

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou
Faculté de génie de la construction
Département de génie civil
Laboratoire Géo matériaux Environnement et Aménagement
(LGEA)



Mémoire de MASTER 2

Option: Géotechnique et Environnement

Présenté par M^{elle} BOUZEBODJA Aldjia

Thème :

Influence de la forme des grains sur les caractéristiques du cisaillement

Soutenu le 08 juillet 2010 devant le jury :

Mr. AIT TAHAR

Mr. MELBOUCI Bachir

Mr. AIT AMAR

Mr. MEGHLAT

Pr ; UMMTO

Pr ; UMMTO

M.A.A ; UMMTO

M.A ; UMMTO

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

Promotion : 2009/2010

Dédicaces

« Rien n'est beau à offrir que le fruit d'un labour qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence. »

Je dédie ce modeste travail

A ceux qui ont su planter en moi tout ce qui est le plus beau en ce monde, et que se sont consacrés à m'inculquer la bonne éducation pour avoir la plus grande des satisfactions et me voir munie des plus grandes distinctions ; ma très chère mère que je ne saurai remercier assez pour les sacrifices qu'elle a consentis pour moi, mon très cher père qui a su se faire sentir dans les moments difficiles ainsi que chaque instant de bonheur qu'il m'a procuré.

A mes frères et sœurs.

A la famille de ma sœur Fatma surtout le petit Samy.

A tous mes amis (es) et mes camarades.

Aldjia

Remerciements

Au premier lieu, je remercie **DIEU**, le tout puissant, de m'avoir aidé à arriver au terme de ce travail et grâce à qui toutes bonnes choses arrivent.

Mes vifs remerciements vont à mon promoteur monsieur le professeur **B.MELBOUCI**, pour m'avoir proposé ce sujet que je trouve très intéressant et d'actualité, pour ces précieux conseils, orientations, sa prise en charge pédagogique et sa patience.

Je remercie monsieur le professeur **R.BAHAR** le directeur de laboratoire qui a mis à notre disposition les moyens nécessaires pour la réalisation des essais, mes sœurs M^{elle} O.BOUZEBODJA enseignante au département de l'électronique et M^{me} F.IDDIR enseignante à l'université de Boumerdes ; sans oublier tous les ingénieurs du laboratoire de mécanique des sols.

Mes remerciements sont exprimés particulièrement :

- Aux membres de jury qui me font l'honneur d'examiner ce modeste travail.
- A tout le personnel du département de Génie Civil.
- A tous ceux qui m'ont apportés de l'aide et encouragement de près ou de loin.

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
Liste des principaux symboles et notations utilisés	IV
Introduction générale	1

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction de la première partie	3
Chapitre I : Généralités sur la mécanique des sols et le milieu granulaire	
Introduction	5
I.1 - Mécanique des sols	5
I.1.1 - Historique succinct	5
I.1.2 - Sciences proches de la mécanique des sols	5
I.1.3 - Domaines d'application	7
I.2 - Propriétés générales d'un milieu granulaire	7
I.2.1 - Origine des sols	8
I.2.2 - Les différents types de granulats	9
I.2.2.1 - Les granulats naturels	9
I.2.2.2 - Les granulas artificiels	10
I.2.2.3 - Les granulats très légers	11
I.3 - Identification et classification des sols grenus	12
I.3.1 - Caractéristiques physiques des sols grenus	12
I.3.2 - Identification par granulométrie	15
I.3.3 - Coefficient d'aplatissement des granulats	18
Conclusion	23
Chapitre II: Les définitions et Les méthodes de quantification de la forme des grains	
Introduction	24
II.1 - La forme des grains	24
II.1.1 - Caractérisation de la forme des grains	25
II.1.1.1 - La forme	26
II.1.1.2 - L'arrondi	27
II.1.1.3 - la rugosité	29
II.2 - Méthodes de quantification de la forme globale des grains	24
II.2.1 - Les méthodes visuelles	30
II.2.1.1 - La sphéricité et l'arrondi	31
II.2.1.2 - Surface spécifique	33
II.2.1.3 - La méthode norvégienne pour la classification des agrégats pour le béton	34
II.2.2 - Analyse d'image	35
II.2.2.1 - Quantification bidimensionnelle de forme de grain par le système d'analyse d'image de <i>QMOT</i>	36
II.2.2.2 - Quantification tridimensionnelle de forme de grain par le système d' <i>UI-AIA</i>	38
II.2.2.3 - Méthodes de Fourier	39
II.3 - Discussion	46

II.3.1 - Méthode de Lees	46
II.3.2 - La méthode norvégienne pour la classification des agrégats pour le béton	46
II.3.3 - Analyse d'image bidimensionnelle	46
II.3.4 - Analyse d'image tridimensionnelle	46
II.3.5 - Méthodes de Fourier.....	47
Conclusion	48

Chapitre III : Effet de la forme des grains du sol sur le comportement mécanique des milieux granulaire

Introduction.....	49
III.1 - Microstructure des sols granulaires.....	49
III.1.1 - L'angle de frottement interne (ϕ)	50
III.1.2 - L'effet de la dilatance	51
III.1.3 - Le phénomène en détails.....	52
III.2 - Effets de la forme des grains sur l'angle de frottement.....	53
III.2.1 - L'influence de la rugosité surfacique sur ϕ	53
III.2.2 - L'influence de l'angularité sur ϕ	53
III.2.3 - L'influence de l'excentricité sur ϕ	54
III.3 - Effets de la forme des grains sur l'état critique	56
III.3.1 - Indice de vide maximal.....	58
III.3.2 - Les frontière d'état critique	60
III.3.3 - Le coefficient équivalent de frottement inter-particulaire	61
Conclusion	63
Conclusion de la première partie.....	64

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction de la deuxième partie.....	65
--	-----------

Chapitre IV : Etude expérimentale

Introduction.....	66
IV.1 - Définition de l'essai	66
IV.2 - Notion de résistance au cisaillement	66
IV.3 - But de l'essai.....	67
IV.4 - Principe de la méthode	68
IV.5 – Appareillage	68
IV.5.1 - La boîte de cisaillement	68
IV.5.2 - Les poids	70
IV.5.3 - La machine de cisaillement à déformations contrôlées	70
IV.6 - Essai de cisaillement direct.....	72
IV.6.1 - Sources d'erreurs.....	72
IV.7 - Choix des matériaux.....	73
IV.7.1 - Définition du sable	73
IV.7.2 - L'analyse morphologique	73
IV.7.3 - Caractérisation physique.....	75
IV.7.3.1 - L'analyse granulométrique	75
IV.7.3.2 - La courbe granulométrique.....	75
IV.7.3.3 - Interprétation.....	75
IV.8 - Déroulement des essais	77
IV.9 - Fin de l'essai	77
IV.10 - Essais réalisés.....	77
Conclusion	78

Chapitre V : Résultats et analyse

Introduction.....	79
V.1 - Traitement des résultats.....	79
V.2 - Photographie des différents types des échantillons avant et après l'essai.....	80
V. 3 - Présentation des diagrammes contrainte-déplacement.....	85
V.3.1 - Interprétation des résultats.....	87
V.4 - Présentation des courbes de variation du volume.....	88
V.4.1 - Phénomène de dilatance et de contractante.....	90
V.4.2 - Interprétation des résultats.....	90
V.5 - La courbe intrinsèque.....	91
V.5.1 - Détermination de l'angle de frottement interne.....	91
V.6 - Les courbes granulométriques après l'essai.....	93
V.6.1 - Interprétation des résultats de la granulométrie.....	95
Conclusion.....	96
Conclusion de la deuxième partie.....	97
Conclusion générale.....	99
Références bibliographiques.....	101
Annexe.....	104

Liste des figures ?

Figure (I.1) : Exemple d'un terrain granulaire	7
Figure (I.2) : Lavage des grains.....	10
Figure (I.3) : Extraction des roches massives.....	11
Figure (I.4) : Extraits des carrières.....	12
Figure (I.5) : Schéma simplifié des trois phases du sol.....	14
Figure (I.6) : Tamis en tôle perforée et en maille métallique.....	16
Figure (I.7) : Granulométrie par tamis	17
Figure (I.8) : Courbe granulométrique.....	18
Figure (I.9) : Les trois dimensions principales.....	19
Figure (I.10) : Une serie de tamis à fentes de largeurs normalisées.....	20
Figure (I.11) : Quelques formes des particules.....	21
Figure (I.12) : Détermination de la granulométrie de granulats in situ.....	21
Figure (I.13) : Vue d'ensemble du vidéogranulomètre développé au LCPC.....	22
Figure (II.1.a) : Eléments de qualification de la forme d'un grain en fonction de l'échelle d'observation	25
Figure (II.1.b) : Classification des grains à l'échelle de la forme en termes de rondeur et des sphéricités.....	25
Figure (II.2) : Les types de formes, qui sont généralement employés pour décrire la morphologie de grain	26
Figure (II.3) : Les diagrammes les plus utilisés par les géologues pour comparer l'arrondi des grains.....	28
Figure (II.4) : corrélation entre les valeurs numériques d'arrondi et les descriptions verbales utilisées pour classifier les grains.....	28
Figure (II.5) : Micro photos des grains sous les formes les plus utilisées.....	29
Figure (II.6) : Diagramme montrant l'indépendance de la forme, l'arrondi et la rugosité.....	30
Figure (II.7) : Diagramme employé pour caractériser la sphéricité S et l'arrondi R des grains (modifié de <i>KRUMBEIN</i> et de <i>SLOSS</i> 1963).....	31
Figure (II.8) : Diagramme global de classification (<i>LEES</i> , 1964, <i>JANOO</i> , 1998).....	33
Figure (II.9) : Résultats de caractérisation de la forme de grain après (1964) méthode de <i>Lees</i>	35
Figure(II.10.a) : Secteur d'un agrégat (<i>JANOO</i> 1998)	36
Figure (II.10.b) : Périmètre d'un agrégat(<i>JANOO</i> 1998).....	36
Figure (II.11.a) : Mesure de Féret (<i>JANOO</i> 1998).....	37
Figure (II.11.b) : Illustration de périmètre convexe (<i>JANOO</i> 1998).....	37
Figure (II.12) : Schéma montrant les difficultés rencontrées avec les angles rentrants	40
Figure (II.13) : Représentation de Fourier de la forme des grains en utilisant différents nombres d'harmoniques (<i>GARBOCZI</i> 2002).....	42
Figure (II.14) : Analyse fractale des grains du sable (<i>HYSLIP</i> et <i>VALLEJO</i> 1997).....	43
Figure (II.15) : La dimension fractale en fonction de la rugosité de sable	43
Figures (II.16) : Les formes générales utilisées pour étudier la description morphologique des descripteurs de Fourier	45
Figure (III.1) : Microstructure des sols granulaires (d'après <i>DAVALLE</i> ,1991).....	49
Figure (III.2) : Le phénomène de la dilatance à l'échelle des grains	52
Figure (III.3) : Ralentissement de la rotation dû à la rugosité extérieure des grains.....	53
Figure (III.4) : Effets de la forme des grains sur la formation de bande de cisaillement	54
Figure (III.5) : Effet de l'excentricité sur le comportement du sol.....	55
Figure (III.6) : L'effet de la forme des grains sur les paramètres d'état critique	57

Figure (III.7) : Angle de frottement d'état critique en fonction d'arrondi des grains	57
Figure (III.8) : Effet de la forme des grains sur les indices des vides extrêmes	58
Figure (III.9) : Les valeurs de e_{max} en fonction du coefficient d'uniformité	59
Figure (III.10) : Le rapport entre les valeurs d'arrondi déterminées	59
Figure (III.11) : Frontières d'état critiques pour différents groupes d'angularité	60
Figure (III.12) : Frontières d'état critiques pour différents groupes de forme	61
Figure (III.13): Les frontières d'état critiques pour les grains circulaires (coefficients inter-particulaires des différents frottements) avec celles de différents groupes de facteur d'angularité ($f = 0.5$) (SALLAM .A. M., ASHMAWY. A. K, 2009).....	62
Figure (IV.1) : Courbe contrainte-déformation dans un essai de cisaillement.....	68
Figure (IV.2) : La courbe intrinsèque	68
Figure (IV.3) : Principe de l'essai de cisaillement directe	69
Figure (IV.4) : Un modèle de boîtes de cisaillement	70
Figure (IV.5) : Schéma présentatif de la boîte de cisaillement directe.....	70
Figure (IV.6) : La machine de cisaillement.....	71
Figure (IV.7) : Montage d'un essai de cisaillement directe	72
Figure (IV.8) : Eprouvette parallélépipédique cisailée	73
Figure (IV.9) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est arrondie	74
Figure (IV.10) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est sous arrondie ..	75
Figure (IV.11) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est sous angulaire ..	75
Figure (IV.12) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est angulaire.....	75
Figure (IV.13) : conduite de l'essai granulométrique du sable	76
Figure (IV.14) : Courbes granulométriques des quatre classes granulaires avant l'essai	77
Figure (V.1) : Photographies de la fraction «1» (la forme arrondie) avant et après l'essai	82
Figure (V.2) : Photographies de la fraction «2» (la forme sous arrondie) avant et après l'essai.....	83
Figure (V.3) : Photographies de la fraction «3» (la forme sous angulaire) avant et après l'essai.....	84
Figure (V.4) : Photographies de la fraction «4» (la forme angulaire) avant et après L'essai	85
Figure (V.5) : Courbe contrainte - déplacement de différentes fractions sous 100 KPa.....	86
Figure (V.6) : Courbe contrainte - déplacement de différentes fractions sous 200 KPa.....	86
Figure (V.7) : Courbe contrainte - déplacement de différentes fractions sous 300 KPa.....	87
Figure (V.8) : Courbes contrainte - déplacement de différentes fractions sous 400 KPa.....	87
Figure (V.9) : Courbe de variation du volume de différentes fractions sous 100 KPa.....	89
Figure (V.10) : Courbe de variation du volume de différentes fractions sous 200 KPa.....	90
Figure (V.11) : Courbe de variation du volume de différentes fractions sous 300 KPa.....	90
Figure (V.12) : Courbe de variation du volume des différentes fractions sous 400 KPa.....	91
Figure (V.13) : Courbes intrinsèques de différentes fractions.....	93
Figure (V.14) : Comparaison entre les angles de frottement des différentes formes des Grains	93
Figure (V.14) : La courbe granulométrique de la fraction "1"(arrondie) après le Cisaillement	94
Figure (V.15) : La courbe granulométrique de la fraction"2" (sous arrondie) après le cisaillement	95
Figure (V.16) : La courbe granulométrique de la fraction"3" (sous angulaire) après le cisaillement	95
Figure (V.17) : La courbe granulométrique de la fraction" 4" (angulaire) après le Cisaillement	96

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Classification élémentaire des sols.....	18
Tableau (I.2) : classification des sols grenus.....	20
Tableau (II.1) : Description de forme globale.....	31
Tableau(III.1) : Facteurs de forme et d'angularité pour différents groupes.....	60

Liste des principaux symboles et notations utilisés

Notatio	Définition	Dimension
$AI_{\text{particule}}$	Indice d'obliquité (angularité) pour le grain	sans
Ang	Obliquité (angularité) pour une vue	sans
Cc	Coefficient de courbure	sans
Cu	Coefficient d'uniformité	sans
d	Dimension minimale des plus petits éléments en	mm
D	Dimension maximale des plus gros élément en	mm
Dr	Densité relative	sans
D_{10}	Diamètre des grains pour lequel on a 10% de passant au tamis	μm
D_{30}	Diamètre des grains pour lequel on a 30% de passant au tamis	μm
D_{60}	Diamètre des grains pour lequel on a 60% de passant au tamis	μm
e	Indice des vides	sans
e_{max}	Indice des vides dans l'état le plus lâche	sans
e_{min}	Indice des vides dans l'état le plus dense	sans
f	facteur de forme	sans
I_D	Indice de densité	%
Md	la masse de l'échantillon séché	kg ou en g
n	Porosité	%
Sr	Degré de saturation	%
V	Volume total de l'échantillon	m^3 ou cm^3
V_s	Volume des grains solides	m^3 ou cm^3
V_t	Volume total	m^3 ou cm^3
V_v	Volume des vides	m^3 ou cm^3
w	Teneur en eau	sans
ρ_s	Masse volumique des grains solides	kg/m^3 ou g/cm^3

ρ_b	Masse volumique apparente du milieu granulaire	kg/m ³ ou g/cm ³
ρ_p	Masse volumique réelle de la particule	kg/m ³ ou g/cm ³
ρ_f	Masse volumique du fluide qui remplit les pores	kg/m ³ ou g/cm ³
ψ	le coefficient de dilatance	sans
ε	Déformation relative linéaire	%
φ	L'angle de frottement interne.	degrés
φ_{cs}	L'angles de frottement à l'état critique	degrés
φ_u'	Angle physique lié à la rotation et au frottement de glissement	kPa
σ	Contrainte normale totale	kPa
σ'	Contrainte normale effective	kPa
σ_1	Contrainte principale majeur	kPa
σ_2	Contrainte principale intermédiaire	kPa
σ_3	Contrainte principale mineure	kPa
τ	Contrainte de cisaillement	kPa
τ_f	Résistance au cisaillement	kPa
μ	Coefficient de Poisson	sans

Introduction générale

Introduction générale

Bien que très répandus, les milieux granulaires présentent une variété de comportement qui les rend difficilement classables parmi les habituels états de la matière. Cela soulève des questions importantes dans des secteurs professionnels très variés : du génie civil jusqu'à la coopérative agricole qui stocke son blé dans des silos. Les milieux granulaires constituent à la fois un défi pour la recherche et un enjeu économique important.

Sur la quasi-totalité de la surface terrestre, les géométraux se présentent comme des collections des grains (grains d'argile, grains de sable, graviers, etc.). Ces grains peuvent être de nature (taille, forme, composition, etc.) très diverse. Mais dans tous les cas, ils présentent deux caractéristiques qui leur confèrent un comportement particulier : (1) ils sont trop grands pour que les agitations thermiques aient un effet important dans leur comportement (leur diamètre est supérieur à $1 \mu\text{m}$), et (2) les interactions au niveau des contacts (collisions inélastiques et frottement) sont essentiellement dissipatives. On appelle ces matériaux, les matériaux granulaires.

L'étude du comportement des matériaux granulaires a mobilisé, depuis de nombreuses années, un important effort de recherche dans des disciplines diverses telles que la géologie, la mécanique des sols et des roches, le génie des procédés et la physique de la matière condensée. Cependant, la compréhension de leur comportement est une tâche qui est loin d'être achevée. En fait, ces travaux ont permis de montrer que, même si chaque grain est un objet assez simple, l'ensemble de grains est un système très complexe, dans lequel le désordre et le caractère divisé du milieu jouent un rôle capital.

Un des nombreux problèmes intéressants dans l'étude des milieux granulaires est celui du cisaillement. C'est aussi un problème avec des implications pratiques très importantes, car la résistance au cisaillement des géométraux détermine la stabilité de nombreux systèmes naturels et anthropiques tels que les glissements de terrain, les failles géologiques, les fondations, et les ouvrages de soutènement. Le "fonctionnement" mécanique de ces systèmes est habituellement décrit à l'aide d'un ensemble de "lois de comportement" macroscopiques.

Cependant, même si ces lois s'avèrent très utiles dans la pratique, elles font souvent intervenir des variables dont le sens physique n'est pas facile à préciser. Pour cette raison, ces lois restent un outil limité pour comprendre, du point de vue physique, le comportement du système à l'échelle macroscopique. Au contraire, lorsqu'on étudie le milieu à l'échelle des grains, le sens physique des variables qui interviennent est beaucoup plus clair ; ces variables "microscopiques" sont, par exemple, les propriétés géométriques de l'arrangement des grains, les propriétés physiques des grains, les forces et les orientations des contacts, entre autres.

Beaucoup de travaux de recherche actuels visent à élucider le comportement mécanique des matériaux granulaires. Ce mémoire s'inscrit dans ce mouvement et propose, en effet, d'étudier l'influence de la forme des grains sur les caractéristiques de cisaillement direct.

Ce travail est composé de deux parties principales :

Dans la première partie, une synthèse bibliographique est présentée en trois chapitres. Cette étude bibliographique s'appuie tout d'abord sur des sources d'informations à vocation générale (recherche sur internet et sur quelques périodiques), puis nous nous reporterons aux références spécialisées dans le domaine de la mécanique des sols.

La deuxième partie, est consacrée à l'étude expérimentale, qui se partage en deux chapitres où nous avons définie l'essai, son appareillage et les matériaux utilisés et en fin nous avons présenté les résultats et leurs interprétations.

La dernière partie dégage les points portant sur l'influence de la forme des grains sur leur comportement.

Quelques définitions des différents paramètres ont été utilisés. Ainsi qu'une annexe donnant la définition de la rupture lors des essais de cisaillement.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

***Chapitre I : Généralités sur la
mécanique des sols et le milieu
granulaire***

***Chapitre II: Les définitions et Les
méthodes de quantification de la
forme des grains***

***Chapitre III : Effet de la forme des
grains sur le comportement
mécanique des milieux granulaires***

Introduction de la première partie

Les milieux granulaires composent notre environnement immédiat, l'existence de toute espèce passe plus ou moins directement par leur utilisation et leur compréhension. La compréhension de cet environnement paraît tellement intrinsèque à la survie de l'homme que peu de civilisations ont déifié le concept de milieu granulaire.

