

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

LABORATOIRE DE RECHERCHE GEOMATERIAUX, ENVIRONNEMENT ET
AMENAGEMENT
(L.G.E.A)



DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENT

Présenté par

DAHOUMANE KAHINA

Thème :

DETERMINATION DU TAUX D'ECRASEMENT DES GRAINS A PARTIR DES
CARACTERISTIQUES DES COURBES GRANULOMETRIQUES.

Devant le jury d'examen suivant :

M ^r AIT-TAHAR Kamel	Professeur	UMMTO	Président.
M ^r MELBOUCI Bachir	Professeur	UMMTO	Rapporteur.
M ^r DJEMAI Mohamed	Maître de conférences A	UMMTO	Examineur.
M ^{me} HAMMOUM Karima	Maître de conférences A	UMMTO	Examinatrice.

Soutenu le 13/ 06/ 2012

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été mené au laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement « L.G.E.A » de la faculté Génie de la Construction de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon directeur de mémoire Monsieur MELBOUCI Bachir, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, d'avoir mis à ma disposition sa pleine disponibilité et réuni tous les moyens nécessaires pour la réalisation de ce travail. Ses conseils et recommandations ainsi que ses compétences m'ont été une réelle source d'inspiration dans l'étude de ce sujet.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur AIT TAHAR Kamel, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, de m'avoir honorée de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

Qu'il me soit permis de remercier Monsieur DJEMAI Mohamed, Maître de conférences à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et Madame HAMMOUM Karima Maître de conférences à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, qui m'ont fait aussi l'honneur d'examiner ce travail. Je les prie de croire à ma respectueuse reconnaissance.

Je souhaiterais remercier Monsieur BOUKHAROUB M^{ed} Ameziane, responsable du laboratoire mécanique des sols, qui m'a aidée dans la réalisation soignée de la partie expérimentale, pour ses conseils avisés.

Mes remerciements s'adressent à l'ensemble des membres du laboratoire LGEA, qui m'ont cordialement aidée. J'ai pu rencontrer des amis et des collègues qui m'ont encouragée au cours de la réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude.

Enfin, je présente une profonde gratitude à mes parents et à toute ma famille qui m'ont encouragée et toujours soutenue pour l'aboutissement de tous mes projets et en particulier ce mémoire..

RESUME

La détermination de la résistance à l'écrasement du matériau granulaire est très importante pour comprendre son comportement dans les différentes applications dans le domaine du génie civil. Les résultats expérimentaux obtenus sont influencés par les dimensions de l'échantillon, sa densité, la contrainte appliquée, la taille et la forme des grains, etc. Ces difficultés peuvent être surmontées en développant un modèle mathématique généralisé, qui est basé essentiellement sur les propriétés physiques du matériau granulaire, telles que la taille des grains, le coefficient de courbure (C_c), le coefficient d'uniformité ou de Hazen (C_u) et le coefficient d'écrasement (B_{10}). Pour ce faire, une série d'essais a été conduite sur différents types de matériaux granulaires tels que le granit, le grès et le calcaire et les résultats ont été utilisés pour développer un tel modèle.

Notre travail consiste, à soumettre des échantillons de matériau granit, grès et calcaire dans leurs classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) à des essais de cisaillement direct à la boîte sous contraintes normales (σ_i) : [100, 300 et 400 KPa].

Une formule permettant de déterminer le taux d'écrasement des grains a été proposée à partir des caractéristiques des courbes granulométriques obtenues après les essais de cisaillement. Elle est de type exponentiel :

$$T (\%) = [(3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u}] e^{(\frac{B_{10}}{s_i} s_{1+b}) D}$$

MOTS CLES : Matériaux locaux - Essais - Cisaillement - Ecrasement des grains - Rupture des grains - Granulométrie - Caractéristiques des courbes granulométriques.

ABSTRACT

Determination of crushing strength of granular material is very important for assessing its suitability in various engineering and industrial applications. Laboratory investigations that would yield stress–strain behaviour, and hence, crushing strength of the granular material are extremely cumbersome and time consuming. Also, results obtained from these experiments get influenced by the aspect ratio of the sample, its density, strain rate, size and shape of the grains etc. These difficulties can be overcome by developing a generalized mathematical model, which is primarily, based on the physical properties of the granular material such as particle size, coefficient of curvature (C_c), coefficient of uniformity (C_u) and coefficient of crushing (B_{10}). For estimating its crushing strength, experiments were conducted on different types of granular materials such as the granite, the sandstone and the limestone. And the results were used for developing such a model.

Our work consists, to submit samples of material granite, sandstone and limestone in their granular classes (3,15/5), (5/8) and (3,15/8) to tests of direct shear box, under normal constraints (σ_i): [100 - 300 and 400 KPa].

A formula permitting to determine the rate of grain crushing was proposed from the characteristics of grading curves gotten after the tests of shearing. It is of exponential type:

$$T (\%) = \left[(3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u} \right] e^{\left(\frac{B_{10}}{s_i} s_{1+b} \right) D}$$

KEYWORDS: Local materials - Tests - Shearing - Crushing of the grains - Broken grains - Size - Characteristics of grading curves.

SOMMAIRE

LISTE DES NOTATIONS ET INDICES	(i)
LISTE DES TABLEAUX	(ii)
LISTE DES FIGURES	(iv)

INTRODUCTION GENERALE	1-2
------------------------------------	-----

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES ECRASEMENTS DES GRAINS

1. Introduction.....	3
2. Ecrasement des grains selon différents auteurs.....	3
2.1. Ecrasement des grains selon (Bishop et Henkel ; 1962).....	4
2.2. Ecrasement des grains selon (Ramamurthy; 1966).....	4
2.2.1. Rupture des aspérités.....	4
2.2.2. Cisaillement des aspérités.....	5
2.2.3. Rupture des angularités.....	5
2.2.4. Fendage des grains de sol.....	5
2.3. Ecrasement des grains selon (Guyon et Troadec ;1994).....	6
2.3.1. L'abrasion.....	6
2.3.2. L'écaillage (ou l'attrition).....	6
2.3.3. La fracture.....	6
3. Effet de la croûte molle	6
3.1. Type de cisaillement dans la croûte molle	7
3.1.1. Cisaillement à l'interface.....	7
3.1.2. Cisaillement localisé dans la croûte molle	7
3.1.3. Cisaillement généralisé dans la croûte molle	8
4. Quantification de la rupture des grains.....	9

5. Paramètres influençant la rupture des grains	9
5.1. Influence des paramètres de nature des grains	9
5.2. Influence du paramètre de compacité	10
5.3. Influence du chemin des contraintes	11
5.4. Influence de l'état de déformation et de l'effet de l'eau	11
6. Méthodes empiriques évaluant le taux d'écrasement des grains.....	11
6.1. Méthode directe.....	12
6.2. Méthode indirecte	12
6.3. Méthodes à une seule taille des grains.....	12
6.4. Méthodes à plusieurs tailles des grains.....	13
7. Conséquences du phénomène d'écrasement.....	14
8. Conclusion.....	15

CHAPITRE II. IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

1. Introduction.....	16
2. Classification générale des roches.....	16
3. Présentation des matériaux utilisés dans notre étude.....	17
3.1. Le granit.....	17
3.2. Le grès.....	19
3.3. Le calcaire.....	23
4. Conclusion.....	25

CHAPITRE III. LES ESSAIS DE LABORATOIRE

1. Introduction.	26
2. Analyse granulométrique par voie sèche.	26
2.1. But de l'essai.....	26
2.3. Equipements nécessaires.....	27
2.2. Principe du tamisage.....	28
2.4. Expression des résultats.....	29
3. Cisaillement direct à la boîte.....	30

3.1. But de l'essai.....	30
3.2. Préparation des échantillons pour les essais.....	30
3.3. Appareillage.....	31
3.4. Principe de l'essai.....	33
4. Conclusion.....	37

CHAPITRE IV. RESULTATS ET INTERPRETATION

1. Introduction.....	38
2. Présentation et interprétation des résultats.....	38
2.1. Courbes contraintes-déformations.....	38
2.1.1. Courbes contraintes-déformations du matériau granit.....	38
2.1.2. Courbes contraintes-déformations du matériau grès.....	40
2.1.3. Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire.....	41
2.2. Courbes granulométriques avant et après essais de cisaillement.....	42
2.2.1. Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau granit.....	42
2.2.2. Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès.....	44
2.2.3. Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire.....	45
2.3. Influence de la classe granulaire (la granulométrie).....	46
2.4. Etalement des courbes granulométriques en fonction des classes granulaires.....	48
3. Conclusion.....	49

CHAPITRE V. PROPOSITION D'UNE FORMULATION

1. Introduction.....	51
2. Comportement des matériaux étudiés au cisaillement.....	51
3. Principaux paramètres influençant sur la courbe granulométrique.....	55
4. Proposition de la formulation.....	58
4.1. Courbe expérimentale (courbe granulométrique après cisaillement).....	59
4.2. Courbe de tendance (courbe théorique).....	60
5. Calcul des paramètres d'ajustement.....	62
6. Calcul des marges d'erreurs.....	64

6.1. Rappels théoriques sur les statistiques.....	64
6.2. Paramètres statistiques.....	64
6.2.1. La moyenne arithmétique.....	64
6.2.2. La variance observée.....	64
6.2.3. L'écart-type observé.....	65
6.3. Application aux matériaux étudiés.....	65
6.3.1. Courbes granulométriques expérimentales et courbes théoriques.....	65
7. Conclusion.....	78
CONCLUSION GENERALE.....	79-80
BIBLIOGRAPHIE.....	81-88
ANNEXES.....	89-112

PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

A et B	Coefficients qui régissent la forme exponentielle de la courbe de théorique.
a et b	Paramètres d'ajustement.
B₁₀	Coefficient d'écrasement des grains de Lade et Yamamuro.
C_c	Coefficient de courbure.
C_u	Coefficient d'uniformité.
C_c	Coefficient d'écrasement des grains de Datta et al.
σ₁	Contrainte normale sous 1 [Bar].
σ_i	Contrainte normale variant de 1, 3 et 4 [Bar].
τ	Contrainte tangentielle.
N	Effort normal.
T	Effort horizontal.
D_{10i}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât initial de 10 %.
D_{15i}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât initial de 15 %.
D_{30i}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât initial de 30 %.
D_{60i}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât initial de 60 %.
D_{10f}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât final de 10 %.
D_{15f}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât final de 15 %.
D_{30f}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât final de 30 %.
D_{60f}	Diamètre du tamis équivalent à un tamisât final de 60 %.
Δw_k = (Δw_{ki} - Δw_{kf})	Coefficient d'écrasement des grains de Marsal.
Δw_{ki}	Pourcentage du poids retenu par le tamis du diamètre k avant essai.
Δw_{kf}	Pourcentage du poids retenu par le tamis du diamètre k après essai.
k	Coefficient de perméabilité.
Kim	Coefficient d'écrasement de Kim.
ΔL	Déplacement horizontal.
S²	Variance observée.
S	Ecart type observé.
\bar{x}	Moyenne arithmétique.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du matériau granit.....	18
Tableau II.2 : Caractéristiques mécaniques du matériau granit.....	18
Tableau II.3 : Composition minéralogique du grès numidien.....	21
Tableau II.3 : Composition minéralogique du grès miocène.....	22
Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du matériau calcaire.....	25
Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques du matériau calcaire.....	25
Tableau V.1: Valeurs des coefficients C_c , C_u , B_{10} et les équations des courbes de tendance pour le calcaire (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les différentes contraintes normales.....	57
Tableau V.2: Valeurs des coefficients C_c , C_u , B_{10} et les équations des courbes de tendance pour le granit (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les différentes contraintes normales.....	57
Tableau V.3: Valeurs des coefficients C_c , C_u , B_{10} et les équations des courbes de tendance pour le grès (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les différentes contraintes normales.....	58
Tableau V.4: valeurs du paramètre d'ajustement (a) en fonction du type du matériau, de la contrainte normale (σ) et la classe granulaire.....	63
Tableau V.5 : Valeurs du paramètre d'ajustement (b) en fonction du type du matériau, de la contrainte normale (σ) et la classe granulaire.....	63
Tableau V.6 : Estimation de l'écart type pour le grès (5/8) sous 100 KPa.....	67
Tableau V.7 : Estimation de l'écart type pour le grès (5/8) sous 300 KPa.....	68
Tableau V.8 : Estimation de l'écart type pour le grès (5/8) sous 400 KPa.....	69

Tableau V.9 : Estimation de l'écart type pour le granit (5/8) sous 100 KPa.....	71
Tableau V.10 : Estimation de l'écart type pour le granit (5/8) sous 300 KPa.....	72
Tableau V.11 : Estimation de l'écart type pour le granit (5/8) sous 400 KPa.....	73
Tableau V.12 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (5/8) sous 100 KPa.....	75
Tableau V.13 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (5/8) sous 300 KPa.....	76
Tableau V.14 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (5/8) sous 400 KPa.....	77
Tableau V.15 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/5) sous 100 KPa.....	90
Tableau V.16 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/5) sous 300 KPa.....	91
Tableau V.17 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/5) sous 400 KPa.....	92
Tableau V.18 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/8) sous 100 KPa.....	94
Tableau V.19 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/8) sous 300 KPa.....	95
Tableau V.20 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/8) sous 400 KPa.....	96
Tableau V.21 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/5) sous 100 KPa.....	98
Tableau V.22 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/5) sous 300 KPa.....	99
Tableau V.23 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/5) sous 400 KPa.....	100
Tableau V.24 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/8) sous 100 KPa.....	102
Tableau V.25 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/8) sous 300 KPa.....	103
Tableau V.26 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/8) sous 400 KPa.....	104
Tableau V.27 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/5) sous 100 KPa.....	106
Tableau V.28 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/5) sous 300 KPa.....	107
Tableau V.29 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/5) sous 400 KPa.....	108
Tableau V.30 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/8) sous 100 KPa.....	110
Tableau V.31 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/8) sous 300 KPa.....	111
Tableau V.32 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/8) sous 400 KPa.....	112

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Représentation schématique du comportement de contact (D'après BISHOP et HENKEL, 1962).....	4
Figure I.2 : Différents types de rupture des grains selon Ramamurthy (1969).....	5
Figure I.3 : Différents modes de rupture des grains selon Guyon et Troadec (1994).....	6
Figure I.4 : Cisaillement à l'interface.....	7
Figure I.5 : Cisaillement localisé dans la croûte la plus molle.....	8
Figure I.6 : Cisaillement généralisé dans la croûte la plus molle.....	8
Figure I.7 : Degré de rupture des grains, Kim (1995).....	14
Figure II.1 : Photos du matériau granit et les échantillons utilisés pour cette étude.....	17
Figure II.2 : Les échantillons du matériau grès utilisés pour cette étude.....	20
Figure II.3 : Les échantillons du matériau calcaire utilisés pour cette étude.....	23
Figure III.1: Tamis.....	28
Figure III.2: Tamiseuse électrique.....	28
Figure III.3: Résultat du tamisage.....	28
Figure III.4 : La Boite de cisaillement.....	32
Figure III.5 : L'appareillage complet.....	32
Figure III.6 : Mode de rupture dans la boite de cisaillement.....	34
Figure III.7: Courbe « effort-déformation » d'un sol pulvérulent dans un essai de cisaillement.....	35
Figure IV.1: Courbes contraintes-déformations du matériau granit pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).....	39
Figure IV.2: Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).....	40
Figure IV.3: Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).....	41
Figure IV.4: Courbes granulométriques du matériau granit pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.....	43

Figure IV.5 : Courbes granulométriques du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa	44
Figure IV.6 : Courbes granulométriques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa	45
Figure IV.7 : Courbes contraintes - déformations des matériaux calcaire, grès et granit sous une contrainte normale de 300 kPa pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).....	46
Figure IV.8 : La zone cisailée.....	47
Figure IV.9 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement sous 300 kPa des matériaux granit, grès et calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).....	48
Figure V.1 : Calcaire (5/8) avant cisaillement.....	52
Figure V.2 : Calcaire (5/8) après cisaillement sous 300 kPa.....	52
Figure V.3 : Granit (5/8) avant cisaillement.....	53
Figure V.4 : Granit (5/8) après cisaillement sous 300 kPa.....	53
Figure V.5 : Grès (5/8) avant cisaillement.....	54
Figure V.6 : Grès (5/8) après cisaillement sous 300 kPa.....	54
Figure V.7 : Photos des grains colorés du granit, du calcaire et du grès après cisaillement.....	55
Figure V.8 : Courbe granulométrique du matériau calcaire (5/8) après cisaillement sous 300 kPa.....	59
Figure V.9 : Courbe de tendance obtenue pour le matériau calcaire (5/8) sous 300 kPa.....	60
Figure V.10 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau grès (5/8) sous 100, 300 et 400 kPa.....	66
Figure V.11 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau granit (5/8) sous 100, 300 et 400 kPa.....	70
Figure V.12 : Courbes expérimentales et théoriques pour le matériau calcaire (5/8) sous 100, 300 et 400 kPa.....	74
Figure V.13 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau grès (3,15/5) sous 100, 300 et 400 kPa.....	89

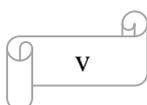


Figure V.14 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau grès (3,15/8) sous 100, 300 et 400 kPa.....	93
Figure V.15 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau granit (3,15/5) sous 100, 300 et 400 kPa.....	97
Figure V.16 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau granit (3,15/8) sous 100, 300 et 400 kPa.....	101
Figure V.17 : Courbes expérimentales et théoriques pour le matériau calcaire (3,15/5) sous 100, 300 et 400 kPa.....	105
Figure V.18 : Courbes expérimentales et théoriques pour le matériau calcaire (3,15/8) sous 100, 300 et 400 kPa.....	109

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux granulaires sont universellement répandus dans la nature et entrent dans de nombreux domaines de l'activité humaine ; ils sont omniprésents sous bien des formes et des tailles différentes dans notre environnement.

L'importance de la matière en grains dans notre vie quotidienne, mais aussi les propriétés parfois surprenantes qui y sont associées, expliquent le nombre croissant de travaux de recherche sur les matériaux granulaires et l'abondante littérature qui s'y rapporte [Guyon et Troadec, 1994 ; Melbouci, B., 2002 ; Chuhan et al., 2003; Bartake, P.P. and Singh, D.N., 2007].

Notre recherche, a été initiée pour les besoins de notre société de caractériser le comportement des granulats et particulièrement pour les matériaux locaux grès, granit et calcaire. Pour cela, un des objectifs était de comprendre l'influence de la courbe granulométrique sur l'écrasement des granulats.

Notre étude a été inspirée de la méthodologie développée et rapportée par P.P. Bartake, and Singh, D.N. en 2007; pour la détermination de la résistance à l'écrasement des matériaux granulaires, en développant un modèle mathématique généralisé.

Il faut donc partir d'une base expérimentale assez vaste. Cela suppose une connaissance préalable de la structure granulaire des matériaux étudiés (composition minéralogique, taille, forme des grains ...) qui aide à interpréter les résultats d'essais de simulation.

Notre travail consiste à déterminer le taux d'écrasement des grains à partir des caractéristiques des courbes granulométriques.

Pour mener à bien notre étude, nous avons réparti ce présent mémoire en (05) chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur l'écrasement des grains. En effet, il existe plusieurs modes de rupture des grains en fonction de leur classification donnée par : Ramamurty, (1969) et Troadec et Guyon, (1994).

Dans le deuxième chapitre, sont données les définitions, la provenance et la minéralogie de tous les matériaux utilisés dans notre étude à savoir le granit, le grès et le calcaire.

Dans le troisième chapitre, sont regroupées toutes les informations nécessaires à la compréhension des principes de fonctionnement des essais de laboratoire (Analyse granulométrique par voie sèche et le cisaillement direct à la boîte de Casagrande).

Dans le quatrième chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation et à l'interprétation des résultats des essais obtenus en laboratoire.

Le cinquième chapitre, porte sur la proposition d'une formulation à partir des caractéristiques des courbes granulométriques pour la détermination du taux d'écrasement des grains. Ce qui nous a permis de tracer les courbes granulométriques théoriques que nous avons comparé aux courbes granulométriques expérimentales obtenues après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa, pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) des matériaux étudiés. Une évaluation statistique du calcul d'erreur entre les courbes théoriques et expérimentales a été menée à la fin de ce chapitre.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale qui donne une synthèse générale sur notre travail.

Chapitre I

Généralités sur les écrasements des grains

CHAPITRE I**GENERALITES SUR LES ECRASEMENTS DES GRAINS****1. Introduction**

Le cisaillement ou le tassement provoquent l'écrasement des grains du sol qui engendre la fragmentation des particules du sol sous différents aspects. Le pourcentage de dégradation des grains, dépend de la composition minéralogique, de leur dureté et de leur composition chimique. La mise en évidence du phénomène de l'écrasement des grains a été publié dans plusieurs études menées par : Biarez-J (1962), Marsal (1967), Vesic A-S et Clough G-W (1968), Cambou (1972), et récemment Kim (1995), Lade et Yamamuro (1996), Mc Dowell et Bolton (1998), Melbouci-B (2002) et P.P. Bartake et D.N. Singh (2007). Ces études ont permis de comprendre comment le phénomène de rupture des grains se manifeste et quels sont les paramètres et les facteurs qui permettent de quantifier cette rupture.

L'écrasement des grains dépend de la contrainte normale de compression, de la contrainte de cisaillement, des dimensions de l'échantillon et de sa densité, de la taille et de la forme des grains. Quand les grains sont solides, durs et assez arrondis, ils peuvent reprendre de grandes contraintes ; par contre, les grains de forme anguleuse de matériaux de carrière fraîchement extraits subissent la fragmentation due à la cassure des aspérités sous des contraintes moins importantes.

La rupture des grains est limitée généralement aux points de contact mais elle peut se prolonger vers l'intérieur du grain.

2. Ecrasement des grains selon différents auteurs

Plusieurs études expérimentales ont montré que le phénomène de rupture des grains est lié aux propriétés physiques et mécaniques de ces derniers ainsi qu'aux chemins de contraintes appliquées.

Les particules angulaires des matériaux subissent la fragmentation sous les pressions ordinaires en raison de la rupture des angularités pointues.

Divers auteurs ont classé la rupture des grains selon des critères différents :

2.1. Ecrasement des grains selon (Bishop et Henkel, 1962)

Cette étude est basée sur la relation contrainte – déformation, effectuée sur des échantillons cylindriques soumis à deux cycles de chargement et de déchargement. Les observations sont faites au niveau des contacts cisailés. Les auteurs ont observé un cisaillement au niveau des points de contact, en outre aucune diminution de volume n'a été relevée. Le comportement de deux grains en contact sous une contrainte croissante est schématisé sur la Figure I.1 :

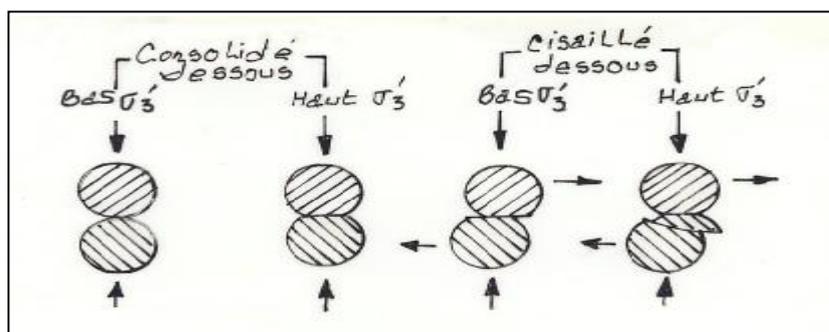


Figure I.1 : Représentation schématisique du comportement de contact
(D'après Bishop et Henkel, 1962)

2.2. Ecrasement des grains selon (Ramamurthy, 1969)

Ramamurthy (1969) a proposé quatre modes de ruptures des grains :

- 1-Rupture des aspérités;
- 2-Cisaillement des aspérités;
- 3-Rupture des angularités;
- 4-Le fendage des grains de sol.

2.2.1. Rupture des aspérités

La résistance de frottement entre les grains de sol dépend de leurs propriétés extérieures et de leurs constituants minéralogiques.

Le degré d'écrasement change selon l'importance de l'effort et du mouvement des grains, les grains fragiles se cassent plus rapidement.

2.2.2. Cisaillement des aspérités

L'écrasement se produit pour les grains durs qui sont soumis à des efforts à leurs points de contact. L'importance de la rupture dépend de la forme géométrique du grain et les efforts de contact. Les fragments formés par la rupture du grain sont plus durs que ceux formés par le cisaillement.

2.2.3. Rupture des angularités

Dans les matériaux fraîchement extraits, les angularités pointues se cassent pendant le cisaillement ou le tassement. Les surfaces et les coins nouvellement formés sont relativement plus résistants. Les aspérités sur ces surfaces résistent sous de basses pressions et peuvent se comporter différemment sous des efforts d'intensité plus élevée.

2.2.4. Le fendage des grains de sol

Cet écrasement se produit lorsque les grains durs de sol sont soumis à des efforts de sens opposés (figure I.2.d). Ces efforts ont pour conséquence la fragmentation. L'ampleur de l'écrasement dépend de la forme, de la taille et des forces de contact. Les grains ainsi produits sont plus résistants que ceux formés après rupture des aspérités.

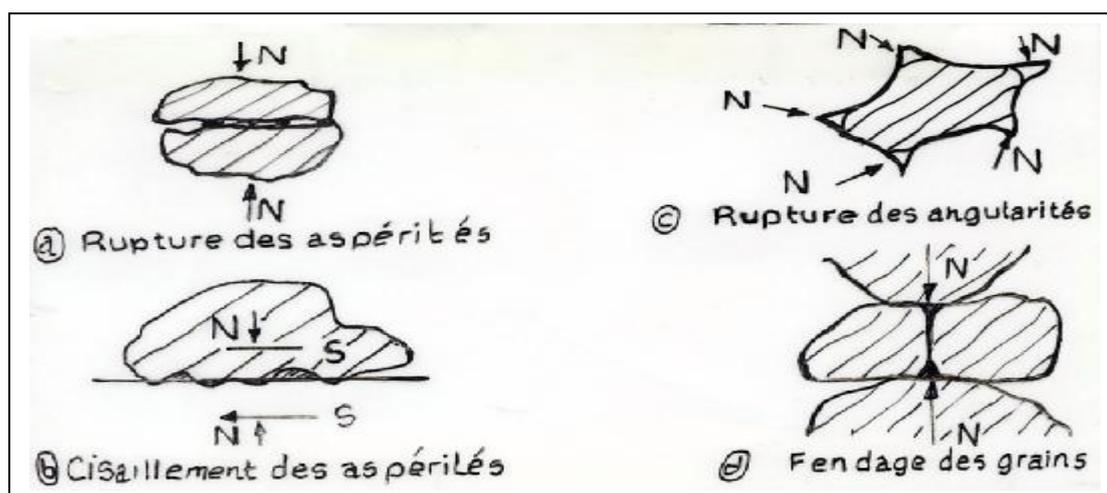


Figure I.2 : Différents types de rupture des grains selon Ramamurthy (1969)

2.3. Ecrasement des grains selon (Guyon et Troadec, 1994)

On distingue trois modes de rupture selon Guyon et Troadec 1994.

