 145 | -1 |
| 50 | 139 | -2,5 | 145 | -5 | 245 | -4 |
| 75 | 185 | -3 | 240 | -8 | 310 | -5 |
| 100 | 210 | -1 | 290 | -11 | 375 | -6 |
| 125 | 240 | 2 | 335 | -12 | 410 | -7 |
| 150 | 255 | 6 | 380 | -13 | 445 | -7 |
| 175 | 268 | 10 | 417 | -13 | 475 | -5 |
| 200 | 282 | 15 | 444 | -12 | 510 | -4 |
| 225 | 289 | 21 | 460 | -10 | 537 | -3 |
| 250 | 295 | 27 | 475 | -7 | 550 | -1 |
| 275 | 297 | 33 | 494 | -4 | 560 | 2 |
| 300 | 305 | 38 | 510 | -1 | 570 | 5 |
| 325 | 308 | 45 | 520 | 3 | 573 | 8,5 |
| 350 | 309 | 51 | 525 | 6 | 575 | 12 |
| 375 | 305 | 57 | 535 | 10 | 575 | 15 |
| 400 | 305 | 63 | 539 | 13 | 590 | 17 |
| 425 | 304 | 70 | 547 | 17 | 602 | 19,5 |
| 450 | 303 | 75 | 548 | 21 | 612 | 22 |
| 475 | 303 | 81 | 545 | 25 | 615 | 25 |
| 500 | 300 | 88 | 545 | 28 | 613 | 27 |
| 525 | 295 | 95 | 545 | 32 | 612 | 29 |
| 550 | 295 | 101 | 540 | 36 | 611 | 31 |
| 575 | 293 | 105 | 541 | 39 | 608 | 32,5 |
| 600 | 293 | 109 | 541 | 41 | 605 | 34 |
| 625 | 292 | 112 | 540 | 44 | 603 | 35 |
| 650 | 290 | 115 | 536 | 46 | 602 | 36,5 |
| 675 | 289 | 118 | 535 | 48 | 598 | 37,5 |
| 700 | 285 | 121 | 534 | 49 | 590 | 38,5 |
| 725 | 277 | 122 | 530 | 50 | 570 | 38,5 |
| 750 | 275 | 124 | 526 | 51 | 570 | 38,5 |
| 775 | 274 | 125 | 526 | 53 | 565 | 38,5 |
| 800 | 269 | 127 | 524 | 54 | 565 | 38 |
| 825 | | | | | 565 | 38 |

| granite | | | | | | |
|---------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| s(Kpa) | s=100 | | s=200 | | s=300 | |
| DL | LA | LV | LA | LV | LA | LV |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 40 | -3 | 90 | -4 | 140 | -1 |
| 50 | 75 | -6 | 150 | -8 | 250 | -4 |
| 75 | 100 | -6 | 202 | -12 | 325 | -7 |
| 100 | 137 | -6 | 238 | -14 | 429 | -13 |
| 125 | 168 | -4 | 276 | -15,5 | 471 | -15 |
| 150 | 198 | -2 | 327 | -16,5 | 510 | -16,5 |
| 175 | 215 | 2 | 345 | -16 | 544 | -17 |
| 200 | 231 | 6 | 368 | -15 | 571 | -17 |
| 225 | 249 | 11 | 388 | -14 | 596 | -17 |
| 250 | 264 | 16 | 414 | -13 | 624 | -16 |
| 275 | 275 | 22 | 435 | -11 | 639 | -14 |
| 300 | 286 | 27 | 448 | -9 | 654 | -12,5 |
| 325 | 290 | 34 | 452 | -8 | 667 | -10 |
| 350 | 291 | 40 | 465 | -6,5 | 677 | -8 |
| 375 | 290 | 45 | 471 | -4,5 | 689 | -5 |
| 400 | 292 | 51 | 489 | -1,5 | 699 | -2 |
| 425 | 292 | 58 | 498 | 1 | 700 | 1 |
| 450 | 292 | 63 | 501 | 4 | 710 | 4 |
| 475 | 289 | 70 | 513 | 7,5 | 713 | 6 |
| 500 | 285 | 74 | 520 | 11,5 | 717 | 9 |
| 525 | 283 | 79 | 519 | 14,5 | 724 | 12 |
| 550 | 281 | 85 | 524 | 18 | 726 | 15 |
| 575 | 280 | 88 | 524 | 21 | 727 | 17 |
| 600 | 279 | 93 | 535 | 24 | 729 | 20 |
| 625 | 276 | 98 | 540 | 27 | 729 | 22 |
| 650 | 275 | 100 | 543 | 30 | 730 | 24 |
| 675 | 274 | 105 | 543 | 33,5 | 731 | 26,5 |
| 700 | 272 | 109 | 542 | 36,5 | 731 | 29 |
| 725 | 268 | 112 | 542 | 40 | 728 | 31 |
| 750 | 267 | 116 | 540 | 43 | 724 | 33 |
| 775 | 266 | 120 | 540 | 47 | 722 | 35 |
| 800 | 263 | 122 | 536 | 50 | 721 | 37 |
| 825 | | | 535 | 52,5 | 714 | 38 |
| 850 | | | 534 | 54,5 | 714 | 38 |
| 875 | | | 531 | 56 | 715 | 39 |
| 900 | | | 531 | 57,5 | 715 | 40 |
| 925 | | | 529 | 59,5 | 710 | 40 |
| 950 | | | | | 699 | 39 |