Ainsi, depuis longtemps, de nombreux procédés industriels reposent sur l'exploitation des poudres et des grains. Ces procédés, pourtant simples et faciles à appréhender (stockages, transports...), ont généralement nécessité, pour leur mise au point, de nombreuses années d'amélioration patiente, la germination d'idées astucieuses et l'utilisation d'associations d'idées et de résultats expérimentaux plus ou moins simples. On note actuellement l'émergence de nombreuses applications nouvelles, d'obtention de brevets (céramique, terre armée, pneu-sol, ancre pour du sable,...) accompagnés d'une connaissance théorique accrue du comportement rhéologique des milieux granulaires (stabilité des pentes, liquéfaction pendant les tremblements de terre...). Le champ d'utilisation des milieux granulaires présente ainsi une grande diversité. Cependant, la compréhension des mécanismes mis en jeu dans ces applications reste simple, voire intuitive. Dans une phase de modélisation, il semble naturel d'associer à cette grande diversité de comportements un nombre suffisant de paramètres de contrôle. Or la multiplication de ces paramètres s'oppose à la simplicité recherchée du modèle. nous proposons une vue cohérente et unificatrice de la mécanique d'un milieu granulaire, basée sur un nombre très restreint de paramètres de contrôle (contrainte intergranulaire, déformation du milieu, histoire des contacts, la nature des grains, le niveau de confinement, la rugosité de la surface des grains, la morphologie des grains, la taille des grains). Le champ d'évolution de ces paramètres traduit la diversité de comportements recherchée. Nous verrons par ailleurs que i) certains états de la matière, aux grandes déformations, sont des attracteurs et que ii) si l'on ramène la description du comportement dans des axes précis, sa description devient beaucoup plus simple.

Cette partie est consacrée à l'étude bibliographique et divisée en trois chapitres repartie comme suit :

Le premier chapitre, représente une description détaillée de la mécanique des sols et des matériaux granulaires.

Le second chapitre, regroupe des définitions et des méthodes des quantifications de la forme des grains.

Le troisième chapitre, consiste à étudier l'effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des milieux granulaires.

Chapitre I

Généralités sur la mécanique des sols et le milieu granulaire

Introduction

Les granulats constituent la matière première essentielle du bâtiment et des travaux publics, sans laquelle la réalisation des ouvrages serait aujourd'hui impossible.

Le milieu granulaire est un terme utilisé pour désigner une vaste famille de matériaux, qui présentent un comportement original, intermédiaire entre celui des solides et celui des liquides, et qui sont présents partout dans la nature et dans le monde industriel.

I.1 - Mécanique des sols

La mécanique des sols est l'application des lois mécaniques et hydrauliques au matériau sol. Comparé aux nombreux autres matériaux étudiés en mécanique, comme les bétons, les aciers, les plastiques et le bois, le sol présente deux originalités. C'est d'une part un milieu discontinu qu'il faudra donc étudier à la fois dans sa globalité et dans sa composition élémentaire, et d'autre part, c'est un matériau triphasique formé de grains solides, d'eau et d'air, qui jouent un rôle fondamental.

I.1.1 - Historique succinct

La mécanique des sols est une science jeune. Les premiers fondements peuvent être attribués à *Coulomb* (1773), qui a mis au point des méthodes de calcul dont certaines sont encore employées de nos jours. Au cours du siècle suivant, les ingénieurs français *Collin*, *Darcy* (ou *D'Arcy*) et l'*Ecossais Rankine* ont fait d'importantes découvertes. *Collin* fut le premier à étudier la rupture dans les talus d'argile et la résistance au cisaillement de l'argile. Au tournant du siècle, *Atterberg* énonça sa définition des limites de consistance de l'argile, notion encore utilisée aujourd'hui. Mais le professeur *Karl Terzaghi* a véritablement initié la mécanique des sols moderne. En 1925, il publiait le premier manuel moderne de mécanique des sols. Comme on se réfère souvent à l'œuvre du professeur *Arthur Casagrande* de son apport à l'art et à la science de la mécanique des sols et des techniques de fondations. *Taylor*, *Peck*, *Tschebotarioff*, *Skempton* et *Bjerrum* ont également contribué, par leurs travaux, au développement de la mécanique des sols. A partir de 1950, le domaine a connu des progrès très rapides et ceux qui ont participé à cet essor sont trop nombreux pour qu'il soit possible de les nommer tous ici (*HOLTZ. R et autres, 1991*).

I.1.2 - Sciences proches de la mécanique des sols

Par certains aspects, la mécanique des sols est proche de la **mécanique des milieux continus** qui étudie de nombreux matériaux comme l'acier, le bois, les bétons, les plastiques dont la plupart sont artificiels et donc de constitution bien connue. Par d'autres aspects, elle est proche des disciplines qui étudient les milieux minéraux naturels : la géologie,

l'hydrogéologie, la mécanique des roches. La géotechnique regroupe ces dernières disciplines.

I.1.3 - Domaines d'application

Les domaines d'application de la mécanique des sols sont nombreux et variés. Ils concernent la profession des travaux publics, ainsi que celle du bâtiment.

A - Milieux naturels

Le domaine d'application de la mécanique des sols ne se limite pas aux constructions; il comprend également des milieux naturels tels que les versants (problèmes de glissement de terrain) et les berges de cours d'eau ou de retenues.

B - Ouvrages en sol

Les ouvrages où le sol est le matériau de base sont aussi bien : des remblais (routes, voies ferrées, barrages, digues de bassins en terre, plates-formes maritimes...) ; ou des déblais (talus, canaux, bassins...).

C - Ouvrages mixtes

Dans les ouvrages mixtes, le sol intervient en relation avec un autre matériau, le béton ou l'acier par exemple. Les conditions d'ancrage dans le sol sont souvent primordiales pour des ouvrages tels que:

- ✓ les murs de soutènements (béton, terre armée, sol renforcé par géotextile...) ;
- ✓ les palplanches utilisées dans les canaux, les ports, les constructions urbaines...
- ✓ les parois moulées (à fonction étanchéité ou à fonction soutènement).

D - Fondations d'ouvrages ou de bâtiments

Dans l'étude des fondations, le sol et l'ouvrage ne constituent pas un ensemble mixte, mais deux ensembles dont il s'agit de connaître les interactions. Les mécaniciens des sols distinguent :

- ✓ les fondations superficielles (semelles ou radiers) ;
- ✓ les fondations profondes (pieux, puits, barrettes).

Tous les ouvrages tels que châteaux d'eau, stations d'épuration, silos, barrages en terre ou en béton, murs de soutènement... doivent faire impérativement l'objet d'une étude de fondation qui permettra de déterminer la profondeur de la fondation et les dimensions de la base de l'ouvrage. Ceci est trop souvent négligé et de nombreux désordres graves en ont résulté.

I.2 - Propriétés générales d'un milieu granulaire

Un milieu granulaire (figure(I.1)) est un assemblage discontinu de particules sous forme de dépôt, généralement de composition minérale, parfois d'origine organique, qui peuvent être séparés par des moyens mécaniques doux et qui contiennent des quantités variables d'eau et d'air (et parfois d'autres gaz), qui remplit l'espace entre les grains (espace interstitiel). Dans ce travail, nous utiliserons le terme milieu granulaire sec, quand il n'existe que les phases solides et gazeuses dans le système en question.

•80 % de la surface terrestre est une matière en grains (sédiments), figure(I.1).



Figure (I.1) : Exemple d'un terrain granulaire.

Un sol est habituellement composé de dépôts naturels issus de la croûte terrestre figure(I.1), mais le terme est aussi applicable à des milieux constitués de sols naturels d'apport, ou de matériaux artificiels ou fabriqués présentant un comportement similaire comme par exemple de la roche concassée, du laitier concassé et des cendres volantes.

L'étude des milieux granulaires peut être réalisée à différentes échelles : micro, méso ou macroscopique, dépendant du phénomène d'intérêt. L'échelle microscopique se contente de l'étude des phénomènes de contact entre les particules qui constituent le milieu, et les échelles méso et macro des phénomènes d'une fraction ou de l'ensemble du milieu.

Généralement, les propriétés facilement mesurables du milieu granulaire sont du type collectif, cela veut dire, à l'échelle macroscopique, et leur résultat est exprimé par une moyenne calculée par particule ou par unité de masse, de surface ou de volume du milieu.

Ce sont les interactions entre les particules et la phase continue, surtout si une phase liquide est présente, qui compliquent la formulation et la compréhension théorique du problème, car une poudre (un milieu granulaire):

- ∅ ne peut pas être étudiée comme un solide, même si elle peut être déformée ;
- ∅ ne peut pas être étudiée comme un liquide, même si elle peut s'écouler ;
- ∅ ne peut pas être étudiée comme un gaz, même si elle peut être compressée.

Pour bien connaître le milieu granulaire sec, il faut d'abord bien connaître les particules qui le constituent et ses caractéristiques, ainsi que les phénomènes d'interaction entre ces particules, puis l'interaction entre ces particules et la phase gazeuse.

I.2.1 - Origine des sols

Les sols et les roches se présentent sous forme d'agrégats de particules généralement minérales, mais parfois organiques, de taille et de forme variables. La nature et l'intensité des forces qui lient les particules de l'agrégat dépendent de la nature du matériau.

On ne traitera ici que des sols, qui peuvent être définis comme des agrégats dans lesquels les particules sont faiblement liées et peuvent être séparées par agitation ou trituration dans l'eau. Les sols ont deux origines principales :

I.2.1.1 - La désagrégation des roches par altération mécanique ou physicochimique sous l'effet des agents naturels :

- fissuration consécutive à la décompression, aux effets des chocs thermiques ou du gel ou aux contraintes tectoniques;
- attaque mécanique (chocs et frottements) dans un processus naturel de transport : gravitaire, glaciaire, fluvial, marin, éolien;
- attaque chimique sous l'effet de circulations d'eaux.

I.2.1.2 - La décomposition d'organismes vivants : végétaux (tourbes) ou animaux (craies).

On distingue également :

-Les sols résiduels, provenant de l'altération sur place des roches ;

-Les sols transportés, provenant du dépôt des produits d'altération, préalablement repris par un agent physique de transport. Ce sont les sols transportés qui posent à l'ingénieur les problèmes les plus délicats ;

-Les formations géologiques de roches tendres.

Enfin, suivant leurs conditions de **formation et de dépôt**, les sols peuvent contenir des matières organiques en proportion plus ou moins élevée.

Il est difficile de distinguer la part qui revient aux différents agents naturels dans la formation des sols et d'apprécier leur importance respective, car leur action est le plus souvent simultanée. Il est possible, par contre, de reconnaître dans telle ou telle caractéristique d'un sol l'effet d'un processus d'altération ou d'un mode de transport déterminé. On soulignera en particulier que les processus mécaniques ou physiques d'évolution des roches ne permettent pas de réduire la dimension des particules en dessous de 10 à 20 μm , car les effets mécaniques, dus aux chocs ou au frottement lié à la masse des particules, diminuent rapidement avec leur volume. Au-dessous de cette dimension, la fragmentation des particules se poursuit principalement par altération chimique, qui entraîne la destruction de certaines des liaisons chimiques des minéraux.

Elle s'accompagne d'une augmentation rapide de la surface des particules offerte à l'attaque chimique (MAGNAN. J-P, 1997).

I.2.2-Les différents types de granulats

Les granulats sont soit d'origine naturelle, soit artificiels.

I.2.2.1 - Les granulats naturels

I.2.2.1.A - Origine minéralogique

Parmi les granulats, les plus utilisés proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzite, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

I.2.2.1.B - Granulats roulés et granulats de carrières

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories.

1-Les granulats alluvionnaires, dit roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses (figure(I.2)), car la présence de boues, d'argiles ou de poussières mélangées aux matériaux ou enrobant les grains, empêche leur adhérence avec les liants (ciment, chaux, laitier ou bitume), ce qui interdit alors leur utilisation.



Figure (I.2) : Eavage des grains.

Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine.

2-Les granulats de carrières sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage...La sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.

I.2.2.2 - Les granulats artificiels

I.2.2.2.A - Sous-produits industriels, concassés ou non

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

- L'extraction s'effectue dans des carrières qui utilisent des techniques différentes, (figure(I.3)), selon qu'il s'agit de roches massives ou de granulats alluvionnaires meubles, soit à sec, soit en milieu hydraulique.
- Le traitement est réalisé dans des installations de traitement généralement situées sur le site de la carrière. Parfois les installations peuvent se situer à un endroit différent du site d'extraction. Dans tous les cas, on retrouve les cinq mêmes principales étapes de production :
 - décapage des niveaux non exploitables,
 - extraction des matériaux,
 - transfert sur les lieux de traitement,
 - traitement des granulats pour obtenir les produits finis,

- remise en état du site exploité.

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

Ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers ou pour les bétons réfractaires. Les différentes caractéristiques des granulats et leurs spécifications font l'objet des *NF 18-302 et 18-306*. D'autres sous-produits sont également utilisés : scories, mâchefer...

I.2.2.2.B - Granulats industriels à hautes caractéristiques

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats freux, carborundum...) ou granulats réfractaires.

I.2.2.2.C - Granulats allégés par expansion ou frittage

Ces granulats, sont très utilisés dans de nombreux pays comme l'*URSS* ou les *ETAS-UNIS*, les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansés et le laitier expansé.

I.2.2.3 - Les granulats très légers

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé).



Figure (I.3) : Extraction des roches massives.



Figure (1.4) : Extraits des carrières.

- ➡ les granulats sont stockés suivant leur :
 - nature des granulats: calcaire, silice, éruptif,... dépendant du gisement ;
 - forme des grains : anguleux, arrondis ;
 - granulométrie précise ou fourchette granulométrique (coupure).

I.3 - Identification et classification des sols grenus

I.3.1 - Caractéristiques physiques des sols grenus

Les propriétés importantes des particules constituant un milieu granulaire sont la forme et leur densité (masse volumique). La forme des particules peut être très diverse : anguleuse, paillette, etc.

Les particules peuvent encore être lisses ou rugueuses, creuses ou poreuses. Ces caractéristiques jouent beaucoup sur les propriétés collectives du milieu granulaire, car la fraction de vide lorsqu'un milieu est constitué de particules poreuses est beaucoup plus importante que si elle est constituée par des particules pleines.

Donc un sol peut être défini par différentes caractéristiques, parmi lesquelles on peut citer :

a-Caractéristique initiales :

- contraintes in situ ;
- l'indice des vides ;
- état de comportement;
- discontinuité.

b -Caractéristique du matériau :

- couleur ;
- forme des grain ;
- composition ;
- nom du sol ;
- granulométrie ;
- plasticité.

c-Formation géologique :

- âge ;
- type de dépôt.

Dans le cadre de nos recherches, les facteurs importants sont l'indice des vides comme caractéristique initiale, la forme des grains et la granulométrie.

I.3.1.1 - Indice des vides

En ce qui concerne un assemblage de particules, *l'indice des vides e* est une caractéristique importante (équation 1.1). Elle est définie par le rapport du volume des vides V_v (c'est-à-dire du volume occupé par l'air, l'eau ou les deux fluides à la fois) au volume des grains solides V_s , (*LERAU. J, 2006*):

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (I.1)$$

Ce paramètre peut être mesurable en laboratoire lorsque les dimensions et la densité relative de l'échantillon de sol sont connues. Dans ce cas, l'indice du vide e est donné par la relation :

$$e = \frac{V \cdot \rho_s}{M_d} \quad (I.2)$$

Avec :

V : le volume total de l'échantillon,

M_d : la masse de l'échantillon séché

ρ_s : la masse volumique des grains solides.

Le degré de saturation S_r peut être exprimé en fonction de la teneur en eau massique w , de l'indice des vides e et de la densité relative D_r par la relation :

$$S_r = \frac{w}{e} D_r \quad (I.3)$$

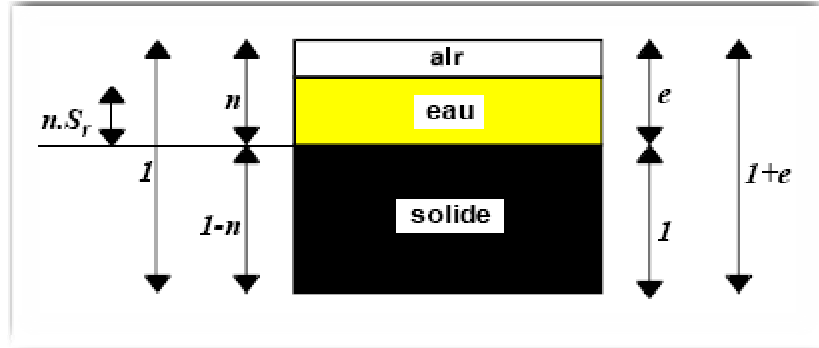


Figure (1.5) : Schéma simplifié des trois phases du sol.

I.3.1.2 - Porosité

La porosité n est le rapport du volume des vides V_v au volume total V_t de l'échantillon de remblai :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (\text{I.4})$$

Ce paramètre est exprimé en pourcentage. Dans le volume unité, les grains solides occupent donc un volume $(1 - n)$ qui s'appelle la compacité. L'indice des vides e fait double emploi avec la porosité n et ils sont reliés par les relations :

$$n = \frac{e}{e+1} \quad (\text{I.5})$$

Et
$$e = \frac{n}{1-n}$$

D'autre part, la teneur en eau volumique peut être exprimée en fonction du degré de saturation et de la porosité par la relation suivante:

$$\theta = n \cdot S_r \quad (\text{I.7})$$

I.3.1.3 - Indice de densité

Pour donner une idée de l'état de compacité dans lequel se trouve un sol grenu à l'état naturel, on définit l'indice de densité.

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (\text{I.8})$$

Où e_{\max} et e_{\min} sont déterminés par des essais de laboratoire.

L'essai consiste à mettre en place le matériau séché dans un moule de volume connu, selon une procédure bien définie (avec une hauteur de chute nulle). On peut ainsi calculer son poids volumique minimal. Une surcharge statique de 10 kPa est ensuite appliquée afin de procéder à un compactage de l'échantillon par vibration. On calcule alors son poids volumique maximal.

Pour un sol lâche $e = e_{\max} \rightarrow I_D \approx 0$.

Pour un sol serré $e = e_{\min} \rightarrow I_D \approx 1$.

Le comportement des sols grenus dépend presque uniquement de l'état de compacité dans lequel se trouve le squelette solide.

Cependant, le vide d'un milieu granulaire peut être divisé en pores inter-granulaires et intra-granulaires. Dans un milieu homogène aléatoire, la porosité surfacique du système est égale à la porosité volumique. La masse volumique du milieu granulaire peut donc être calculée par l'expression suivante :

$$\rho_b = (1 - n)\rho_p + n\rho_f \quad (I.9)$$

ρ_b est la masse volumique apparente du milieu granulaire;

ρ_p est la masse volumique réelle de la particule;

ρ_f est la masse volumique du fluide qui remplit les pores.

-Enfin, un milieu granulaire sec est un ensemble de particules, poudres ou grains dont les pores sont remplis d'un fluide gazeux. Les composantes de ce milieu sont toujours soumises à l'action de la gravité mais il existe aussi des interactions entre elles qui ne sont pas négligeables.

-Grâce à ces interactions, un tas des grains constitué par des particules empilées les unes sur les autres peuvent transférer des contraintes de cisaillement entre elles. Si ces interactions ne sont plus suffisantes pour maintenir les particules du tas à l'équilibre, celui-ci s'effondre.

-La problématique de la manipulation des milieux granulaires repose initialement sur la statique des assemblages granulaires concernant la répartition des forces lorsque cet assemblage est à l'équilibre et sur les conditions de stabilité de celui-ci (CONDOTTA. R, 2005).

I.3.2 - Identification par granulométrie

Les grains d'un sol ont des dimensions très variables pouvant aller de la dizaine centimètres au micromètre. La taille des particules a une forte influence sur les propriétés du milieu granulaire, car elle a un rapport direct avec l'aire superficielle du grain et le nombre de particules en question (Carr 1967).

Un essai d'identification important consiste à étudier la granulométrie du sol, c'est-à-dire la distribution des grains suivant leur dimension en déterminant par pesée l'importance relative des classes des grains de dimensions bien définies. Cette distribution montre la variation et la fréquence de la taille des grains et permet de définir la structure du résidu. La présence de grains de différentes tailles dans un résidu influe sur la porosité, la perméabilité, la résistance

mécanique et les caractéristiques du milieu granulaire. La distribution de la taille des grains d'un résidu ou d'un remblai peut être obtenue par l'analyse granulométrique par tamisage. Mais pour les matériaux très fins c'est plutôt l'analyse granulométrique par sédimentation.

➡ Tamisage

Pour les sols grenus on utilise une série de passoires et de tamis (figure (I.6)). Les trous des passoires ont un diamètre variant de 100 à 6,3mm. L'ouverture intérieure des mailles des tamis varie de 12,5mm à 40 μ m. Par définition le diamètre d'une particule est égal à l'ouverture intérieure des mailles du plus petit tamis la laissant passer. Quand on se sert de passoires, il faut connaître les dimensions des tamis équivalents. D étant le diamètre des trous de la passoire, l'ouverture intérieure des mailles du tamis équivalents et égale à $D/1,25$ (résultat de Féret). On utilise, par exemple, indifféremment tamis de 10 mm ou une passoire de 12,5mm.