2.3.1. L'abrasion

Le résultat est un grain ayant sensiblement la même taille que l'original et plusieurs particules très fines.

2.3.2. L'écaillage (ou l'attrition)

Le grain se casse pour donner un gros grain et plusieurs de petites tailles.

2.3.3. La fracture

Le grain se casse pour en donner de nouveaux de tailles sensiblement égales et inférieures à la taille du grain original.

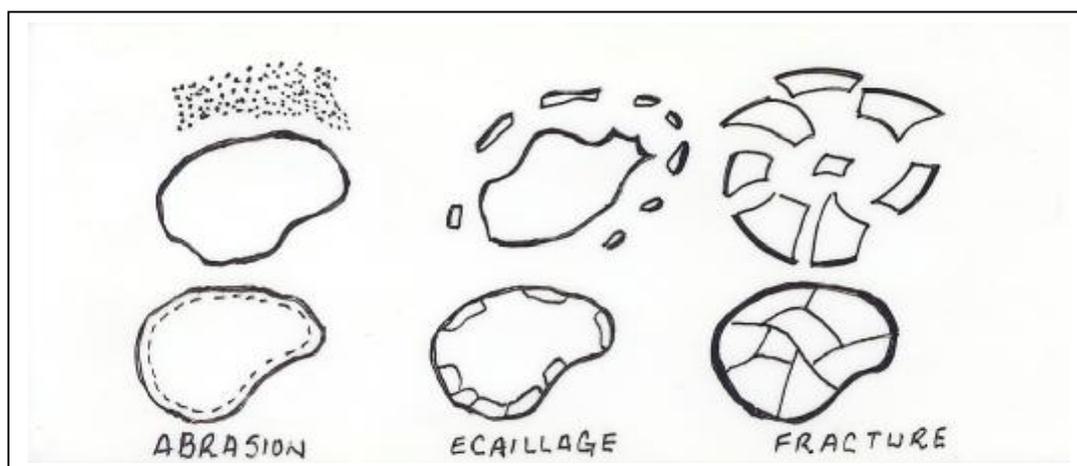


Figure I.3 : Différents modes de rupture des grains selon Guyon et Troadec (1994)

3. Effet de la croûte molle

La résistance au cisaillement du grain dépend des propriétés de la croûte molle et des forces de contact. Si les pressions de contact sont basses, aucune variation ne sera observée dans les paramètres de résistance. Mais quand les efforts de contact augmentent, les résidus des grains provoquent des écoulements.

3.1. Type de cisaillement dans la croûte molle

Le cisaillement dans la croûte dépend de la force de contact et des grains constituant la croûte. On distingue trois types de cisaillement.

- 1- Cisaillement à l'interface.
- 2- Cisaillement localisé dans la croûte la plus molle.
- 3- Cisaillement généralisé dans croûte la plus molle.

3.1.1. Cisaillement à l'interface

L'effet de cisaillement progresse sur l'interface des grains et tend à diminuer en direction du centre de la particule. Sous basses pressions, l'écrasement ne peut pas être atteint mais prend place le long du plan séparant les surfaces initiales. La zone de cisaillement sera limitée à une région discontinue très étroite. La résistance au cisaillement sera celle de la croûte plus molle du grain glissant au-dessus. (Voir figure I.4)

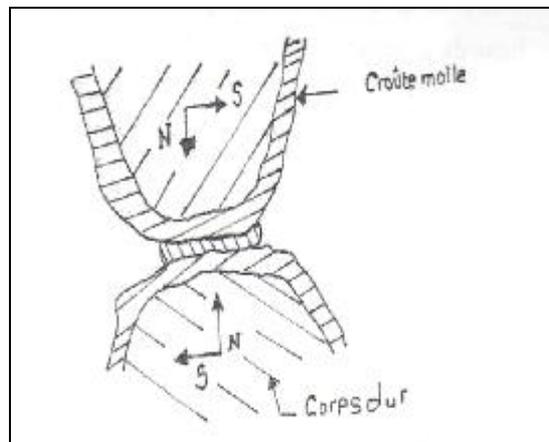


Figure I.4 : Cisaillement à l'interface

3.1.2. Cisaillement localisé dans la croûte la plus molle

Sous une pression de contact plus élevée, La couche épaisse du grain mou (fragile) adhère à la surface de l'autre grain, ainsi le cisaillement aura lieu entièrement dans le grain le plus mou. La résistance au cisaillement sera la somme des résistances partielles du grain mou glissant sur lui-même plus le travail supplémentaire effectué par le glissement des deux grains. (Voir figure I.5)

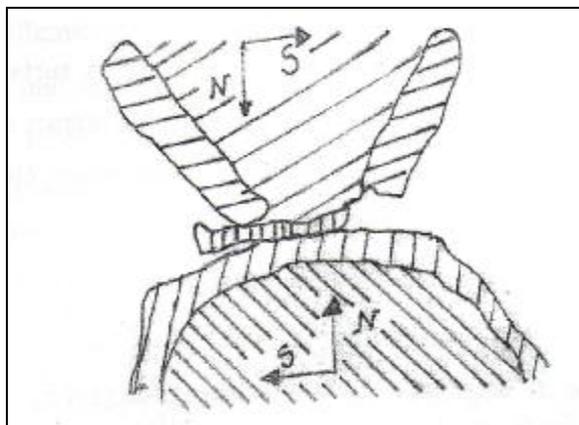


Figure I.5 : Cisaillement localisé dans la croûte la plus molle

3.1.3. Cisaillement généralisé dans la croûte la plus molle

Quand les effets climatiques sont limités à la couche supérieure et n'atteignent pas la couche inférieure du sol, seule une épaisseur limitée du grain sera ramollie. Sous des pressions de contact élevées, le cisaillement peut avoir lieu directement dans le grain mou le long de la borne qui sépare la couche molle du noyau le plus dur. (Voir figure I.6)

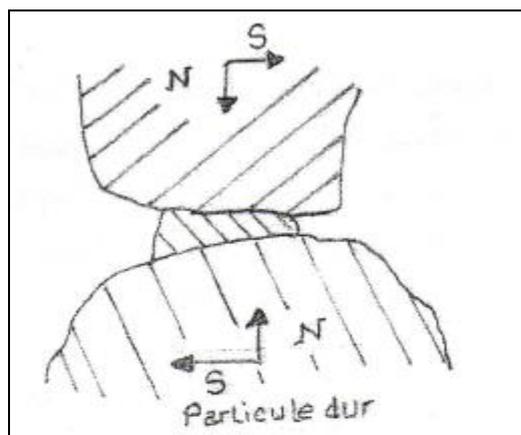


Figure I.6 : Cisaillement généralisé dans la croûte la plus molle

4. Quantification de la rupture des grains

Pour bien comprendre le comportement des sols, il est important de définir le degré d'écrasement des grains et pouvoir ainsi le quantifier.

L'écrasement des grains est mesuré par comparaison les courbes granulométriques avant et après chaque essai. La rupture des grains entraîne une diminution de leurs tailles qui induit à une augmentation du pourcentage de particules fines et, par conséquent, une modification de la distribution granulométrique.

La rupture des grains peut se produire même sous des basses pressions mais cela dépend des caractéristiques des grains.

Plusieurs auteurs ont défini le taux d'écrasement des grains à partir des caractéristiques des courbes granulométriques : Lee et Farhoomand, (1967) ; Lee et Seed, (1967) ; Vesic et Clough, (1968) ; Miura et Yamanouchi, (1977) ; Miura et O-Hara, (1979) ; Hardin, (1985) ; Fukumuto, (1990) ; Yamamuro et al., (1996) ; Hagerty et al., (1993). Ces auteurs proposent différents facteurs pour mesurer la quantité de rupture des grains. Ces facteurs sont empiriques et sont basés sur des changements des dimensions granulaires, des diamètres ou le changement global de la granulométrie.

5. Paramètres influençant l'écrasement des grains

Nous présentons une synthèse des résultats expérimentaux tirés des différents articles entre autres : Biarez et Hicher, (1997) ; Hagerty, (1993) ; Melbouci, (2002) et Ramamurty, (1969) relatifs aux paramètres susceptibles d'influencer le phénomène de rupture des grains.

5.1. Influence des paramètres de nature des grains

Quatre paramètres sont recensés et qui peuvent influencer considérablement la rupture des grains :

- La composition minéralogique et leur structure cristalline (résistance mécanique des grains) ;
- La taille des grains ;
- L'étalement granulométrique ;
- La forme des grains.

La résistance mécanique des grains peut être rattachée d'une part à leur nature minéralogique, d'autre part à leur état d'altération. Elle dépend donc de l'histoire de la formation pour les dépôts naturels, de l'histoire de fabrication (concassage) pour des mélanges artificiels.

La taille est aussi un paramètre très important, les plus petites étant plus résistantes que les grosses (effet d'échelle). En effet, plus la taille augmente et plus la probabilité de présence de zones de faiblesse dans le grain augmente. Ces micro-fissures se propagent lorsque les grains sont soumis à un chargement élevé et peuvent se rejoindre, constituant ainsi une cause importante de rupture des grains.

La répartition granulométrique est également un facteur très important et les différentes études concordent pour montrer qu'une granulométrie serrée favorise les ruptures des grains. En fait, l'étalement granulométrique détermine le nombre de contacts entre grains qui varie également selon la forme et la compacité du matériau dans une unité de volume élémentaire.

La forme des grains est également un facteur significatif. En effet, la forme anguleuse favorise la concentration des contraintes (les surfaces de contacts étant très faibles) et la résistance à la rupture des grains est plus rapidement atteinte dans ce cas que pour des grains plus arrondis. De plus, les grains aplatis sont susceptibles de se rompre lorsqu'ils sont soumis à un effort de traction par flexion.

5.2. Influence du paramètre de compacité

La compacité influe de manière considérable sur l'écrasement des grains. Pour un matériau granulaire donné, un matériau de faible densité relative initiale conduit à un écrasement des grains plus important qu'un matériau de forte densité relative initiale.

Une faible densité initiale implique un nombre de contact réduit entre les grains et, par conséquent, une intensité des contraintes plus élevée. Cela provoque une rupture des grains qui accentue le caractère contractant du matériau.

L'écrasement des grains est important au début du chargement pour un milieu peu dense à grains anguleux puis devient semblable à celui du milieu dense.

5.3. Influence du chemin des contraintes

Il est bien évident que l'intensité des contraintes appliquées est un facteur prépondérant sur le développement des ruptures des grains. Cependant, le chemin des contraintes joue également un rôle marquant. Les études expérimentales réalisées sur ce thème ont montré que l'essai triaxial génère plus de ruptures que l'essai oedométrique pour une même contrainte moyenne [Biarez, J. 1997].

En 1995, Kim a montré que plus la contrainte de confinement au triaxial augmente et plus la rupture des grains est prononcée. De plus, pour une même contrainte moyenne, plus le déviateur de contraintes est élevé et plus la rupture des grains est importante.

Sur des essais drainés et non drainés, Lade et Yamamuro en 1996, ont montré que le cisaillement drainé produit plus de rupture car les contraintes effectives augmentent dans le cas drainé alors qu'elles diminuent dans le cas non drainé.

5.4. Influence de l'état de déformation et de l'effet de l'eau

Ces deux facteurs sont aussi importants que les trois premiers. L'amplitude des déformations a une incidence notable sur l'importance du phénomène d'écrasement des grains. En effet, plus la déformation axiale est élevée et plus il y'a écrasement des grains [Melbouci, B. 2002]. Quant à l'effet de l'eau, Marsal a montré que la présence d'eau a tendance à diminuer la résistance du matériau. Miura et al. Ont montré par ailleurs, en 1984, que cet effet est plus marqué dans le cas de grains dont la résistance individuelle est faible que dans le cas de grains de résistance individuelle élevée.

6. Méthodes empiriques évaluant le taux d'écrasement des grains

Selon Ramamurthy.T(1969), l'écrasement dans les milieux granulaires durant le compactage et le cisaillement peut être évalué par :

- Ø La méthode directe, c'est-à-dire, évaluation par tamisage.

∅ La méthode indirecte, c'est-à-dire, à partir de la relation contrainte-déformation.

6.1. Méthode directe

Cette méthode d'évaluation de l'écrasement des grains dans les milieux granulaires consiste à comparer les courbes granulométriques avant et après le compactage ou le cisaillement.

L'augmentation du pourcentage des particules fines obtenues avant et après l'essai peut être considérée comme une mesure de l'importance de l'écrasement. Cette méthode n'indique pas le début de l'écrasement pendant le cisaillement. Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage constituent une mesure importante de l'évaluation de l'écrasement des grains.

6.2. Méthode indirecte

Cette méthode indique la contrainte normale de compression correspondant au début de l'écrasement. L'écrasement peut avoir lieu à différentes étapes correspondant à différents niveaux de contraintes. La combinaison des pressions de contact aux propriétés des surfaces extérieures des grains de sol peut provoquer le début de l'écrasement et diminue la porosité.

Plusieurs auteurs ont défini le taux d'écrasement à partir de l'évolution ou de l'étalement de la courbe granulométrique. En fait, tous les paramètres sont déterminés à partir de l'évolution de la taille des grains avant et après essai. Ils se distinguent par le nombre de tailles des grains retenu pour leur calcul ou par leur pourcentage correspondant à une taille de grain donnée. On distinguera les méthodes ayant un seul facteur d'une part et les méthodes à plusieurs facteurs d'autre part.

6.3. Méthode à une seule taille des grains

- **Lee et Farhoonand (1967)** ont défini un facteur basé sur l'évolution du diamètre correspondant à 15% de passant avant et après essai. Il est défini par l'équation suivante :

$$D_{15 \text{ initial}} / D_{15 \text{ final}}$$

- **Datta et al. (1979)** ont travaillé sur du sable calcaire et ont défini un coefficient C_c qui caractérise le degré d'écrasement des grains comme suit :

$$C_c = D_{10f} / D_{10i}$$

- **Lade et Yamamuro (1996)** ont défini un coefficient de perméabilité « k » qui correspond à la taille du tamis qui laisse passer 10% du matériau, et un autre paramètre « B_{10} » dont les valeurs sont comprises entre 0 (sans rupture des grains) et 1 (la taille des grains est très petite par rapport à la taille initiale).

$$k = 100 \cdot (D_{10})^2$$

$$B_{10} = 1 - (D_{10f} / D_{10i})$$

6.4. Méthode à plusieurs tailles des grains

- **La méthode de Marsal** : permet de déterminer le pourcentage du poids des grains affectés au cours de l'essai. L'application de cette méthode nécessite de réaliser des analyses granulométriques avant et après essai. Le paramètre « B_w » représentant ce pourcentage est défini comme la somme des valeurs positives de « Δw_k » avec :

$$\Delta w_k = w_{ki} - w_{kf}$$

w_{ki} : est le pourcentage du poids retenu par le tamis de diamètre k avant essai.

w_{kf} : est le pourcentage du poids retenu par le même tamis après essai.

k : prend les valeurs des diamètres de tous les tamis utilisés.

- **La méthode de Kim** : l'indice de Kim signifie la somme de l'écrasement des grains. La méthode est basée sur le changement de la taille des grains dans la courbe granulométrique. La différence des pourcentages retenus est calculée pour toutes les tailles analysées. (Voir figure I.7)

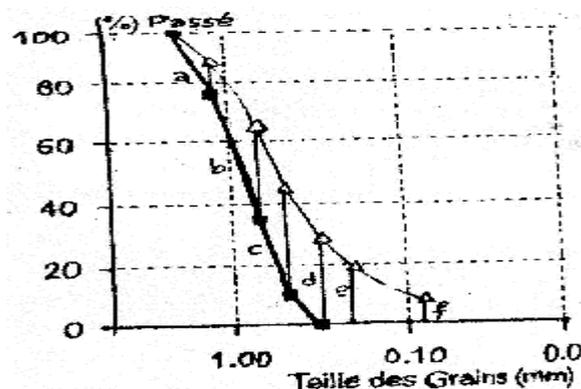


Figure I.7 : Degré de rupture des grains, selon Kim (1995)

a = % à 1,2 mm après essai - % à 1,2 mm avant essai

b = % à 0,8 mm après essai - % à 0,8 mm avant essai

$$\text{Kim (\%)} = a+b+c+\dots+i$$

7. Conséquences du phénomène d'écrasement des grains

Dans les milieux granulaires, les cassures se produisent pendant le compactage. Des échantillons frais doivent être employés pour obtenir des résultats fiables de densité sèche et de contenu d'humidité maximum. Dépendant de la forme et de la force des grains de sol et du mode du compactage, les grains de sol peuvent subir la dégradation même pendant le premier compactage. Un écrasement graduel pendant le compactage ou le cisaillement indique un changement graduel de l'indice des vides qui influence par la suite la force du sol.

L'importance de la fragmentation des grains peut ne pas influencer la conception et la stabilité des structures. L'écrasement excessif pendant le compactage améliorera la densité qui devrait être pris en considération pour évaluer les avantages d'un équipement plus lourd de compactage.

L'avantage de l'écrasement doit non seulement casser les grains plus faibles mais améliorer également la performance des milieux granulaires en diminuant sa compressibilité et sa perméabilité. [Ramamurthy. T en 1969].

8. Conclusion

La résistance et la déformation d'un matériau granulaire pendant son chargement sont affectées considérablement par le degré d'écrasement des grains. Le taux d'écrasement des grains qui se produit dans ce matériau dépend essentiellement de la granulométrie, de la contrainte appliquée, de la forme et de la taille des grains.

La rupture entraîne une diminution de la taille des grains qui induit une augmentation du pourcentage des particules fines et, par conséquent, une modification de la distribution granulométrique et de l'état de surface des grains.

Le paramètre majeur influençant la rupture des grains est l'évolution de l'étalement granulométrique.

Chapitre II

Identification des matériaux utilisés

CHAPITRE II**IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES****1. Introduction**

Les matériaux de construction trouvent leur origine dans le sol. En premier lieu, les pierres issues des roches qui sont des éléments de construction résultant du refroidissement progressif de la masse de la terre passant dans sa première phase de formation de l'état gazeux à l'état liquide (le magma) puis, au contact de l'atmosphère, à l'état solide (l'écorce terrestre).

D'autres pierres résultent de celles-ci par désagrégation, sédimentation et altération. Les pierres possèdent des formes et dimensions très variées.

Dans le domaine du génie civil, le concassage des roches est effectué pour la production de granulats de formes variées, cubique, isométrique, plate allongée ou parallélépipédique. Essentiellement, utilisables pour les infrastructures (construction de routes, bâtiments, ponts etc.).

La fragmentation des roches dépend, en général, des caractéristiques physico-chimiques des minéraux constitutifs de la roche et, en particulier, de la fissuration et de la frontière de jonction des minéraux. Cette fragmentation sera d'autant plus sélective que les caractéristiques physico-mécaniques dans les différentes conditions de charge (cisaillement, choc, flexion et écrasement) sont liées aux paramètres structuraux et aux propriétés des minéraux essentiels. C'est là qu'interviennent la nature et l'architecture de la roche dont les comportements seront différents lors du concassage.

2. Classification Générale des roches

Suivant leur origine, les roches se classent en trois grandes familles:

- Roches magmatiques : comme les granites ;
- Roches sédimentaires : comme les calcaires et les grès ;
- Roches métamorphiques : comme les schistes.

3. Présentation des matériaux utilisés dans notre étude

Pour les besoins de l'étude, il a été utilisé trois matériaux granulaires, à savoir : le granit, le grès et le calcaire.

3.1. Le granit

Les principales définitions de ce matériau se résument comme suit :

3.1.1. Définitions

Le matériau de notre étude est extrait du village « Ichétouanène » de la commune de « Boudjima » distante de 27 Km au Nord-est du chef lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Le granit est une roche magmatique de structure grenue, elle est dure et formée de grains plus ou moins volumineux (d'où son nom). et qui se compose essentiellement de quartz (pour la moitié et même les trois quarts), de feldspath et de mica, qui sont agrégés avec plus ou moins de force.

Le granit est très répandu dans la croûte terrestre, mais on le trouve principalement dans les chaînes de montagnes les plus anciennes, où il n'est présent que là où prédomine les roches métamorphiques et ignées. Ce matériau est soumis au concassage manuel, pour l'obtention des classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) nécessaires pour nos essais, comme le montre la figure ci-après.



Figure II.1 : Photos du matériau granit et les échantillons utilisés pour cette étude.

3.3.2. Caractéristiques

Les principales caractéristiques de ce matériau se résument comme suit :

- Grande résistance à la compression.
- Très lourd.
- Très bonne résistance aux agents atmosphériques.
- Se laisse difficilement travailler.
- Existe en de nombreuses couleurs (gris, bleu, noir, rouge, verdâtre).
- Utilisation : Généralement utilisé pour les parements de façades, les escaliers et les perrons.

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X (analyse quantitative) a été réalisée sur des échantillons de roches granit au laboratoire de minéralogie de l'université de Nancy 1 (France). Les résultats ont été confirmés au niveau du centre de recherche et du développement de Boumerdes. En effet, le minéral dominant est le Quartz dont le pourcentage oscille entre 55 et 75%, et les minéraux accessoires sont : l'albite (feldspath) (15 à 25%), la muscovite (5 à 15%) et d'autres minéraux dont le pourcentage est inférieure à 5%.

Les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau granit sont regroupées respectivement dans les tableaux (II.1) et (II.2) suivants :

Caractéristiques	γ_s (g/cm ³)	n (%)	γ_d (g/cm ³)	ϵ_{\min}	ϵ_{\max}
physiques					
Granit	2.67	12.28	1.785	0.41	1.17

Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du matériau granit.

Caractéristiques	MDE(%)	LA (%)	W_{opt}	I_{CBR}	Résistance à la compression (Mpa)
mécaniques					
Granit	51.9	28	9.22	38.78	100 - 280

Tableau II.2 : Caractéristiques mécaniques du matériau granit.

3.2. Le grès

Les principales définitions de ce matériau se résument comme suit :

3.2.1. Définitions

Le matériau étudié est extrait au lieu dit « Yakourène », situé à 70 Km à l'Est du chef lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Le grès est une roche détritique, issue de l'agrégation et la cimentation (ou diagenèse) de grains de sable. Il s'agit par conséquent d'une roche cohérente et dure. Ces grains sont fréquemment composés de silice, mais ils peuvent avoir d'autres compositions. On parle alors plutôt d'arénite, surtout si les grains sont carbonatés.

Le grès est une roche sédimentaire détritique constituée par l'agglomération de nombreux petits grains unit par un ciment naturel de composition variable.

Le grès est une roche détritique, poreuse, fréquemment litée, constituée de sable lié par un ciment siliceux ou calcaire.

Le grès est une roche sédimentaire qui provient de la décomposition et de la transformation de roches anciennes. En fait, c'est une roche détritique (du latin détritius : débris) formée de grain de nature variable (quartz, feldspaths, calcaire...) agglomérés par un ciment siliceux. Il est généralement de couleur claire, virant au jaune ou au gris.

Le grès est une roche sédimentaire à gros grains qui est composée de masses consolidées de sable, ces dernières sont déposées par le mouvement de l'eau ou du vent dont la taille des grains est inférieure à 2mm. La constitution chimique du grès est composée essentiellement du quartz. Le matériau qui lie les grains entre eux est généralement composé de silice, de carbonate de calcium ou d'oxyde de fer. C'est ce liant qui, confère au matériau sa couleur, ainsi l'oxyde de fer donne un grès rouge ou brun rougeâtre et les autres donnent un grès blanc, jaunâtre ou grisâtre. La rupture de grès est caractérisée par la fracture du ciment mais pas des grains, qui eux restent entiers.

Les grès tirent leurs appellations de liant qui relie leurs grains. On peut trouver des grès siliceux si le liant est la silice, grès calcaire ou argileux s'il s'agit du calcaire ou bien de l'argile comme liant. Et des grès ferrugineux si le ciment est un hydroxyde de fer.

La figure suivante, montre les trois classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) nécessitées par nos essais, obtenues après concassage manuel.



Figure II.2 : Les échantillons du matériau grès utilisés pour cette étude.

3.2.2. Formations

Les dépôts successifs de sable se retrouvent dans la stratification du grès. La cimentation des grains se fait par précipitation et cristallisation des sels dissous dans l'eau interstitielle. On nomme ce processus la «grésification». La roche prend des couleurs différentes selon la présence d'oxyde de fer.

Les grains, et le ciment entre ces grains peuvent avoir une composition différente selon l'origine et l'histoire de ce grès.

Si les grains sont peu cimentés, le grès est particulièrement poreux ; les couches géologiques constituées de tels grès peuvent former de bons réservoirs d'eau, de pétrole ou de gaz.

3.2.3. Les différents types de grès

Les différents types de grès sont :

1. Une arkose est un grès grossier, feldspathique, à peine lité, fréquemment issu de l'induration d'une arène granitique.
2. Une psammite est un grès micacé.
3. Un grès quartzeux, est composé seulement de quartz.
4. Un quartzite est un grès particulièrement siliceux à ciment siliceux, provient de la diagenèse ou du métamorphisme de sable quartzeux.

5. Une grauwacke est un grès gris-sombre, brun... particulièrement dur, contenant en plus des grains de quartz d'autres éléments de roches diverses.
6. Grès à ciment siliceux.
7. Grès ferrugineux à ciment siliceux.
8. Grès à ciment calcaire (ciment constitué de calcite).

D'après l'étude qui a été faite en 1994 par l'Office National de Recherches géologiques et Minières (O.R.G.M), le territoire de la Wilaya de Tizi-Ouzou, dispose de deux types de grès :

-Les grès numidiens

-Les grès miocènes.

a) Les grès numidiens : Sont quartzeux de couleurs gris à gris claire, parfois blancs à grains moyens à gros, ils se présentent en gros blocs métriques intercalés de pélites, épais de plusieurs centaines de mètres, ils constituent en volume l'essentiel de la série numidienne.

Les grès numidiens sont de qualités supérieures à celles des miocènes.

Les principaux minéraux des grès numidiens donnés (O.R.G.M) de Tizi-Ouzou sont présentés dans le tableau (II.3) suivant :

Si O ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ti O ₂	CaO	MgO	MIO	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
91,57%	0,10%	0,04%	0,15%	0,10%	0,02%	0,02%		0,01%	0,29%
à	à	à	à	à	à	à	0,05	à	à
98,64%	1,8%	3,6%	0,36%	1,05%	0,21%	0,05%		0,51%	1,35%

Tableau II.3 : Composition minéralogique du grès numidien

b) Les grès miocènes : Les grès d'origine miocène sont totalement différents de ceux du numidiens, ils sont de couleur ocreuse, friables à ciment carbonaté.

Il s'agit de grès silico-argileux.