| grès | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| s(Kpa) | s=100 | | s=200 | | s=300 | |
| DL | LA | LV | LA | LV | LA | LV |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 22 | -4 | 49 | -5 | 36 | -6 |
| 50 | 38 | -10 | 75 | -12 | 90 | -13 |
| 75 | 38 | -13 | 105 | -16 | 144 | -19 |
| 100 | 43 | -16 | 135 | -21 | 190 | -25 |
| 125 | 47 | -18 | 166 | -25 | 231 | -28 |
| 150 | 45 | -20 | 191 | -28 | 260 | -32 |
| 175 | 57 | -21 | 217 | -30 | 287 | -36,5 |
| 200 | 77 | -21 | 233 | -32,5 | 308 | -40 |
| 225 | 85 | -22 | 249 | -34,5 | 341 | -42 |
| 250 | 93 | -23 | 265 | -36 | 375 | -44 |
| 275 | 100 | -24 | 277 | -37 | 398 | -45 |
| 300 | 103 | -25 | 284 | -38 | 420 | -46,5 |
| 325 | 110 | -25 | 289 | -39 | 449 | -47,5 |
| 350 | 116 | -25 | 295 | -39,5 | 461 | -49 |
| 375 | 122 | -24,5 | 301 | -40 | 480 | -50 |
| 400 | 127 | -25 | 309 | -40 | 494 | -50 |
| 425 | 132 | -25 | 313 | -40 | 496 | -50,5 |
| 450 | 132 | -25,5 | 317 | -40 | 508 | -50,5 |
| 475 | 131 | -25 | 320 | -40 | 525 | -50 |
| 500 | 133 | -25 | 322 | -40 | 527 | -50 |
| 525 | 140 | -25 | 322 | -40 | 526 | -50 |
| 550 | 146 | -25 | 323 | -40 | 531 | -50 |
| 575 | 147 | -25,5 | 322 | -41 | 537 | -50 |
| 600 | 155 | -25,5 | 322 | -41 | 539 | -50 |
| 625 | 164 | -25 | 324 | -41 | 546 | -49,5 |
| 650 | 175 | -24 | 326 | -42 | 554 | -49 |
| 675 | 175 | -23 | 324 | -42 | 557 | -49 |
| 700 | 175 | -23 | 326 | -41 | 557 | -49 |
| 725 | 173 | -22 | 325 | -41 | 556 | -48 |
| 750 | 174 | -21,5 | 326 | -41 | 555 | -48 |
| 775 | 177 | -21 | 326 | -40,5 | 554 | -48 |
| 800 | 176 | -20 | 326 | -41 | 552 | -47 |
| 825 | 176 | -19,5 | 328 | -42 | 550 | -47 |
| 850 | 178 | -19,5 | 328 | -42 | 547 | -47 |
| 875 | 175 | -20,5 | 329 | -42,5 | 546 | -47,5 |
| 900 | 174 | -21 | 329 | -43 | 549 | -48 |
| 925 | 174 | -22 | 328 | -44 | 549 | -48 |
| 950 | 175 | -23 | 330 | -45 | 548 | -48 |
| 975 | 173 | -23 | 332 | -45 | | |
| 1000 | 172 | -24 | 333 | -45 | | |
| 1025 | 172 | -24 | 335 | -46 | | |
| 1050 | 172 | -23 | 335 | -46,5 | | |
| 1075 | | | 337 | -46,5 | | |
| 1100 | | | 339 | -47 | | |