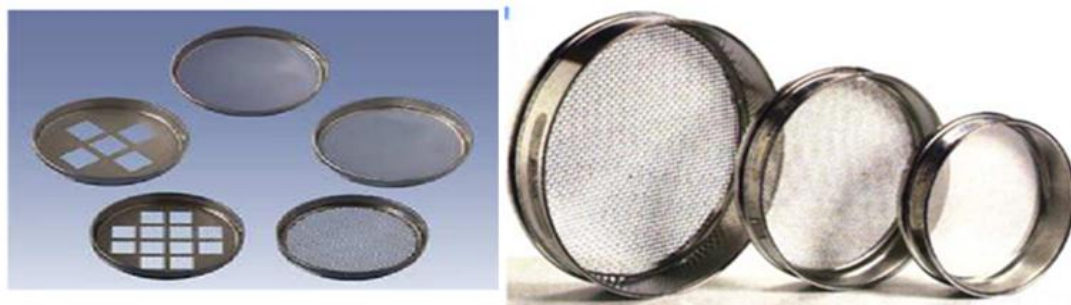


Figure (I.6) : Tamis en tôle perforée et en maille métallique (VOIVRET. Ch, 2008).

On commence toujours par passer l'échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à un poids constant de façon à déterminer le poids de l'échantillon sec . On procède ensuite au tamisage proprement dit, soit à sec, soit sous l'eau, à l'aide d'une colonne de tamis soumise à des vibrations (figure (I.7)). La quantité de matériau retenue sur le tamis est appelée refus, celle qui passe au travers du tamis est appelée tamisât.

Le tamisage à sec n'est précis que pour les matériaux dénués de cohésion comme les sables ou les graviers. En présence d'un sol limoneux ou argileux, il faut effectuer un tamisage sous l'eau. Le matériau doit alors être mis dans l'eau pendant un temps suffisant pour faire dissocier les particules. Cette opération peut durer de quelques minutes à plusieurs heures. Après tamisage, on passe de nouveau les tamis et leurs refus à l'étuve avant de les peser.

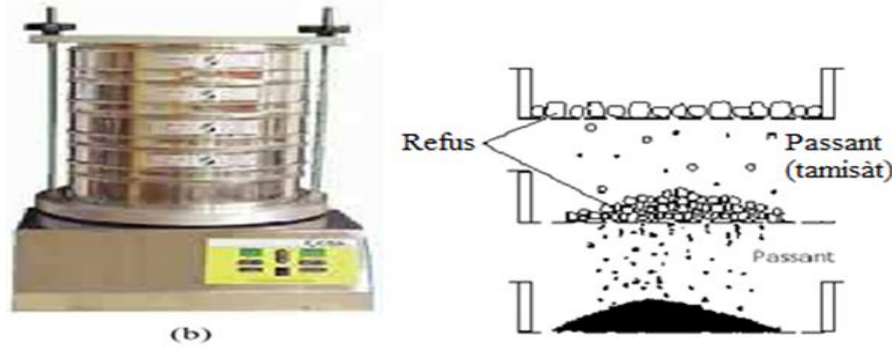


Figure (I.7) : granulométrie par tamis,

_ (b) Tamiseuse en ordre de fonctionnement (*DYSLIM, 1997*).

La courbe granulométrique représente le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure à D en fonction de la dimension D d'un grain (figure (I.8)). On l'obtient par tamisage pour les grains de dimension supérieure à $80\mu\text{m}$ et par densimétrie pour les grains de dimension inférieure à $80\mu\text{m}$. En densimétrie, D est le diamètre d'une sphère de même poids que le grain. En tamisage c'est la maille du tamis.

Soit D_x la dimension de grain correspondant à $X\%$ en poids de tamisât (ce qui passe au travers du tamis). On appelle coefficient d'uniformité (ou de *HAZEN*) le rapport :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{I.10})$$

Tel que :

§ $D_{60}/D_{10} < 3$ est dit à granulométrie uniforme ;

§ $D_{60}/D_{10} > 3$ est dit à granulométrie étalée.

On utilise aussi un autre paramètre pour la classification des sols : *coefficient de courbure*, déterminé de la façon suivante :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \cdot D_{60})} \quad (\text{I.11})$$

Avec , D_{30} et D_{60} , représentent respectivement le diamètre des grains pour lequel on a 30% et 60% de passant au tamis. Selon *Das* (1983), lorsque $4 \leq C_u \leq 6$ et $1 \leq C_c \leq 3$ on peut dire que le matériau est bien classé.

Par exemple, sur la courbe de la figure(I.8) ci-après : $D_{60} = 0,5 \text{ mm}$ et $D_{10} = 4 \mu\text{m}$. D'où $D_{60}/D_{10} = 125$.

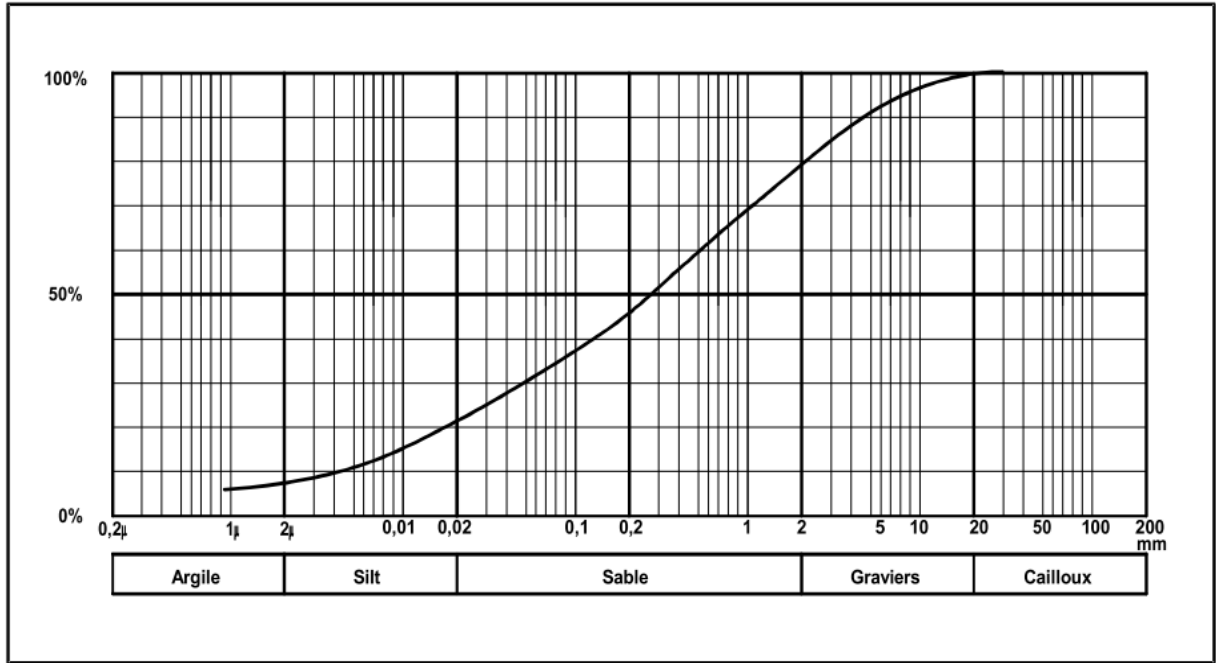


Figure (I.8) : Courbe granulométrique.

Le besoin de granulats de qualités et adaptés aux besoins du génie civil moderne a conduit à mettre en place des appellations des différentes tailles de granulats ainsi que des qualificatifs concernant la forme de la distribution granulométrique. Une classification élémentaire des sols (correspondant à la norme NF P18-560) en fonction du diamètre des grains est donnée par Schlosser (DEGOUTTE, G et autre), qui est représentée dans le tableau (I.1).

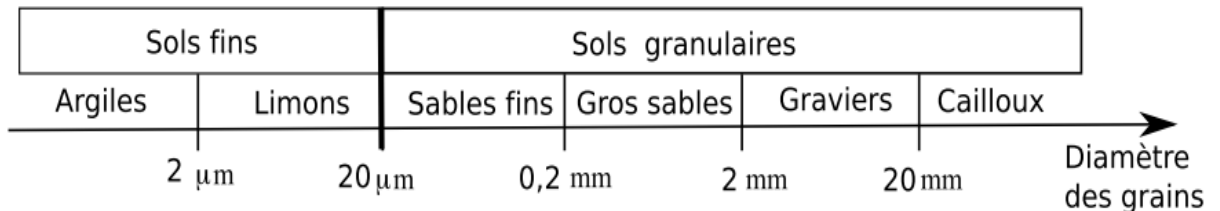


Tableau (I.1) : Classification élémentaire des sols (VOIVRET. Ch, 2008).

I.3.3 - Coefficient d'aplatissement des granulats [EN 999-3]

-Selon leur origine, leur nature et leur mode d'élaboration, les granulats peuvent avoir des formes sphériques. Cubique nodulaire ou allongées. Ces caractéristiques, ainsi que l'état de surface des grains influent sur la compacté des remblais et les couches de forme, la rugosité des couches de roulement, l'adhérence avec les liants bitumineux.

-La forme d'un granulat est définie par trois dimensions principales (figure(I.6)) :

- 1) **Longueur(L)** : le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- 2) **Epaisseur(E)** : le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

- 3) **Grosueur (G)** : dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

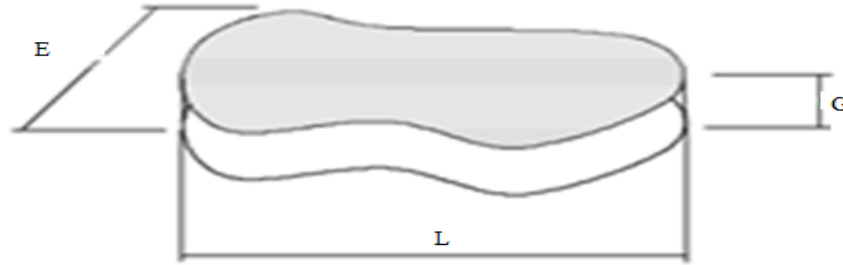


Figure (I.9) : les trois dimensions principales.

Le coefficient d'aplatissement des granulats permet de caractériser la forme des granulats dont la dimension est comprise entre 4 mm et 80 mm et de suivre la régularité des fournitures de gravillons.

Un gravillon de forme défavorable (plate ou allongée) présente un coefficient d'aplatissement généralement compris entre 5% et 20%.

L'essai consiste à effectuer 2 tamisages successifs :

- 1) -Un tamisage sur tamis permet de classer l'échantillon en différentes classes granulaires **d/D** (**d** étant la dimension minimale des plus petits éléments en mm. **D** étant la dimension maximale des plus gros élément en mm).
- 2) -Un tamisage des différentes classes granulaires **d/D**. Sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : $\frac{D}{2}$.

Le coefficient d'aplatissement représente le pourcentage d'élément d'un granulat tel que $\frac{G}{E} > 1.58$, il s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrées ;
- une série de tamis à fentes de largeurs normalisées.

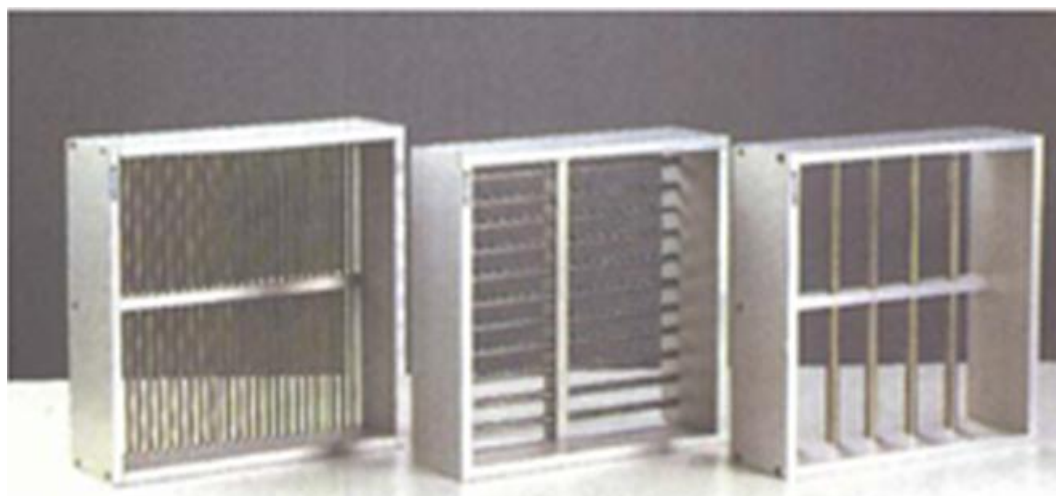


Figure (I.10) : Une serie de tamis à fentes de largeurs normalisées (Gabrysiak. F, 2007).

La granulométrie et les limites d'Atterberg, nous donnent la classification des sols grenus précisée dans le tableau ci-après (tableau 1).

Définitions		Symboles	Conditions	Désignations géotechniques	
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb	$c_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $c_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A ¹⁷	grave limoneuse
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A ¹⁷	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb	$c_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $c_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A ¹⁷	sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A ¹⁷	sable argileux

Lorsque 5% < % inférieur à 0,08 mm < 12% ⇒ on utilise un double symbole

- pour les graves : Gb-GL Gb-GA Gm-GL Gm-GA
- pour les sables : Sb-SL Sb-SA Sm,SL Sm-SA

Tableau (I.2) : classification des sols grenus (LERAU. J, 2006).

Ces méthodes présentent l'inconvénient de ne donner aucune information sur la forme des particules (figure (I.11)).



Figure (I.11) : Quelques formes des particules.

Pour pallier ce problème, des systèmes optoélectroniques ont été développés pour étudier la forme des particules et ainsi obtenir une granularité très proche de la réalité. Cependant, ces méthodes nécessitent de fixer au préalable des critères morphologiques (plus grand axe d'un ellipsoïde par exemple) pour comparer les tailles de particules entre elles afin de construire la courbe granulométrique. La puissance croissante des ordinateurs a permis de mettre au point des logiciels performants de reconnaissance de forme à partir de clichés ou de numérisation avec un scanner, d'un granulat réparti sur un plan (figure (I.12)).

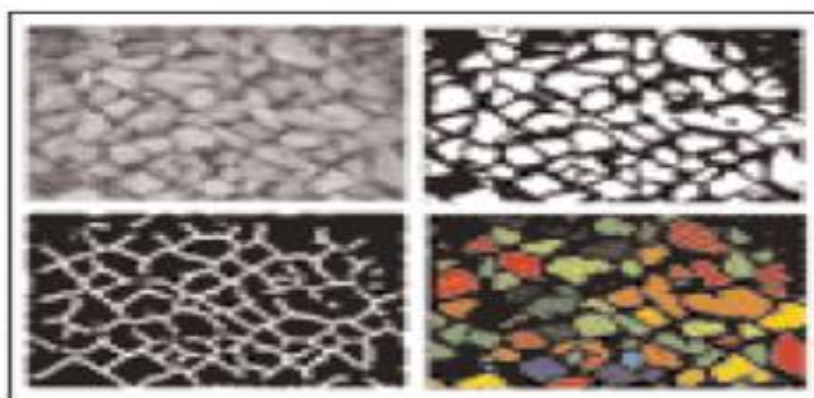


Figure (I.12) : Détermination de la granulométrie de granulats in situ.

A partir de quatre images correspondantes ayant chacune un éclairage rasant différent, le logiciel calcule une image qui met en évidence la couche supérieure de graviers. Le traitement a pour objectif de séparer les éléments, la colorisation de mieux les visualiser pour ensuite en calculer des caractéristiques de forme et de dimension.

La statistique des formes est alors réalisée sur la face en contact avec le plan qui est, le plus souvent, la plus grande face. Cependant, cette méthode nécessite une répartition lâche des

particules (pas de contact) pour que la reconnaissance soit efficace, ce qui impose un nombre de particules relativement faible.

Pour contourner cette difficulté, un appareil capable d'analyser une grande quantité de granulats a été mis au point, notamment au LCPC depuis les années 1980 (G. Blot et J.-B. Ducassou), le vidéogranulomètre (figure (I.13)). Un essai consiste à introduire un échantillon de granulats refusés à tamis de 1mm et passant au tamis de 63mm dans la trémie de l'appareil, les particules sont alors dispersées et positionnées sur leurs plus grandes surfaces par le couloir vibrant. En fin, elles sont précipitées en chute libre dans la zone d'analyse par le tambour. Dans sa chute, chaque particule crée une ombre sur les cellules photo sensibles rendant ainsi possible l'analyse de la forme des particules en temps réel. En associant un modèle de forme numérique (ellipsoïde) pour chaque grain on peut évaluer des grandeurs pertinentes pour qualifier la forme des particules et déduire ensuite une courbe granulométrique tenant compte de la forme des particules. De part son automatisation poussée, ce dispositif permet de traiter rapidement de gros échantillons de sols pour obtenir une statistique satisfaisante sur la courbe granulométrique. (VOIVRET. Ch, 2008).

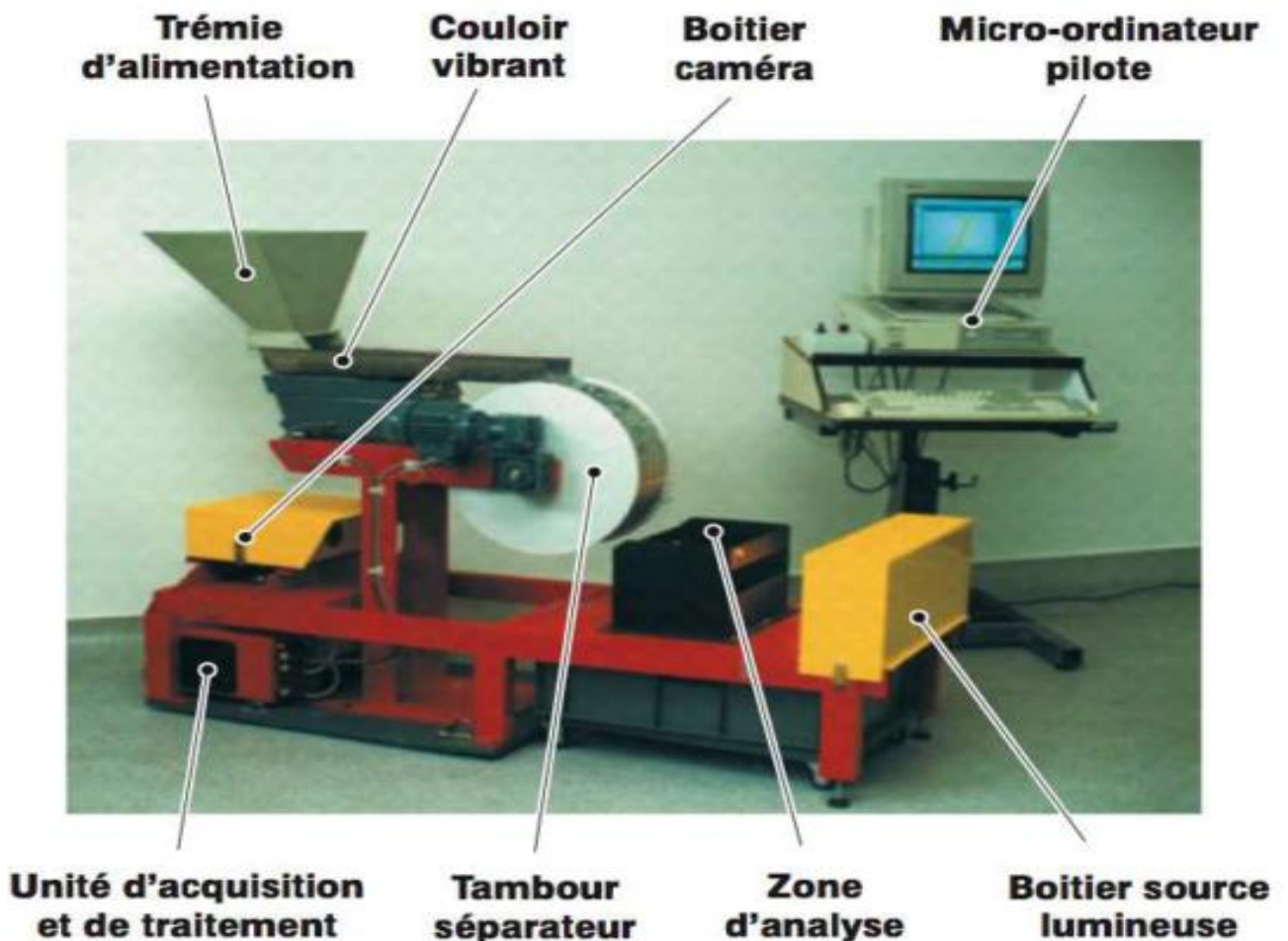


Figure (I.13) : Vue d'ensemble du vidéo granulomètre développé au LCPC

(VOIVRET. Ch, 2008).

Conclusion

Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. C'est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. On conçoit donc que la limite entre un sol et une roche altérée ne soit pas définie nettement. Le sol est un matériau meuble, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles. Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble. L'aspect physique des grains solides, leur taille et leur agencement peut influencer les propriétés mécaniques du sol. D'autre part, l'origine du résidu et le traitement qu'il a subi affecte la forme des grains, leur taille et leur distribution.