Les principaux minéraux des grès numidiens donnés (O.R.G.M) de Tizi-Ouzou sont présentés dans le tableau (II.4) suivant :

Si O ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	PAF
56,18%	1,07%	9,20%	12,58%	12,58%
à	à	à	à	à
76,30%	2,96%	14,10%	14,88%	13,69%

Tableau II.4 : Composition minéralogique du grès miocène

3.2.4. Utilisations

Les grès sont utilisés dans les constructions, la sculpture, la fabrication de meules naturelles et de pavés.

3.2.5. Maçonnerie et sculpture

Le grès est une excellente pierre de construction non gélive, facile à travailler. Il doit être choisi soigneusement en rejetant les pierres fissurées, non homogènes, contenant des trous ou bien des inclusions de galets. Selon la provenance la roche peut être colorée dans une illimitée de nuances : ocre, rose, jaune, orangé, brun, gris, blanc, violacé... et veinée ou marbrée. On peut trouver des blocs de grès bruts de grandes dimensions.

Les applications dans le bâtiment sont particulièrement nombreuses, surtout pour l'ensemble des pierres de taille façonnées et sculptées : appui de fenêtre, seuil de porte, encadrement de fenêtre, linteaux, acrotère, marches d'escalier, margelle de puits, évier en pierre, caniveau, monument, bordure de trottoir, etc.

3.3. Le calcaire

Les principales définitions de ce matériau se résument comme suit :

3.3.1. Définitions

Le matériau étudié est extrait au niveau de la wilaya de « Bouira », distante de 80 Km au Sud du chef lieu de la wilaya de Tizi- Ouzou.

Les calcaires sont des roches sédimentaires massives très répandues, constituées essentiellement de carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme de calcite. Il existe de nombreuses variétés qui possèdent des propriétés assez variables, allant des roches les plus tendres à des roches très dures.

Les roches calcaires sont définies à partir de trois paramètres suivant : la minéralogie, la structure et la porosité. Les calcaires peuvent être employés dans divers domaines de l'industrie vue leur forte teneur en CaCO_3 (95%) (industrie chimique, agriculture). Dans le domaine du génie civil, ils sont utilisés pour la production d'agrégats en tant que matière première à granulats ainsi que la production de pierres de construction.

La figure suivante, montre les trois classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) nécessaires pour nos essais, obtenues après concassage manuel.



Figure II.3 : Les échantillons du matériau calcaire utilisés pour cette étude.

3.2. Formation

Les calcaires se forment par précipitation de carbonate de calcium à partir du bicarbonate ($(\text{CO}_3)_2\text{CaH}_2$) dissous dans l'eau ; cette précipitation est favorisée par certains facteurs physico-chimiques : augmentation de la température de l'eau ou de la teneur en dioxyde de carbone, chute de la pression, etc. Ainsi, les dépôts marins calcaires ne s'effectuent actuellement que dans les régions chaudes et jusqu'à une profondeur limite au-dessous de laquelle la calcite est remise en solution.

Les calcaires issus directement de la précipitation du carbonate de calcium sont relativement rares : ce sont les stalactites, les travertins, les calcaires oolithiques formés de globules millimétriques de calcite précipitées autour d'un noyau en mouvement. Le plus souvent, les calcaires proviennent de l'accumulation, sur place ou après transport, de débris d'organismes calcaires noyés dans un ciment calcaire.

3.3.3. Classification

La classification des calcaires varie selon les critères considérés : présence de divers minéraux, outre la calcite (calcaires argileux, siliceux, etc.) ; mode de formation (sur place : autochtones ; après transport : allochtones) ; nature et mode de cristallisation du ciment (sparitique : grossier, ou micritique : fin).

3.3.4. Utilisations

Les roches calcaires sont fréquentes parmi les couches sédimentaires fossilifères et sont un outil indispensable pour la stratigraphie ; en revanche, il existe peu de roches calcaires au précambrien, du fait du faible développement de la vie à cette époque et surtout de leur métamorphose en marbres au cours des cycles orogéniques successifs postérieurs à leur formation. Les calcaires sont utilisés comme pierres de construction ou d'ornement, pour l'amendement des sols, pour la fabrication de la chaux, etc. Les calcaires argileux sont employés dans la fabrication du ciment.

3.3.2. Caractéristiques

L'analyse effectuée par le laboratoire spécialisé de l'office national de la recherche géologique et minière l'ORGM (Boumerdes 2005) sur des échantillons de roches calcaires, dans le but d'identifier les caractéristiques minéralogiques et chimiques du gisement, a montré que ces derniers se composent : d'oxyde de silicium SiO_2 (~1.75%), d'oxyde de fer FeO_3 (~0.2%), d'oxyde de titane TiO_2

(<0.5%), d'oxyde d'alumine Al_2O_3 (~0.05%), d'oxyde manganèse MnO (~0.05%), d'oxyde de magnésium MgO (0.62%), d'oxyde de sodium Na_2O (<0.5%), d'oxyde de potassium K_2O (<0.5%), d'oxyde sulfurique SO_3 (<0.5%), et avec quantités importantes de la chaux (CaO) 54% environ et de pertes à feu PAF de 43%.

Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques du matériau calcaire sont regroupées respectivement dans les tableaux suivants : (II.5) et (II.6)

Caractéristiques / Matériaux	γ_s (g/cm ³)	n (%)	γ_d (g/cm ³)	ϵ_{min}	ϵ_{max}
Calcaire	2,698	9,37	1,42	0,901	1,206

Tableau II.5 : Caractéristiques physiques du matériau calcaire

Caractéristiques / Matériaux	MDE (%)	LA (%)	γ_{dopt} (g/cm ³)	W_{opt} (%)	Résistance à la compression (Mpa)
Calcaire	20	24	1,62	5,58	50 - 60

Tableau II.6 : Caractéristiques mécaniques du Matériau calcaire

4. Conclusion

Les matériaux locaux étudiés (granit, grès et le calcaire) sont très répandus dans la région de Kabylie en Algérie, situés en surface et près des routes nationales, ce qui rend leur exploitation facile et à moindre coût.

Ces matériaux disposent des principaux minéraux qui sont le quartz, le feldspath et les micas. De ce fait, il est souhaitable de pouvoir les utiliser dans le domaine du génie civil.

Chapitre III

Les essais de laboratoire

CHAPITRE III
LES ESSAIS DE LABORATOIRE

1. Introduction

Pour simuler le comportement du sol en laboratoire, il faut utiliser des essais qui se rapprochent le plus possible de la réalité du terrain sous les diverses actions que subit le sol. Les essais de laboratoire ont pour but de suivre l'évolution et le comportement mécanique d'une éprouvette de sol soumise à un chargement.

Ce chapitre porte sur la description des essais de laboratoire utilisés dans notre étude et qui sont : l'analyse granulométrique par voie sèche et le cisaillement direct à la boîte de Casagrande.

2. Analyse granulométrique par voie sèche

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des tailles d'une population d'éléments finis de matière naturelle ou fractionnée. L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution des tailles des éléments composant la population. La distribution granulométrique est la représentation sous forme de tables de nombres ou de graphiques des résultats expérimentaux de l'analyse granulométrique.

2.1. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

2.1.1. But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux pour permettre de mesurer les paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. L'échantillon utilisé doit donc être représentatif.

2.1.2. Prélèvement d'échantillons

§ Prélèvement sur le tas (sables et graviers)

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments fins. Le prélèvement se fera donc en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas. Ces fractions seront mélangées avec soin ; afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble.

§ Echantillonnage au laboratoire

On peut procéder soit : par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur.

-Par quartage : on divise l'échantillon en quatre parties égales, on retient deux quarts opposés, après homogénéisation on effectue un nouveau quartage, et on répète l'opération trois à quatre fois; ainsi on obtient un échantillon représentatif du matériau initial.

-Par échantillonneur : cet appareil de laboratoire permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée. On répète l'opération trois ou quatre fois jusqu'à l'obtention de la quantité représentative et nécessaire à l'essai.

2.2. Equipements nécessaires

- Une série de tamis.
- Une balance.
- Bacs et brosses.
- Un sol.

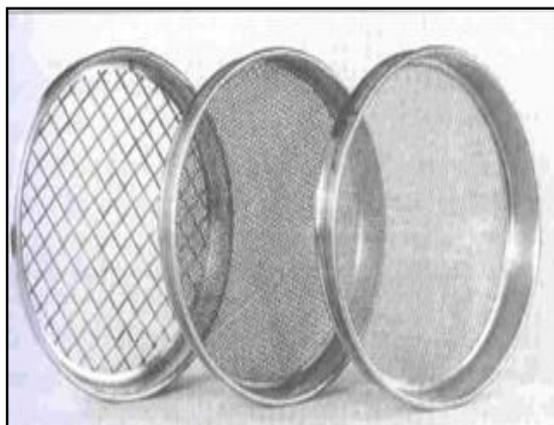


Figure III.1 : Tamis



Figure III.2 : Tamiseuse électrique

2.3. Principe du tamisage

La granulométrie est la mesure de la répartition des grains suivant leur dimension, pour les sols grenus ou pulvérulents : le matériau sera séché à l'étuve à une température de (105°C) pendant 24 heures.

On emboîte les tamis les uns sur les autres, dont leurs ouvertures sont dans un ordre décroissant du haut vers le bas, suivant une progression géométrique de raison $r = \sqrt[10]{10}$.

En partie inférieure on dispose un fond étanche, et en haut, un couvercle sera disposé afin d'éviter toute perte du matériau pendant le tamisage.

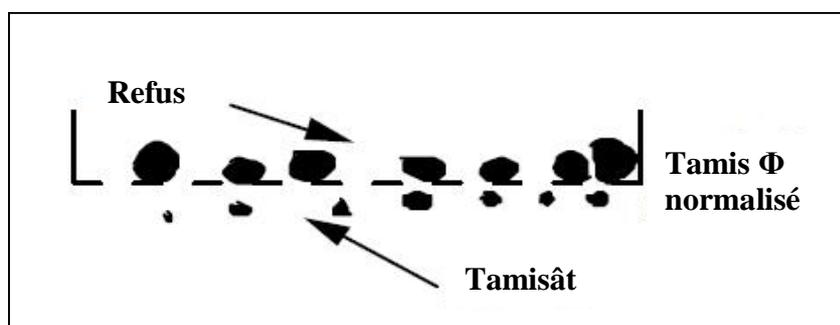


Figure III.3 : Résultat du tamisage

- Le poids du matériau passant par le tamis est **le tamisât**.
- Le poids du matériau retenu par ce même tamis est **le refus**.

2.4. Expression des résultats (courbe granulométrique)

Une courbe granulométrique permet d'identifier le type de sol qui compose l'échantillon analysé.

-On appelle coefficient d'uniformité ou de HAZEN le coefficient C_u .

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Avec :

D_{60} Représente le diamètre pour lequel 60 % en masse des particules ont un diamètre \leq à D_{60}

D_{10} Représente le diamètre pour lequel 10 % en masse des particules ont un diamètre \leq à D_{10}

- si $C_u > 2$: la granulométrie est dite étalée.
- si $C_u < 2$: la granulométrie est dite étroite.

-On appelle coefficient de courbure le coefficient C_c .

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

- si $C_u > 2$ et $1 < C_c < 3$; le sol est dit bien gradué.

D_{30} Représente le diamètre pour lequel 30 % en masse des particules ont un diamètre \leq à D_{30}

▼ Commentaires

Le tamisage est l'une des méthodes d'analyse granulométrique, et la plus largement utilisée.

Mais le tamisage ne convient pas pour tous les sols, surtout lorsque leur structure est hétérogène, les particules de forme lamellaire ou fibreuse : dans ce cas, les dimensions des particules classées au cours d'un tamisage n'ont qu'un rapport plus ou moins lointain avec l'ouverture des mailles du tamis.

Cet essai peut être appliqué pour des granulats non souillés par une fraction argileuse significative. Il est alors impératif de prendre toutes les précautions nécessaires pour que les éléments fins, présents dans l'échantillon, ne soient pas perdus.

Pour des échantillons pollués par une fraction argileuse, il est nécessaire de procéder par voie humide.

La reconnaissance du sol est préliminaire et indispensable de tout projet de construction afin de connaître son comportement pour pouvoir, par la suite, prendre les mesures appropriées pour la réalisation du projet.

L'un des moyens les plus utilisés est de prélever un échantillon le plus intact possible, et le soumettre à une analyse granulométrique par tamisage. Les résultats ainsi obtenus dans la courbe granulométrique permettent à l'ingénieur d'identifier et de classer le sol.

En dépit de ses avantages, l'analyse granulométrique présente toutefois des inconvénients, à savoir des perturbations lors de l'analyse, dues à la pesée et aux grains collés entre les mailles. En sus de la perte des grains sous forme de poussière lors du tamisage.

3. Cisaillement direct à la boîte

3.1. But de l'essai

L'essai de cisaillement direct a pour but de déterminer des paramètres de résistance du sol, l'angle de frottement interne (φ) et la cohésion (c), qui sont déterminés par la courbe intrinsèque ou **droite de Coulomb**.

3.2. Préparation des échantillons pour les essais

Les essais de cisaillement sont réalisés selon la norme française (NF P94-071-1), sur les échantillons de 179g à l'état sec et lâche.

Trois types de matériaux granulaires ont été utilisés (le granit, le grès et le calcaire).

Pour chaque matériau, on a retenu trois classes granulaires : (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

- Les classes granulaires ont été obtenues à partir des pourcentages suivants :

$$\text{La classe granulaire (3,15/5)} \left\{ \begin{array}{l} \Phi 3.15 \Rightarrow 10\% \Rightarrow 17.9\text{g} \\ \Phi 4 \Rightarrow 50\% \Rightarrow 89.5\text{g} \\ \Phi 5 \Rightarrow 40\% \Rightarrow 71.6\text{g} \\ \hline 179\text{g} \end{array} \right.$$

$$\text{La classe granulaire (5/8)} \left\{ \begin{array}{l} \Phi 5 \Rightarrow 10\% \Rightarrow 17.9\text{g} \\ \Phi 6.30 \Rightarrow 50\% \Rightarrow 89.5\text{g} \\ \Phi 8 \Rightarrow 40\% \Rightarrow 71.6\text{g} \\ \hline 179\text{g} \end{array} \right.$$

$$\text{La classe granulaire (3,15/8)} \left\{ \begin{array}{l} \Phi 3.15 \Rightarrow 8\% \Rightarrow 14.32\text{g} \\ \Phi 4 \Rightarrow 25\% \Rightarrow 44.75\text{g} \\ \Phi 5 \Rightarrow 34\% \Rightarrow 60.86\text{g} \\ \Phi 6.30 \Rightarrow 25\% \Rightarrow 44.75\text{g} \\ \Phi 8 \Rightarrow 8\% \Rightarrow 14.32\text{g} \\ \hline 179\text{g} \end{array} \right.$$

3.3. Appareillage

▼ La boîte de cisaillement

Il existe différents modèles de boîtes de cisaillement, dans laquelle est mise l'éprouvette d'essai, mais tous répondent au principe schématisé sur les figures (III.4) et (III.5) suivantes.

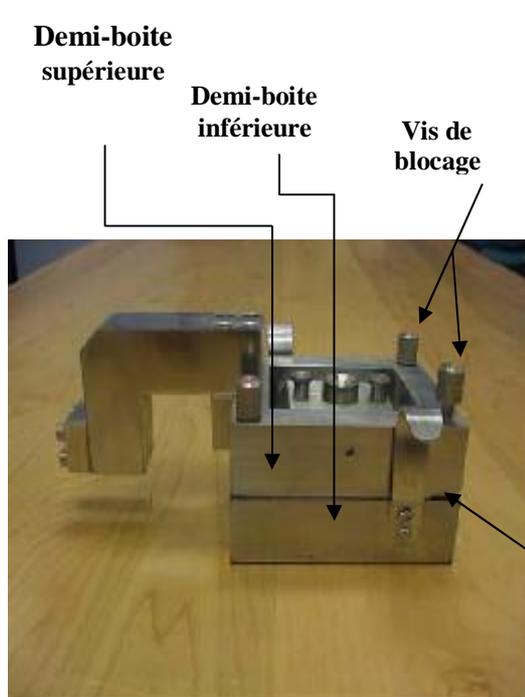


Figure III.4 : Boîte de cisaillement

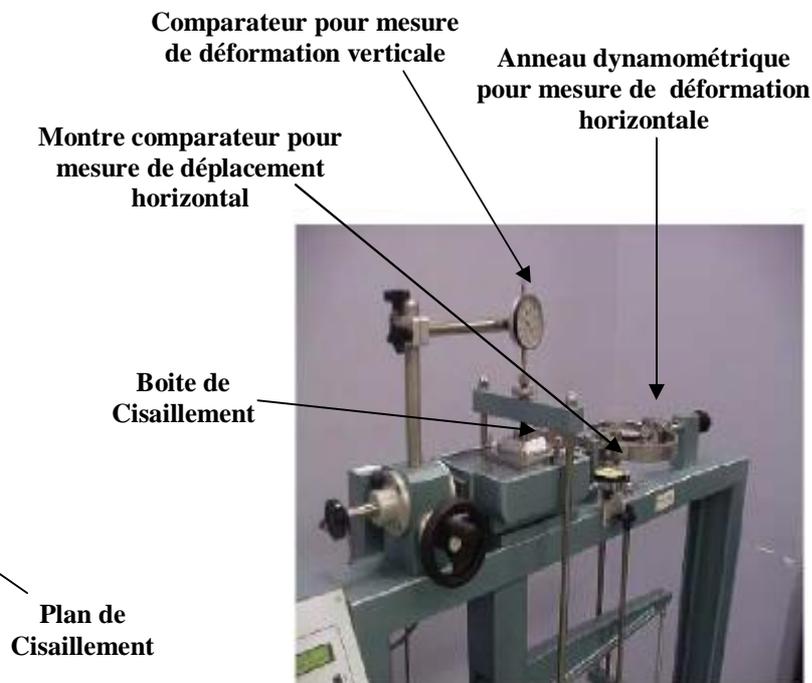


Figure III.5 : Appareillage complet

La boîte de cisaillement comporte essentiellement :

- Une demi-boîte inférieure, munie d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée ;
- Une demi-boîte supérieure ;
- Un piston, muni à sa base d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée, glissent librement dans la demi-boîte supérieure transmettant à l'éprouvette l'effort vertical exercé ;
- Deux goupilles, solidarissant les deux demi boîtes, avant l'essai.
- Les poids : Ce sont des disques plats fendus, permettant leur centrage et leur superposition sur le plateau de charge du levier du bâti.

- Les dimensions intérieures des demi boîtes couramment utilisées sont de 6×6 cm. (C'est les dimensions choisies pour nos essais).
- La profondeur de la demi-boîte inférieure ou supérieure est de 2 cm.

3.4. Principe de l'essai

L'essai de cisaillement direct est parmi les plus anciennes méthodes, issu des expériences de **Coulomb**. L'idée première d'une boîte de cisaillement appartient au français **Alexandre Colin** (1846), dont la forme la plus récente, qu'on lui connaît actuellement, a été élaborée par **Arthur Casagrande** en 1932. Cet essai s'effectue à l'aide d'une boîte de cisaillement, dans laquelle on cherche à obtenir la rupture de l'échantillon. Cette boîte est constituée de deux parties se déplaçant l'une par rapport à l'autre dans un plan horizontal.

On choisit la boîte de cisaillement en fonction du type de sol. La boîte dont la section intérieure est carrée convient parfaitement aux sols pulvérulents, tandis qu'il est indiqué d'employer la boîte circulaire pour les sols cohérents. La largeur ou le diamètre intérieur de la boîte devrait être supérieure à 50 mm, jamais être inférieurs à dix fois le diamètre équivalent des plus grosses particules. Dans le cas des sables, on se sert couramment de la boîte de cisaillement carrée de 60 mm de côté. Si le sol contient une certaine quantité de gravier, il faudra utiliser une boîte de 100 mm de côté.

L'essai de cisaillement donc, consiste à assembler solidement les deux parties de la boîte de cisaillement au moyen des deux vis de blocage. On installe ensuite la plaque de base de la boîte, puis on place une plaque métallique rainurée et perforée. On place notre échantillon dans la boîte de cisaillement dite « **boîte de Casagrande** », une fois l'échantillon est placé, on remet une autre plaque métallique rainurée, et ensuite le répartiteur (chapeau) de charge verticale. Et on le soumet à une charge verticale N , résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale respectivement de (100,300 et 400 kPa), maintenue constante tout le long de l'essai. On soumet ensuite l'échantillon à une contrainte tangentielle T , due au déplacement de la demi-boîte inférieure à une vitesse constante qui est de 1,5 mm/min pour un essai non consolidé non drainé (**UU**), jusqu'à la rupture de l'échantillon. Le plan de rupture se développe le long du plan horizontal imposé par le déplacement de la demi-boîte inférieure par rapport à la demi-boîte supérieure de la boîte de Casagrande (Figure III.6).

Les essais ont été réalisés en respectant les étapes suivantes

- Régler la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement relatif constant entre les demi-boîtes. (1,5mm/min) est la vitesse utilisée dans nos essais.
- Mettre tous les comparateurs (déplacement horizontal et vertical) à zéro.

-Actionner la machine et prendre les lectures sur les trois comparateurs simultanément, à des intervalles de temps réguliers (toutes les 15 secondes).

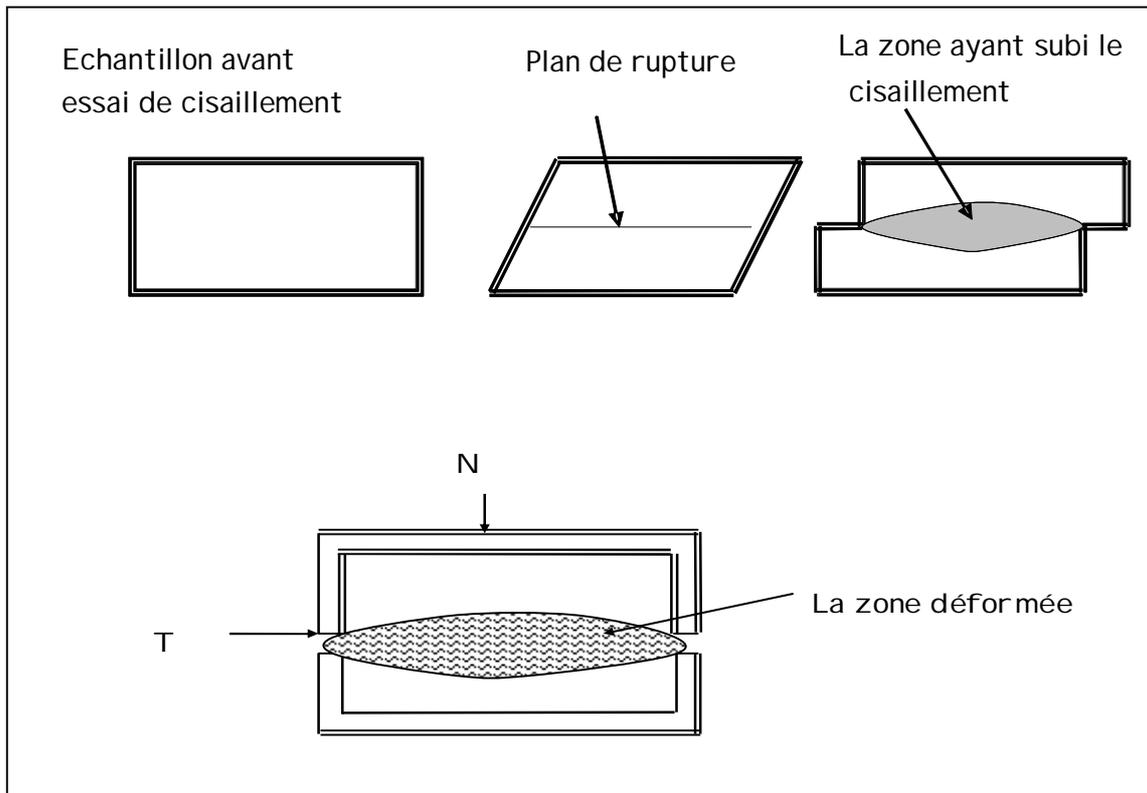


Figure III.6 : mode de rupture dans la boîte de cisaillement

Ø Fin de l'essai

- Enlever les poids du plateau de charge ;
- Débloquer l'anneau dynamométrique ;
- Enlever la boîte de chariot de la machine ;
- Sortir l'éprouvette de la boîte ;
- Mesurer le poids spécifique final ;
- Examiner les plans de rupture, noter les particularités ;
- Prendre au besoin une photo ;
- Nettoyer soigneusement les pierres poreuses ;
- Bien nettoyer les boîtes de cisaillement.

Ø Résultats

L'objectif de l'exploitation des résultats est de construire, dans le plan de **Mohr** (σ, τ), la droite intrinsèque de (**Coulomb**) afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du sol étudié. Les résultats des essais nous permettent aussi, de tracer les courbes suivantes : (Figure III.7).

• Courbes contraintes-déformations

Les courbes contraintes-déformations obtenues au cours des essais de cisaillement présentent d'une manière générale l'une des allures suivantes :

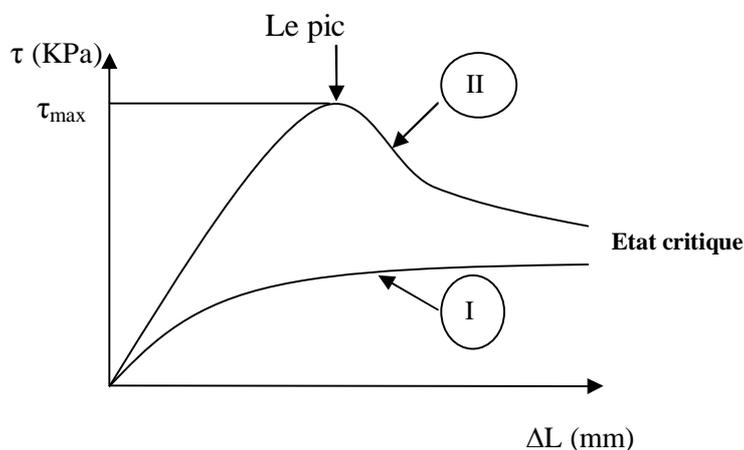


Figure III.7 : Courbe « contraintes-déformations » d'un sol pulvérulent lors d'un essai de cisaillement.

Comportement des sols pulvérulents (graviers et sables)

- La courbe I, correspond à des **sols lâches (cas de nos échantillons)** qui se densifient pendant le cisaillement (sols contractants), jusqu'à atteindre au voisinage de la surface de rupture, un certain poids volumique dit poids volumique critique, également traduit par un indice des vides critique.

- Les essais menés sur des **sols denses** qui se décomposent pendant le cisaillement (sols dilatants) conduisent à des courbes ayant l'allure de la courbe II. La contrainte de cisaillement passe par un maximum, puis décroît vers une valeur sensiblement constante. Deux résistances au cisaillement sont alors distinguées : une résistance maximale (résistance de pic) servant à définir la résistance au cisaillement, et une résistance sous grande déformation, dite résistance à l'état de critique.