| calcaire | | | | | | |
|----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| s(Kpa) | s=100 | | s=200 | | s=300 | |
| DL | LA | LV | LA | LV | LA | LV |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 55 | -3 | 49 | -2 | 100 | -1 |
| 50 | 102 | -7 | 130 | -5 | 160 | -4 |
| 75 | 140 | -9 | 200 | -9 | 250 | -8 |
| 100 | 170 | -10 | 254 | -12 | 320 | -12 |
| 125 | 195 | -10 | 305 | -14,5 | 365 | -16 |
| 150 | 216 | -9 | 328 | -15 | 401 | -18 |
| 175 | 230 | -7 | 367 | -14 | 440 | -21 |
| 200 | 240 | -5 | 389 | -13 | 470 | -23 |
| 225 | 255 | -1,5 | 405 | -12 | 495 | -24 |
| 250 | 256 | 1 | 423 | -10 | 515 | -25 |
| 275 | 267 | 4,5 | 444 | -8 | 532 | -26 |
| 300 | 274 | 9 | 465 | -5 | 550 | -25 |
| 325 | 274 | 13 | 482 | -2 | 565 | -24 |
| 350 | 274 | 17,5 | 490 | 1 | 585 | -23 |
| 375 | 273 | 22 | 497 | 4 | 600 | -22 |
| 400 | 272 | 26 | 511 | 9 | 605 | -21 |
| 425 | 272 | 30 | 518 | 12 | 611 | -20 |
| 450 | 271 | 34 | 524 | 16 | 624 | -18 |
| 475 | 272 | 39 | 525 | 21 | 631 | -16,5 |
| 500 | 271 | 43 | 524 | 26 | 631 | -14 |
| 525 | 272 | 46 | 523 | 30 | 634 | -12 |
| 550 | 272 | 50 | 523 | 34 | 644 | -10 |
| 575 | 272 | 53 | 521 | 37 | 646 | -3 |
| 600 | 279 | 57 | 520 | 41 | 652 | 0 |
| 625 | 275 | 60 | 513 | 45 | 659 | 1 |
| 650 | 274 | 64 | 513 | 48 | 661 | 2 |
| 675 | 270 | 69 | 511 | 50 | 674 | 3 |
| 700 | 270 | 70 | 514 | 54 | 675 | 3 |
| 725 | 270 | 72 | 514 | 58 | 673 | 4 |
| 750 | 268 | 75 | 512 | 60 | 673 | 5 |
| 775 | 266 | 77 | 513 | 62 | 670 | 6,5 |
| 800 | 266 | 79 | 509 | 65 | 668 | 7,5 |
| 825 | 266 | 81 | 505 | 67 | 666 | 8,5 |
| 850 | 262 | 83 | 504 | 70 | 667 | 10 |
| 900 | 260 | 86 | 499 | 71 | 668 | 11,5 |
| 925 | 258 | 87 | 489 | 72 | 668,5 | 13 |
| 950 | 257 | 87 | 486 | 73 | 669 | 14 |
| 975 | 256 | 88 | 486 | 74 | 666 | 15 |
| 1000 | 255 | 87 | 486 | 74 | 668 | 16 |
| 1025 | 254 | 87 | 484 | 75 | 661 | 16 |
| 1050 | 254 | 85 | 483 | 75 | 660 | 15,5 |
| 1075 | 254 | 85 | 475 | 76 | 660 | 15 |
| 2000 | 251 | 85 | 472 | 76,5 | 653 | 14,5 |
| 2025 | 251 | 84 | 473 | 76,5 | 648 | 14 |
| 2050 | 251 | 83 | 448 | 76 | 648 | 13,5 |



-Analyse granulométrique par tamisage-



-la boite de cisaillement -



-Le dispositif de l'essai de perméabilité-



-Les matériaux étudiés -

RESUME

RESUME : Les paramètres de la résistance au cisaillement (ϕ et τ_{max}) peuvent être influencés par plusieurs facteurs tels que la présence d'eau

L'objectif de ce travail est de montrer que le coefficient de perméabilité (K) peut influencer sur les paramètres (ϕ , τ_{max}) de la résistance au cisaillement des matériaux granulaires.

Afin d'atteindre cet objectif, on a réalisé un nombre d'essais sur des différents matériaux granulaires qui sont granite, grès, calcaire et sable d'oued .

Tous d'abord on a effectué des essais d'identification tels la granulométrie (tamisage), les teneurs en eau, les masses spécifiques, ensuite on a entamé les essais de perméabilité à charge constante et en fin nous avons réalisé les essais de cisaillement direct à la boîte de CAZAGRANDE sous les charges 100 Kpa, 200 Kpa et 300Kpa .

D'après les résultats obtenus, on a remarqué que la perméabilité peut influencer les caractéristiques mécaniques au cisaillement (j , τ_{max}).

Mots clés : concassage, granulats, granite, grès, calcaire, sable d'oued, perméabilité, résistance.

ABSTRACT: The parameters of shear strength can be influenced by several factors such as the presence of water....

The objective of this work is to show that the permeability coefficient (K) can influence the parameters of the shear strength of granular materials.

To achieve this goal, we conducted a number of different tests on granular materials are granite, sandstone, limestone and river sand.

First we conducted tests of identification such as particle size (sieving), the water content, and specific gravity, as a result we started the permeability tests at constant load and at the end we realized the shear test direct CAZAGRANDE box under the load 100 kPa, 200 kPa and 300Kpa.

According to the results, it was noted that the permeability can be influenced on the characteristics of the shear strength (ϕ , τ_{max}).

Tags: crushing, aggregate, granite, sandstone, limestone, river sand, permeability, resistance.