Chapitre II

Les définitions et Les méthodes de quantification de la forme des grains

Introduction

Les grains apparaissent dans la forme différente, selon leur origine et processus postérieurs. Les grains portés par le vent, l'eau ou les glaciers, semblent être arrondies tandis que les grains des pierres concassées peuvent être angulaires (WADELL 1932). L'action chimique et l'abrasion augmentent avec l'âge des grains. D'ailleurs, les plus anciens tendent à être plus ronds indépendamment de leur dimension particulière. Plus le grain est grand plus la probabilité des imperfections et de la rupture fragile est élevée (typiquement $d > 400\mu\text{m}$).

La forme de grain des agrégats influe sur la gradation matérielle obtenue par le tamisage. Selon Lees (1964), les grains floconneux tendent à passer diagonalement à travers les tamis avec des trous carrés. La forme a également une influence significative sur le volume des grains maintenus sur chaque passoire. Comme montré par Lees (1964), le volume des grains qui ont une forme de tige, est environ 2,5 fois celui des grains qui ont une forme du disque.

La mesure de la morphologie dans la mécanique des sols, a historiquement exigé l'utilisation des normes et des diagrammes à lesquels les différents grains peuvent être comparés. Les conditions dans les directives de conception pour la forme de grain donnent des limitations pour les grains floconneux et ovales. Par conséquent, les paramètres comme arrondi, la texture de surface et l'angularité sont seulement données dans les directives comme condition pour le pourcentage des surfaces écrasées et cassées. Des méthodes plus sophistiquées comme l'analyse d'image, ne sont pas encore pratiquées ou admises pour le travail journalier de technologie, mais elles ont été employées par des chercheurs.

II.1 - La forme des grains

La forme des grains comporte les caractéristiques qui se rapportent à la morphologie externe des grains. Celles-ci est déterminée par (BUSTIN, 1995) :

- La structure interne,
- Les caractéristiques de la source des roches ;
- La lithologie;
- La dureté ;
- La rupture ;
- Le transport.

II.1.1 - Caractérisation de la forme des grains

Si tous les grains étaient sphériques, il n'y aurait aucun problème à caractériser leurs diamètres par une seule dimension linéaire. Cependant, la grande majorité des grains ont des formes irrégulières, et pour définir leurs dimensions n'est pas toujours aussi facile qu'on puisse le croire ; La première classification qualitative des formes des grains fut donnée par *Sorby* en 1897 (*NACER. S, 2003*).

La fore des grains a fait l'objet de nombreuses classifications, dont on ne retiendra que les aspects essentiels. La caractérisation de la forme des grains est dépendante de l'échelle d'observation (figure (II.1.a)). A l'échelle du grain, on décrit la forme générale de celui-ci par trois attributs relatives indépendantes incluent la rugosité, l'arrondi et la forme (*BARRETT, 1980*) :

En mécanique des sols, on limite la description des grains à l'observation par des dispositifs optiques. A cet effet, on peut résumer la forme des grains en termes de sphéricité et de rondeur par opposition à l'élongation et l'angularité.

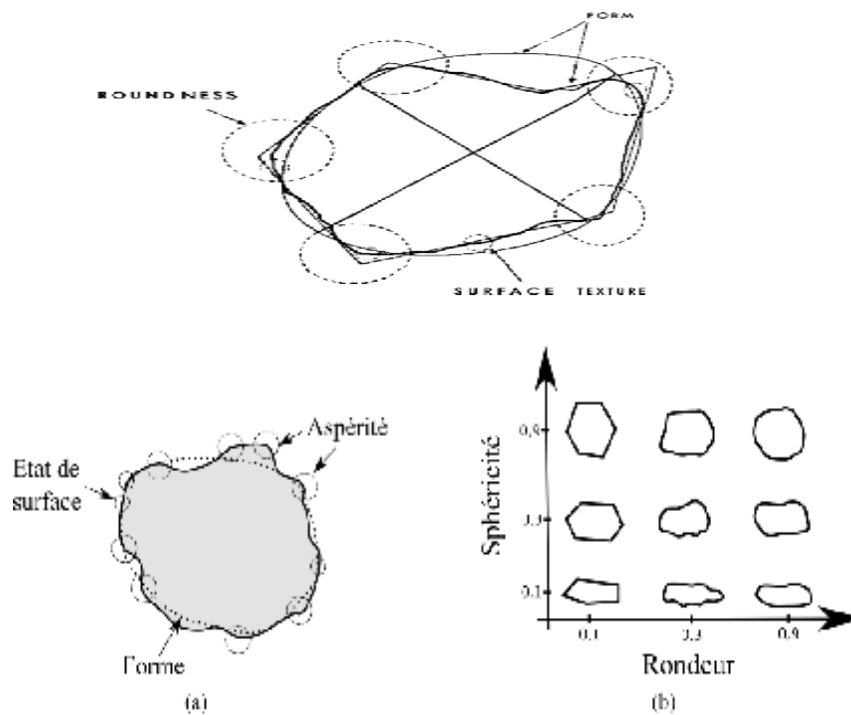


Figure (II.1) : (a) Eléments de qualification de la forme d'un grain en fonction de l'échelle d'observation, (b) Classification des grains à l'échelle de la forme en termes de rondeur et des sphéricités (*VOIVRET. Ch, 2008*).

II.1.1.1 - La forme

La forme décrit des variations géométriques dans les proportions du grain, elle se rapporte à des attributs impliquant la morphologie tridimensionnelle, c'est-à-dire la variation de la proportion des trois axes qui définissent la forme géométrique. Diverses mesures sont employées, La forme d'un grain peut être exprimée en termes descriptifs tels que cubique, sphérique, elliptique, ovale, plat, tubulaire et aiguille. *BARRETT* (1980) énumère au moins 15 paramètres différents qui définissent ces rapports. Un paramètre familier est l'allongement ou l'élongation, qui est le rapport de l'axe long L à l'axe intermédiaire B . Une autre est une planéité, qui est définie comme rapport de l'axe intermédiaire B et l'axe court t .

D'autres descripteurs mathématiques de forme incluent la sphéricité et l'excentricité. La sphéricité indique si en deux, ou trois dimensions de grains sont du même ordre de grandeur. Elle est définie comme le diamètre de la plus grande sphère inscrite relativement au diamètre de la plus petite sphère entourée.

La sphéricité et la proximité dans la forme ont une sphère visuellement estimée en utilisant des diagrammes. Comme le diagramme de *ZING*, voir la figure (II.2), qui trace le rapport des axes (courts « c » à intermédiaires « b ») en fonction de (Intermédiaires « b » à longs « a »). Les termes de forme donnés dans l'image de la figure (II.2), sont généralement employés pour décrire le caillou aux particules de taille de rocher. Souvent une évaluation visuelle, plutôt que des mesures réelles, sont employées.

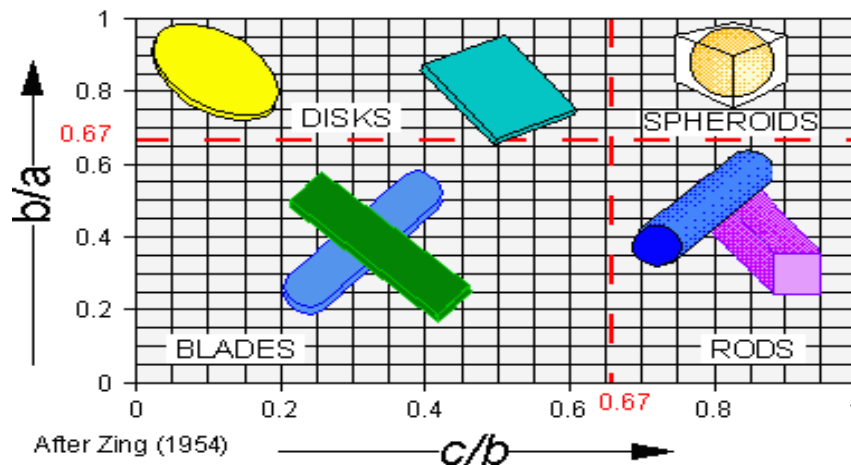


Figure (II.2) : Les types de formes, qui sont généralement employés pour décrire la morphologie de grain (d'après *ZING* 1954).

La sphéricité est définie par *Wadell* (1932) comme étant le rapport du volume de grains au volume d'une sphère d'entourage. Cette définition est défectueuse parce qu'elle a inclus une

mesure d'arrondi. Celle-ci peut être améliorée grâce au rapport de la superficie du grain à la superficie d'une sphère de volume égal (SANTAMARINA et autres 2001).

Une nouvelle méthode de mesure de la forme est développée par Sukamaran et Ashmawy (2001). Ils ont utilisé un facteur de forme qui mesure la déviation d'un contour de grain à celui d'un cercle. L'image de grains est d'abord, découpée en tranches en sections de n. Les points extérieurs sur les lignes de découpage en tranches, sont reliés pour créer un polygone équivalent. Les orientations des lignes reliant des points sur le périmètre du polygone, sont comparées aux orientations sur des lignes reliant le polygone créé en découpant un cercle. L'angle qui constitue la différence dans l'orientation de α et le nombre de points de prélèvement N sont employés pour définir le nouveau facteur de forme (DODDS. J, 2003) comme :

$$SF = \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{\alpha_i(\text{particule})}{\alpha_i(\text{flat}_{\text{particle}})} \right| \right) \cdot 100\% \quad (\text{II. 1})$$

$$SF = \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{\alpha_i(\text{particule})}{N \cdot 45 \cdot \text{deg}} \right| \right) \cdot 100\% \quad (\text{II. 2})$$

SF : facteur de forme.

α_i : L'angle qui constitue la différence dans l'orientation.

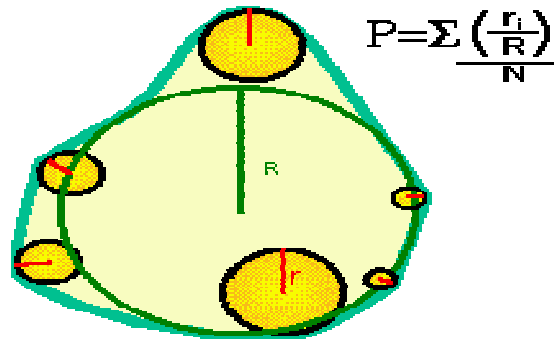
N : le nombre de points de prélèvement.

II.1.1.2 - L'arrondi

L'arrondi décrit des variations aux coins superposés au grain. Ainsi, comme le montre la figure(II.1), la sphéricité qualifie l'élongation du grain tandis que la rondeur qualifie l'angularité des particules.

L'arrondi peut être évalué en faisant la moyenne du rayon de courbure r_i , faisant le coin, et le comparer au rayon de la plus grande sphère inscrite, WADELL (1932). Le procédé est bidimensionnel mais, il peut être prolongé à trois dimensions par l'utilisation des sphères au lieu des cercles. Comme vous pouvez voir, ce type de mesure est très facile (RAYMOND, 1995).

$$P = \frac{\sum \left(\frac{r_i}{R} \right)}{N} \quad (\text{II.3})$$



La plupart des géologues comparent l'arrondi des grains aux diagrammes présentés dans la figure (II.3) :

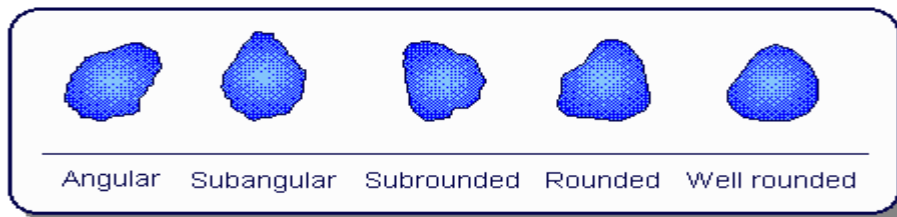
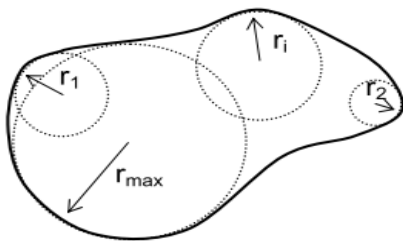


Figure (II.3) : Les diagrammes les plus utilisés par les géologues pour comparer l'arrondi des grains (RAYMOND, 1995).



Classification	Roundness
very angular	0.12-0.17
angular	0.17-0.25
subangular	0.25-0.35
subrounded	0.35-0.49
rounded	0.49-0.70
well rounded	0.70-1.00

Figure (II.4) : Corrélation entre les valeurs numériques d'arrondi et les descriptions verbales utilisées pour classier les grains (POWERS, 1953).

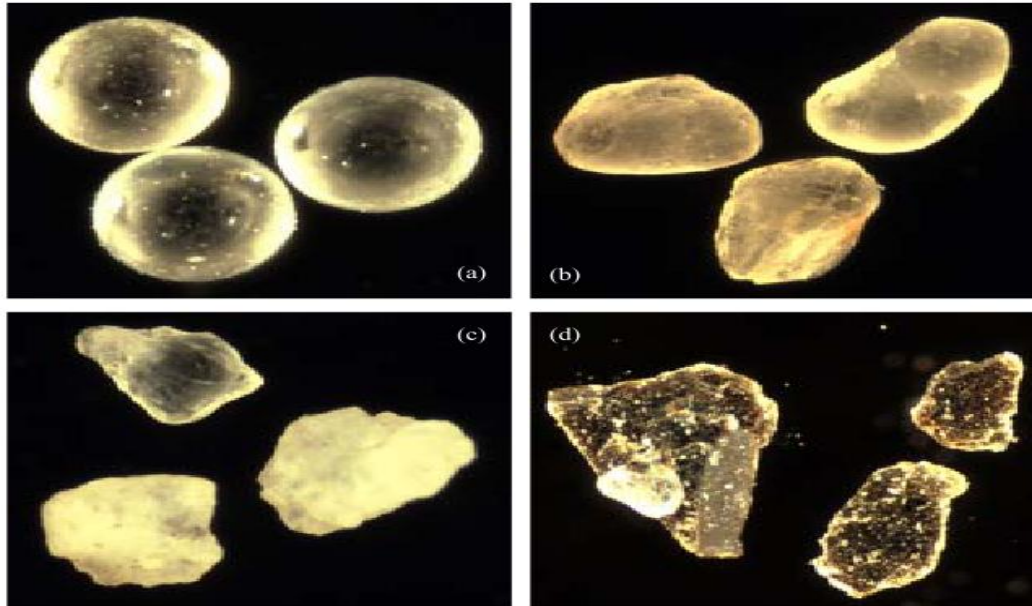


Figure (II.5) : Micro photos des grains sous les formes les plus utilisées.

- (a) Beeds en verre D50= millimètre (**Arrondi**) ;
- (b) Sable d'Ottawa D50=0.60 millimètre (**sous- arrondi**) ;
- (c) Sable de Ticino D50= 0.33 millimètre (**sous -angulaire**) ;
- (d) Fractions fines de sable concassé D ≈ 0.08 millimètre (**angulaire**).

SUKAMARAN et ASHMAWY (2001) développent également un nouveau paramètre pour la mesure d'arrondi. D'abord, un polygone équivalent est construit comme a été décrit précédemment. Chaque angle interne du polygone β est mesuré et la somme de ces angles est comparée à la somme des angles du polygone équivalent d'un cercle. Le facteur d'angularité est défini comme:

$$AF = \frac{\sum_{n=1}^n (\beta_i(\text{particule}) - 180 \cdot \text{deg})^2 - \sum_{n=1}^n (\beta_i(\text{particule}) - 180 \cdot \text{deg})^2}{3 \cdot 180^2 - \sum_{n=1}^n (\beta_i(\text{circle}) - 180 \cdot \text{deg})^2} \quad (\text{II. 4})$$

AF : Le facteur d'angularité.

$\beta_i(\text{particule})$: L' angle interne du polygone.

$\beta_i(\text{circle})$: L'angle interne équivalent d'un cercle.

II.1.1.3 - la rugosité

La rugosité se rapporte à des irrégularités sur la surface, si petite qu'elles n'affectent pas la forme globale du grain. Ce dernier décrit la texture externe relativement au rayon de grain, et les caractéristiques superposées aux coins et aux surfaces.

La sphéricité, l'arrondi et la rugosité forment un ensemble indépendant. Tandis que la sphéricité et l'arrondi augmentent par l'abrasion mais, elles n'augmentent pas proportionnellement. En outre, l'ébrèchement d'un grain peut faire augmenter la sphéricité, mais il fait diminuer l'arrondi (WADEL, 1932). Autour des grains, il peut y avoir certaines formes elliptiques (non-sphériques).

Ceci est montré sur la figure (II.6). La forme peut également être caractérisée par la méthode de Fourier, si la forme est auto similaire, par l'analyse de fractale (DODDS. J, 2003).

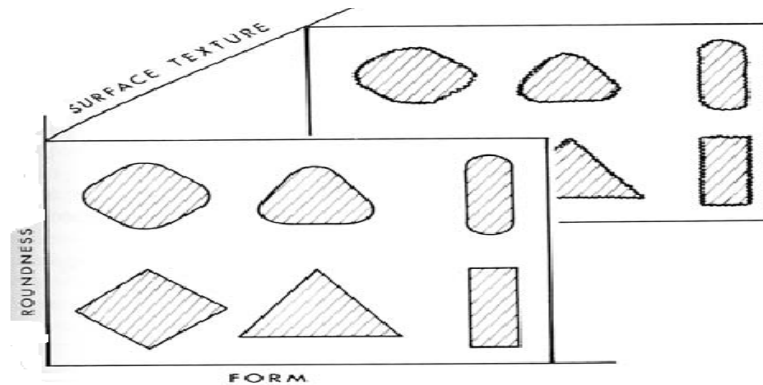


Figure (II.6) : Diagramme montrant l'indépendance de la forme, l'arrondi et la rugosité (BARRETT, 1980).

II.2 - Méthodes de quantification de la forme globale des grains

Il y a beaucoup de méthodes pour la quantification de la forme de grains; des méthodes visuelles simples et des mesures physiques jusqu'à l'analyse d'image tridimensionnelle complexe. Ces méthodes sont basées, dans leurs classifications visuelles, sur le type de roche et la mesure des dimensions d'agrégats donnant plusieurs caractéristiques de forme. Les méthodes manuelles sont des mesures laborieuses et pénibles, et les méthodes les plus sophistiquées sont chères mais plus efficace et plus facile à fonctionner. Certaines méthodes disponibles ont été évaluées en ce qui concerne la qualité des résultats.

II.2.1 - Les méthodes visuelles

WADELL (1932) a remis en cause l'utilisation des mesures pour quantifier la forme des grains globale:

Comment est-il possible de définir la largeur et l'épaisseur d'un grain irrégulière ?

Ces types de caractérisation seront toujours des évaluations et des approximations. Cependant, elles sont faciles à exécuter et fréquemment employées.

II.2.1.1 - La sphéricité et l'arrondi

La sphéricité et l'arrondi peuvent être effectivement caractérisés par une comparaison visuelle avec des diagrammes (GENS, 1955, BARRETT, 1980). Par exemple le diagramme montré dans la figure (II.7).

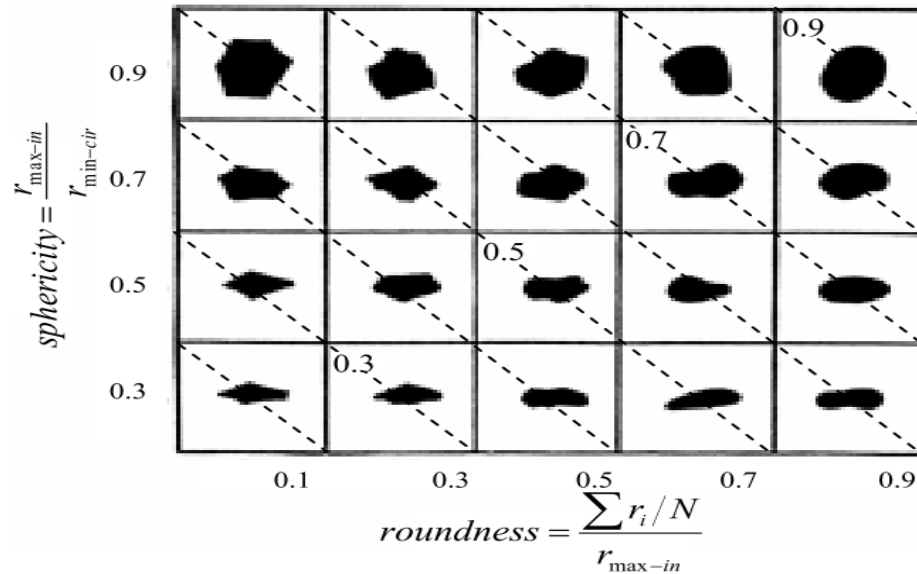


Figure (II.7) : Diagramme employé pour caractériser la sphéricité S et l'arrondi R des grains (modifié de *Krumbein* et de *Sloss* 1963).