✓ Commentaires

- L'essai à la boîte de **Casagrande** nous permet de tracer la courbe intrinsèque de la variation de la contrainte de cisaillement ' τ ' en fonction de la variation de la contrainte normale ' σ ' afin de déduire les caractéristiques mécaniques du sol étudié, à savoir la cohésion du sol « C » et l'angle de frottement interne « φ ».

La boîte de Casagrande présente plusieurs défauts, plusieurs imperfections.

- Tout d'abord la surface de l'échantillon, soumise aux efforts de cisaillement, varie au cours de l'essai puisqu'il y a déplacement relatif des deux demi boîtes.

- Le plan de rupture est imposé.

- La répartition des contraintes sur le plan de cisaillement n'est pas uniforme, la contrainte de cisaillement est maximale au centre de l'échantillon et décroît pour s'annuler vers les bords, tandis que la répartition de la pression verticale est commandée par les légers mouvements du piston qui ont souvent tendance à basculer. C'est là une deuxième source d'erreur importante.

- Les efforts de frottement parasites sont mal connus et difficiles à prendre en compte. Il s'agit principalement du frottement des parties métalliques de la demi-boîte supérieure sur la partie cisailée de l'échantillon. De nombreux phénomènes restent inexpliqués et les résultats expérimentaux sont assez peu comparables.

- Les chercheurs ont essayé à améliorer l'appareil classique en utilisant un échantillon de forme torique (appareil de **Kérisel**) pour lequel la surface de cisaillement ne varie pas au cours de l'expérience.

Toutefois, la boîte de **Casagrande** reste, en dépit de ses imperfections, le seul dispositif utilisé dans la pratique courante pour la détermination de la résistance au cisaillement des sols.

Aujourd'hui, les chercheurs ont amélioré le système d'essai en introduisant un logiciel à l'appareil de cisaillement et à supprimer les comparateurs pour les remplacer par des capteurs, et à supprimer les charges indirectes, c'est-à-dire que notre système moderne applique les charges normales d'une façon directe au moyen de capteur de charge.

4. Conclusion

Malgré les difficultés rencontrées lors de la mesure et les anomalies dues aux imperfections des appareils, les essais de laboratoire demeurent indispensables pour l'identification des sols et la détermination de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Les appareils définis dans ce chapitre, permettront de réaliser les différents essais nécessaires pour notre étude et ainsi faire l'interprétation des résultats au chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultats et interprétation

CHAPITRE IV**RESULTATS ET INTERPRETATIONS****1. Introduction**

Les résultats des échantillons des matériaux (granit, grès et calcaire) soumis au cisaillement direct à la boîte de Casagrande sont représentés sous forme de courbes contraintes-déformations et courbes granulométriques avant et après essai de cisaillement, tout en faisant varier les paramètres suivants :

- La contrainte normale (100,300 et 400 KPa);
- La taille des grains : trois classes granulaires ont été utilisées (3,15/5, 5/8 et 3,15/8) pour chaque matériau.

2. Présentation et interprétation des résultats**2.1. Courbes contraintes-déformations****2.1.1. Courbes contraintes-déformations du matériau granit**

La figure (IV.1) présente la courbe $\tau = f(\Delta L)$ du matériau granit pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

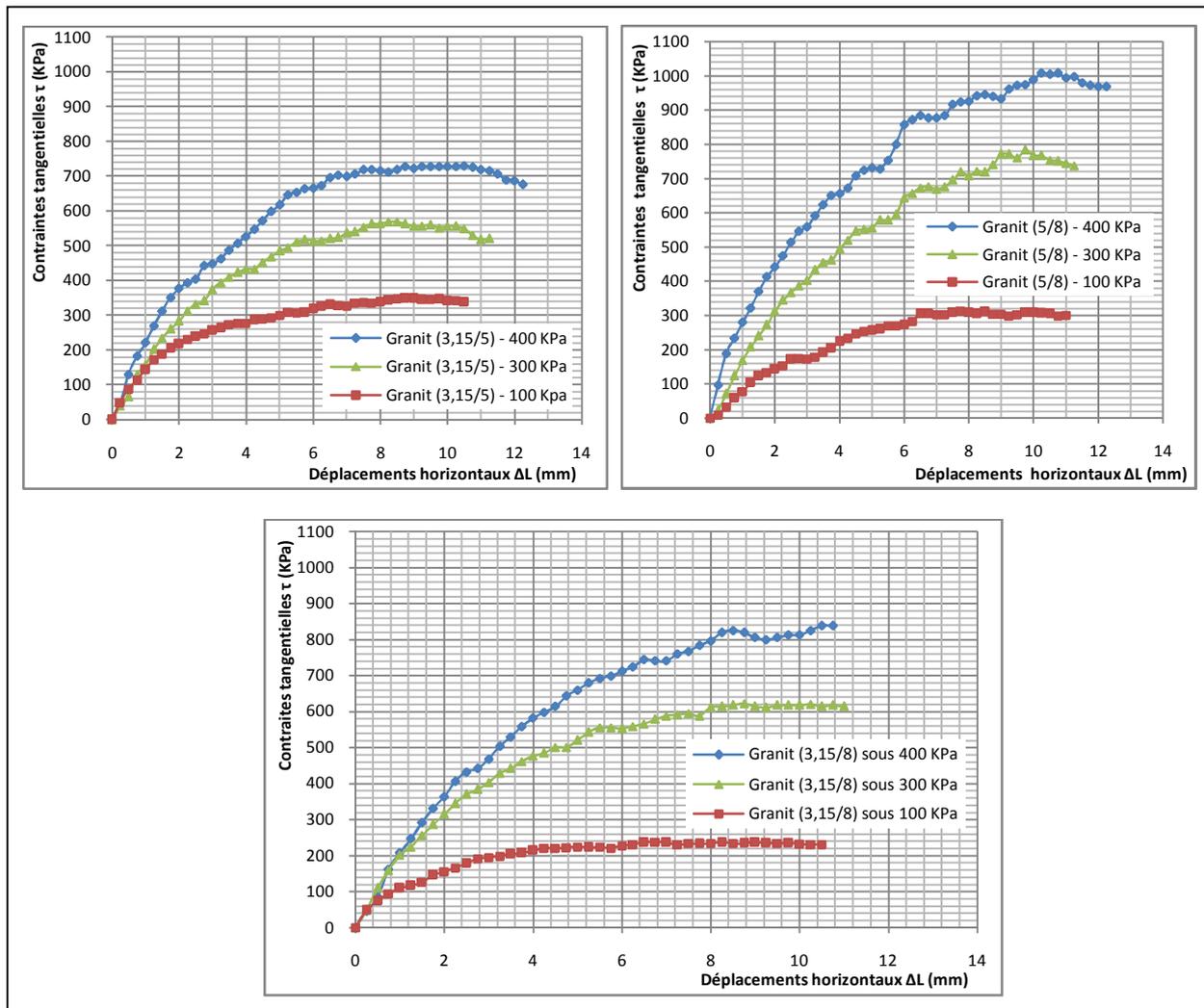


Figure IV.1: Courbes contraintes-déformations du matériau granit pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

2.1.2. Courbes contraintes-déformations du matériau grès

La figure (IV.2) présente la courbe $\tau=f(\Delta L)$ du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

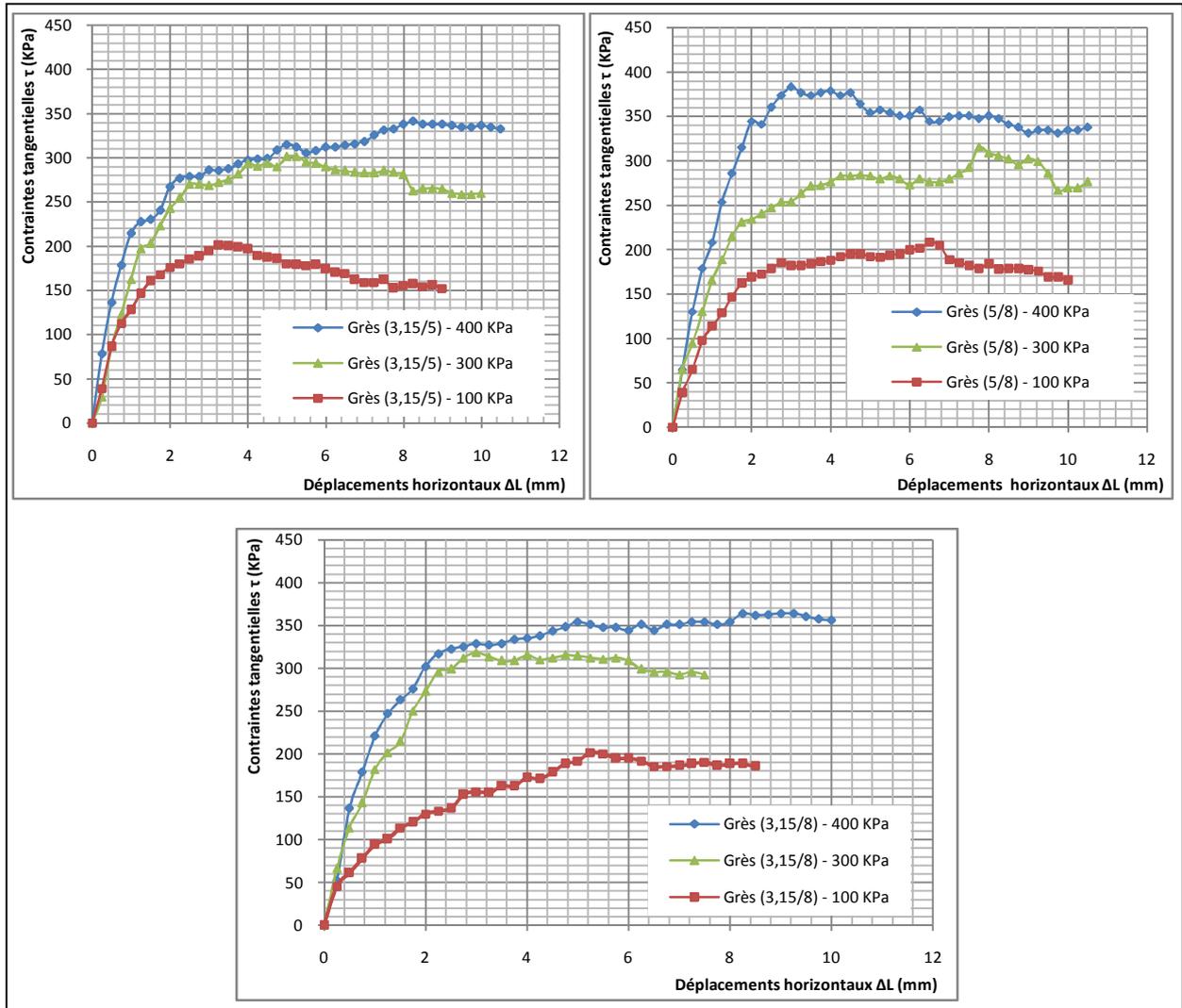


Figure IV.2: Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

2.1.3. Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire

La figure (IV.3) présente la courbe $\tau=f(\Delta L)$ du matériau calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

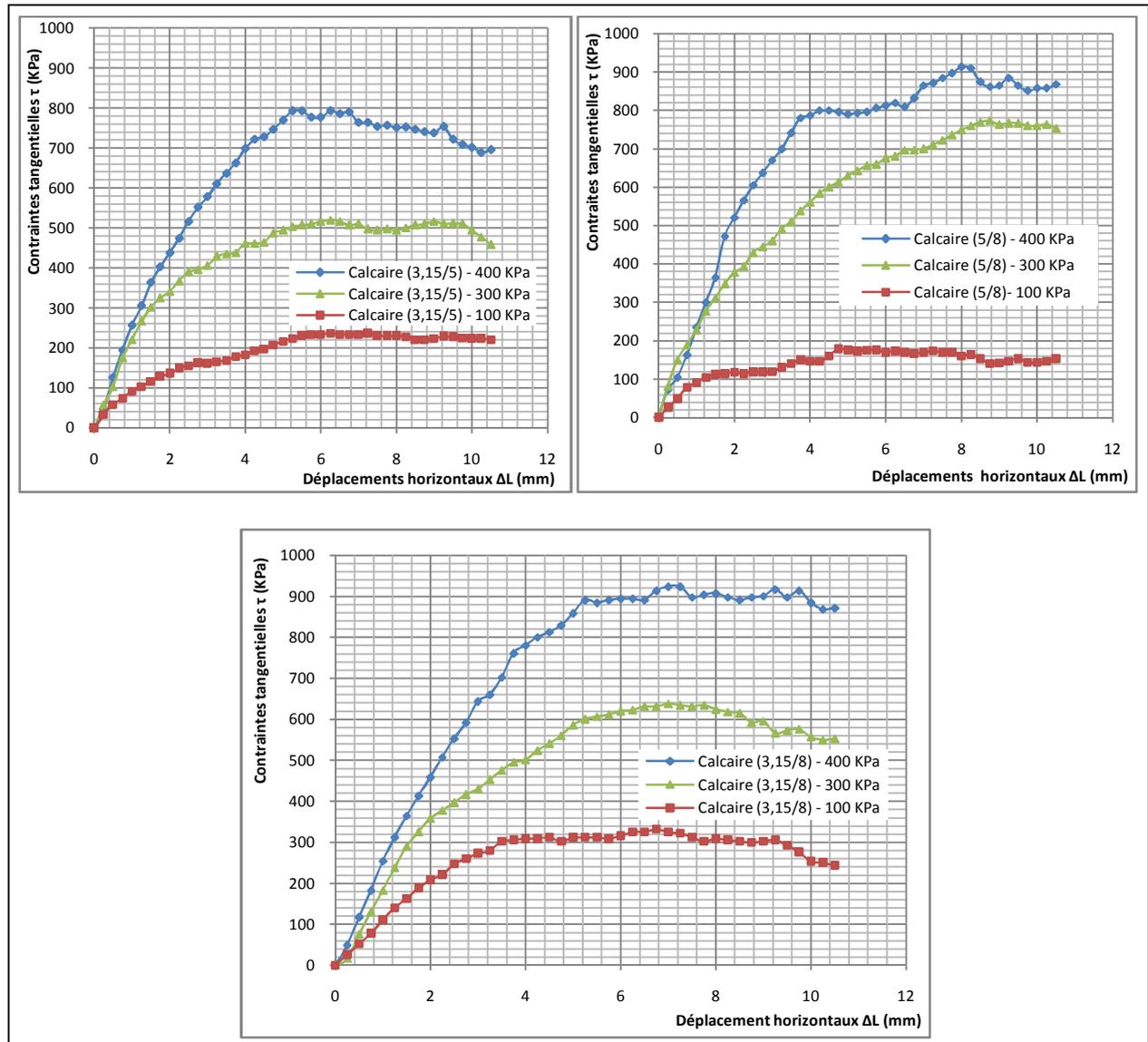


Figure IV.3: Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

Ø Interprétation des résultats :

Les courbes Contraintes – Déformations; représentées sur les figures (IV.1), (IV.2) et (IV.3); montrent que :

- La contrainte de cisaillement des matériaux étudiés (granit, grès et calcaire) augmente en fonction de la contrainte normale appliquée.

- L'application d'une contrainte normale de plus en plus importante engendre un enchevêtrement et un frottement de plus en plus important entre les grains, ce qui empêche leur déplacement horizontal les uns par rapport aux autres et seront ainsi, plus susceptibles à se casser qu'à se déplacer, tout en sachant que la force nécessaire pour casser un grain est beaucoup plus importante que celle nécessaire pour le déplacer.

2.2. Courbes granulométriques avant et après essai de cisaillement

Les courbes granulométriques présentées sur les figures (IV.4), (IV.5) et (IV.6) montrent l'évolution de la structure granulaire des échantillons étudiés après les essais de cisaillement.

La granulométrie des échantillons est influencée par :

-La contrainte normale appliquée : (100, 300 et 400 kPa).

-La taille et la forme des grains.

2.2.1. Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau granit

La figure (IV.4) présente les courbes granulométriques du matériau granit pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

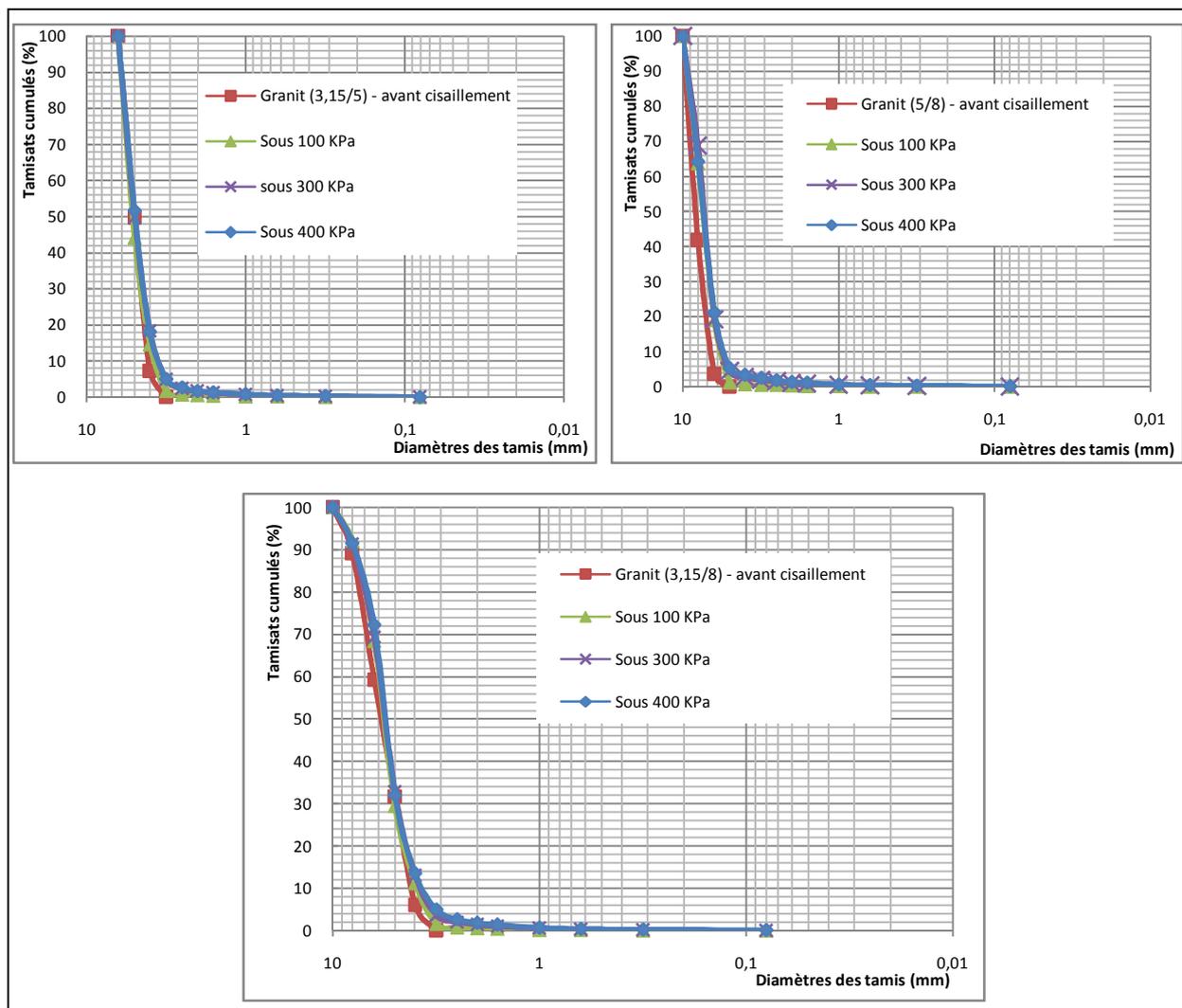


Figure IV.4: Courbes granulométriques du matériau granit pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

2.2.2. Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès

La figure (IV.5) présente les courbes granulométriques du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

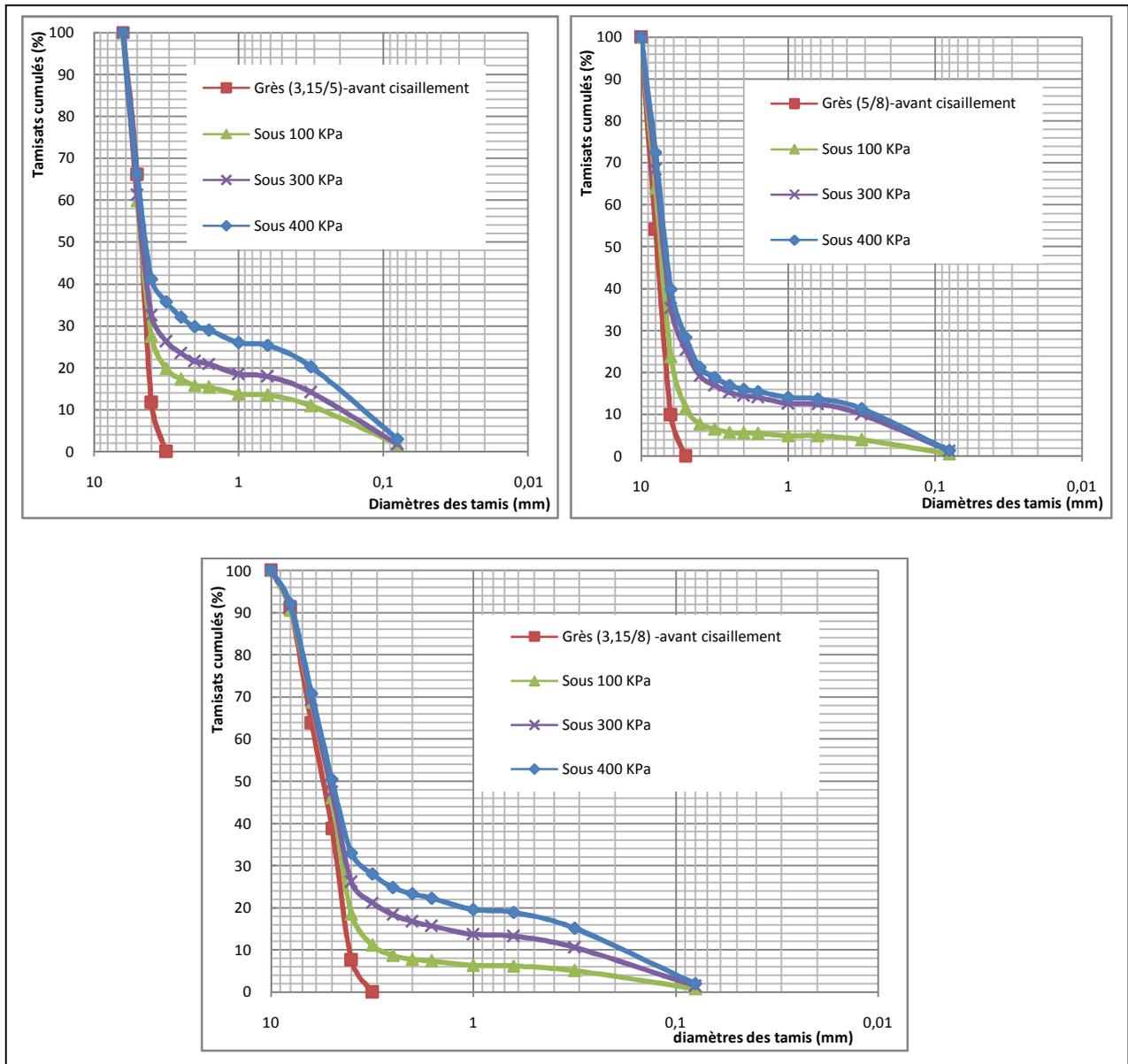


Figure IV.5 : Courbes granulométriques du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

2.2.3. Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire

La figure (IV.6) présente les courbes granulométriques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

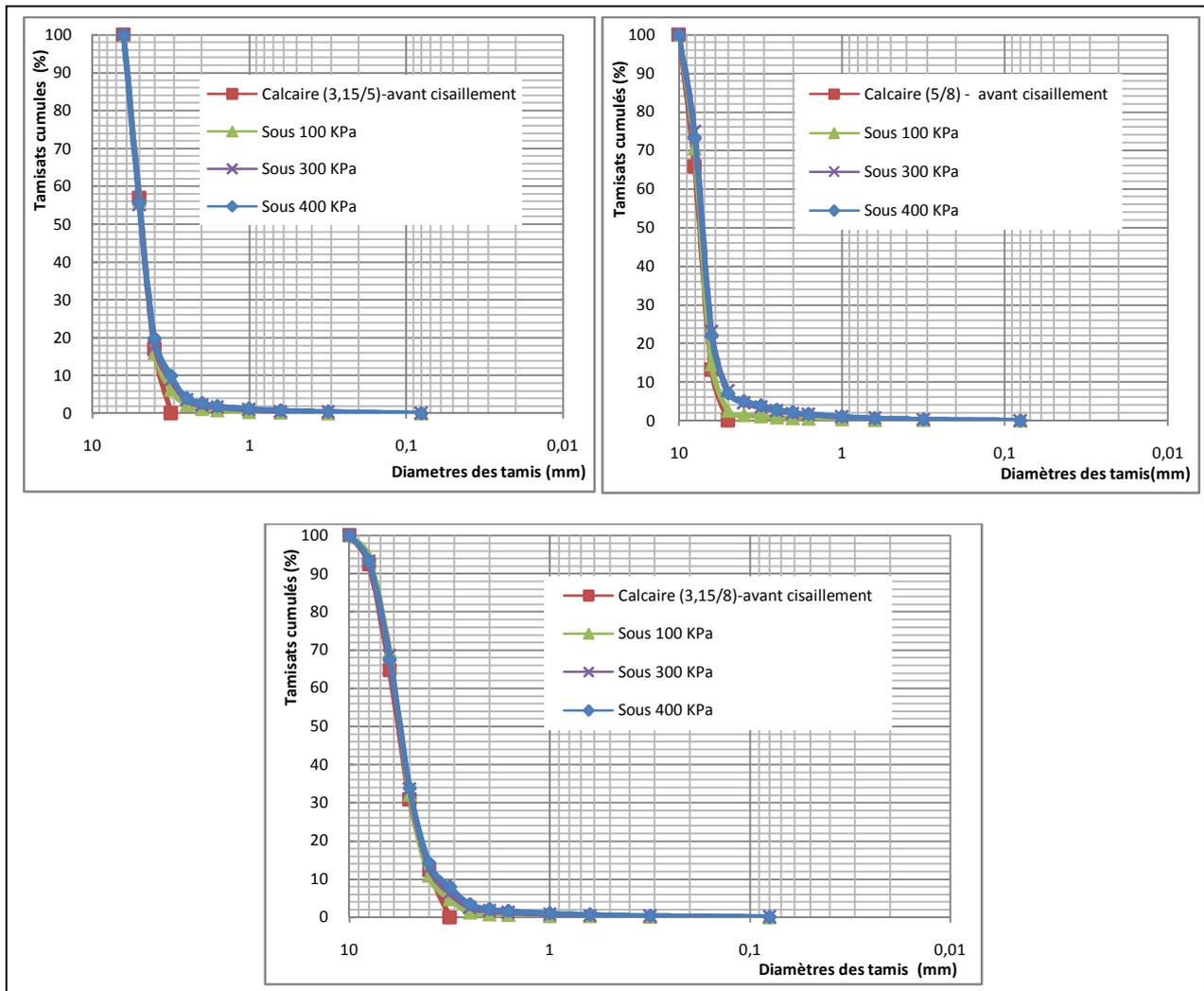


Figure IV.6: Courbes granulométriques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

Ø Interprétation des résultats

- L'étalement des courbes granulométriques évolue en fonction de la contrainte normale appliquée, ce qui se traduit par un écrasement de plus en plus important des grains [Biarez et al. 1997].
- Plus la contrainte normale appliquée augmente, plus les courbes granulométriques après essai se décalent davantage ; ce qui traduit qu'il y a plus d'écrasement. Les grains sont plus serrés sous les fortes contraintes normales et sont ainsi plus exposés à l'écrasement qu'au déplacement.