Les lignes pointillées diagonales correspondent au $\rho = (R+S) / 2$, c'est la constante de régularité des grains

➡ Méthode de Lees

Lees (1964) *BARKSDALE* et *ITANI* (1989) a classé les grains par quatre catégories sous formes différentes, à savoir le disque, l'equidimensionnel, la lame ou la tige. *Janoo* (1998) a organisé la description des formes différentes dans une table.

forme globale	Description
Disque	plat en apparence, mais pas allongé
Equidimensionnel	Aspect ni plat ni prolongé
lame	plat en apparence
Tige	Élongation , mais non plat en apparence

Tableau (II.1) : Description de forme globale.

Lees (1964) a constaté que ces quatre larges catégories ont permis tout à fait une gamme étendue de caractéristiques de forme des grains dans chaque classification. Il a conclu que cette classification n'était pas appropriée aux recherches. C'est pour cela qu'il fallait probablement classifier la forme de grains par la planéité et le rapport d'élongation.

Le rapport de planéité (p) est le rapport de la longueur courte (épaisseur) à la longueur intermédiaire (largeur). Le rapport d'élongation (q) est le rapport de la longueur intermédiaire à la plus longue longueur (longueur). En combinant le rapport de planéité et celui d'élongation, la forme des agrégats peut être décrite par un facteur de forme (F) et la sphéricité (ψ). Le facteur de forme est le lien entre le rapport d'élongation et le rapport de planéité (II.5).

$$F = \frac{P}{q} \quad (\text{II.5})$$

p :Le rapport de planéité ;

q :Le rapport d'élongation ;

F :facteur de forme.

Un grain rond ou cubique aura un facteur de forme égal à « 1 ». Si le facteur de forme est moins que « 1 », la particule est plus ovale et fine. Un grain formée par lame aura un facteur de forme plus grand que « 1 ».

La sphéricité est définie comme rapport de la superficie d'une sphère ayant le même volume que le grains global. La sphéricité peut également être exprimée par rapport à la planéité et l'élongation comme il a été montré dans l'équation(II.6). La sphéricité peut prendre des valeurs comprises entre « 0 » et « 1,0 » pour les sphères parfaites.

$$\psi = \frac{12.8(\sqrt[3]{p^2q})}{1+p(1+p)+6\sqrt{1+p^2(1+q^2)}} \quad (\text{II.6})$$

Le rapport de planéité et d'élongation et le facteur de forme et la sphéricité sont combinés dans le diagramme ci-dessous. Dans le diagramme, les agrégats peuvent être classifiés comme un disque, une lame et une tige sont formées équidimensionnellement comme le montre le tableau 1. L'Equidimensionnels désigne les grains cubiques ou bien ronds.

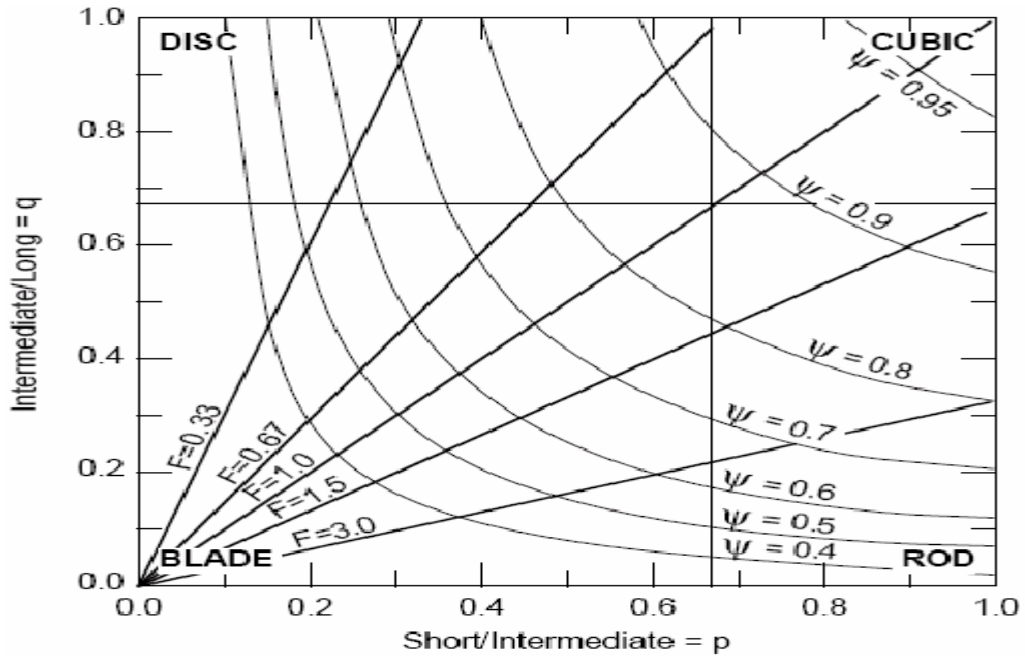


Figure (II.8) : Diagramme global de classification (Lees, 1964 et Janoo, 1998).

Dans la figure(II.9), la partie principale est la chute cubique de série dans la catégorie de la forme de disque tandis que celle cubique arrondie la série tend toujours davantage à être équidimensionnel. La série floconneuse tombe entre les catégories du disque et forme des lames tandis que le matériel arrondi floconneux peut avoir plus de lames formées. Ces résultats sont prévus dans différences séries connues dans la forme de grain.

II.2.1.2 - Surface spécifique

La surface spécifique S_a d'un grains est le rapport entre sa surface et la masse. A partir des considérations géométriques simples, on trouve que la surface spécifique est proportionnelle à l'inverse de la plus petite dimension des grains L_{min} :

$$S_a = \frac{c}{L_{min} \rho_w G_s} \quad (II.7)$$

S_a : La surface spécifique ;

Où G_s :Est la gravité spécifique de la matière minérale des grains;

$\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ est la masse volumique de l'eau ;

Et le paramètre $c = 6$ pour les grains sphériques, cubiques ;

$c = 4$ pour les grains prismatiques et cylindriques ;

$c = 2$ pour les grains lamellaires.

Par conséquent, la taille et la répartition des grains de surface spécifique peuvent être utilisées pour déduire la forme.

II.2.1.3 - La méthode norvégienne pour la classification des agrégats pour le béton

La méthode norvégienne pour la classification des agrégats pour le béton est une méthode visuelle. Mais, elle ne donnera pas des résultats pour une analyse statistique.

Pour mesurer les grains, un calliper de glissière est employé en combinaison avec la caractérisation visuelle. Des grains floconneux et ovales sont déterminés par la relation entre la longueur, largeur et épaisseur du grain. La longueur est définie comme le plus long axe du grain. La largeur est l'axe intermédiaire du grain. L'épaisseur est l'axe le plus court.

Un grain est classifié comme floconneux si:

$$\frac{\text{Largeur}}{\text{épaisseur}} > 2,0$$

Un grain est classifié comme prolongé si:

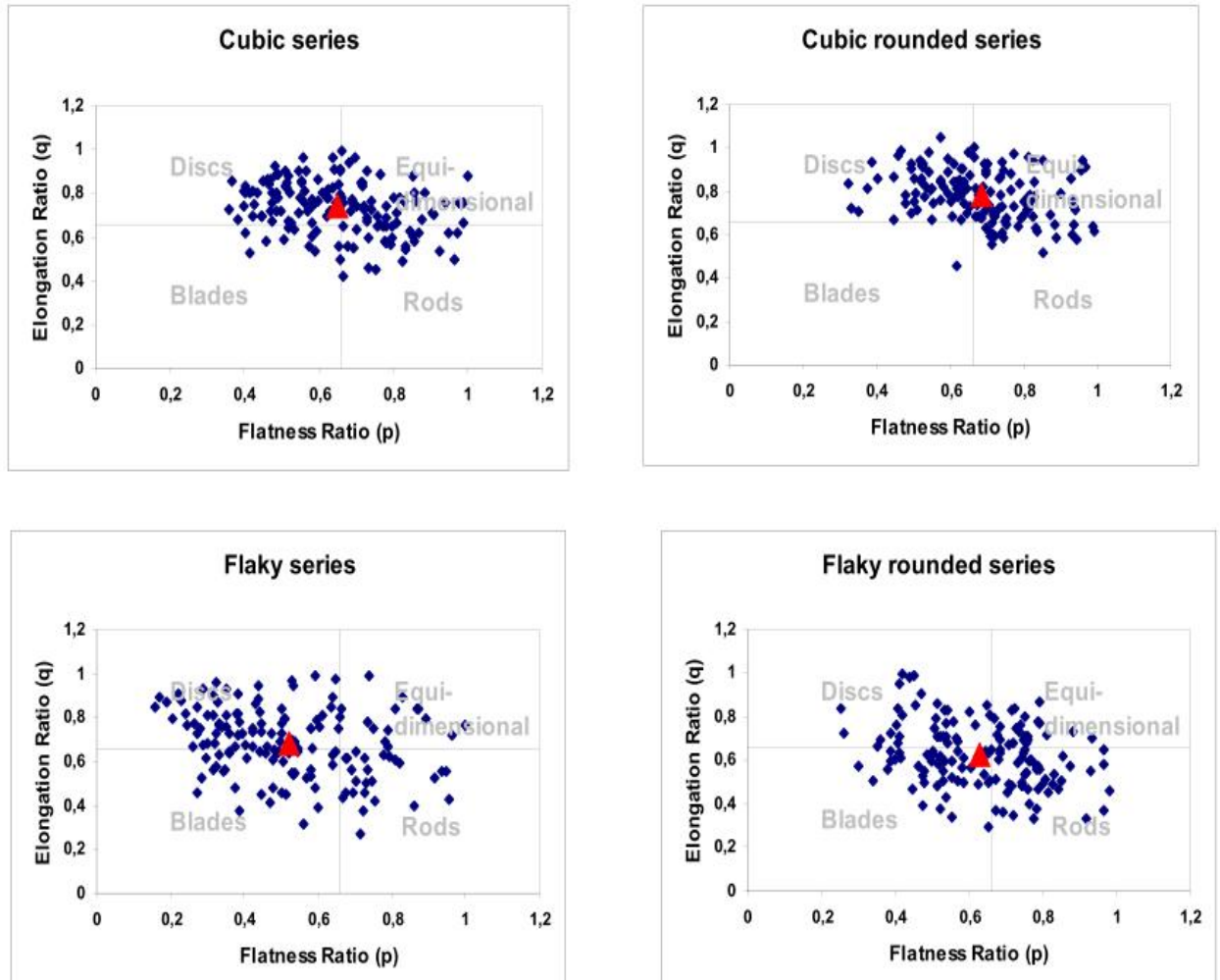
$$\frac{\text{longueur}}{\text{épaisseur}} > 2,5$$

Un grain est classifié comme cubique s'il n'est pas floconneux ou ovale:

$$\frac{\text{Largeur}}{\text{épaisseur}} < 2,5 \text{ et } : \frac{\text{longueur}}{\text{épaisseur}} < 2,5$$

➡ Résultats

La figure(II.9), montre les résultats de la méthode de Lees pour quatre formes différentes des grains, la partie principale est la chute la de série cubique dans la catégorie de la forme de disque, tandis que la série cubique arrondie tend toujours davantage à être equidimensionel. La série floconneuse tombe entre les catégories de la forme du disque et des lames tandis que la série arrondie floconneuse peut avoir plus des formes de lames. Ces résultats sont prévus dans des différentes séries connues dans la forme des grains.



Le schéma (II.9) : Résultats de caractérisation de la forme des grains après (1964) méthode de *Lees*.

II.2.2 - Analyse d'image

Des analyses d'images sont devenues sophistiquées dans leur caractérisation de la forme globale. Ces méthodes sont également plus puissantes dans leur capacité de caractériser la rugosité extérieure. Deux élasticités dimensionnelles peuvent analyser une image de chaque grain dans seulement deux dimensions, c'est-à-dire comme la projection de grain sur un plan en position aléatoire. Les méthodes les plus avancées sont les trois analyses d'image dimensionnelles.

Le traitement d'image numérique pour la caractérisation de la forme globale, a été employé pour la recherche depuis plusieurs années. Des chercheurs ont employé les deux méthodes 2d et 3d d'analyses d'image pour mesurer le paramètre de la forme des grains. Le traitement d'image numérique est une technique pour employer des images sur une forme et une application numérique de diverses procédures mathématiques afin d'obtenir l'information numérique de l'image.

II.2.2.1 - Quantification bidimensionnelle de forme de grain par le système d'analyse d'image de *QMOT*

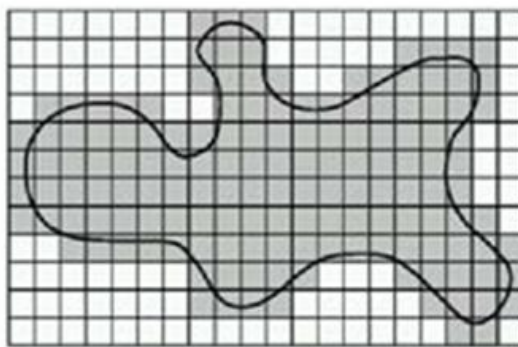
L'analyse d'image est une manière avancée d'évaluer et mesurer la forme d'un agrégat. Dans la forme la plus simple, ceci doit arranger des grains sur un fond blanc et prendre des photos. Puis, les images montrent une projection bidimensionnelle de la forme globale du grain.

En utilisant un ordinateur avec un programme approprié pour traiter les images, il est possible de calculer presque n'importe quel paramètre géométrique dans deux dimensions. Le ministère du Québec de transport (*QMOT*) emploie l'analyse d'image d'une façon régulière pour vérifier l'angularité du son chaud-mélangez les « hot-mix » agrégats (JANOO, 1998).

Dans l'analyse d'image à deux dimensions, des paramètres différents sont trouvés. Il s'agit de l'arrondi et la rugosité des agrégats. Un programme d'analyse d'image est employé pour dépister la projection bidimensionnelle des agrégats et pour se débarrasser des nuances et de toute autre perturbation. Pour l'analyse d'image, ces mesures de base suivantes sont faites:

- 1) secteur (surface) ;
- 2) périmètre ;
- 3) Férets ;
- 4) coordonnées de x/y.

Le secteur est calculé comme le nombre de Pixels qui forment un objet et le périmètre est déterminé en comptant le nombre des pixels touchant le fond ou la projection de l'objet. Ce paramètre dépendra de la résolution de l'image. Il est plus sensible aux variations de la texture aux hautes résolutions et aux changements de l'angularité relativement à basse résolution.



Figure(II.10.a): Secteur d'un agrégat (Janoo 1998).

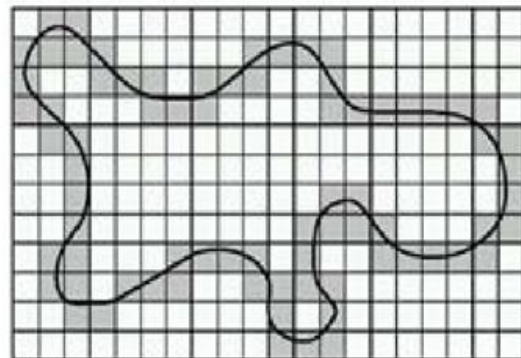
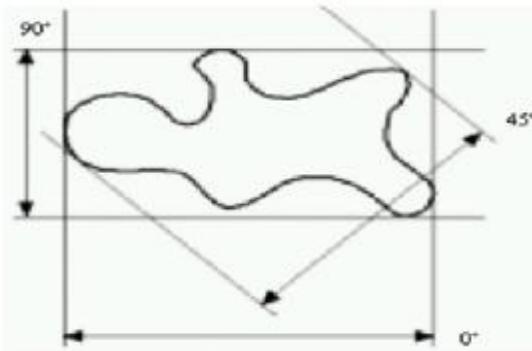
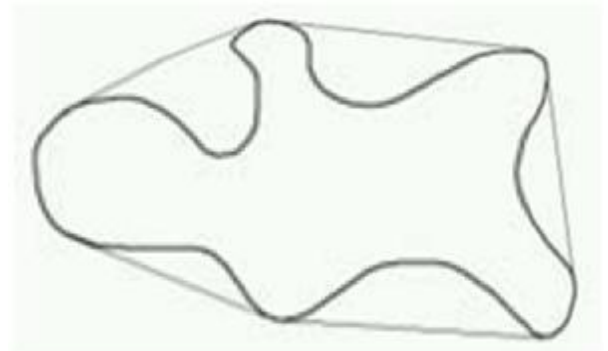


Figure (II.10.b) : périmètre d'un agrégat(Janoo 1998).

Férets sont des mesures à ligne directe faites entre deux tangentes comme représenté sur la figure (II.11.a). Avec ces mesures, il est possible d'obtenir des expressions pour l'arrondi et la rugosité d'un agrégat.



Figure(II.11.a): Mesure de Féret
(Janoo 1998).



Figure(II.11.b): Illustration de périmètre convexe
(Janoo 1998).

L'indice de la rondeur /angularité (Janoo 1998) est calculé par la formule suivante:

$$R_n = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (\text{II.8})$$

là où,

R_n = Indice d'arrondi ;

A = secteur d'agrégat ;

p = périmètre d'agrégat.

Ce paramètre a typiquement une valeur moins de « 100 ». Un objet parfaitement circulaire aura la valeur de 100, mais en raison de la simplification de la position des pixels, la meilleure valeur peut être obtenue égale à 95. Un objet avec la surface irrégulière aura une plus petite valeur.

La rugosité des grains est calculée par la formule suivante (JANOO, 1998):

$$r = \frac{p}{p_c} \quad (\text{II.9})$$

Là où, r = rugosité ;

p = périmètre d'agrégat ;

P_c = périmètre convexe d'agrégat.

La rugosité d'un grain global est définie par le rapport du périmètre au périmètre convexe du corps. Pour un matériel lisse, le facteur de rugosité égale «1,00», le facteur de rugosité augmente par la rugosité croissante d'un grain.

II.2.2.2 - Quantification tridimensionnelle de forme de grain par le système d'UI-AIA

Pour un grain global a trois dimensions en nature, une projection bidimensionnelle n'indiquera pas toute la vérité. La méthode présentée est l'une des méthodes sophistiquées, avancées et disponibles. Ce type d'équipement exige beaucoup d'argent et d'effort pour s'accumuler, mais au cours des années, beaucoup de méthodes ont été développées avec différentes approches.

Un analyseur d'image a été développé à l'université de *Illinois*, pour fournir un fiable moyen d'automatiser la détermination des propriétés globales brutes de taille et de forme. le rapport d'aplatissement et d'élongation et l'angularité sont les facteurs étudiés d'une manière rapide et efficace. L'appareil emploie trois appareils-photo, pour rassembler des images globales de trois directions orthogonales. Les grains analysés sont fournis dessus à un système de bande de convoyeur, qui porte les grains – un par un – vers les appareils-photo placés orthogonalement.

Chaque grain sera détecté par les appareils photo comme il se déplace dans le champ visuel d'une sonde. Les appareils photo sont synchronisés ; ainsi, les trois images sont prises exactement en même temps.

L'indice d'angularité décrit par *RAO et autres* (2002) a été développé comme partie de d'analyse d'UI-AIA. La théorie de base a été soigneusement vérifiée avec la forme globale brute typique afin de développer un outil objectif pour caractériser la forme globale du grain.

Le procédé d'analyse d'image fournit d'abord, une valeur d'angularité, pour chacune des trois images à 2d rassemblées des trois vues. L'angularité est établie comme moyenne de chacune des trois vues.

$$AI_{\text{particule}} = \frac{|\text{Angl}(\text{front})\text{Area}(\text{front}) + \text{Ang}(\text{top})\text{Area}(\text{top}) + \text{Ang}(\text{sid})\text{Area}(\text{sid})|}{\text{Area}(\text{front}) + \text{Area}(\text{top}) + \text{Area}(\text{sid})} \quad (\text{II.10})$$

là où;

$AI_{\text{particule}}$ = Indice d'obliquité (angularité) pour le grain ;

Ang. = Obliquité (angularité) pour une vue ;

Secteur(Area) = Secteur pour une vue;

fron =Face, avant;

top = Haut ;

sid = Coté.

L'AI pour un échantillon est la moyenne de AI pour tous les grains pesés en poids. L'unité de AI est des degrés.

Le système d'UI-AIA peut également être employé pour déterminer la texture extérieure des agrégats bruts, en employant une technique d'érosion-dilatation (Rao et autres 2003). C'est une technique bien connue dans l'analyse d'image, où l'opération d'érosion est un procédé pour obtenir le paramètre morphologique de la première formation d'image. MASAD et autres (1999) ont employé la technique d'érosion-dilatation pour déterminer la texture extérieure des granulats fins.

L'érosion est une opération morphologique, par laquelle tous les pixels de frontière sont enlevés d'une image binaire, laissant un pixel moins dense le long de la frontière d'objet. La dilatation est l'inverse de l'érosion, d'où une couche de Pixel est ajoutée à la frontière d'objet pour créer une forme simplifiée de l'objet original. Le pourcentage du secteur (surface) total de l'image originale est dénoté par la surface extérieure de paramètre ST:

$$ST = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100 \quad (\text{II.11})$$

Là où;

ST : Le pourcentage de la surface totale de l'image originale;

A_1 = surface (dans les Pixel) de la projection bidimensionnelle avant l'érosion-dilatation;

A_2 = surface d'objet après l'érosion-dilatation.

La surface de la texture externe est calculée comme moyenne des valeurs des surfaces des textures externes. Dans chaque vue, il faut passer par différents secteurs comme l'indique l'équation (II.12) (L. Uthus and al).

$$ST_{\text{particule}} = \frac{ST(\text{front})\text{Area}(\text{front}) + ST(\text{top})\text{Area}(\text{top}) + ST(\text{sid})\text{Area}(\text{sid})}{\text{Area}(\text{front}) + \text{Area}(\text{top}) + \text{Area}(\text{sid})} \quad (\text{II.12})$$

là où; $ST_{\text{particule}}$ = surface de la texture externe pour la particule ;

ST = surface de la texture externe pour une vue ;

Area = secteur pour une vue.

II.2.2.3 - Méthodes de Fourier

Une méthode alternative de caractérisation du grain est employée avec la technique mathématique de Fourier. Beaucoup de recherches ont été réalisées dans le domaine de la technologie et de la géologie des sols pour aboutir à des relations mathématiques qui peuvent caractériser les profils des différentes grains (BEDDOW, 1989, CLARK, 1981).

Et pour ce faire, il trace le contour d'une figure, employant une des équations (II.13, II.14) suivantes (archer et autres 2001), là où le profil d'un grain de sol est tracé en 2D suivant les indications de la figure(II.12).

$$R(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)) \quad (\text{II.13})$$

$$X_m + iy_m = \sum_{n=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} (a_n + ib_n) \left(\cos \frac{2 \cdot \pi n \cdot m}{M} + i \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi n \cdot m}{M} \right) \quad (\text{II.14})$$

Dans ces équations le :

$R(\theta)$: est le rayon à l'angle θ ;

θ_i : est l'angle de phase ;

N :est le nombre total des descripteurs ;

n :est le nombre d'harmoniques ;

M : est le nombre total de points décrivant le grain ;

m : est le numéro d'indice d'un point sur le grain ;

M est le nombre total de points décrivant le grain ;

i : dénote un nombre imaginaire ;

x, y sont des coordonnées décrivant le grain ;

a_n et b_n : sont des coefficients pour chaque descripteur.

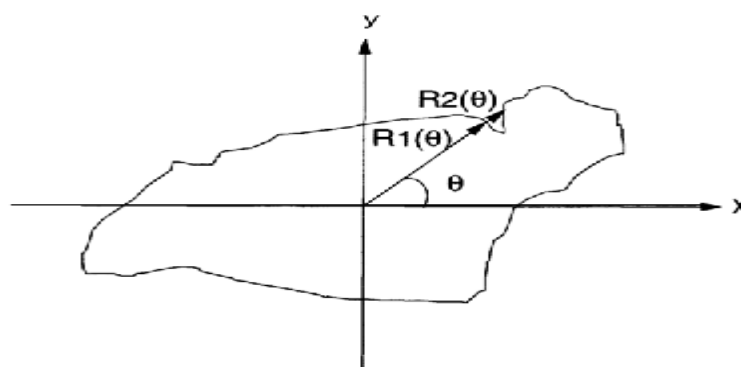


Figure (II.12) : Schéma montrant les difficultés rencontrées avec les angles rentrants.

La première équation représente (R, θ) . Elle est la méthode traditionnelle favorisée dans la recherche de géologie, principalement pour l'analyse de la rugosité et les dispositifs de texture des sols granulaires, tandis que la seconde représente la méthode de descripteur de Fourier, qui a été présentée par CLARK (1981).

La méthode de descripteur est employée si le contour de grains double en arrière sur lui-même de sorte que deux rayons puissent être calculés pour un θ . Cette méthode, plus tard, a été étudiée dans le domaine de recherche de géologie, (*THOMAS et autre, 1995*). Ces auteurs ont identifié son utilisation dans l'évaluation du processus sédimentaires (c'est-à-dire, en classifiant les grains en groupes en fonction de pointes de chaque fréquences harmoniques).

Cependant, cette méthode permet de fournir le commentaire morphologique et de texture au comportement mécanique des échantillons de sol.

Le nombre de points choisis dicte le nombre de descripteurs de l'analyse de Fourier, et donc du niveau du détail décrit. Par exemple, pour 128 points, $N=128$ descripteurs possibles de Fourier et $-63 \leq n \leq +64$. La nature complexe de l'équation(II.14) signifie que les descripteurs d'ordre inférieur ($n=+1$ à $+4$ et $n=-1$ à -4) décriront la morphologie globale des grains et auront généralement les coefficients plus grands dus aux dispositifs décrits. Les valeurs se délabrent généralement vers les descripteurs à $+64$ et à -63 pendant que les dispositifs deviennent plus petits, pour l'usage général comme descripteurs pour un sable. Cependant, seulement l'importance du coefficient de descripteur est exigée, c'est-à-dire $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ (*Elisabeth T. and autre, 2000*).

Les différents harmoniques représentent des aspects séparés de la forme. Les plus basses harmoniques permettent de mesurer la forme sur une échelle globale. Les harmoniques du plus haut niveau caractérisent la forme sur des échelles de plus en plus petites. L'arrondi est estimé à des harmoniques dans la gamme de 10 et la rugosité est estimée à des niveaux beaucoup plus élevés (*SANTAMARINA et autres 2001*). La figure(II.13) montre l'évolution de la représentation de la forme des grains en utilisant un nombre successivement plus élevé d'harmoniques, (*GARBOCZI, 2002*).

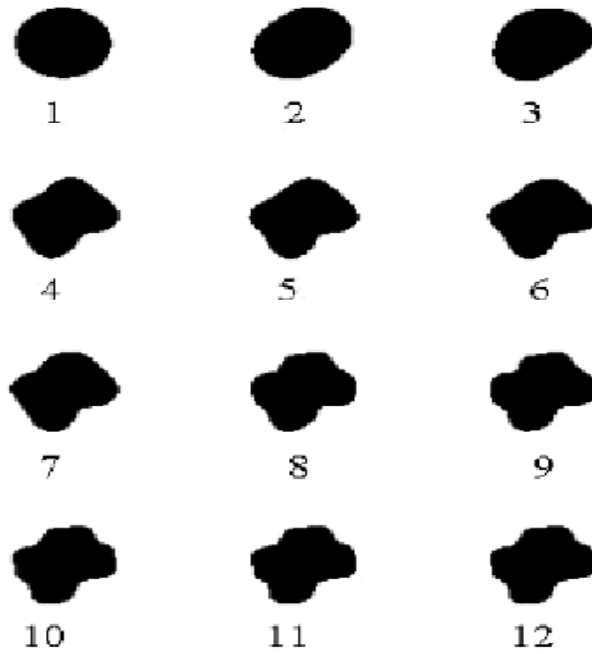


Figure (II.13) : Représentation de Fourier de la forme des grains en utilisant différents nombres d'harmoniques (GARBOCZI, 2002).

L'analyse de fractale est basée sur le concept d'un système de fractale. La propriété mesurée dépend de la taille de l'unité de la mesure. Pendant que l'unité de la mesure diminue, la propriété mesurée augmente. La figure (II.14) illustre ce concept. Dans ce diagramme, l'unité de mesure est la distance entre les lignes parallèles. La propriété mesurée est la longueur du périmètre du polygone. La longueur d'une ligne fractale $P(\lambda)$ peut être approchée par une fonction qui est proportionnelle à la constante n et à la dimension fractale D_R et qui est donnée en fonction de l'unité de mesure de longueur λ , (équation(II.15)).

$$p(\lambda) = n \cdot \lambda^{1-D_R} \quad (\text{II.15})$$

λ : L'unité de mesure est la distance entre les lignes parallèles

$P(\lambda)$: La longueur d'une ligne fractale ;

D_R : la dimension fractale ;

n : la constante.

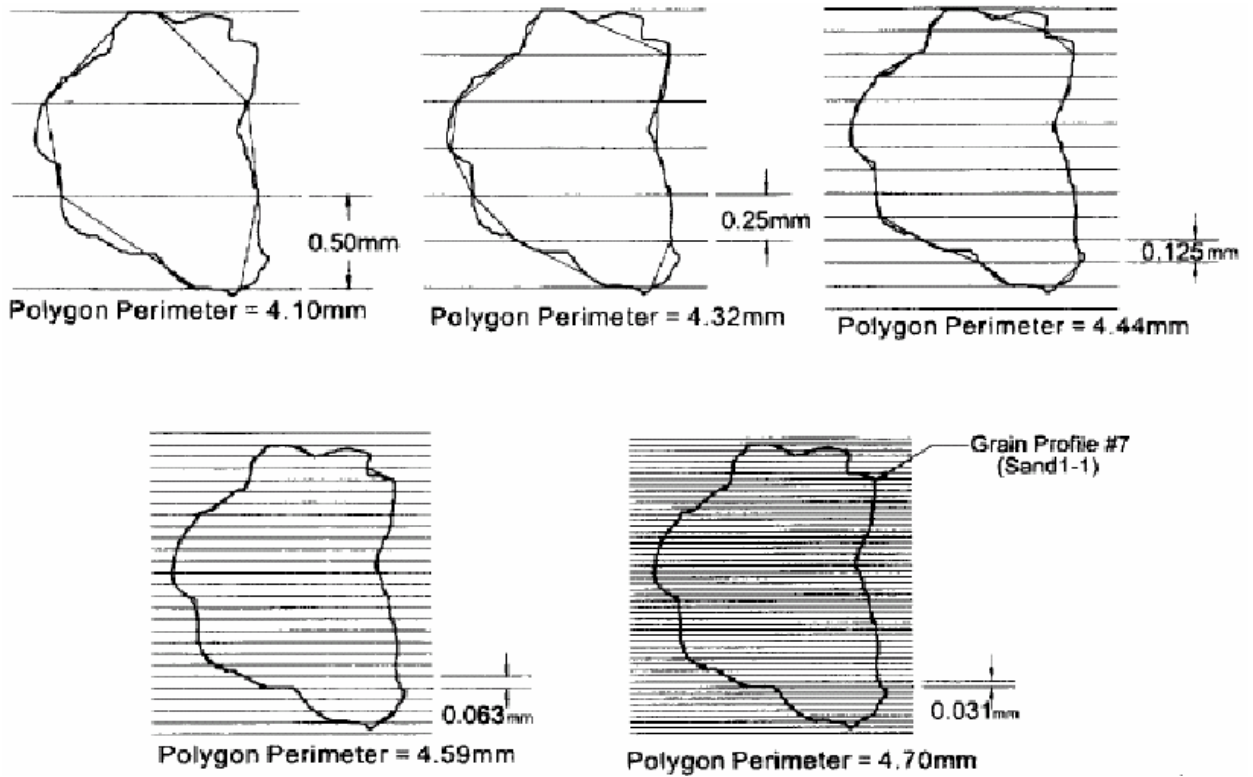


Figure (II.14) : Analyse fractale des grains du sable (HYSLIP et VALLEJO, 1997).

Des irrégularités de surface de nombreux matériaux ont été observées (CHAI, 2002). Cette caractéristique rend l'analyse fractale de la rugosité de surface possible et plusieurs auteurs ont observé une corrélation entre la rugosité et la dimension fractale.

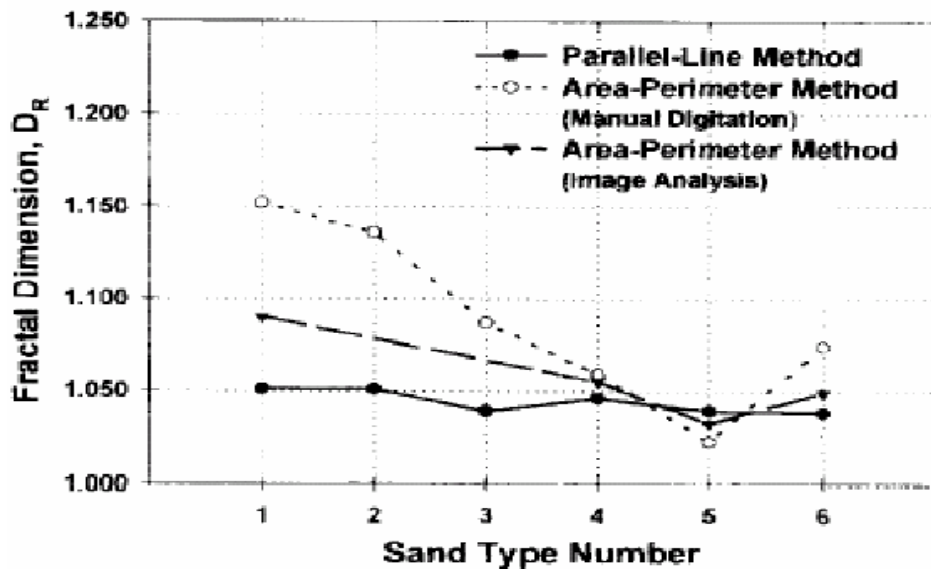


Figure (II.15) : La dimension fractale en fonction de la rugosité de sable (HYSLIP et VALLEJO, 1997).

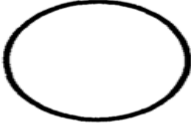

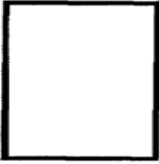
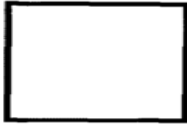



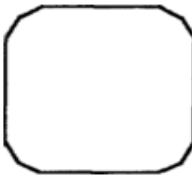

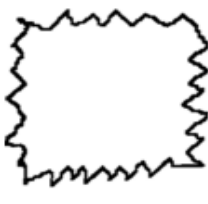
Six échantillons de sable (1-6 types de sable) sont examinés à partir de type rugueux (type 1 de sable) jusqu'à le type lisse (type de sable 6).

La figure (II.15) montre un graphique de la dimension fractale en fonction de la rugosité. Les six spécimens de sable considérés sont désignés sous les différents types de grain de sable (des plus rugueux au plus lisses). La tendance entre la dimension fractale et la rugosité est évidente. Cependant, les auteurs de cette étude n'ont pas distingué les dispositifs de texture et structuraux. Ceci a mené à une certaine contradiction dans le lien entre la dimension fractale et la rugosité des grains.

Il y a deux limitations importantes à l'analyse de la dimension fractale. La première est la difficulté liée à la détermination de la longueur de surface caractéristique sur laquelle on mesure la dimension fractale des grains; la seconde est l'incapacité de la dimension fractale à se rapporter à la forme des grains. Ceci signifie qu'une autre forme d'analyse est nécessaire pour la caractérisation complète de la forme des grains (*SUKAMARAN et ASHMAWY 2001*). Généralement, on constate que les 10 premiers à 15 descripteurs sont habituellement suffisants pour la description complète du caractère d'une forme fortement complexe (*SONKA et autres 1993 in DODDS J, 2003*).

➡ **Morphologie générale**

Des formes standards ont été employées pour extraire des dispositifs des descripteurs. Les formes étaient un cercle, un angle droit, un triangle équilatéral, un triangle isocèle, un ovale et un rectangle, suivant les indications des figures (II.16, a,...f), les figures (II.16, g, h) d'un carré et d'un triangle avec des bords arrondis, ont été analysés pour déterminer la différence entre «angulaire» et «arrondi» des grains. d'un carré et d'un triangle de types rugueux, les figures (II.16, i, j) ont montré les effets des irrégularités approximatives sur les descripteurs morphologiques bruts. Les résultats de l'analyse complexe de Fourier des descripteurs, sont également donnés dans la figures (II.16).

D Shape c r i p t o r		Coef ficien	Shape	Descriptor	Coefficient
	0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	- 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000		0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.2607 0.0000 0.0000 0.0000 0.0749 0.0137 0.0000
(a)			(b)		
	0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.2680 0.0000 0.0000 0.0814 0.0814 0.0000		0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.1113 0.0000
(c)			(d)		
	0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.0001 0.0001 0.2500 0.0001 0.0001 0.0625		0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.2314 0.0346 0.2286 0.0467 0.0281 0.0496
(e)			(f)		
	0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.0043 0.0015 0.1748 0.0019 0.0035 0.0068		0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0642 0.0000
(g)			(h)		
	0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	- 0.0483 0.0490 0.2170 0.0268 0.0555 0.0692		0 -1 +1 -2 +2 -3 +3	0.0214 0.0799 0.0279 0.0142 0.0816 0.0285
(i)			(j)		

Figures (II.16) : Les formes générales utilisées pour étudier la description morphologique des descripteurs de Fourier. 0 Rayons, -1 Élongation, -2 Triangularité, -3 Forme carrée, +1 Asymétrie, +2 élongation du Second degré, +3 Second Ordre de Triangularité. (note que n=0 n'est pas donné car dans ce cas-ci le résultat est arbitraire), (ELISABETH T. et autre, 2000)..

II.3 - Discussion

Beaucoup de méthodes ont été appliquées pour quantifier la forme des grains. Il est difficile de les comparer, en raison de la grande différence dans la manière avec laquelle elles traitent les données.

II.3.1 - Méthode de Lees

La méthode de Lees ne sépare pas clairement les différentes séries. Statistiquement, cette méthode n'est également pas une bonne méthode, car certaines valeurs ne sont pas sensiblement différentes pour les diverses séries. Cette méthode est basée sur des mesures physiques de la longueur, de l'épaisseur et de la largeur, qui est difficile en travaillant avec des grains irréguliers (WADELL, 1932).

II.3.2 - La méthode norvégienne pour la classification des agrégats pour le béton

Cette méthode est subjective. Il est donc important d'employer le même opérateur pour toutes les groupes de forme des grains afin d'assurer que les résultats puissent être comparés, toutefois, les groupes ne sont pas détaillés.

II.3.3 - Analyse d'image bidimensionnelle

JANOO (1998) a constaté, que l'analyse d'image bidimensionnelle, (système d'analyse d'image de *QMOT*) n'a pas bien distingué les agrégats concassés (écrasés) et arrondis. Il faut noter que cette étude a été faite sur une gamme (un nombre) très limitée de matériaux n'ayant pas subi de tests de performance.

L'un des inconvénients de la méthode est que vous mesurez seulement la projection bidimensionnelle des agrégats. Comme les agrégats tendent à s'étendre avec le côté plat vers le bas, ceci donnera quelques problèmes à la qualité des résultats. L'élongation est toujours mesurée, mais une mesure appropriée pour la planéité ou la combinaison de la planéité et l'élongation sera plus difficile.

La résolution des images est de grande importance dans l'analyse d'image. Comme prouvée par les autres chercheurs, la résolution a une importance sur la qualité des résultats, selon les paramètres étudiés.

II.3.4 - Analyse d'image tridimensionnelle

Les résultats prouvent clairement que cette méthode est la meilleure pour caractériser cette série. Pour les deux paramètres choisis (l'indice de texture et l'indice de surface d'angularité), ils correspondent à ce qui peut être observé visuellement.

Un inconvénient de la méthode d'UI-AIA est le fait qu'il ne peut pas analyser l'obscurité colorée des agrégats. C'est en raison de la couleur noire de la courroie de transporteur des agrégats. Ce problème a pu être évité en utilisant une bande de convoyeur légère. C'est également une méthode qui exige des équipements chers.

II.3.5 - Méthodes de *Fourier*

La méthode de descripteur de Fourier a été choisie au-dessus d'autres méthodes utilisées flexibilité et facilité d'utilisation, car elle ne pose pas de problème d'angle rentrant (R, θ) et de l'endroit précis du centre de surface pour chaque grain.

La méthode de Fourier fournit une richesse d'informations. Elle permet au contour d'un grain d'être reproduit de sorte que la transition puisse être faite à partir du numérique à l'analyse visuelle.

L'analyse fractale (VALLEJO, 1995) a été présentée comme alternative possible à ce qui précède les autres méthodes. Elle a l'avantage de l'objectivité dans son analyse par ordinateur qui est employée pour déterminer les paramètres fractales. Cependant, elle permet de mesurer la texture plutôt que la morphologie du grain. Elle doit être employée avec d'autres paramètres pour définir totalement un grain.

Conclusion

Au cours des discussions concernant la forme des grains, il ressort que les concepts d'« angularité », d'« arrondi » et de « rugosité » sont vagues. Il est évident qu'il y ait une certaine différence entre leurs limites sur une base. Ceci est le produit de la recherche d'une méthode de mesure quantifiable de la forme des grains.

Les méthodes simples de caractérisation de la forme des grains distinguent bien les agrégats avec une différence claire dans la forme du grain, mais ne séparent pas les matériaux qui ont la forme presque semblable.

Dans l'analyse d'image bidimensionnelle (système d'analyse d'image de *QMOT*), il n'y a pas de distinction assez bonne entre les agrégats écrasés et arrondis.

L'analyse d'image tridimensionnelle est la meilleure méthode la plus satisfaisante. La question est comment l'information détaillée est nécessaire pour séparer des matériaux, et comment les différences trouvées puissent affecter le comportement du matériau.

En conclusion, comme l'ingénieur doit être intéressé par le comportement de l'ensemble des grains (c'est-à-dire, corps des sols), l'analyse statistique doit être un outil central dans la recherche d'un lien entre le comportement micro et macro. Dans cette étude, l'analyse statistique simple permet à des généralisations d'être faites au sujet des caractéristiques de la forme des grains de sol.

Chapitre III

Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des milieux granulaires

Introduction

Le comportement mécanique d'un matériau granulaire est régi par sa structure et l'effort qui lui est appliqué, la structure est faite de grains minéraux, la distribution en taille des grains détermine la particule qui régit les forces inter-particulaire, par conséquent, la distribution granulométrique joue un rôle essentiel dans le système de la classification des sols.