2.3. Influence de la classe granulaire (la taille des grains)

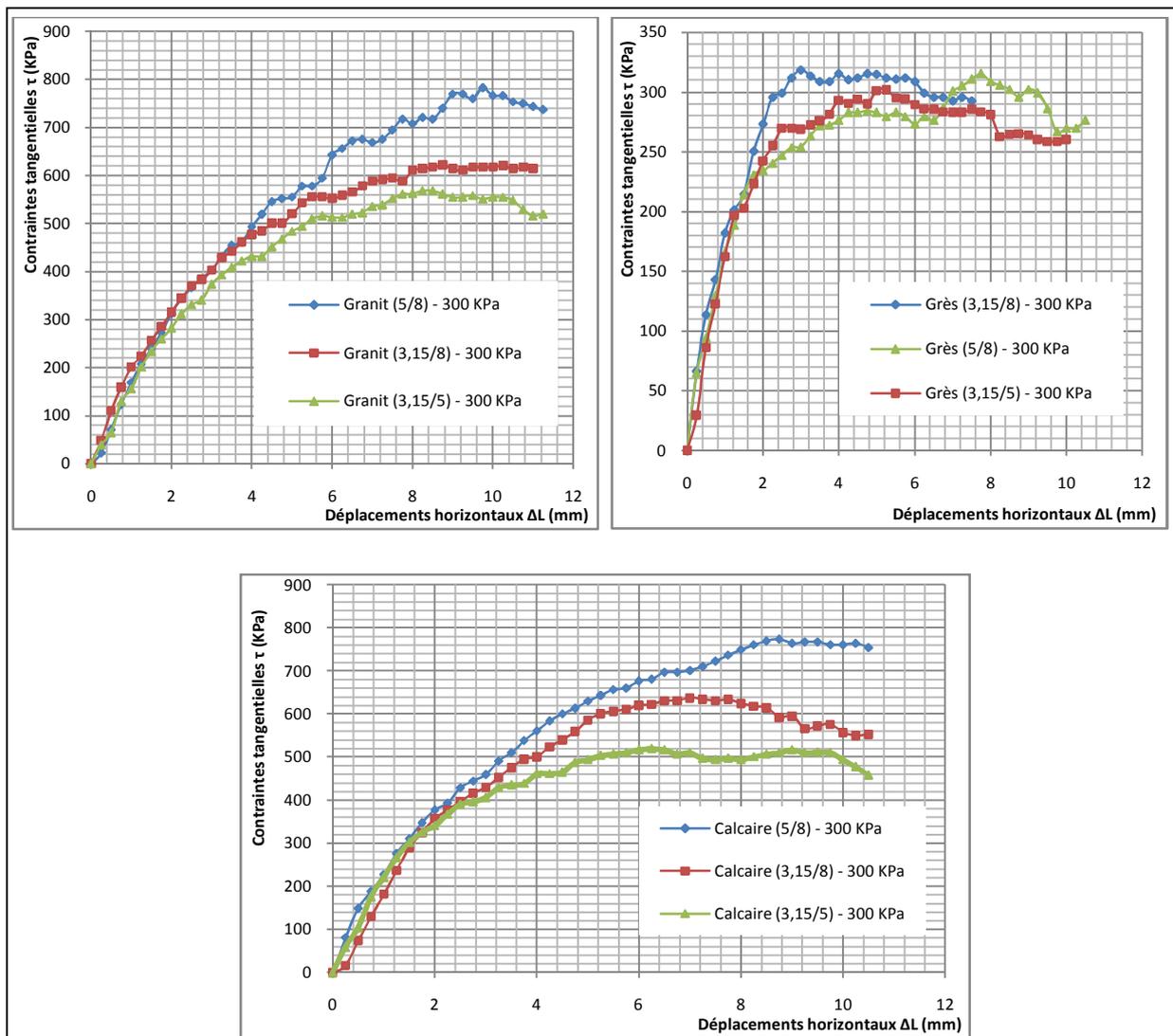


Figure IV.7 : Courbes contraintes - déformations des matériaux granit, grès et calcaire sous une contrainte normale de 300 kPa pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

Ø Interprétation des résultats

Les courbes contraintes - déformations des matériaux granit, grès et calcaire soumis aux essais de cisaillement direct sous une contrainte normale de 300 kPa, pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) montrent que :

- Pour le granit et le calcaire, c'est la classe granulaire (5/8) qui donne la résistance au cisaillement maximale.

- Ce qui peut s'expliquer que les gros grains résistent plus au cisaillement par rapport aux petits grains sous la même contrainte normale. La résistance au cisaillement augmente avec la taille des grains. Des résultats concordants ont été trouvés par HADDAD rachid (2005).
- Les gros grains (5/8) résistent mieux car ils présentent moins de déplacements dans l'échantillon lors du cisaillement. Car la rupture de l'échantillon concerne uniquement la zone située entre les deux demi-boîtes (voir figure IV.8) :

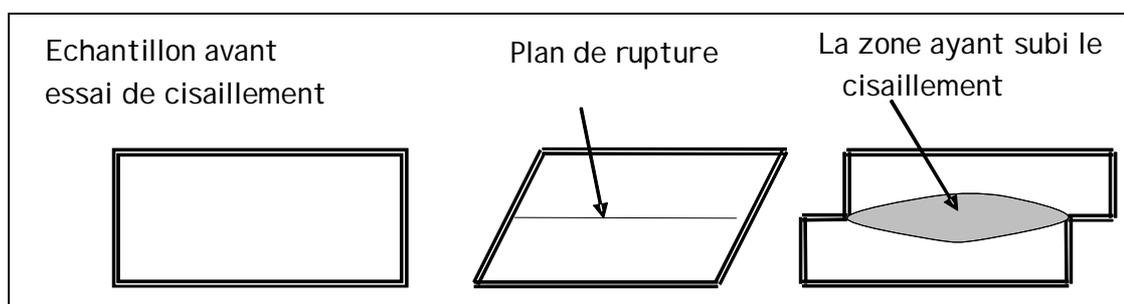


Figure IV.8 : La zone cisailée

Alors il est plus facile de cisailier ou de déplacer latéralement des grains de faibles diamètres que ceux de tailles plus grandes du fait de l'enchevêtrement des grains entre eux.

- Les gros grains (5/8) résistent mieux car ils présentent un pourcentage de quartz élevé : Plus la taille des grains est grande plus la quantité du quartz est élevée et plus le grain est résistant.

- Pour le grès toutes les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) tendent vers un palier. Et la résistance au cisaillement maximale est obtenue pour la classe granulaire (3,15/8).

Ce qui peut s'expliquer par le fait que le grès est un matériau fragile, rugueux et qu'il s'effrite facilement à cause du ciment qui lie les grains entre eux. D'où la rupture du grès est caractérisée par la fracture du ciment mais pas des grains, qui eux restent entiers.

- La résistance au cisaillement maximale, pour les trois matériaux de l'étude est obtenue pour le matériau granit, cela est dû à sa minéralogie (à savoir le pourcentage élevé du quartz). Car la rupture d'un grain dépend d'un certain nombre de facteurs, en particulier la minéralogie du matériau [Cambou. 1972].

Dans notre étude, on a constaté expérimentalement, que le matériau granit résiste mieux que le calcaire et celui-ci résiste mieux que le grès.

2.4. Etalement des courbes granulométriques en fonction des classes granulaires

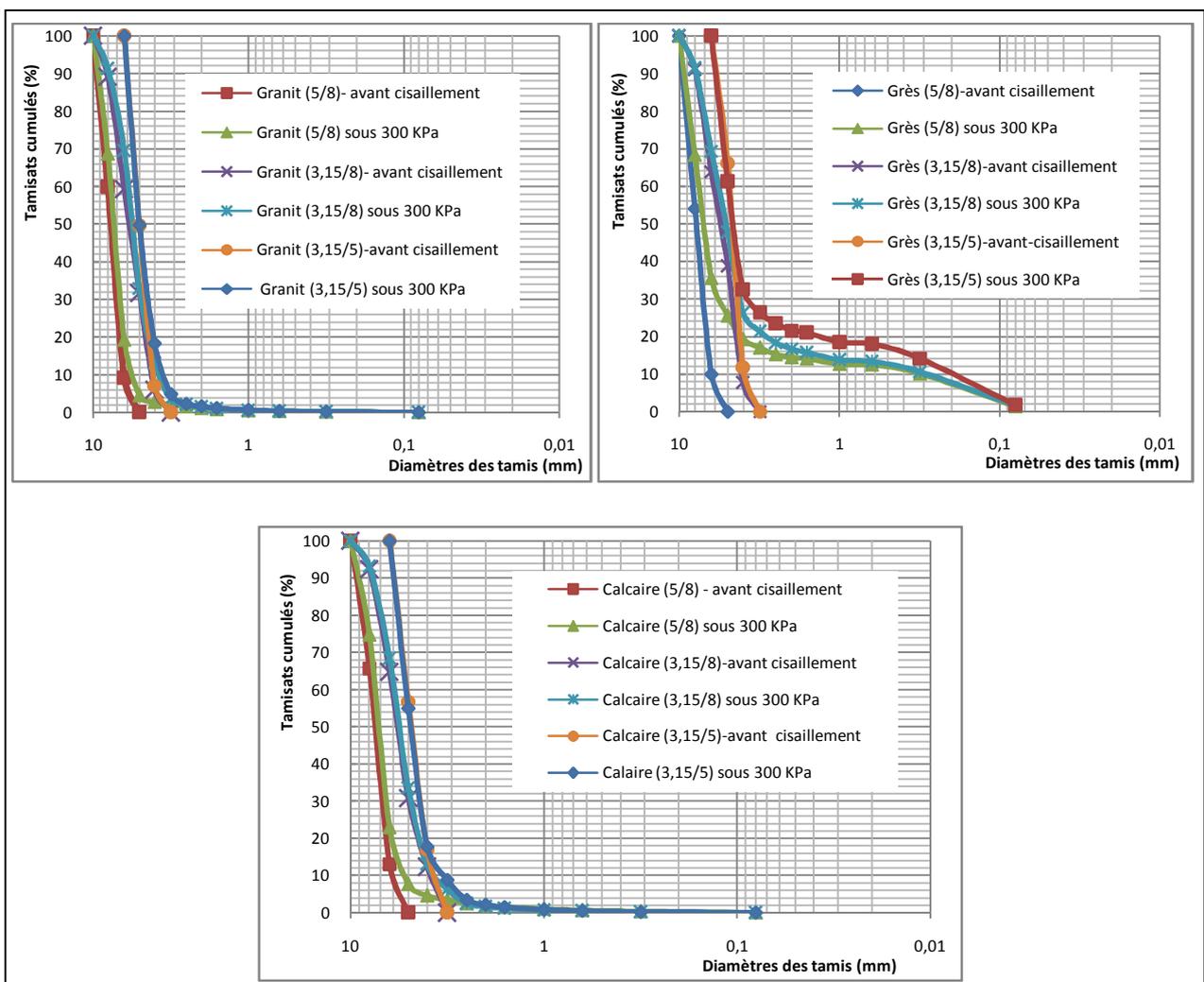


Figure IV.9 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement sous 300 kPa des matériaux granit, grès et calcaire pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

Ø Interprétation des résultats

Les courbes granulométriques des matériaux granit, grès et calcaire; après cisaillement sous une contrainte normale de 300 kPa, montrent que c'est la courbe de la classe (5/8) qui s'étale plus par rapport aux classes (3,15/8) et (3,15/5).

Ceci peut être expliqué par le fait que :

- Les gros grains (5/8), présentent des aspérités et sont sujettes à s'écraser lors de cisaillement, beaucoup plus que les grains de petites tailles [Ramamurthy 1969]. Et cela est vérifié pour les trois matériaux étudiés.
- Les petits grains se redistribuent dans les interstices existants ce qui provoque une faible déformation avec un faible écrasement des grains (C'est le cas de la classe (3,15/8)).

La classe granulaire est un facteur très important sur l'écrasement des grains. Notre étude concorde avec les différentes études effectuées par [Vesic, A.B.-Clough, G.H. 1968], [KIM, M.S. 1995] et [Melbouci, B. 2002]. Elles montrent qu'une granulométrie serrée (5/8) favorise plus de rupture des grains tandis qu'une granulométrie étalée (3,15/8) provoque une meilleure redistribution des forces intergranulaires, donc moins de cassure de grains.

De même, Marsal (1977) a considéré que le facteur déterminant la rupture des grains est l'intensité des forces intergranulaires. Celle-ci est liée au nombre de points de contacts qui augmentent avec la grosseur des grains.

3. Conclusion

Les matériaux locaux (granit, grès et calcaire) ont été soumis aux essais de cisaillement direct à la boîte sous contraintes normales (100, 300 et 400 kPa), pour les différentes classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), et cela à l'état sec et lâche. L'étude a montré que :

- Le phénomène d'écrasement des grains est significatif pour les contraintes assez élevées, particulièrement pour la classe granulaire (5/8).
- La rupture des grains augmente considérablement avec la fragilité du matériau.

- Au cours des essais de cisaillement, la déformation est plus grande pour les échantillons de classe (5/8) que pour ceux des classes (3,15/8) et (3,15/5). Plus les grains sont petits plus ils sont sains.
- La granulométrie serrée engendre plus de rupture que la granulométrie étalée.
- Le granit, de part sa minéralogie, est le matériau le plus résistant suivi du calcaire puis du grès.

Dans le chapitre suivant, nous proposerons une formulation pour la détermination du taux d'écrasement des grains à partir des caractéristiques des courbes granulométriques.

Chapitre V

Proposition d'une formulation

CHAPITRE V**PROPOSITION D'UNE FORMULATION****1. Introduction**

Après essais, pour quantifier le taux de rupture des grains observé précédemment sur les courbes granulométriques, nous calculerons différents coefficients, qui sont proposés par plusieurs auteurs. Ces coefficients évaluant le degré d'écrasement des grains, sont développés par des méthodes empiriques basées sur la mesure des changements de tailles des grains.

Dans ce chapitre, une formulation permettant de déterminer le taux d'écrasement des grains a été proposée à partir des caractéristiques des courbes granulométriques obtenues après les essais de cisaillement direct à la boîte.

Pour ce faire, nous avons utilisé les courbes de tendance données par Excel pour tracer les courbes granulométriques théoriques celles-ci sont comparées ensuite aux courbes granulométriques expérimentales obtenues après essais de cisaillement.

Le principe du tracé des courbes granulométriques théoriques consiste à combiner : (le coefficient de courbure C_c , le coefficient d'uniformité C_u , le coefficient d'écrasement B_{10} et la contrainte normale appliquée σ_i) pour trouver les équations des courbes de tendance.

Une évaluation statistique du calcul d'erreur entre les courbes granulométriques théoriques et expérimentales a été menée à la fin de ce chapitre.

2. Comportement des matériaux étudiés au cisaillement

Nous avons utilisé pour chaque matériau trois classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8). Chaque classe granulaire est soumise au cisaillement direct à la boîte de Casagrande, sous contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

Avant essais, nous avons procédé à la coloration de quelques grains pour mieux illustrer le comportement de ces matériaux au cisaillement et faciliter le suivi de leur comportement.

Les grains colorés ont été déposés sur tout le plan séparant les deux demi- boîtes (le plan de cisaillement), car c'est la zone qui subit le cisaillement.

Après écrasement, et à partir des grains colorés, on a déduit les modes de ruptures observés.

Les figures suivantes montrent les photos du calcaire (5/8), du granit (5/8) et du grès (5/8) avant et après cisaillement sous 300 KPa.

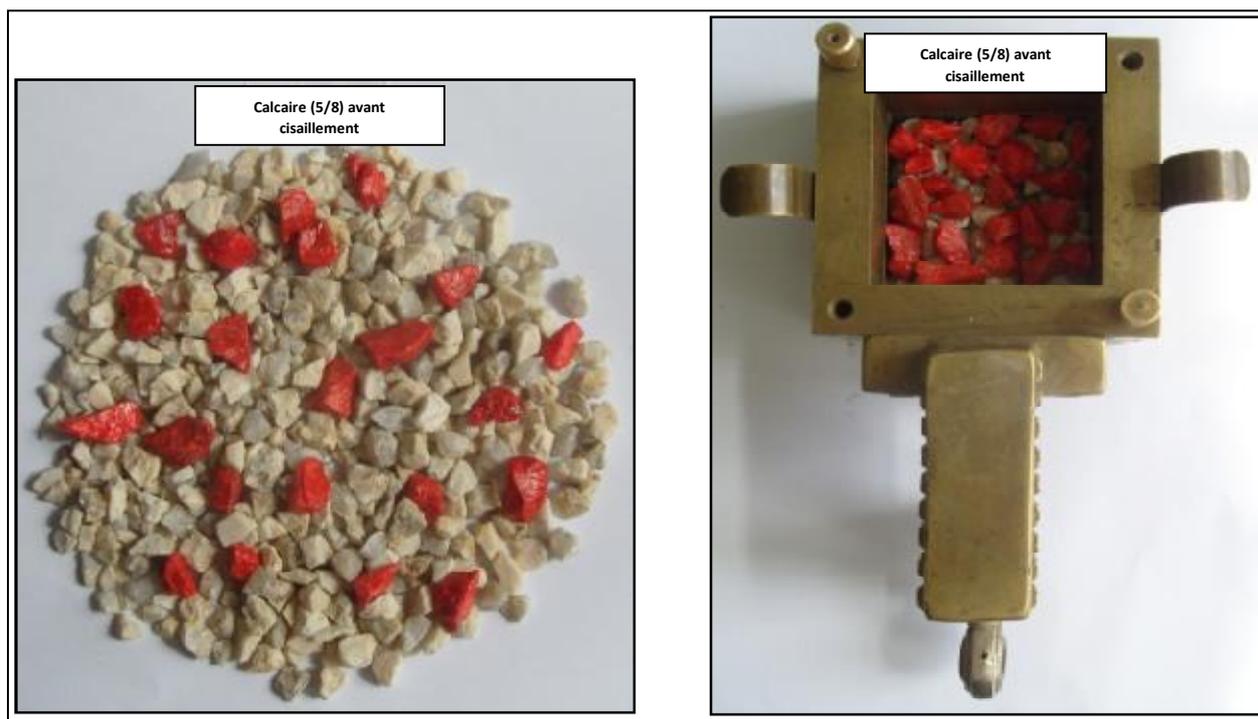


Figure V.1 : Calcaire (5/8) avant cisaillement.



Figure V.2 : Calcaire (5/8) après cisaillement sous 300 KPa.

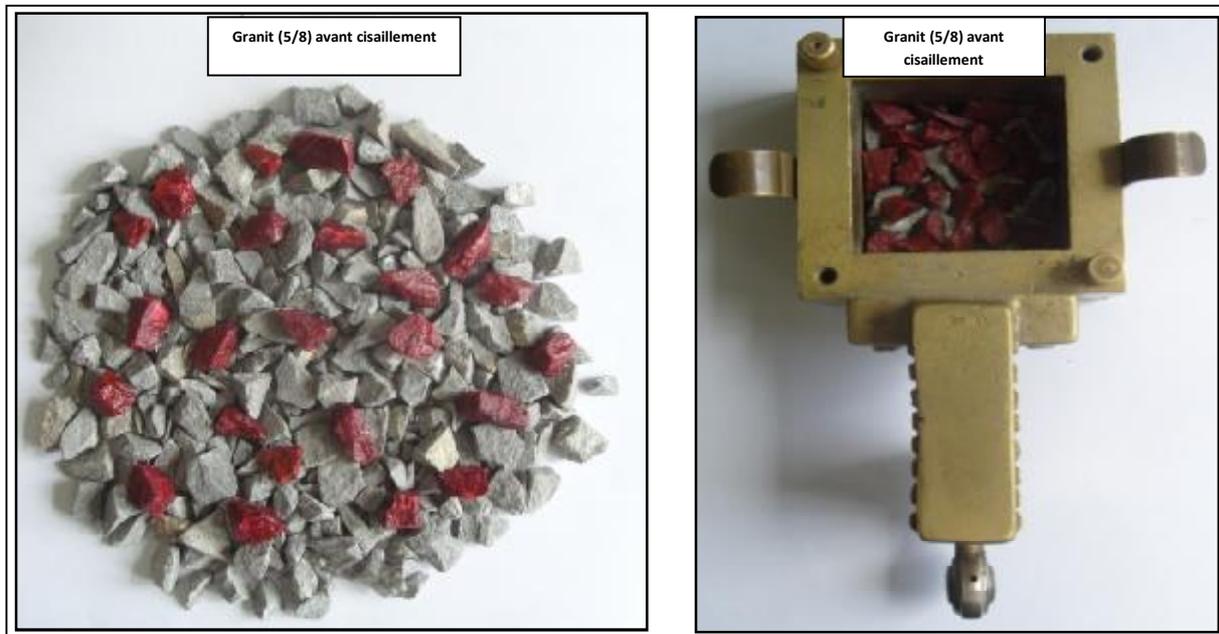


Figure V.3 : Granit (5/8) avant cisaillement.



Figure V.4 : Granit (5/8) après cisaillement sous 300 KPa.

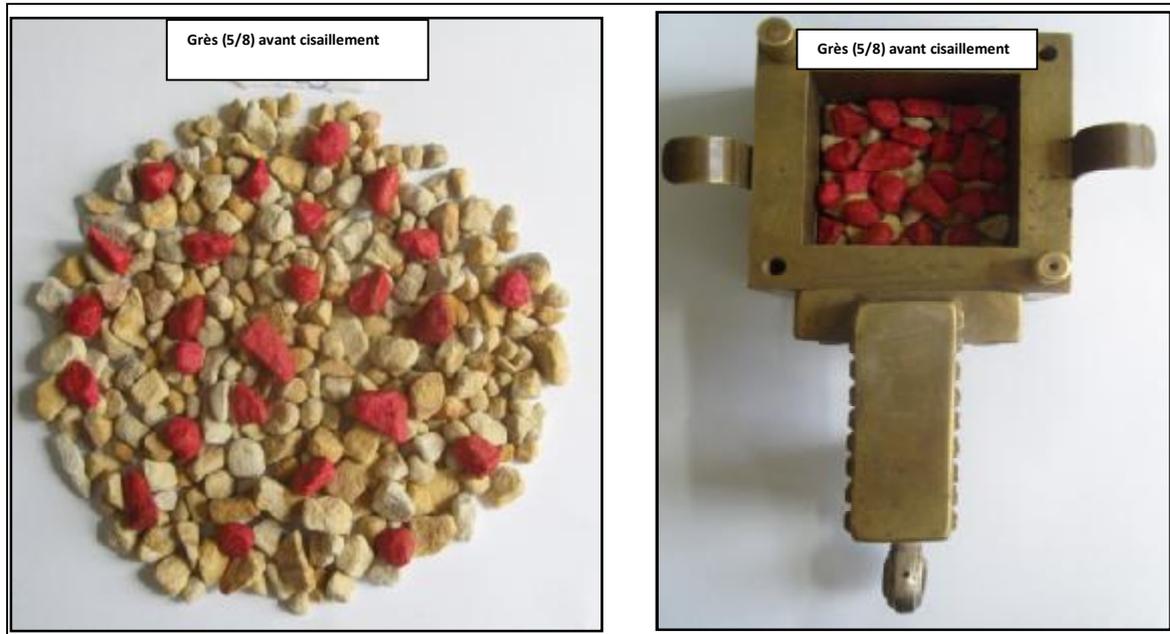


Figure V.5 : Grès (5/8) avant cisaillement.



Figure V.6 : Grès (5/8) après cisaillement sous 300 KPa.



Figure V.7 : Photos des grains colorés du granit (5/8), du calcaire (5/8) et du grès (5/8) après cisaillement sous 300 kPa.

Remarques

En s'inspirant des grains colorés, les modes de rupture observés pour chaque matériau se résumement comme suit :

- Pour le matériau granit, deux modes de rupture prédominants ont été observés: l'abrasion et la rupture des angularités.
- Pour le matériau calcaire, trois modes de rupture ont été observés: le fendage des grains, la rupture des angularités et l'abrasion.
- Pour le matériau grès, plusieurs modes de rupture ont été observés: l'abrasion, l'écaillage, la fracture et le fendage des grains.

On constate que le matériau qui s'écrase le plus est le grès suivi du calcaire puis du granit. Il faut signaler que l'écrasement des grains induit une production de particules fines. Les photos prises après écrasement en témoignent de la cassure des grains.

3. Principaux paramètres influençant sur la courbe granulométrique

- **Coefficients d'uniformité ou de HAZEN (Cu)**

Cu est un coefficient sans dimension, définit par la formule suivante :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{60} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 60%

D_{10} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10%

Ce coefficient permet de savoir si la granulométrie est étalée ($C_u > 2$) ou serrée ($C_u < 2$).

- **Coefficients de courbure (C_c)**

C_c est un coefficient sans dimension, qui est défini par la formule suivante :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

D_{30} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 30%

D_{60} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 60%

D_{10} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10%

Ce coefficient vient en complément de C_u dans la classification des sols LCPC, afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée ($1 < C_c < 3$) ou mal graduée ($C_c < 1$ ou $C_c > 3$).

Un sol est mal gradué si une fraction de grains prédomine.

- **Coefficients d'écrasement (B_{10})**

B_{10} est un coefficient sans dimension, qui est défini par la formule suivante :

$$B_{10} = 1 - \left(\frac{D_{10f}}{D_{10i}} \right)$$

D_{10i} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10% avant essai.

D_{10f} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10% après essai.

Ce coefficient caractérise le taux de rupture des grains.

§ Courbes de tendance

Nous avons tracé des courbes de tendance données par Excel pour toutes les courbes granulométriques obtenues après cisaillement, et cela pour tous les matériaux étudiés.

Les tableaux (V.1), (V.2), et (V.3) suivants récapitulent les valeurs numériques des coefficients de courbure C_c , des coefficients d'uniformité C_u , des coefficients d'écrasement B_{10} et les équations des courbes de tendance; pour le calcaire, le granit et le grès respectivement, en fonction de la classe granulaire et de la contrainte normale appliquée.