Les sols granulaires sont sûrement les matériaux naturels présentant les formes de grains les plus variées, la sphéricité, l'arrondi et la rugosité. En effet, la forme est une caractéristique intrinsèque qui joue un rôle majeur dans le comportement mécanique des milieux granulaires. Des nouvelles données expérimentales et des résultats des études ont été recueillis pour explorer les effets de la forme.

III.1 - Microstructure des sols granulaires

Les sols granulaires sont des matériaux, dont les grains ne sont pas de nature argileuse et donc, ne possèdent rarement ou presque pas de propriétés colloïdales. Ils sont généralement tridimensionnels et non du type feuillet. Les liaisons entre les grains sont extrêmement faibles puisqu'il n'y a pas de couche d'eau adsorbée sur la surface de grain. Toutefois, lorsque le sol est en état non saturé, la succion fournit une certaine cohésion pour renforcer les liaisons entre les grains. Les interactions entre grains sont principalement dues aux forces de contact. En conséquence, les frottements sont souvent grands dans des sols granulaires. Les grains composant la structure sont imbriqués les uns dans les autres et de multiples possibilités d'arrangement existent. Quelques structures représentatives des sols granulaires sont schématisées dans la figure (III.1), (DAVALLE, 1991).

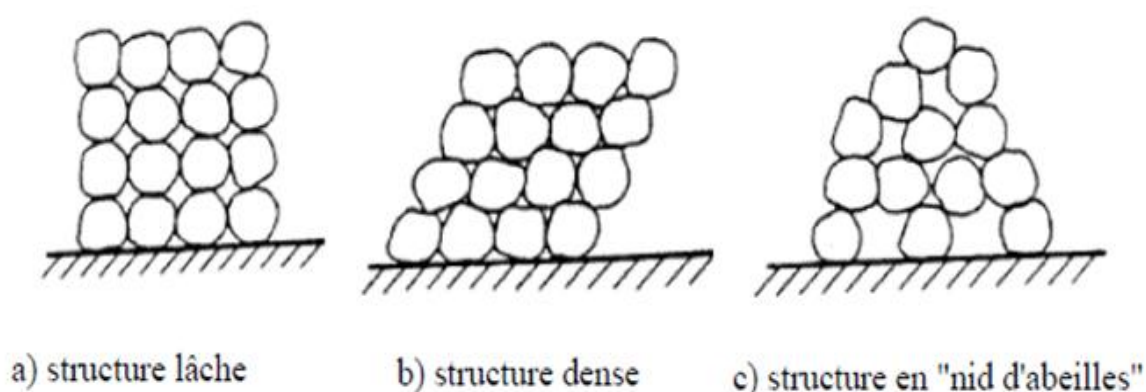


Figure (III.1) : Microstructure des sols granulaires (d'après DAVALLE, 1991).

Le sol non cohérent peut s'expliquer par trois mécanismes (DAVALLE, 1991), liés à la mobilité plus ou moins importante des grains:

- Compressibilité et réarrangement des grains;
- Glissement et rotation des grains;
- Rupture et écrasement des grains.

Ainsi, toute variation volumique d'un échantillon granulaire s'explique par le déplacement relatif des grains, le désenchevêtrement des grains provoque la dilatation et l'enchevêtrement entraîne la compaction. Les résistances de sols ayant une structure lâche ou dense, ont une grande différence.

La forme des grains est souvent liée aux conditions de la sédimentation. Les grains anguleux sont normalement le produit d'une sédimentation rapide. La structure formée par de telles particules est souvent peu serrée. Les pores sont généralement grands, la porosité est relativement élevée, la position des grains n'est pas stable. Les grains se déplacent facilement lorsqu'ils sont soumis à une pression, par contre, les grains plus ou moins arrondis proviennent d'une sédimentation lente. Aussi, durant la sédimentation, les grains ont subi certaines actions physiques. Ils forment une structure relativement dense et stable.

III.1.1 - L'angle de frottement interne (φ)

L'angle de frottement interne (φ) est directement lié aux frottements inter- granulaire qui se manifestent aux points de contact entre les grains, il est lié à la compacité du sol, à la forme et à l'état de la surface des grains solides.

La loi du frottement du coulomb rapporte l'effort de cisaillement à l'effort normal par l'angle de frottement φ :

$$t_f = s' \cdot \tan(\varphi) \quad (\text{III.1})$$

L'angle de frottement φ n'est pas une constante matérielle (TAYLOR (1948)). Certains auteurs ont séparé l'angle du frottement interne en deux composantes :

- La composante de frottement interne, qui est une combinaison du roulement et du frottement du au glissement.
- La composante du cisaillement engendrant une dilatance.

$$\tau_f \delta_x = \sigma'_n \cdot \mu \cdot \delta_x + \sigma'_n \cdot \delta_y \quad (\text{III.2})$$

$$\tan(\varphi) = \frac{\tau_f}{\sigma} \quad (\text{III.3})$$

$$\tan(\varphi) = \mu + \frac{\delta_x}{\sigma_y} = \tan(\varphi'_\mu) + \tan(\nu) \quad (\text{III.4})$$

ν : coefficient de la dilatance ;

μ : coefficient de Poisson ;

τ_f : effort de cisaillement ;

ψ : angle de dilatation ;

σ : effort normal ;

φ_μ : angle de frottement inter particulaire ;

Où φ_μ est un angle physique lié à la rotation et le frottement de glissement, et ψ est le coefficient de dilatance qui désigne le taux d'épaississement lié à la déformation de cisaillement.

III.1.2 - L'effet de la dilatance

Reynolds (1885) a fait une série de constatations remarquables, qui lui ont permis de déduire qu'un milieu granulaire ne pouvait se déformer carrément qu'en se dilatant préalablement.

En effet, il faut que certains grains puissent se glisser dans les vides laissés entre les autres pour que les grains puissent bouger les uns par rapport aux autres. Ceci nécessite que les pores soient de grande taille et que le milieu soit suffisamment dilaté lors de la déformation. Ainsi, le milieu devra se dilater avant que la déformation n'ait pu avoir lieu. *Reynolds* appelle ce phénomène l'effet de dilatance.

Le phénomène de la dilatance est encore un peu plus complexe, nous verrons : (i) qu'un milieu granulaire sous contrainte isotrope doit d'abord se contracter aux très faibles déformations, (autrement son état mécanique serait instable), (ii) qu'il se dilate ensuite (ou au contraire, il poursuit sa contraction s'il est trop peu dense) et (iii) que la dilatation globale du milieu est en fonction non seulement, de la densité initiale, mais aussi de la contrainte moyenne qui lui est appliquée. Plus cette dernière est faible, plus le phénomène de dilatance est important à la densité initiale donnée.

Ces derniers points n'ont pas été observés par *Reynolds*, mais ont été étudiés plus récemment grâce à l'utilisation de nouveaux moyens de mesure tels que le test triaxial. Si l'on néglige la dilatance, de fortes erreurs sont introduites sur l'angle de frottement interne φ (angle que l'on cherche à estimer).

L'angle de dilatance ψ est défini par *WOOD et WROTH, 1977* (cité par *COMPARIEU, 1995*), comme la différence entre les angles de frottement interne ϕ et l'angles de frottement à l'état critique (sans variation de volume) ϕ_{cs} . Les variations de volume en zone plastique font intervenir la fonction :

$$G(\sigma) = (\sigma_3 - \sigma_1) + \sin\psi (\sigma_3 - \sigma_1). \quad (\text{III.5})$$

III.1.3 - Le phénomène en détails

Etudions plus en détails le phénomène à l'échelle des grains.

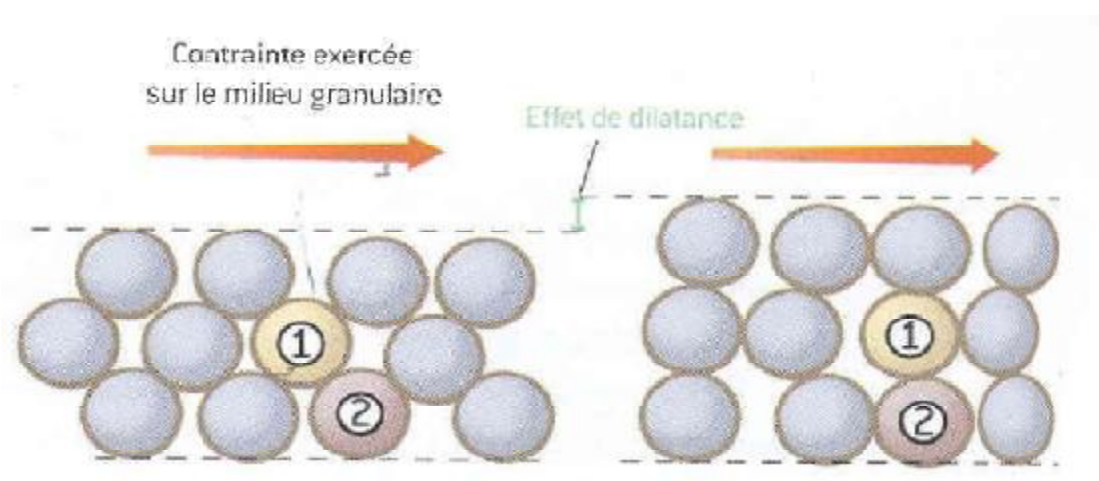


Figure (III.2) : Le phénomène de la dilatance à l'échelle des grains.

Sous l'effet de la contrainte de cisaillement exercée sur le milieu granulaire, le grain 1, figure(III.2), est poussé vers la droite. Cependant, il ne peut se déplacer que sauf s'il passe par-dessus de grain 2. Donc, le milieu granulaire se dilate et diminue sa compacité (ou, ce qui est équivalent, augmente sa porosité à l'eau) pour autoriser ce mouvement.

La dilatance est étroitement liée à l'arrangement particulier des grains à l'échelle locale que la physique a du mal à modéliser. Même pour un empilement de sphères de diamètres identiques, la compacité peut être très variable, elle va de celle d'un empilement compact, obtenu en secouant et tassant en cours de remplissage, à celle d'un état désordonné, obtenu en remplissant d'un seul coup un récipient. Ces empilements peu denses, ne présentent pas d'effets de dilatance (*ALTKIRCH, 2010*).

III.2 - Effets de la forme des grains sur l'angle de frottement

III.2.1 - L'influence de la rugosité surfacique sur ϕ

Il y a au moins deux théories de frottement. **La première** est la théorie de rugosité qui identifie que toutes les surfaces des grains sont rugueuses à un certain degré. Elle explique également que l'interaction des rugosités cause le frottement. **La seconde** est la théorie d'adhérence qui précise qu'en raison de la rugosité, le véritable secteur de contact entre deux surfaces est très petit. Ceci implique l'effort très élevé aux contacts (*SANTAMARINA et autres* 2001).

La théorie de rugosité prévoit un rapport constant entre la force de frottement et la force normale qui est indépendante de secteur de surface de contact. Elle implique également que le frottement et la rugosité augmentent simultanément, parce que le nombre de points de contacts entre les grains est élevé. D'autre part, la théorie d'adhérence prévoit un rapport entre la force de frottement et la surface réelle de contact. Ceci provoque une augmentation de frottement pendant que la rugosité diminue.

L'effet de la rugosité sur le frottement peut être trompeur car les études ont prouvé que le frottement peut augmenter quand la rugosité diminue.

III.2.2 – L'influence de l'angularité sur ϕ

La rotation des grains est à l'origine des bases de la déformation dans une bande de cisaillement (*BARDET 1994*). En raison du ralentissement de la rotation, le cisaillement des particules angulaires est moindre, (*figure (III.4)*), *MAIR et autres* (2002) prouve qu'au fur et à mesure que l'angularité augmente, le rapport du roulement aux contacts glissants diminue la *figure (III.3)*, Il mène aussi à une plus grande résistance au cisaillement. Pendant le cisaillement, ce n'est pas tous les grains qui tournent dans des directions complémentaires (*figure (III.3)*).

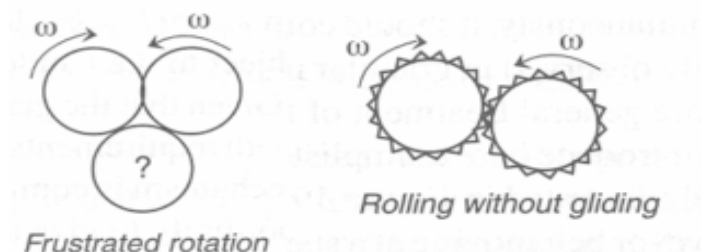


Figure (III.3) : Ralentissement de la rotation dû à la rugosité extérieure des grains (*DURAN, 2000*).

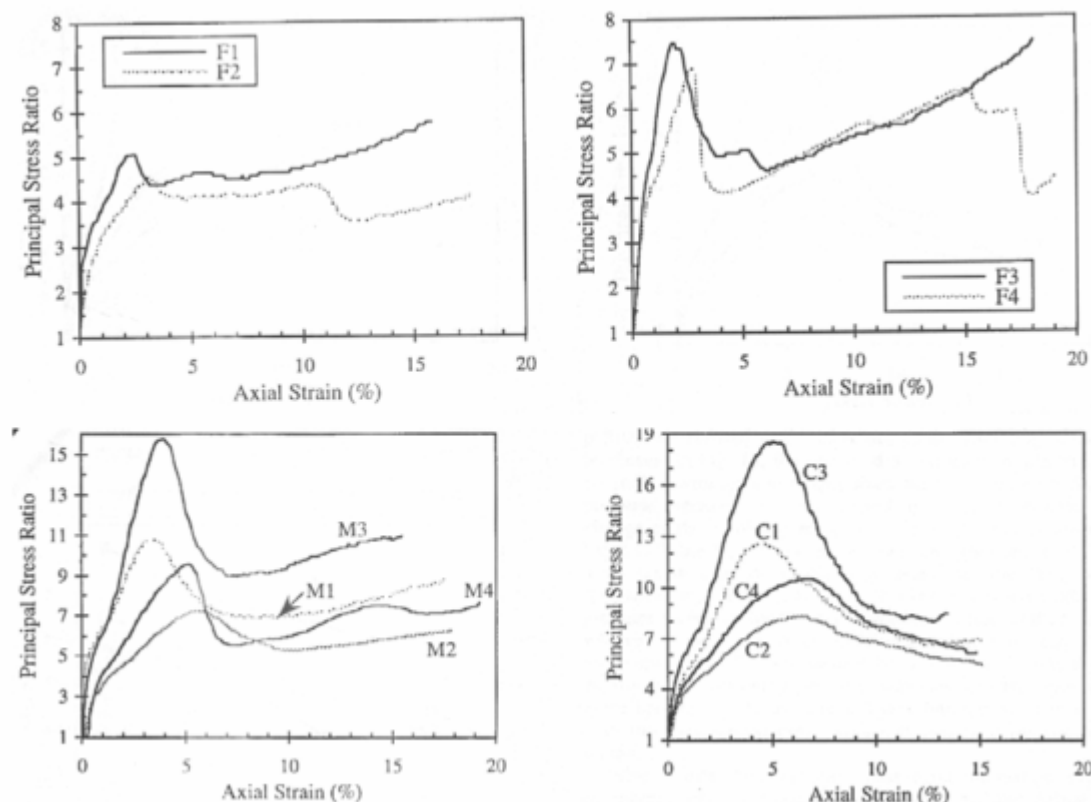


Figure (III.4) : Effets de la forme des grains sur la formation de bande de cisaillement (ALSHIBLI et STURE, 2000).

Les courbes de cisaillement représentent les grains angulaires C, sous-arrondies M, sous-angulaires et lisses F, A noter que la baisse du rapport des contraintes principales se produit à des plus grandes contraintes axiales et elle est moins marquée pour les grains angulaires.

III.2.3 - L'influence de l'excentricité sur ϕ

L'excentricité a une grande influence sur la résistance au cisaillement, *Rothenburg et BATHURST* (1993). Cela prouve que la force augmente au début, alors les crêtes (pics) diminuent avec l'augmentation de l'excentricité (figure III.5.a). A cet effet, la grande partie est due soit aux différences dans le nombre de coordinations, ou à la dilatation. Le nombre de coordinations comme l'angle de frottement, alors augmente au début des diminutions de l'excentricité accrue (figure III.5.c). La dilatation de l'assemblage aléatoire des particules excentriques suit la même tendance que le nombre de coordination et l'angle de frottement (figure III.5.b). Au fur et à mesure que l'excentricité augmente, au début, les particules doivent se dilater plus pour se déplacer pendant le cisaillement. Toutefois, pendant que l'excentricité continue à augmenter, l'arrangement des grains parallèles à la direction du cisaillement, mène à une diminution de la dilatation et de réarrangement.

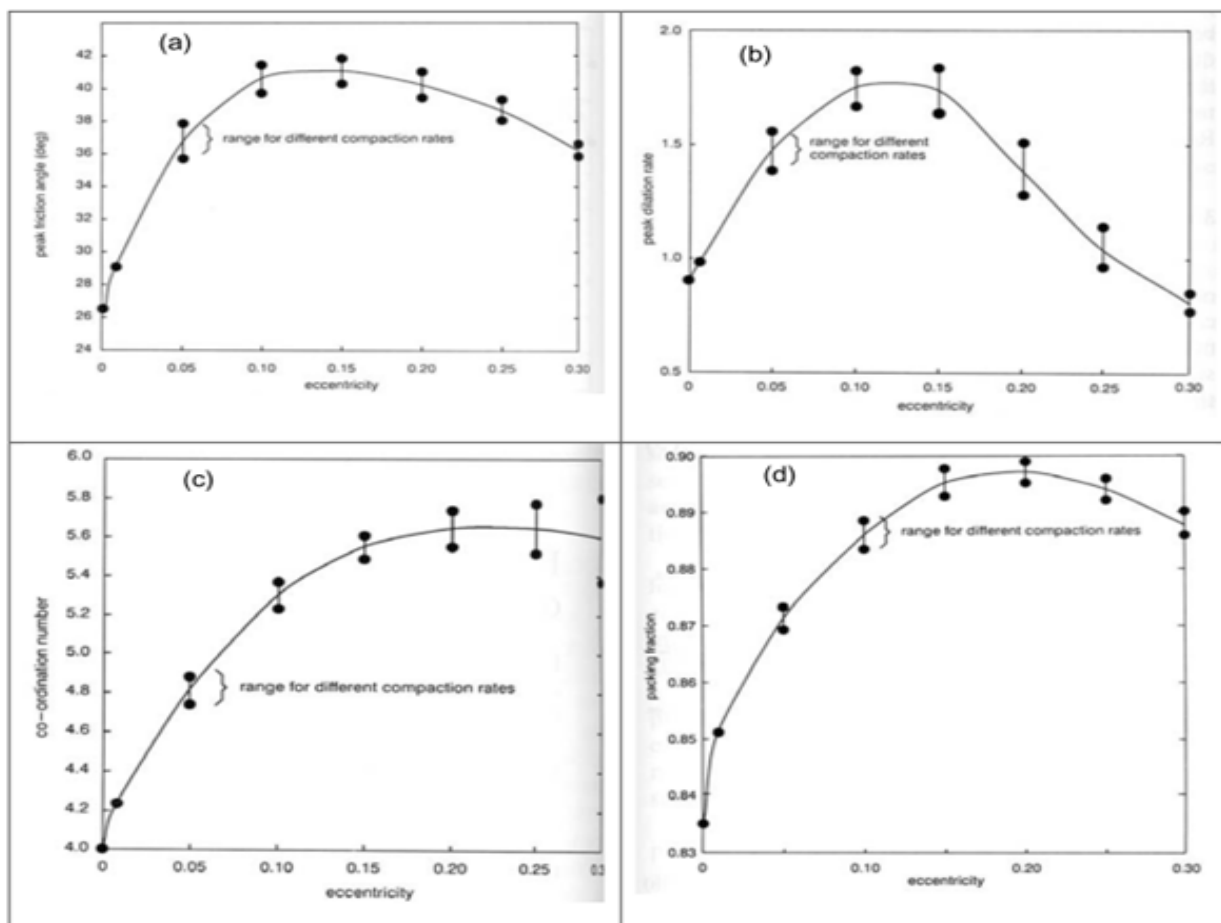


Figure (III.5) : Effet de l'excentricité sur le comportement du sol
(ROTHENBURG et BATHURST 1993).

Où (a) l'angle de frottement, (b) la fraction de l'échantillon, (c) le nombre de coordination et (d) le taux maximal de la dilatation.

L'orientation du η de plan de cisaillement en ce qui concerne l'axe σ_2 est liée à l'angle de frottement interne ϕ et à l'angle de dilatation ψ par (TATSUOKA et autre, 1990) :

$$\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \leq \eta \leq \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (\text{III.6})$$

III.3 - Effets de la forme des grains sur l'état critique

L'état critique est défini quand l'échantillon est soumis à une contrainte à laquelle le sol continue à se cisailer avec un volume constant, dans cet état, les rotations de grains (qui font dilater le sol) et les effondrements de chaîne de force (qui font densifier le sol) sont équilibrés (SANTAMARINA, 2002).