Matériau	Classe Granulaire	Contrainte normale σ_i (bar)	Coefficient	Coefficient	Coefficient	Equation de la courbe de tendance
			de courbure Cc	d'uniformité Cu	d'écrasement B ₁₀	
Calcaire	(3,15/5)	1	0,98	1,39	0,03	$y=0,0571.e^{1,342 x}$
		3	1,04	1,47	0,09	$y=0,2002.e^{1,0914 x}$
		4	1,10	1,56	0,14	$y=0,3152.e^{1,0023 x}$
	(5/8)	1	1	1,28	0,02	$y=0,0907.e^{0,7594 x}$
		3	1,08	1,43	0,14	$y=0,3793.e^{0,6221 x}$
		4	1,11	1,44	0,15	$y=0,4035.e^{0,615 x}$
	(3,15/8)	1	1,09	1,57	0,03	$y=0,1096.e^{0,874 x}$
		3	1,11	1,66	0,06	$y=0,335.e^{0,7195 x}$
		4	1,11	1,68	0,08	$y=0,4755.e^{0,6752 x}$

Tableau V.1: Valeurs des coefficients Cc, Cu, B₁₀ et les équations des courbes de tendance pour le calcaire (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les différentes contraintes normales.

Matériau	Classe Granulaire	Contrainte normale σ_i (bar)	Coefficient	Coefficient	Coefficient	Equation de la courbe de tendance
			de courbure Cc	d'uniformité Cu	d'écrasement B ₁₀	
Granit	(3,15/5)	1	1,07	1,37	0,08	$y=0,0231.e^{1,4416 x}$
		3	1,08	1,44	0,12	$y=0,1434.e^{1,1294 x}$
		4	1,03	1,38	0,1	$y=0,1085.e^{1,2128 x}$
	(5/8)	1	0,99	1,33	0,07	$y=0,038.e^{0,8608 x}$
		3	1,005	1,32	0,08	$y=0,1837.e^{0,6953 x}$
		4	1,07	1,38	0,13	$y=0,3305.e^{0,6173 x}$
	(3,15/8)	1	1,04	1,5	0,03	$y=0,082.e^{0,8984 x}$
		3	1,04	1,51	0,05	$y=0,2538.e^{0,753 x}$
		4	1,13	1,52	0,08	$y=0,3965.e^{0,6933 x}$

Tableau V.2: Valeurs des coefficients Cc, Cu, B₁₀ et les équations des courbes de tendance pour le granit (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les différentes contraintes normales.

Matériau	Classe Granulaire	Contrainte normale σ_i (bar)	Coefficient de courbure Cc	Coefficient d'uniformité Cu	Coefficient d'écrasement B ₁₀	Equation de la courbe de tendance
Grès	(3,15/5)	1	11,20	16,66	0,925	$y=5,9502.e^{0,4459 x}$
		3	15,21	25	0,95	$y=7,8755.e^{0,4141 x}$
		4	6,72	32	0,96	$y=12,342.e^{0,3479 x}$
	(5/8)	1	1,19	1,625	0,25	$y=2,2065.e^{0,3862 x}$
		3	14,75	25,33	0,954	$y=6,466.e^{0,2874 x}$
		4	13,53	27,4	0,96	$y=7,2213.e^{0,2814 x}$
	(3,15/8)	1	1,15	2	0,3	$y=3,3247.e^{0,4085 x}$
		3	10,14	19,33	0,93	$y=7,4251.e^{0,3118 x}$
		4	12,86	31,11	0,96	$y=10,964.e^{0,2658 x}$

Tableau V.3: Valeurs des coefficients Cc, Cu, B₁₀ et les équations des courbes de tendance pour le grès (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les différentes contraintes normales.

4. Proposition de la formulation

Plusieurs études approfondies en laboratoire ont été menées par des chercheurs pour évaluer le comportement écrasant du matériau granulaire.

L'étude faite par Chuhan et al. en 2003, basée sur des vastes recherches expérimentales sur différents types de sables, deux corrélations ont été développées entre la limite d'élasticité et la taille des grains, la forme et la minéralogie des matériaux granulaires.

Cependant, cette étude ne donne pas directement, des relations empiriques ou semi-empiriques qui peuvent être utilisées pour la détermination de la résistance à l'écrasement des sables.

En outre, les chercheurs (Nakata et al. 1999; McDowell et Bolton 1998; McDowell 2000) ont essayé de simuler " Le concassage des grains " en utilisant une configuration sur la base d'un essai simple qui se compose de deux plaques parallèles et un dispositif de chargement.

Cependant, ces études ne simulent pas les comportements in situ du matériau granulaire.

4.2. Courbe de tendance (courbe théorique)

Cette courbe doit tenir compte de l'écrasement des grains et doit approcher au maximum la courbe expérimentale. De ce fait, elle doit dépendre des paramètres essentiels tels que le coefficient d'uniformité (C_u) et le coefficient de courbure (C_c) caractérisant le tracé d'une courbe granulométrique, et du coefficient B_{10} caractérisant le phénomène d'écrasement des grains.

En utilisant Excel, pour chaque courbe granulométrique après cisaillement, on trace la courbe de tendance, dont l'équation suit une forme exponentielle.

Les équations des courbes théoriques ont été obtenues en combinant : (le coefficient de courbure C_c , le coefficient d'uniformité C_u , le coefficient d'écrasement B_{10} et la contrainte normale appliquée σ_i).

La figure ci-dessous montre une courbe granulométrique théorique donnée par Excel, à partir de la courbe granulométrique du matériau calcaire (5/8) obtenue après cisaillement sous 300 KPa.

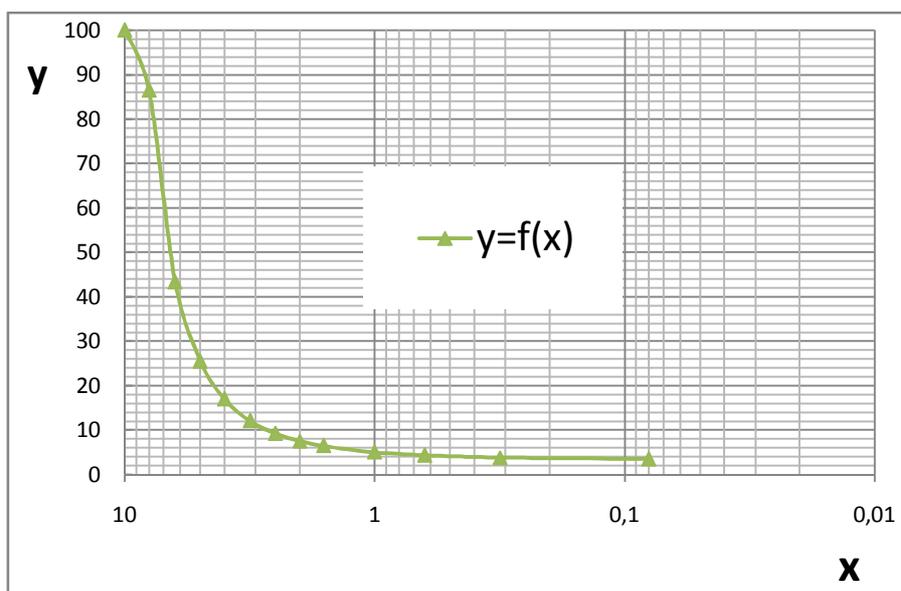


Figure V.9 : Courbe granulométrique théorique pour le matériau calcaire (5/8) sous 300 KPa.

La courbe de tendance donnée par Excel suit une forme exponentielle.

Dont l'équation s'écrit comme suit:

$$y = A e^{Bx} \dots\dots\dots (I)$$

Où : A et B sont les coefficients qui régissent cette forme exponentielle.

Les valeurs de A et B sont données par les équations des courbes de tendance tracées par Excel, à partir des courbes granulométriques obtenues après les essais de cisaillement. [Voir tableaux (V.1), (V.2) et (V.3)].

On pose:
$$\begin{cases} A = (3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u} \\ B = \left(\frac{B_{10}}{s_i} s_1 + b \right) \end{cases}$$

Avec :

C_c est le coefficient de courbure.

C_u est le coefficient d'uniformité.

B₁₀ est le coefficient d'écrasement.

σ₁ est la contrainte normale sous 1Bar (σ₁ = 1Bar).

σ_i est la contrainte normale variant de 1 à 4 Bar (σ_i = 1, 3 et 4 Bar).

En plus de ces paramètres (C_u, C_c, B₁₀, σ₁ et σ_i), deux paramètres (a et b) sont rajoutés pour permettre de mieux ajuster la courbe théorique à la courbe expérimentale.

D'où : l'équation (I) précédente s'écrit sous forme:

$$(I) \iff y = \left[(3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u} \right] e^{\left(\frac{B_{10}}{s_i} s_1 + b \right) x}$$

Par analogie avec les courbes granulométriques, on aura :

$$T (\%) = \left[(3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u} \right] e^{\left(\frac{B_{10}}{s_i} s_1 + b \right) D}$$

5. Calcul des paramètres d'ajustement « a » et « b »

On a :

$$y = A e^{Bx}$$

$$= [(3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u}] e^{(\frac{B_{10}}{S_i} s_1 + b) x}$$

D'où :

Les valeurs numériques des paramètres d'ajustement (a) et (b) sont calculées à partir des équations ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = A \frac{C_u}{C_c} - 3B_{10} \\ b = B - \frac{B_{10}}{S_i} S_1 \end{array} \right.$$

Les valeurs des paramètres d'ajustement (a) et (b) en fonction du type du matériau, de la contrainte normale (σ_i), de la classe granulaire et de A et B sont données, respectivement dans les tableaux (V.4) et (V.5) suivants :

a				
Matériaux	Contrainte normale σ_i (bar)	Classe granulaire		
		(3,15/5)	(5/8)	(3,15/8)
Calcaire	1	-0,009	0,0560	0,0678
	3	0,0129	0,0822	0,3209
	4	0,0270	0,0734	0,4796
Granit	1	-0,2104	-0,1589	0,0282
	3	-0,1688	0,0012	0,2185
	4	-0,1546	0,0362	0,2933
Grès	1	6,0759	2,2630	4,8820
	3	10,0946	8,2419	11,3645
	4	55,8914	11,7440	23,6433

Tableau V.4: valeurs du paramètre d'ajustement (a) en fonction du type du matériau, de la contrainte normale (σ_i) et la classe granulaire.

b				
Matériaux	Contrainte normale σ_i (bar)	Classe granulaire		
		(3,15/5)	(5/8)	(3,15/8)
Calcaire	1	1,312	0,7394	0,844
	3	1,0614	0,5754	0,6995
	4	0,9673	0,5775	0,6552
Granit	1	1,3616	0,7908	0,8684
	3	1,0894	0,6687	0,737
	4	1,1878	0,5848	0,6733
Grès	1	-0,4791	0,1362	0,1085
	3	0,0974	-0,0306	0,0018
	4	0,1079	0,0414	0,0258

Tableau V.5 : Valeurs du paramètre d'ajustement (b) en fonction du type du matériau, de la contrainte normale (σ_i) et de la classe granulaire.

6. Calcul des marges d'erreur

Dans ce qui suit une évaluation statistique du calcul d'erreur entre les courbes granulométriques théoriques et expérimentales a été menée.

6.1. Rappels théoriques sur les statistiques

Le mot « statistique » a été inventé en Allemagne au XVIIIème siècle pour désigner l'ensemble des renseignements; principalement quantitatifs; devant servir aux administrations publiques. Les premières statistiques correctement élaborées ont été celles des recensements démographiques. Ainsi le vocabulaire statistique est essentiellement celui de la démographie.

6.2. Paramètres statistiques

On définit les paramètres statistiques suivants : La moyenne arithmétique, la variance observée et l'écart type observé.

6.2.1. La moyenne arithmétique

Soit un échantillon de n valeurs observées $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ d'un caractère quantitatif x, on définit la moyenne arithmétique des n valeurs comme suit :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Dans notre étude, on a calculé la moyenne arithmétique notée \bar{x} pour :

- La courbe granulométrique expérimentale, dans ce cas les x_i correspondent aux tamisâts cumulés de la courbe expérimentale.
- La courbe granulométrique théorique, dans ce cas les x_i correspondent aux tamisâts cumulés de la courbe théorique.

6.2.2. La variance observée

Soit un échantillon de n valeurs observées $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ d'un caractère quantitatif x et soit \bar{x} la moyenne observée. On définit la variance observée notée S^2 comme la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne.

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

x_i : correspond aux tamisats cumulés de la courbe granulométrique théorique.

\bar{x} : correspond à la moyenne de la courbe granulométrique expérimentale.

6.2.3. L'écart-type observé

Permet la mesure des dispersions, correspond à l'écart moyen entre la courbe expérimentale et la courbe théorique. Il est donné par la racine carrée de la variance observée.

$$S = \sqrt{S^2}$$

6.3. Application aux matériaux étudiés

Dans ce paragraphe, une évaluation statistique du calcul d'erreur entre les courbes granulométriques obtenues après essais de cisaillement et les courbes granulométriques théoriques, a été menée. Pour se faire on a calculé les écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques.

6.3.1. Courbes granulométriques expérimentales et courbes théoriques

Pour chaque matériau on a représenté les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour la classe granulaire (5/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

Le reste des résultats obtenus pour les autres classes (3,15/5) et (3,15/8) sont montrés en l'annexe.

Ø Pour le grès (5/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.10) suivante, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau grès (5/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400KPa.

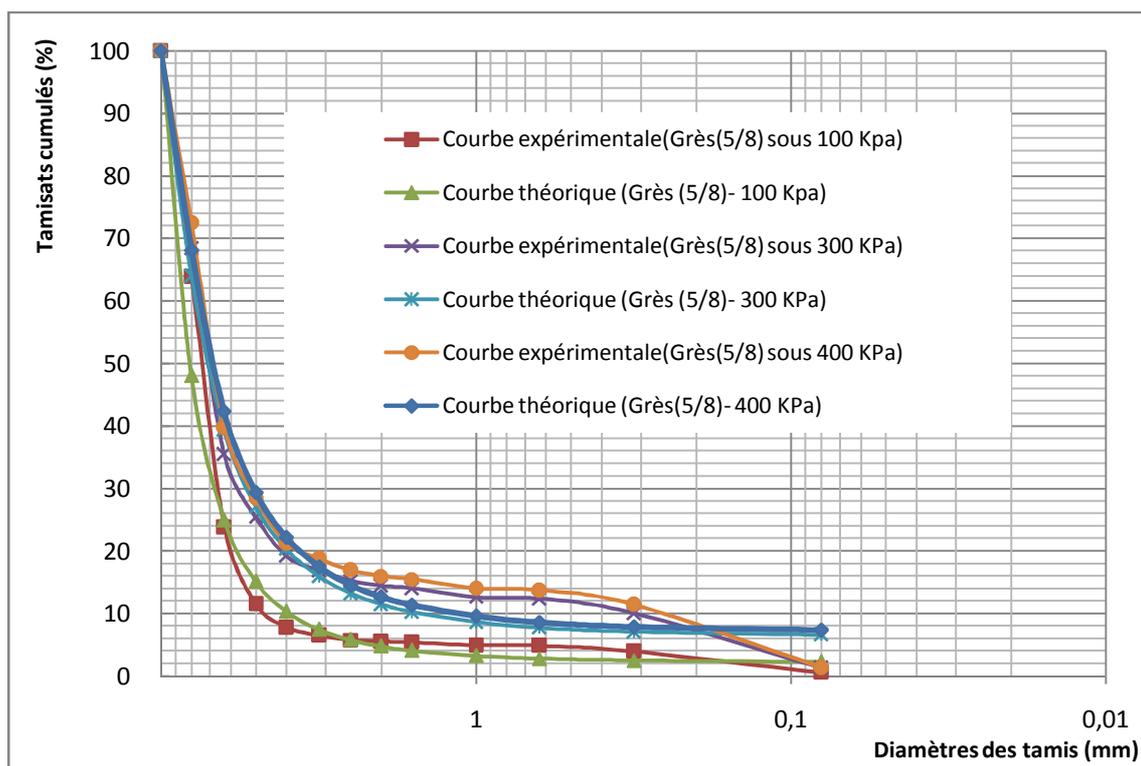


Figure V.10 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau grès (5/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.6), (V.7) et (V.8), suivants donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le grès (5/8) sous 100 KPa, 300 KPa et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (5/8) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	48,02		8	63,91		48,02		
6,3	24,95		6,3	23,84		24,95		
5	15,13		5	11,53		15,13		
4	10,29		4	7,79		10,29		
3,15	7,42		3,15	6,54		7,42		
2,5	5,78		2,5	5,77		5,78		
2	4,77		2	5,53		4,77		
1,6	4,09		1,6	5,41		4,09		
1	3,24		1	4,93		3,24		
0,63	2,81		0,63	4,88		2,81		
0,315	2,49		0,315	3,98		2,49		
0,08	2,28		0,08	0,59		2,28		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	□	231,26	Somme	□	244,71	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	18,82
Moyenne	\bar{x}	17,79	Moyenne	\bar{x}	18,82	Variance	S^2	716,97
						Ecart type	S	26,78

Tableau V.6 : Estimation de l'écart type pour le grès (5/8) sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (5/8) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	63,99		8	68,37		63,99		
6,3	39,32		6,3	35,45		39,32		
5	27,09		5	25,45		27,09		
4	20,34		4	19,21		20,34		
3,15	15,94		3,15	16,91		15,94		
2,5	13,24		2,5	15,28		13,24		
2	11,47		2	14,44		11,47		
1,6	10,23		1,6	14,04		10,23		
1	8,61		1	12,64		8,61		
0,63	7,75		0,63	12,42		7,75		
0,315	7,08		0,315	10,06		7,08		
0,08	6,62		0,08	1,29		6,62		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	□	331,66	Somme	□	345,56	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	26,58
Moyenne	\bar{x}	25,51	Moyenne	\bar{x}	26,58	Variance	S^2	710,39
						Ecart type	S	26,65

Tableau V.7 : Estimation de l'écart type pour le grès (5/8) sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (5/8) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	68,13		8	72,43		68,13		
6,3	42,29		6,3	39,79		42,29		
5	29,36		5	28,42		29,36		
4	22,18		4	21,27		22,18		
3,15	17,47		3,15	18,80		17,47		
2,5	14,56		2,5	16,94		14,56		
2	12,66		2	15,98		12,66		
1,6	11,31		1,6	15,48		11,31		
1	9,56		1	14,01		9,56		
0,63	8,62		0,63	13,73		8,62		
0,315	7,89		0,315	11,42		7,89		
0,08	7,39		0,08	1,35		7,39		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	□	351,41	Somme	□	369,61	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	28,43
Moyenne	\bar{x}	27,03	Moyenne	\bar{x}	28,43	Variance	S^2	722,89
						Ecart type	S	26,89

Tableau V.8 : Estimation de l'écart type pour le grès (5/8) sous 400 KPa.

Ø Pour le granit (5/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.11) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau granit (5/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa.

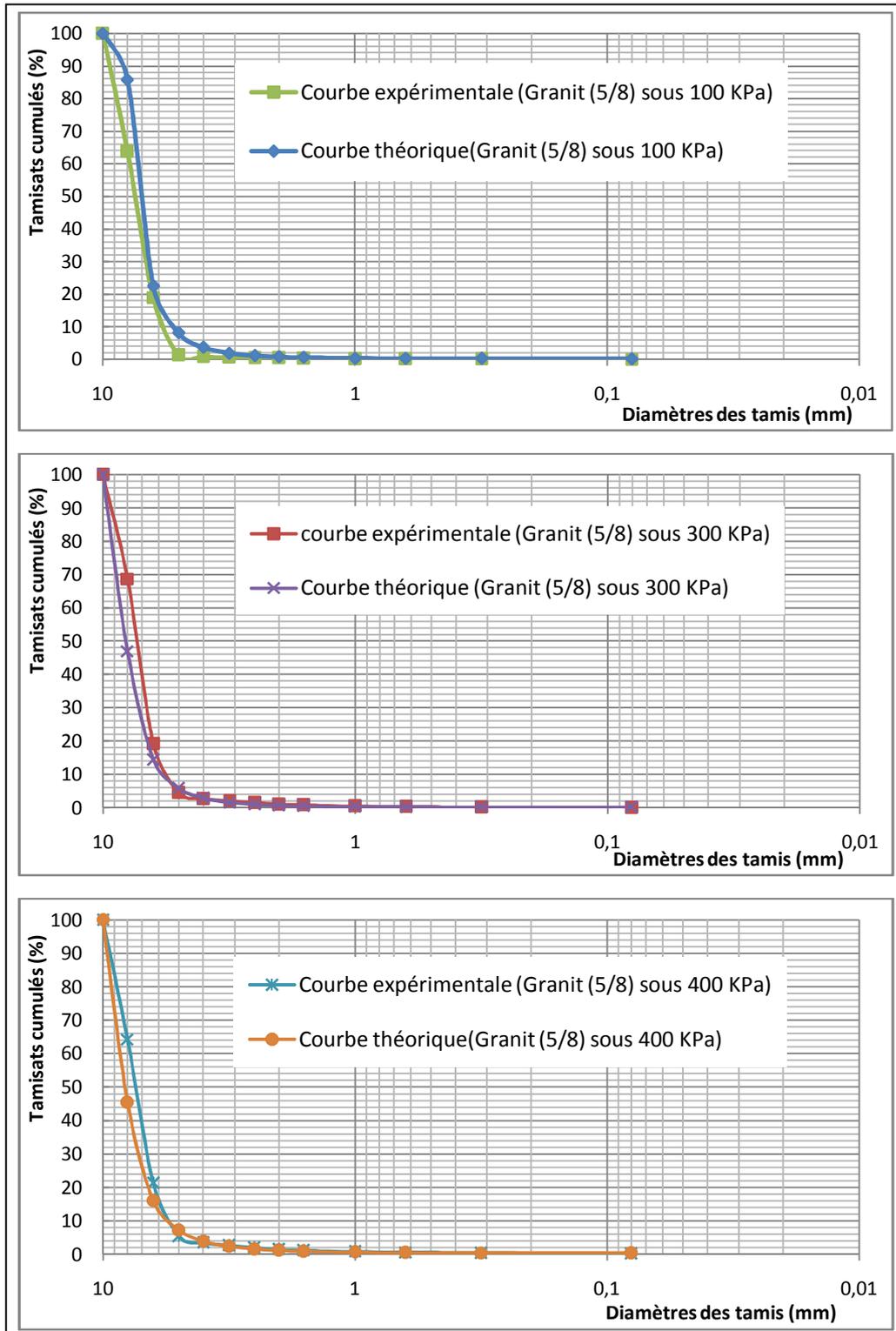


Figure V.11 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau granit (5/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.9), (V.10), (V.11), suivants donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le granit (5/8) sous 100 KPa, 300 KPa et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (5/8) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	36,42		8	63,72		36,42		
6,3	8,47		6,3	18,96		8,47		
5	2,78		5	1,24		2,78		
4	1,18		4	0,76		1,18		
3,15	0,57		3,15	0,54		0,57		
2,5	0,32		2,5	0,50		0,32		
2	0,21		2	0,41		0,21		
1,6	0,15		1,6	0,27		0,15		
1	0,09		1	0,16		0,09		
0,63	0,07		0,63	0,10		0,07		
0,315	0,05		0,315	0,05		0,05		
0,08	0,04		0,08	0,01		0,04		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	□	150,34	Somme	□	186,73	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	14,36
Moyenne	\bar{x}	11,56	Moyenne	\bar{x}	14,36	Variance	S^2	751,61
						Ecart type	S	27,42

Tableau V.9 : Estimation de l'écart type pour le granit (5/8) sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (5/8) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	47,04		8	68,71		47,04		
6,3	14,48		6,3	19,26		14,48		
5	5,88		5	4,51		5,88		
4	2,94		4	2,77		2,94		
3,15	1,63		3,15	2,01		1,63		
2,5	1,04		2,5	1,60		1,04		
2	0,73		2	1,12		0,73		
1,6	0,56		1,6	0,89		0,56		
1	0,37		1	0,52		0,37		
0,63	0,28		0,63	0,34		0,28		
0,315	0,23		0,315	0,21		0,23		
0,08	0,19		0,08	0,04		0,19		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	□	175,37	Somme	□	201,98	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	15,54
Moyenne	\bar{x}	13,49	Moyenne	\bar{x}	15,54	Variance	S^2	781,48
						Ecart type	S	27,95

Tableau V.10 : Estimation de l'écart type pour le granit (5/8) sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (5/8) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	45,43		8	64,28		45,43		
6,3	15,96		6,3	21,26		15,96		
5	7,17		5	5,37		7,17		
4	3,87		4	3,43		3,87		
3,15	2,30		3,15	2,67		2,30		
2,5	1,54		2,5	1,93		1,54		
2	1,13		2	1,47		1,13		
1,6	0,88		1,6	1,17		0,88		
1	0,61		1	0,80		0,61		
0,63	0,49		0,63	0,57		0,49		
0,315	0,40		0,315	0,37		0,40		
0,08	0,35		0,08	0,13		0,35		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	□	180,13	Somme	□	203,45	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	15,56
Moyenne	\bar{x}	13,86	Moyenne	\bar{x}	15,65	Variance	S^2	764,73
						Ecart type	S	27,65

Tableau V.11: Estimation de l'écart type pour le granit (5/8) sous 400 KPa.

Ø Pour le calcaire (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.12) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau calcaire (5/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400KPa.

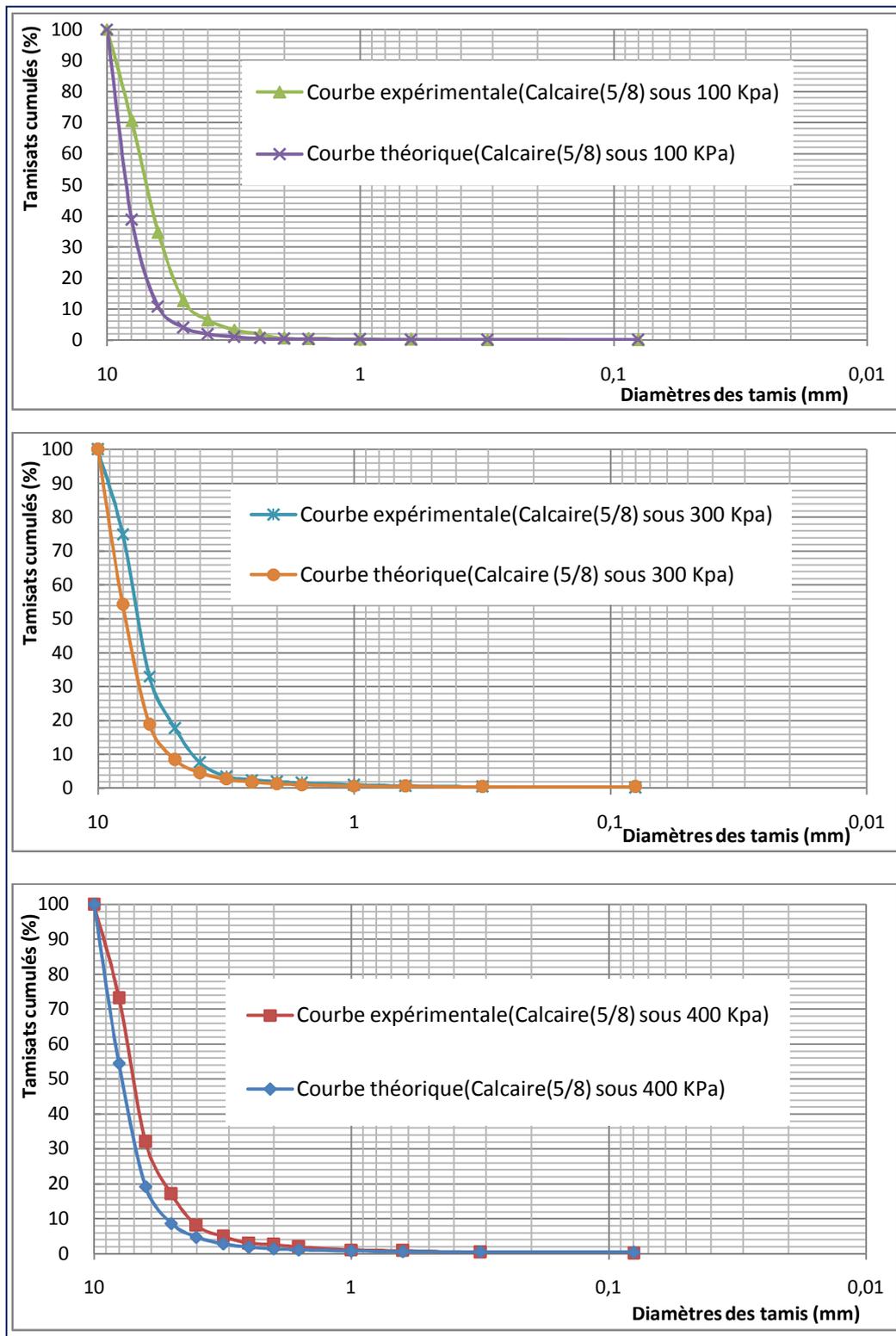


Figure V.12 : Courbes expérimentales et théoriques pour le matériau calcaire (5/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.12), (V.13), (V.14), suivants donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le grès (5/8) sous 100 KPa, 300 KPa et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (5/8) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100		100,00		
8	38,72		8	70,51		38,72		
6,3	10,69		6,3	14,63		10,69		
5	4,00		5	2,59		4,00		
4	1,87		4	1,45		1,87		
3,15	0,98		3,15	1,14		0,98		
2,5	0,60		2,5	0,74		0,60		
2	0,41		2	0,6		0,41		
1,6	0,30		1,6	0,45		0,30		
1	0,19		1	0,27		0,19		
0,63	0,15		0,63	0,18		0,15		
0,315	0,12		0,315	0,11		0,12		
0,08	0,10		0,08	0,03		0,10		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	∑	158,14	Somme	∑	192,70	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	14,82
Moyenne	\bar{x}	12,16	Moyenne	\bar{x}	14,82	Variance	S^2	754,08
						Ecart type	S	27,46

Tableau V.12 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (5/8) sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (5/8) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100		100,00		
8	54,17		8	74,87		54,17		
6,3	18,88		6,3	23,03		18,88		
5	8,43		5	7,71		8,43		
4	4,53		4	4,54		4,53		
3,15	2,68		3,15	3,4		2,68		
2,5	1,79		2,5	2,49		1,79		
2	1,31		2	1,96		1,31		
1,6	1,02		1,6	1,59		1,02		
1	0,71		1	0,99		0,71		
0,63	0,56		0,63	0,67		0,56		
0,315	0,46		0,315	0,39		0,46		
0,08	0,40		0,08	0,09		0,40		
Fond	0,00		Fond	0		0,00		
Somme	□	194,93	Somme	□	221,73	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	17,06
Moyenne	\bar{x}	14,99	Moyenne	\bar{x}	17,06	Variance	S^2	809,95
						Ecart type	S	28,46

Tableau V.13 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (5/8) sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (5/8) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100		100,00		
8	54,46		8	73,2		54,46		
6,3	19,20		6,3	22,03		19,20		
5	8,65		5	7,08		8,65		
4	4,69		4	5,07		4,69		
3,15	2,78		3,15	3,95		2,78		
2,5	1,87		2,5	2,83		1,87		
2	1,38		2	2,19		1,38		
1,6	1,08		1,6	1,77		1,08		
1	0,74		1	1,09		0,74		
0,63	0,59		0,63	0,71		0,59		
0,315	0,49		0,315	0,39		0,49		
0,08	0,42		0,08	0,08		0,42		
Fond	0,00		Fond	0		0,00		
Somme	□	196,36	Somme	□	220,39	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	16,95
Moyenne	\bar{x}	15,10	Moyenne	\bar{x}	16,95	Variance	S^2	809,63
						Ecart type	S	28,45

Tableau V.14: Estimation de l'écart type pour le calcaire (5/8) sous 400 KPa.

Les figures (V.10), (V.11), et (V.12) montrent un très bon ajustement pour la granulométrie (5/8), et cela est vérifié pour les trois matériaux étudiés. On peut voir que les courbes théoriques sont très proches des courbes expérimentales, et cela quelque soit la contrainte appliquée (100, 300 et 400 KPa). Ces résultats concordent avec la majorité des ajustements faits pour les classes granulaires (3,15/5) et (3,15/8). Le reste des résultats obtenus sont montrés en l'annexe.

Plus l'écart est petit plus l'ajustement est meilleur. Le grès est le matériau qui s'ajuste le mieux et cela pour les trois classes granulaires (3,15/5),(5/8) et (3,15/8) suivi du calcaire puis du granit. D'après l'évaluation statistique du calcul d'erreur, les écarts types obtenus entre les courbes granulométriques théoriques et expérimentales, dans la majorité des cas sont inférieurs à 30%. Donc les ajustements sont significatifs.

7. Conclusion

Il en ressort selon les différents essais réalisés sur les matériaux étudiés que :

- La formule proposée présente des bons résultats, car les courbes théoriques sont proches des courbes expérimentales particulièrement pour les classes granulaires (5/8) et (3,15/5), et cela pour les différents matériaux étudiés.
- Plus la contrainte normale appliquée est importante, plus l'écrasement est significatif et plus il y a un bon ajustement entre les courbes théoriques et expérimentales et cela pour différentes classes granulaires. L'ajustement est d'autant meilleur que la taille des grains est élevée. Donc la granulométrie est un paramètre qui influe sur l'ajustement.
- Le grès est le matériau qui s'écrase le plus et qui s'ajuste le mieux.
- D'après l'évaluation statistique du calcul d'erreur; pour les différents matériaux étudiés et pour la majorité des cas, l'écart type est inférieur à 30%. Donc notre modèle proposé s'applique parfaitement aux matériaux étudiés.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La recherche exposée dans ce mémoire a pour but la détermination du taux d'écrasement des grains à partir des caractéristiques des courbes granulométriques, en développant un modèle mathématique basé sur des données expérimentales.

L'ensemble des résultats obtenus après les essais de cisaillement permet de conclure ce qui suit :

- La formule proposée présente des bons résultats, car les courbes théoriques sont proches des courbes expérimentales particulièrement pour les classes granulaires (5/8) et (3,15/5), et cela pour les différents matériaux étudiés.
- Plus la contrainte normale appliquée est importante, plus l'écrasement est significatif et plus il y a un bon ajustement entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques et cela pour différentes classes granulaires. L'ajustement est d'autant meilleur que la taille des grains est élevée. Donc la granulométrie est un paramètre qui influe sur l'ajustement.
- Tous les échantillons étudiés ont montré un écrasement appréciable sous cisaillement à contrainte normale maximale de 400 KPa, particulièrement pour la classe granulaire (5/8).
- Au cours des essais de cisaillement, la déformation est plus grande pour les échantillons de classe (5/8) que pour ceux des classes (3,15/8) et (3,15/5). Plus les grains sont petits plus ils sont sains. Et cela vérifié pour tous matériaux étudiés.
- La rupture des grains augmente considérablement avec la fragilité du matériau. Le grès est le matériau qui s'écrase le plus et qui s'ajuste le mieux. Le granit, de part sa minéralogie, est le matériau le plus résistant suivi du calcaire puis du grès.

- La granulométrie serrée (5/8) engendre plus de rupture que la granulométrie étalée (3,15/8).
- D'après l'évaluation statistique du calcul d'erreur; entre les courbes granulométriques théoriques et expérimentales et pour les différents matériaux étudiés, l'écart type est inférieur à 30 % dans la majorité des cas. Donc notre modèle proposé s'applique parfaitement aux matériaux étudiés.

La formule proposée est très efficace et utile pour la détermination du taux d'écrasement des matériaux granulaires. On peut donc prédire la courbe granulométrique après écrasement avec la seule connaissance du coefficient d'uniformité (C_u), du coefficient de courbure (C_c), du coefficient d'écrasement (B_{10}) et de la contrainte normale appliquée (σ_i).

Le présent travail a apporté des éclaircissements au phénomène d'écrasement des grains. Les résultats obtenus méritent d'être vérifiés pour d'autres essais tels que le triaxial, l'oedomètre et le Proctor.

Bibliographie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] AFNOR., (2000)

« Granulométrie, Tome I : Tamis, Tamisage et applications particulières »
Edition AFNOR, Paris 2000

[2] AFNOR., (2000)

« Granulométrie, Tome II : Méthodes de séparation granulométrique »
Edition AFNOR, Paris 2000

[3] ALILI, H. et AMOKRANE, D., (1999)

« Comportement mécanique des grès », Mémoire d'ingénieur de L'UMMTO, 1999

[4] ALKAMA, F., (2003)

« Etude expérimentale du comportement mécanique des matériaux schiste en géotechnique routière », Mémoire de magister de L'UMMTO, 2003

[5] ARQUIE, G. and TOURENQ, C., (1990)

« Granulats », Edition de l'école des ponts et chaussées de Paris, (1990)

[6] BARTAKE, P.P. and SINGH, D.N., (2007)

« A generalized methodology for determination of crushing strength of granular materials »
Geotech Geol Eng (2007) 25:203-213

[7] BENAÏSSA, A., (1992)

« Élément de mécanique des sols»; Alger, OPU, Avril 1992

- [8] BERTHAUD, Y. DEBUHAN, P. SCHMITT, N., (2008)
« Mécanique des sols Conceptions et Applications », Aide mémoire, Dunod, Paris, 2008.
- [9] BIAREZ, J., (1962)
« Contribution à des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents »,
Thèse de Doctorat des sciences, Faculté des Sciences De Grenoble. 1962
- [10] BIAREZ, J. et HICHER, P.Y.,(1997)
« Influence de la granulométrie et son évolution par rupture des grains sur le comportement
mécanique des matériaux granulaires », Revue française de Génie Civil, Volume I –
n°4/1997, pages 607 à 631
- [11] BISHOP, A.W. and HENKEL, D.J., (1962)
« The measurement of soil properties in the triaxial test ». 2nd Edition, Edward Arnold
(Pub.) Ltd., London.
- [12] BOULIFA, D., (2006)
« Influence du chemin de contrainte sur l'écrasement des grains », Mémoire de magister de
L'UMMTO, 2006.
- [13] CAMBOU, B., (1972)
« Compressibilité d'un milieu pulvérulent, influence de la forme et de la dimension des
particules sur les propriétés mécaniques d'un milieu pulvérulent »
Thèse de Docteur de Spécialité- Université Scientifique et Médicale, Grenoble, 1972.
- [14] CHUHAN, FA., et al., (2003)
« Experimental compression of loose sands: relevance to porosity reduction during burial
in sedimentary basins ». Can Geotech J 40:995–1011

[15] CHIK, Z., (2004)

« The effect of fragmentation on engineering proprieties of granular materials: laboratory and fractal analysis »; these de doctorate university of Pitts burgh, 2004.

[16] COLLIAT D.ANGUS, J.L., (1986)

« Comportement des matériaux granulaires sous fortes contraintes. Influence de la nature minéralogique du matériau étudié ». Thèse de doctorat de spécialité, Université scientifique et médicale de Grenoble, 1986.

[17] FEDA, J., (2002)

« Notes on the effects of the grain crushing on the granular soils behavior ». Eng Geol 63:93–98

[18] FUKUMUTO, T., (1990)

« A grading equation for decomposed granite soil ». Soils and foundations, vol 30, N° 1, 1990, pp 27-34.

[19] FUKUMUTO, T., (1992)

« Particle breakage characteristics of granular soils ». Soils and foundations, vol 32, N° 1, 1992, pp 26-40.

[20] GUYON, E. et TROADEC J.P., (1994)

« Du sac de billes au tas de sables ». Edition Odile Jacob, Sciences, 1994.

[21] GHOUILEM, K., (2007)

« Influence de l'écrasement des grains sur l'angle de frottement interne des matériaux granulaires », Mémoire de magister de L'UMMTO, 2007.

[22] HADDAD, R., (2005)

« Modélisation du phénomène d'écrasement des grains », Mémoire de magister de L'UMMTO, 2005.

[23] HAGERTY, et al., (1993)

« One dimensional high pressure compression of granular media », Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119 N° 1, January 1993, pp.1-17.

[24] HARDIN, B. O., (1985)

« Crushing of soil particles », Journal of Geotechnical Engineering, vol 111, N° 10, 1985.

[25] KIM, M. S., (1995)

« Etude expérimentale du comportement mécanique des matériaux granulaires sous fortes contraintes ». Thèse de doctorat de l'école centrale de Paris - décembre, 1995.

[26] LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC), (1986)

« Essai de cisaillement à la boîte » ; méthode d'essai n° 21, Février 1986.

[27] LADE, P.V ; YAMAMURO, J.A. et al., (1996)

« Significance of particle crushing in granular materials », Journal of Geotechnical Engineering, vol. 122, N° 4, 1996, pp 3109-3116.

[28] LEE, KL. And FARHOOMAND, I., (1967)

« Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression ». Canadian Geotechnical Journal, vol.4, N° 1, Feb 1967, pp 68-86.

[29] LEE, KL and SEED, H. B., (1967)

« Drained strength characteristics of sand ». Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol 93.No.SM6, Proc. Paper 5561, November.1967, pp 117-141.

[30] MALGORN, G., (1996)

« Dictionnaire Technique Anglais – Français ». Edition Dunod Paris, (1996)

[31] MARSAL, R.J. (1967)

« Large scale testing of rockfill materials. » J. soil Mech. and Found. Div., ASCE, 93(2), 1967, pp 27-43.

[32] MARSAL, R.J. (1977)

« Research on granular materials. Experimental work compiled for the IX int. Conf on soils. Mechanics and Found. Eng., Tokyo 1977, pp 1-78.

[33] MCDOWELL, G.R; BOLTON, M.D., (1998)

« On the mechanics of crushable aggregates ». Geotechnique 48, No. 5, 667-679.

[34] MCDOWELL, G.R ; BOLTON, M.D. et ROBERTSON, D., (1996)

« The fractal crushing of granular materials ». J Mech Phys Solids 44(12):2079–2102

[35] MCDOWELL, G.R; AMON, A., (2000)

« The application of weibull statistics to the fracture of soil particles ». Soils Found., 40, No. 5, pp 133-141.

[36] MELBOUCI, B., (2002)

« Pegmatite de la grande Kabylie : Caractéristiques et comportement en géotechnique routière ». Doctorat d'état de L'UMMTO, 2002.

[37] MELBOUCI, B., (2005)

« Etude de l'écrasement des grains du matériau pegmatite à l'essai proctor. »
Revue Algérie Equipement N° 39, Mai 2005.

[38] MELBOUCI, B., (2005)

« Etude expérimentale des matériaux locaux à l'écrasement ». Congrès International sur la Réhabilité des constructions et Développement durable à l'ENTP, Alger 3 et 4 mai 2005.

[39] MELBOUCI, B., (2006)

« Analyse du comportement du composite granite fibres à l'essai de cisaillement ». 1st Mediterranean congress for composites matériels, Bechar 9 et 10 Décembre 2006.

[40] MELBOUCI, B., (2007)

« Etude expérimentale du comportement des grains du matériau grès à l'écrasement ». Revue Technologique et Scientifique COST (ENSET-Oran) ISSN 1112-5187- T. N° 5 – Janvier 2007.

[41] MIURA et al., (1984)

« Stress-strain characteristics of sand in a particle crushing region ». Soils Foundations, 1984, 24, 77-89.

[42] MIURA et O-HARA., (1979)

« Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses ». Soils Found. 19, No. 3, 1-14.

[43] MIURA et YAMANOUCHI., (1977)

« Effect of particle crushing on the shear characteristics of a sand ». Proc. Japanese Society of Civil Engineers, No. 260, 109-118 (in Japanese), Trans. Japanese Society of civil engineers, 9, (1978).

[44] NAKATA et al. (1999)

« A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test ». Geotechnique 49 (5):567-538.

[45] RAHMA, A., (1998)

« Modélisation du comportement du milieu granulaire en fonction de l'écrasement des grains », Can. Geotech. J. 35: 517.523

[46] RAHMA, A., (1993)

« Spécification du granulat des remblais : Choix d'un matériau granulaire modèle et approche statistique de la rupture des grains ». Agence nationale des déchets radioactifs (ANDRA), n°315691A0, Identification 2260044AFE.

[47] RAHMA, A. (1994)

« Modélisation numérique des granulats sous fortes contraintes, partie B : Comportement du milieu granulaire ». Agence nationale des déchets radioactifs, n° 315691B0, Identification 6C2ECP94.01B.

[48] RAMAMURTHY, T., (1969)

« Crushing phenomena in granular soils » Journal of the Indian National Society of Soil Mechanics and foundation Ing – Vol 18, 1969, pp 67 – 86.

[49] ROBITAILLE, V. TREMBLAY D., (1997)

« Mécanique des sols » ; théorie et pratique, Canada, Modulo Editeur 1997.

[50] TOUATI, A., (1982)

« Comportement mécanique des sols pulvérulents sous fortes contraintes ». Thèse de docteur Ingénieur, de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris 1982.

[51] TOURENQ, C. et DENIS, A., (1982)

« Les essais de granulats ». Rapport de recherches LPC, N°114, juillet 1982.

[52] VESIC, A.S and CLOUGH, G.W., (1968)

« Behavior of granular materials under high stresses », Journal of The Soil Mechanic and Foundations Divisions, ASCE, Vol 94, 1968, pp 661-688.

[53] YAMAMURO J.A., BOPP P.A. et LADE P.V. (1996)

« One dimensional compression of sands at high pressures », Journal of Geotechnical Engineering, February 1996.

[54] YOJIROY, M.S., (2003)

« Force chains and the fragmentation of granular materials »; Master of Science, university of Pitts burg, 2003.

[55] ZAMRI, C., (2004)

« The effect of fragmentation on engineering properties of granular materials: laboratory and fractal analysis »; these de doctorate university of Science, university of Pitts burg, 2004.

Annexes

Courbes granulométriques expérimentales et théoriques.

Ø Pour le grès (3,15/5) sous 100,300 et 400 KPa.

La figure (V.13) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau grès (3,15/5) après cisaillement sous 100,300 et 400KPa.

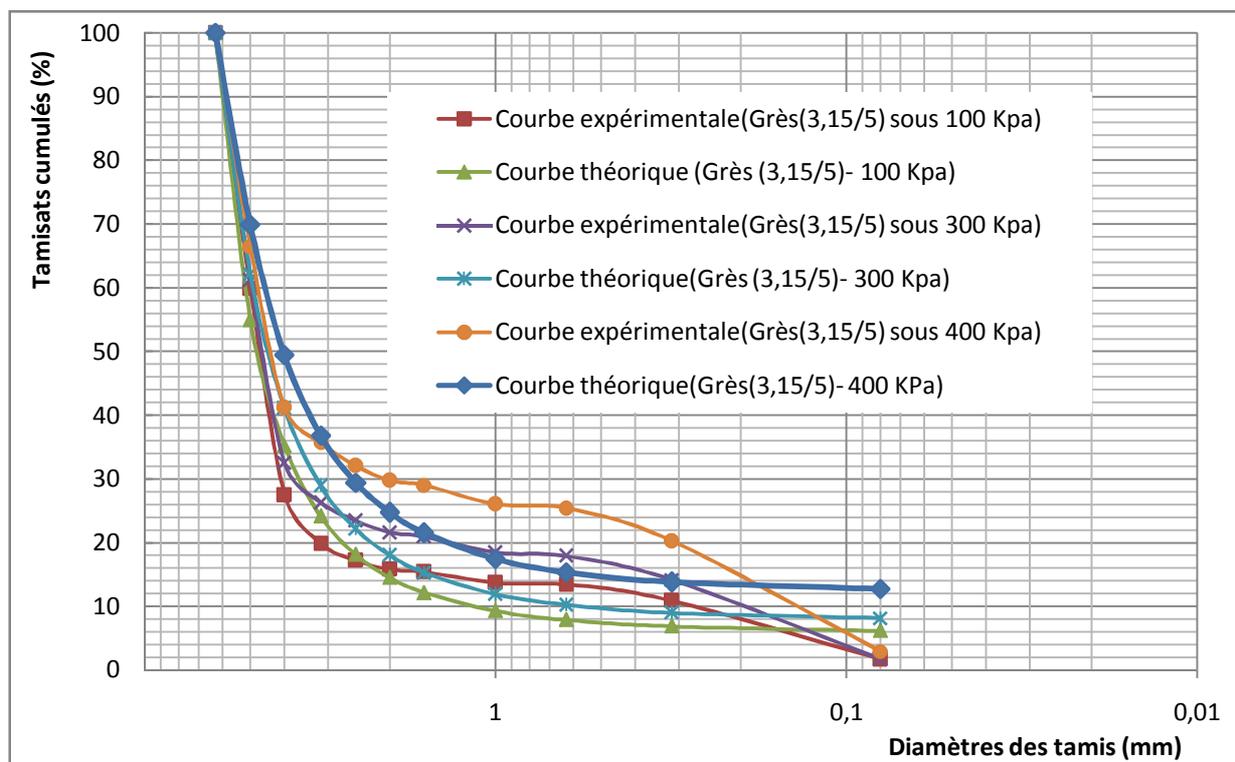


Figure V.13 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau grès (3,15/5) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.15), (V.16) et (V.17), donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le grès (3,15/5) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (3,15/5) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale			Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)				
6,3	100,00		6,3	100,00				100,00
5	54,93		5	59,82				54,93
4	35,22		4	27,46				35,22
3,15	24,14		3,15	19,84				24,14
2,5	18,08		2,5	17,19				18,08
2	14,48		2	15,81				14,48
1,6	12,12		1,6	15,37				12,12
1	9,28		1	13,73				9,28
0,63	7,87		0,63	13,41				7,87
0,315	6,84		0,315	10,89				6,84
0,08	6,17		0,08	1,70				6,17
Fond	0,00		Fond	0,00				0,00
Somme	Σ	289,13	Somme	Σ	295,21	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	26,84
Moyenne	\bar{x}	26,28	Moyenne	\bar{x}	26,84	Variance	S^2	741,89
						Ecart type	S	27,24

Tableau V.15 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/5) après cisaillement sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (3,15/5) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	62,05		5	61,20		62,05		
4	41,06		4	32,43		41,06		
3,15	28,91		3,15	26,28		28,91		
2,5	22,11		2,5	23,41		22,11		
2	17,98		2	21,55		17,98		
1,6	15,25		1,6	20,92		15,25		
1	11,90		1	18,44		11,90		
0,63	10,21		0,63	17,88		10,21		
0,315	8,97		0,315	14,16		8,97		
0,08	8,14		0,08	1,69		8,14		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	326,58	Somme	Σ	337,96	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	30,72
Moyenne	\bar{x}	29,69	Moyenne	\bar{x}	30,72	Variance	S^2	738,64
						Ecart type	S	27,18

Tableau V.16 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/5) après cisaillement sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (3,15/5) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	69,91		5	66,35		69,91		
4	49,42		4	41,17		49,42		
3,15	36,80		3,15	35,67		36,80		
2,5	29,37		2,5	32,02		29,37		
2	24,70		2	29,73		24,70		
1,6	21,50		1,6	29,00		21,50		
1	17,46		1	26,02		17,46		
0,63	15,36		0,63	25,35		15,36		
0,315	13,77		0,315	20,25		13,77		
0,08	12,69		0,08	2,92		12,69		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	390,97	Somme	Σ	408,47	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	37,13
Moyenne	\bar{x}	35,54	Moyenne	\bar{x}	37,13	Variance	S^2	694,69
						Ecart type	S	26,36

Tableau V.17 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/5) après cisaillement sous 400 KPa.

Ø Pour le grès (3,15/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.14) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau grès (3,15/8) après cisaillement sous 100,300 et 400KPa.

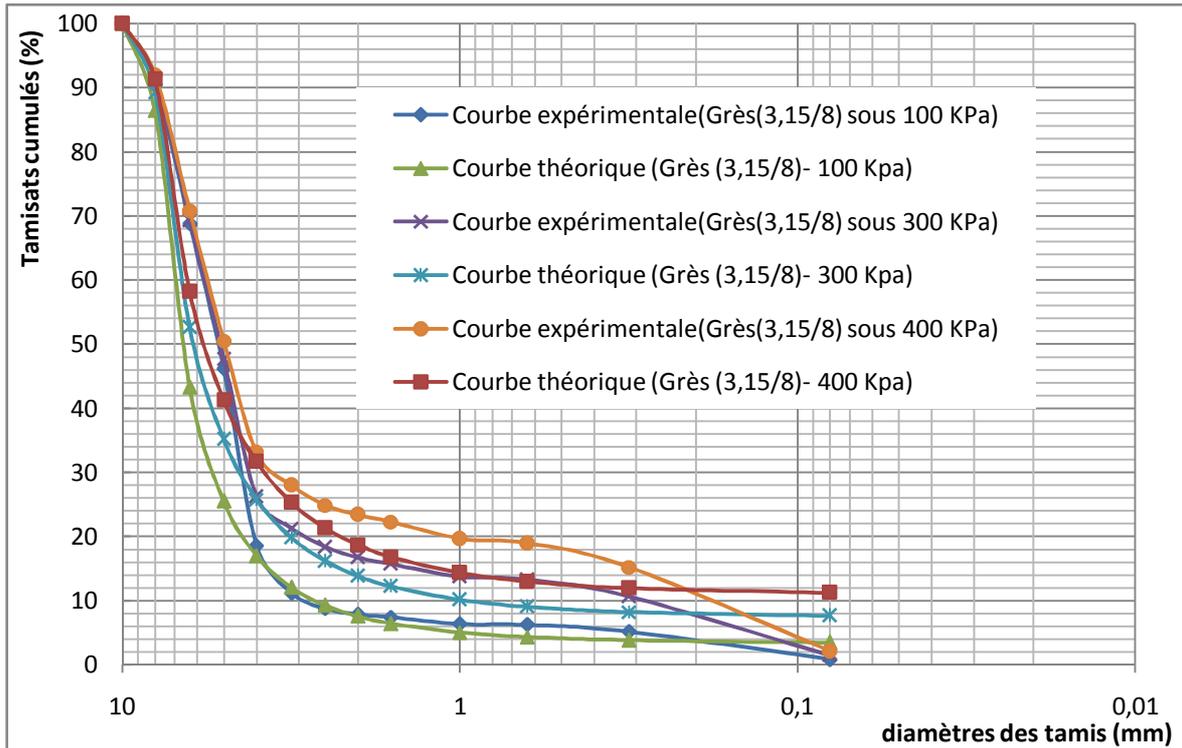


Figure V.14 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau grès (3,15/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.18), (V.19) et (V.20), donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le grès (3,15/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (3,15/8) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	86,44		8	90,47		86,44		
6,3	43,25		6,3	68,80		43,25		
5	25,47		5	46,14		25,47		
4	16,95		4	18,54		16,95		
3,15	11,99		3,15	11,16		11,99		
2,5	9,20		2,5	8,72		9,20		
2	7,51		2	7,84		7,51		
1,6	6,38		1,6	7,38		6,38		
1	5,00		1	6,33		5,00		
0,63	4,30		0,63	6,22		4,30		
0,315	3,78		0,315	5,11		3,78		
0,08	3,43		0,08	0,81		3,43		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	323,70	Somme	Σ	377,51	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	29,04
Moyenne	\bar{x}	24,90	Moyenne	\bar{x}	29,04	Variance	S^2	987,38
						Ecart type	S	31,42

Tableau V.18 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/8) après cisaillement sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (3,15/8) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale			Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)				
10	100,00		10	100,00				100,00
8	89,27		8	91,48				89,27
6,3	52,63		6,3	69,32				52,63
5	35,13		5	47,67				35,13
4	25,75		4	26,19				25,75
3,15	19,77		3,15	21,26				19,77
2,5	16,15		2,5	18,34				16,15
2	13,83		2	16,71				13,83
1,6	12,21		1,6	15,70				12,21
1	10,13		1	13,68				10,13
0,63	9,03		0,63	13,24				9,03
0,315	8,19		0,315	10,60				8,19
0,08	7,61		0,08	1,46				7,61
Fond	0,00		Fond	0,00				0,00
Somme	Σ	399,69	Somme	Σ	445,65	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	34,28
Moyenne	\bar{x}	30,75	Moyenne	\bar{x}	34,28	Variance	S^2	908,49
						Ecart type	S	30,14

Tableau V.19 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/8) après cisaillement sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le grès (3,15/8) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale			Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)				
10	100,00		10	100,00				100,00
8	91,33		8	92,07				91,33
6,3	58,21		6,3	70,83				58,21
5	41,25		5	50,48				41,25
4	31,64		4	33,05				31,64
3,15	25,26		3,15	27,99				25,26
2,5	21,27		2,5	24,85				21,27
2	18,63		2	23,38				18,63
1,6	16,75		1,6	22,26				16,75
1	14,29		1	19,62				14,29
0,63	12,96		0,63	18,94				12,96
0,315	11,92		0,315	15,18				11,92
0,08	11,20		0,08	2,08				11,20
Fond	0,00		Fond	0,00				0,00
Somme	Σ	454,71	Somme	Σ	500,73	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	38,52
Moyenne	\bar{x}	34,98	Moyenne	\bar{x}	38,52	Variance	S^2	849,94
						Ecart type	S	29,15

Tableau V.20 : Estimation de l'écart type pour le grès (3,15/8) après cisaillement sous 400 KPa.

Ø Pour le granit (3,15/5) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.15) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau granit (3,15/5) après cisaillement sous 100,300 et 400KPa.

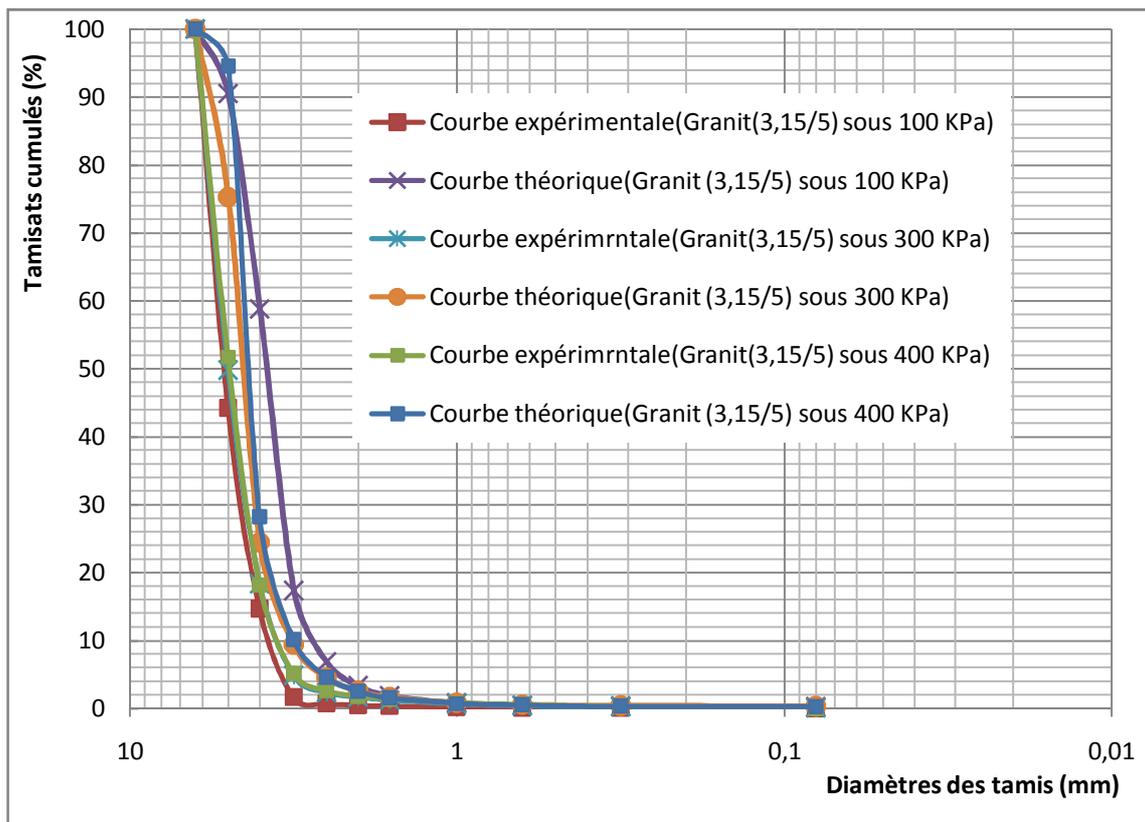


Figure V.15 : Courbes expérimentales et théoriques pour le matériau granit (3,15/5) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.21), (V.22) et (V.23), donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le granit (3,15/5) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (3,15/5) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	30,51		5	44,16		30,51		
4	7,25		4	14,63		7,25		
3,15	2,14		3,15	1,61		2,14		
2,5	0,84		2,5	0,67		0,84		
2	0,41		2	0,45		0,41		
1,6	0,23		1,6	0,32		0,23		
1	0,10		1	0,17		0,10		
0,63	0,06		0,63	0,10		0,06		
0,315	0,04		0,315	0,04		0,04		
0,08	0,03		0,08	0,01		0,03		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	141,59	Somme	Σ	162,17	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	14,74
Moyenne	\bar{x}	12,87	Moyenne	\bar{x}	14,74	Variance	S^2	836,80
						Ecart type	S	28,93

Tableau V.21 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/5) après cisaillement sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (3,15/5) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	39,95		5	49,79		39,95		
4	12,96		4	18,35		12,96		
3,15	4,98		3,15	4,84		4,98		
2,5	2,39		2,5	2,32		2,39		
2	1,36		2	1,67		1,36		
1,6	0,87		1,6	1,20		0,87		
1	0,44		1	0,67		0,44		
0,63	0,29		0,63	0,40		0,29		
0,315	0,20		0,315	0,23		0,20		
0,08	0,16		0,08	0,05		0,16		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	163,61	Somme	Σ	179,51	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	16,32
Moyenne	\bar{x}	14,87	Moyenne	\bar{x}	16,32	Variance	S^2	853,37
						Ecart type	S	29,21

Tableau V.22 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/5) après cisaillement sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (3,15/5) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	45,81		5	51,76		45,81		
4	13,67		4	18,12		13,67		
3,15	4,89		3,15	5,12		4,89		
2,5	2,23		2,5	2,64		2,23		
2	1,22		2	1,76		1,22		
1,6	0,75		1,6	1,41		0,75		
1	0,36		1	0,84		0,36		
0,63	0,23		0,63	0,54		0,23		
0,315	0,16		0,315	0,30		0,16		
0,08	0,12		0,08	0,01		0,12		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	169,45	Somme	Σ	182,50	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	16,59
Moyenne	\bar{x}	15,40	Moyenne	\bar{x}	16,59	Variance	S^2	883,81
						Ecart type	S	29,73

Tableau V.23 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/5) après cisaillement sous 400 KPa.

Ø Pour le granit (3,15/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.16) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau granit (3,15/8) après cisaillement sous 100,300 et 400KPa.

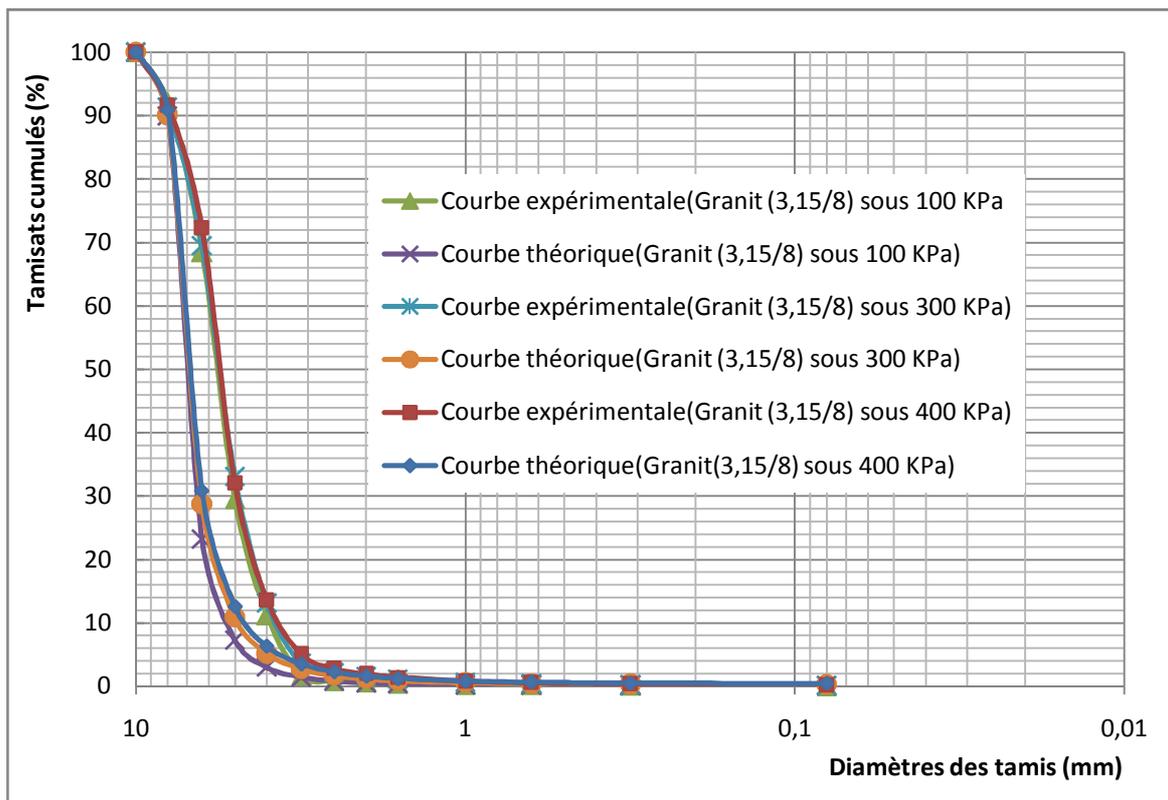


Figure V.16 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau granit (3,15/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.24), (V.25) et (V.26), donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le granit (3,15/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (3,15/8) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	89,92		8	92,05		89,92		
6,3	23,14		6,3	68,47		23,14		
5	7,22		5	29,52		7,22		
4	2,95		4	11,19		2,95		
3,15	1,38		3,15	1,64		1,38		
2,5	0,77		2,5	0,82		0,77		
2	0,49		2	0,60		0,49		
1,6	0,34		1,6	0,40		0,34		
1	0,20		1	0,22		0,20		
0,63	0,14		0,63	0,15		0,14		
0,315	0,11		0,315	0,08		0,11		
0,08	0,09		0,08	0,01		0,09		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	226,76	Somme	Σ	305,14	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	23,47
Moyenne	\bar{x}	17,44	Moyenne	\bar{x}	23,47	Variance	S^2	1169,37
						Ecart type	S	34,20

Tableau V.24 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/8) après cisaillement sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (3,15/8) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale			Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)				
10	100,00		10	100,00				100,00
8	74,23		8	91,28				74,23
6,3	28,74		6,3	69,46				28,74
5	10,83		5	33,01				10,83
4	5,11		4	13,09				5,11
3,15	2,70		3,15	3,58				2,70
2,5	1,66		2,5	2,10				1,66
2	1,14		2	1,45				1,14
1,6	0,84		1,6	1,04				0,84
1	0,54		1	0,58				0,54
0,63	0,41		0,63	0,37				0,41
0,315	0,32		0,315	0,18				0,32
0,08	0,27		0,08	0,06				0,27
Fond	0,00		Fond	0,00				0,00
Somme	Σ	226,79	Somme	Σ	316,20	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	24,32
Moyenne	\bar{x}	17,45	Moyenne	\bar{x}	24,32	Variance	S^2	1011,59
						Ecart type	S	31,81

Tableau V.25 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/8) après cisaillement sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le granit (3,15/8) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100,00		100,00		
8	90,92		8	91,64		90,92		
6,3	30,86		6,3	72,22		30,86		
5	12,56		5	32,04		12,56		
4	6,29		4	13,59		6,29		
3,15	3,50		3,15	5,05		3,50		
2,5	2,23		2,5	2,73		2,23		
2	1,58		2	1,92		1,58		
1,6	1,20		1,6	1,40		1,20		
1	0,79		1	0,79		0,79		
0,63	0,61		0,63	0,52		0,61		
0,315	0,49		0,315	0,32		0,49		
0,08	0,42		0,08	0,11		0,42		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	251,46	Somme	Σ	322,33	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	24,79
Moyenne	\bar{x}	19,34	Moyenne	\bar{x}	24,79	Variance	S^2	1150,88
						Ecart type	S	33,92

Tableau V.26 : Estimation de l'écart type pour le granit (3,15/8) après cisaillement sous 400 KPa.

Ø Pour le calcaire (3,15/5) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.17) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau calcaire (3,15/5) après cisaillement sous 100,300 et 400KPa.

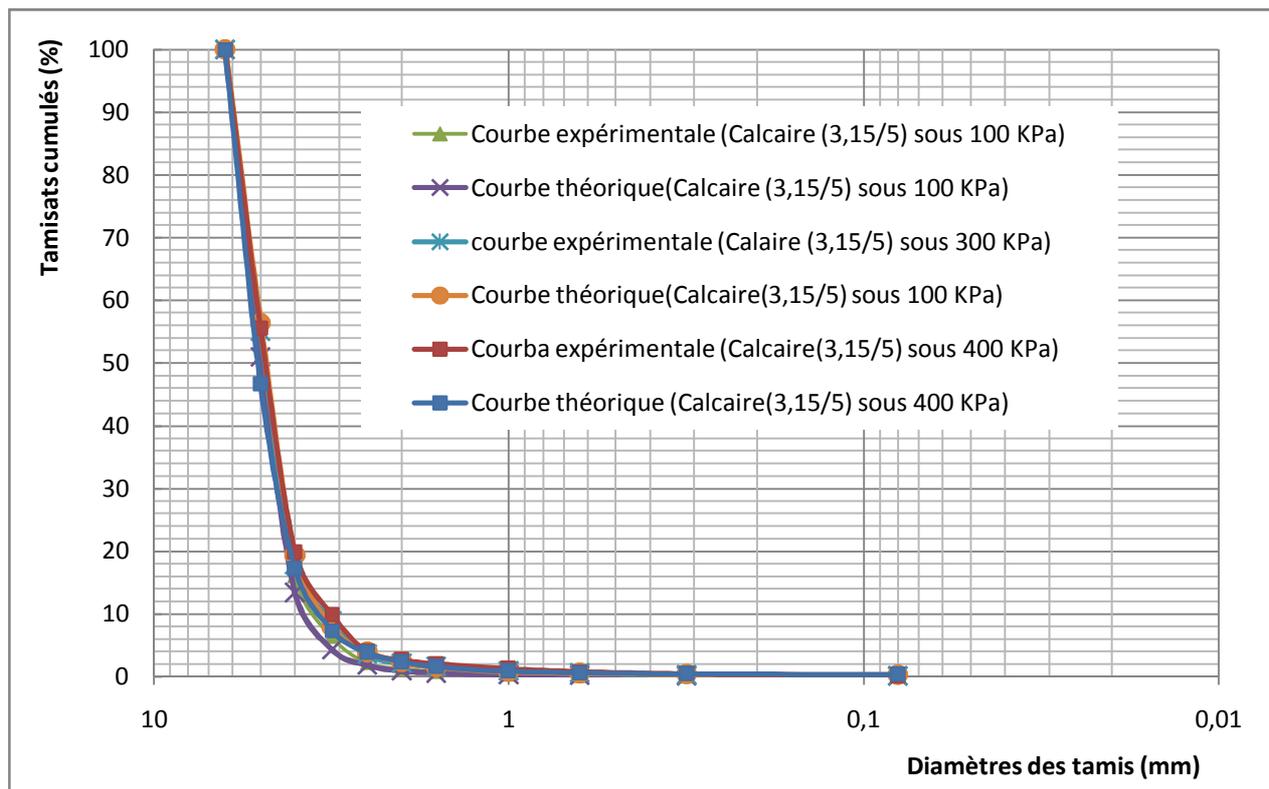


Figure V.17 : Courbes expérimentales et théoriques pour le matériau calcaire (3,15/5) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.27), (V.28) et (V.29), donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le calcaire (3,15/5) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (3,15/5) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	45,91		5	56,21		45,91		
4	12,05		4	16,04		12,05		
3,15	3,86		3,15	6,34		3,86		
2,5	1,62		2,5	2,20		1,62		
2	0,83		2	1,21		0,83		
1,6	0,49		1,6	0,82		0,49		
1	0,22		1	0,39		0,22		
0,63	0,13		0,63	0,17		0,13		
0,315	0,09		0,315	0,04		0,09		
0,08	0,06		0,08	0,02		0,06		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	165,25	Somme	Σ	183,44	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	16,68
Moyenne	\bar{x}	15,02	Moyenne	\bar{x}	16,68	Variance	S^2	892,61
						Ecart type	S	29,88

Tableau V.27 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/5) après cisaillement sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (3,15/5) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	46,15		5	55,05		46,15		
4	15,55		4	17,78		15,55		
3,15	6,17		3,15	8,87		6,17		
2,5	3,04		2,5	3,52		3,04		
2	1,76		2	2,14		1,76		
1,6	1,14		1,6	1,58		1,14		
1	0,59		1	0,92		0,59		
0,63	0,40		0,63	0,57		0,40		
0,315	0,28		0,315	0,30		0,28		
0,08	0,22		0,08	0,05		0,22		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	175,30	Somme	Σ	190,77	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	17,34
Moyenne	\bar{x}	15,94	Moyenne	\bar{x}	17,34	Variance	S^2	877,45
						Ecart type	S	29,62

Tableau V.28 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/5) après cisaillement sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (3,15/5) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
6,3	100,00		6,3	100,00		100,00		
5	46,60		5	55,55		46,60		
4	17,16		4	19,82		17,16		
3,15	7,34		3,15	9,85		7,34		
2,5	3,83		2,5	4,01		3,83		
2	2,33		2	2,70		2,33		
1,6	1,56		1,6	2,01		1,56		
1	0,86		1	1,25		0,86		
0,63	0,59		0,63	0,81		0,59		
0,315	0,43		0,315	0,46		0,43		
0,08	0,34		0,08	0,10		0,34		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	181,04	Somme	Σ	196,55	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	17,87
Moyenne	\bar{x}	16,46	Moyenne	\bar{x}	17,87	Variance	S^2	871,49
						Ecart type	S	29,52

Tableau V.29 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/5) après cisaillement sous 400 KPa.

Ø Pour le calcaire (3,15/8) sous 100, 300 et 400 KPa.

La figure (V.18) ci-dessous, montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau calcaire (3,15/8) après cisaillement sous 100,300 et 400KPa.

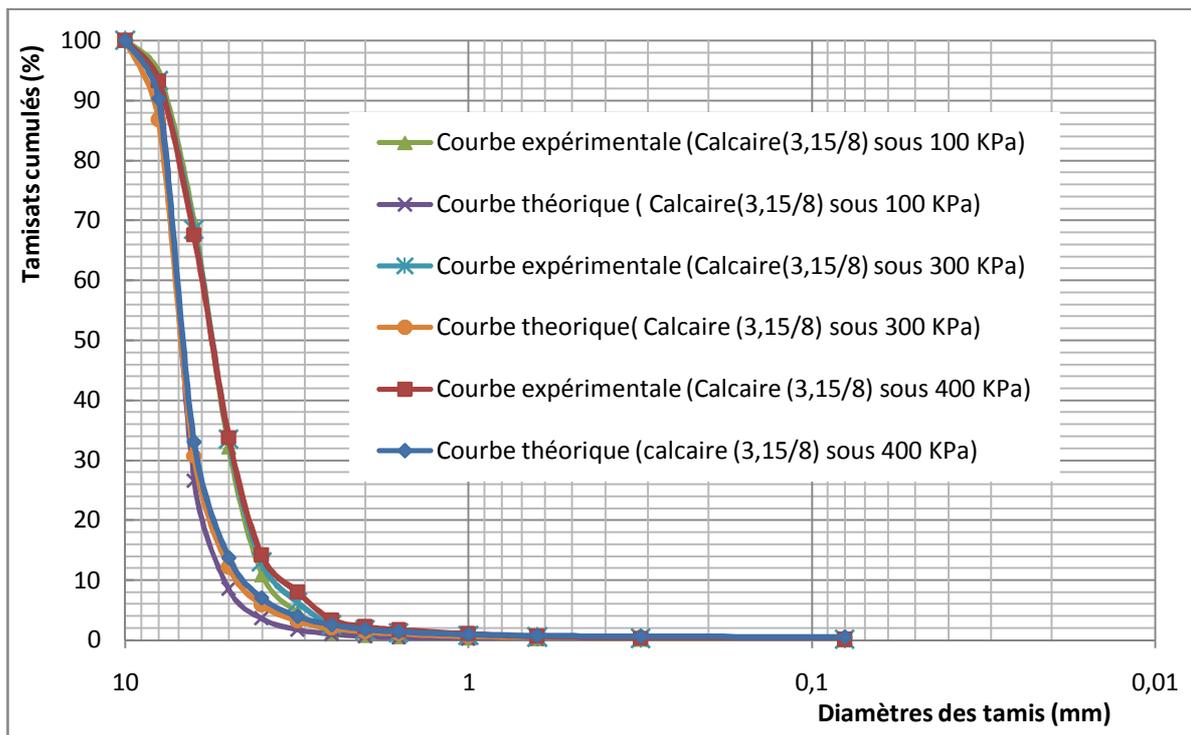


Figure V.18 : Courbes expérimentales et théoriques pour le matériau calcaire (3,15/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa.

Les tableaux (V.30), (V.31) et (V.32), donnent les valeurs des écarts types entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le calcaire (3,15/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400 KPa. Respectivement.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (3,15/8) sous 100 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100		100,00		
8	91,87		8	94,44		91,87		
6,3	26,54		6,3	69,58		26,54		
5	8,55		5	32,14		8,55		
4	3,58		4	10,88		3,58		
3,15	1,71		3,15	4,68		1,71		
2,5	0,97		2,5	1,17		0,97		
2	0,63		2	0,76		0,63		
1,6	0,44		1,6	0,57		0,44		
1	0,26		1	0,31		0,26		
0,63	0,19		0,63	0,18		0,19		
0,315	0,14		0,315	0,09		0,14		
0,08	0,12		0,08	0,01		0,12		
Fond	0,00		Fond	0		0,00		
Somme	Σ	234,99	Somme	Σ	314,81	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	24,22
Moyenne	\bar{x}	18,08	Moyenne	\bar{x}	24,22	Variance	S^2	1190,60
						Ecart type	S	34,50

Tableau V.30 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/8) après cisaillement sous 100 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (3,15/8) sous 300 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100		100,00		
8	86,79		8	93,23		86,79		
6,3	30,73		6,3	68,46		30,73		
5	12,10		5	33,47		12,10		
4	5,90		4	12,99		5,90		
3,15	3,21		3,15	6,3		3,21		
2,5	2,01		2,5	2,51		2,01		
2	1,41		2	1,65		1,41		
1,6	1,06		1,6	1,22		1,06		
1	0,69		1	0,71		0,69		
0,63	0,53		0,63	0,48		0,53		
0,315	0,42		0,315	0,27		0,42		
0,08	0,35		0,08	0,07		0,35		
Fond	0,00		Fond	0		0,00		
Somme	Σ	245,20	Somme	Σ	321,36	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	24,72
Moyenne	\bar{x}	18,86	Moyenne	\bar{x}	24,72	Variance	S^2	1115,26
						Ecart type	S	33,39

Tableau V.31 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/8) après cisaillement sous 300 KPa.

Evaluation statistique du calcul d'erreur pour le calcaire (3,15/8) sous 400 KPa								
Courbe théorique			Courbe expérimentale					
Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Diamètres (mm)	Tamisât cumulés (%)		Tamisât. Cum de la courbe théorique (%)		
10	100,00		10	100		100,00		
8	90,25		8	93,32		90,25		
6,3	33,03		6,3	67,62		33,03		
5	13,77		5	33,84		13,77		
4	7,02		4	14,16		7,02		
3,15	3,96		3,15	8,01		3,96		
2,5	2,56		2,5	3,46		2,56		
2	1,83		2	2,22		1,83		
1,6	1,40		1,6	1,69		1,40		
1	0,93		1	1,03		0,93		
0,63	0,73		0,63	0,65		0,73		
0,315	0,59		0,315	0,35		0,59		
0,08	0,50		0,08	0,10		0,50		
Fond	0,00		Fond	0,00		0,00		
Somme	Σ	256,56	Somme	Σ	326,44	Moyenne de la courbe expérimentale	\bar{x}	25,11
Moyenne	\bar{x}	19,74	Moyenne	\bar{x}	25,11	Variance	S^2	1139,73
						Ecart type	S	33,75

Tableau V.32 : Estimation de l'écart type pour le calcaire (3,15/8) après cisaillement sous 400 KPa.