Dans le cadre de la mécanique au niveau des particules, il est à préciser que l'excentricité, l'angularité et la rugosité ajoutent la difficulté à la rotation de grains, qui provoque une plus grande résistance au cisaillement. Cette hypothèse est évaluée en fonction des résultats des essais expérimentaux récapitulés dans la figure (III.6). Les trois paramètres d'état critique Γ , λ et φ_{cs} diminuent avec l'augmentation de l'arrondi, de la sphéricité et de la régularité globale. L'arrondi est plus approprié à l'angle de frottement d'état critique φ_{cs} , l'interception Γ mesurées sont portées en fonction de la rondeur (la figure (III.6. a, b)). et les directives suivantes sont obtenues, (CHAN et PAGE, 1997):

$$\varphi_{cs} = 42 - 17R \quad (III.7)$$

$$\Gamma = 1.2 - 0.4R \quad (III.8)$$

La pente λ est mal définie par les paramètres de forme (la figure (III.6.c)). Cependant, la relation d'indice de vide e_{cs100} d'état critique et l'effort principal moyen $p' = 100\text{kPa}$, calculé comme suit :

$$e_{cs100} = \Gamma - 2\lambda \quad (III.9)$$

$$e_{cs100} = 1.1 - 0.42\rho \quad (III.10)$$

Où $\rho = (R+S) / 2$ la constante de régularité des grains.

Γ : l'interception.

présente la bonne corrélation avec la régularité des grains (figure(III.6.d)) :

Confirment que l'angle de frottement d'état critique φ_{cs} n'est pas seulement le frottement de minérales-à-minérales, mais elle est fortement affecté par la forme des grains.

Puisque les formes de sable de concassage varient entre les spécimens, une valeur typique d'arrondi pour le granit écrasé, le sable naturel et le calcaire écrasé est employé. Les lignes représentent la gamme des angles d'arrondi et de frottement dans lesquels la plupart des échantillons s'effondrent (figure(III.7)).

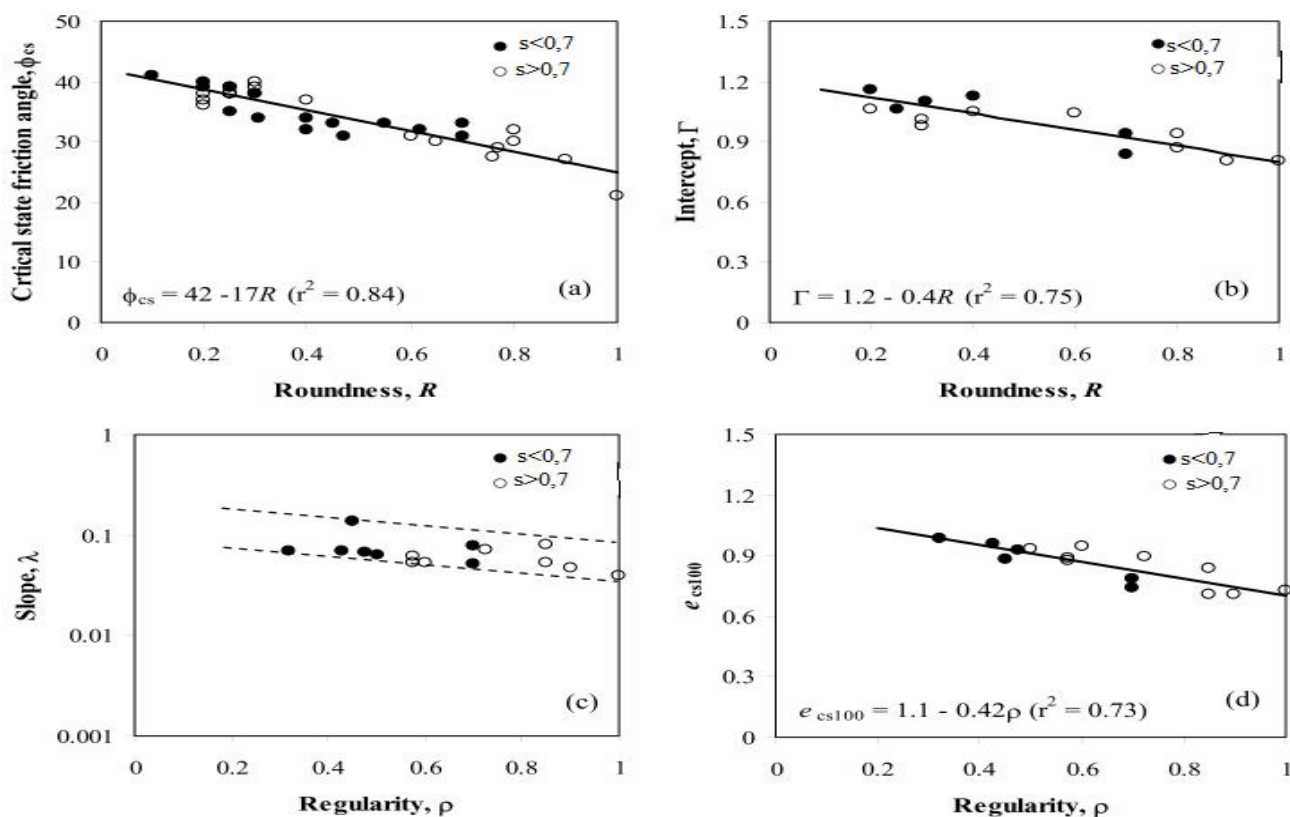


Figure (III.6) : L'effet de la forme de grains sur les paramètres d'état critique
(SANTAMARINA.C et autres)

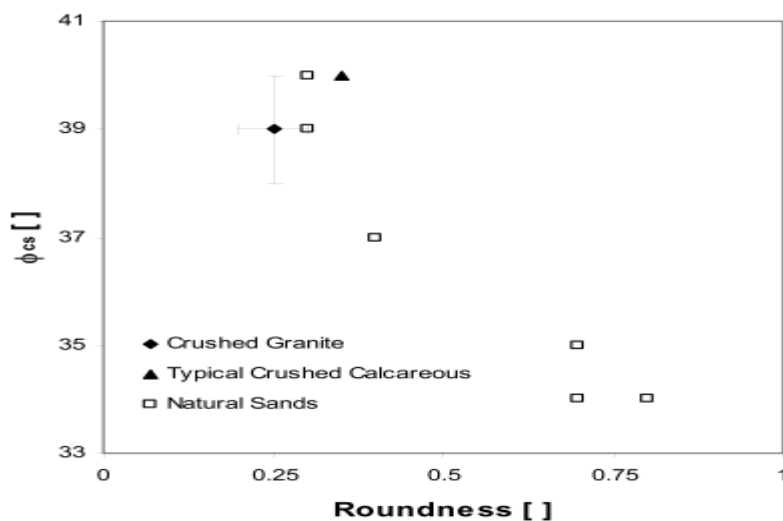


Figure (III.7) : Angle de frottement d'état critique en fonction d'arrondi des grains
(DODDS. J, 2003).

III.3.1 - Indice de vide maximal

L'effet de la forme des particules sur les indices des vides est exploré dans la figure (III.8), l'irrégularité gêne la mobilité de grains et leur capacité d'atteindre des configurations d'énergie potentielle minimale (GUIMARAES, 2002). La pertinence de la distribution de grosseur du grain et du coefficient d'uniformité C_u sur la densité d'intégration a été enlevée dans cette figure, où tous les sols ont $C_u \leq 2.5$ (voir YOUND, 1973).

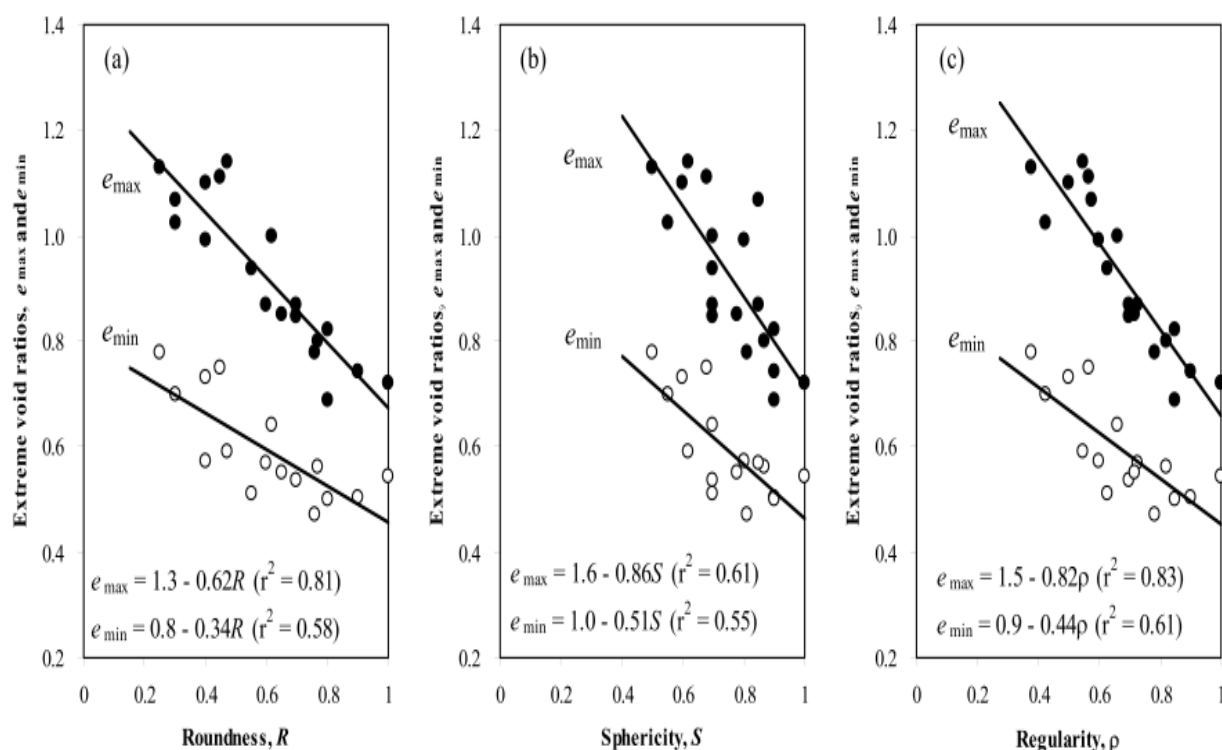


Figure (III.8) : Effet de la forme des grains sur les indices des vides extrêmes
(SANTAMARINA. C et autres).

Les lignes pour l'arrondi différente (figure (III.9)), elles sont des rapports empiriques développés par Youd (1973). Ces rapports empiriques fournissent une manière pratique d'enlever l'effet du coefficient d'uniformité et d'étudier le rapport entre l'indice de vide maximal et la forme des grains. Selon ces tendances, des valeurs d'arrondi entre 0.21 et 0.49 sont prévues. Ces valeurs sont comparées à l'arrondi dans la figure (III.10) , (SANTAMARINA. C et autres).

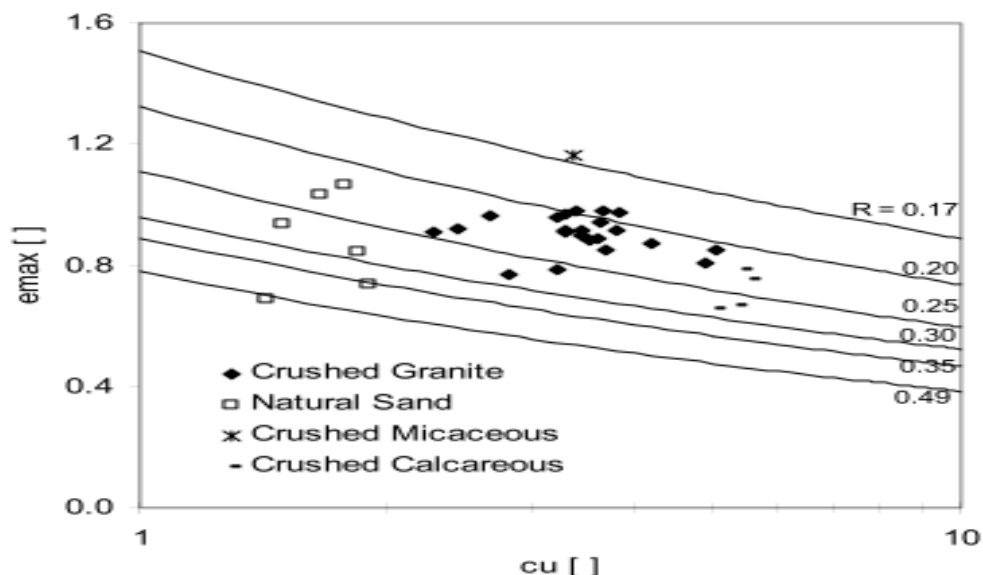


Figure (III.9) : Les valeurs de e_{max} en fonction du coefficient d'uniformité Cu (DODDS. J, 2003).

Les lignes représentent les relations empiriques entre l'arrondi R, e_{max} et le Cu (Youd, 1973). Dix-neuf des 27 valeurs de e_{max} de sable de concassage tombent entre la 0.20 et 0.25 ligne d'arrondi. Les valeurs e_{max} des sables normales sont beaucoup plus variables.

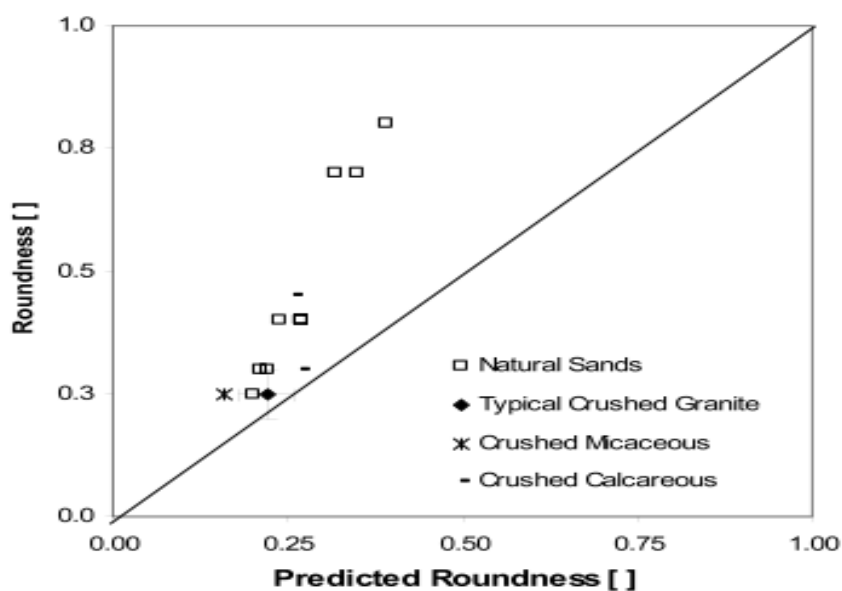


Figure (III.10) : Le rapport entre les valeurs d'arrondi déterminées, en employant le diagramme sur la figure (II.5, chapitre II) et les valeurs d'arrondis prévues des valeurs de e_{max} et de Cu, employant les relations empiriques de Youd (1973), (DODDS. J, 2003).

III.3.2 - Les frontières d'état critique

Pour isoler l'effet de la forme et d'angularité des grains, les frontières d'état critiques pour les différents groupes doivent être identifiées. Le volume spécifique (v) a été tracé en fonction de la pression d'emprisonnement (p) pour différents groupes d'angularité et de forme, les figures (III.11) et (III.12).

Particles Group	SF range, (Percent)	SF average, (Percent)	AF range, (Percent)	AF average, (Percent)
AF1	30 - 73	40.00	05 - 10	7.50
AF2	32 - 74	54.00	20 - 25	22.50
AF3	37 - 60	50.00	40 - 45	42.50
SF1	30 - 35	32.50	05 - 27	13.00
SF2	50 - 55	52.50	05 - 44	25.00
SF3	70 - 75	72.50	07 - 27	20.00
SF1(AF 15-25)	30 - 35	32.50	15 - 25	20.00
SF2(AF 15-25)	50 - 55	52.50	15 - 25	20.00
SF3(AF 15-25)	70 - 75	72.50	15 - 25	20.00

Tableau (III.1) : Facteurs de forme et d'angularité pour différents groupes
(Sallam. A. M, Ashmawy. A. K, 2009).

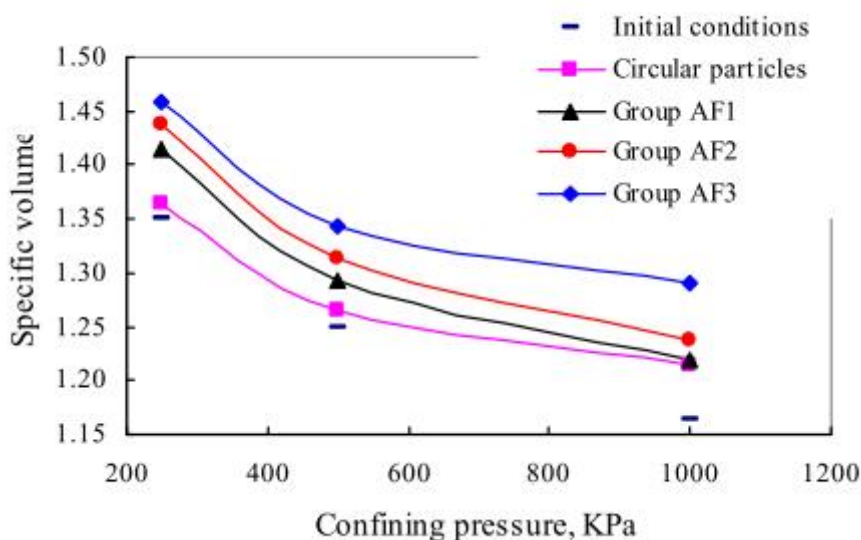


Figure (III.11) : Frontières d'état critiques pour différents groupes d'angularité ;

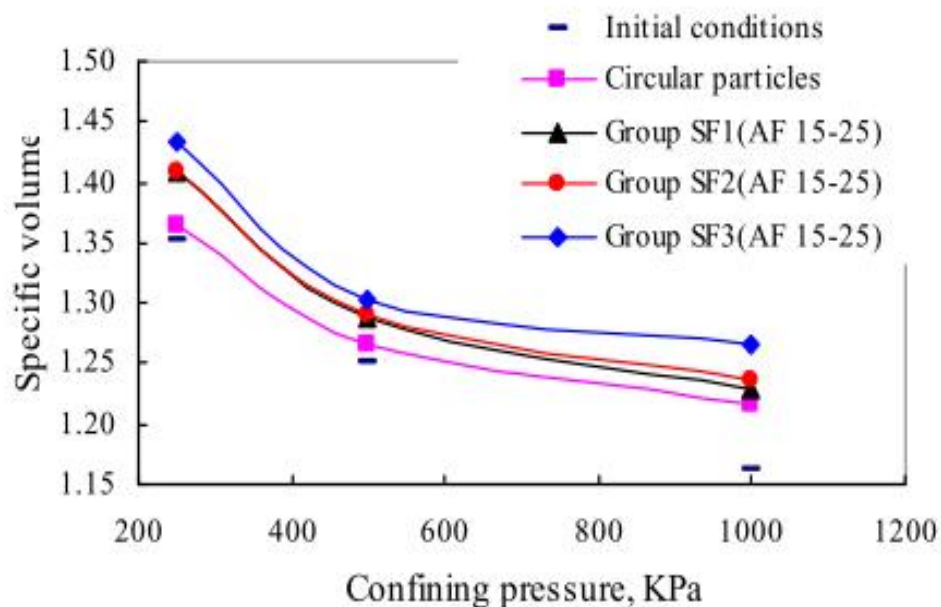


Figure (III.12) : Frontières d'état critiques pour différents groupes de forme
(Sallam. A. M, Ashmawy. A. K, 2009).

III.3.3 - Le coefficient équivalent de frottement inter-particulaire

Le coefficient de frottement inter particulaire est l'un des propriétés les plus significatives dans des simulations de DEM (La méthode d'élément discret, a été employée pour explorer les propriétés granulaires fondamentales de sol tels que la force et la dilatance). L'angle de frottement inter-particulaire affecte la position de la frontière d'état critique. On a observé également que les frontières d'état critiques pour différents groupes d'angularité et de forme, ont été décalées vers le haut pour ce qui concerne celle des grains circulaires.

Jusqu'à ce degré, il peut être possible d'ajuster l'angle de frottement inter-particulaire pour expliquer les caractéristiques de forme de particules. Le coefficient de frottement inter-particulaire de cible peut être extrait en retraçant la frontière d'état critique pour le groupe exigé, d'angularité ou de forme sur les frontières d'état critique, comme il est montré dans la figure(III.13) et choisir le frottement inter-particulaire qui assortit la frontière d'état critique pour le groupe.

Le procédé a été appliqué pour les trois groupes d'angularité (AF1, AF2, et AF3) et les résultats ont prouvé que la frontière d'état critique pour chaque groupe d'angularité change en fonction des valeurs de frottement. Aussi, elle ne sera pas précise pour choisir une valeur équivalente au frottement afin d'expliquer l'angularité. Le procédé a été répété pour les trois

groupes de forme (SF1 (AF 15-25), SF2 (AF 15-25), et SF3 (AF 15- 25)) et les résultats étaient semblables à la figure(III.13).

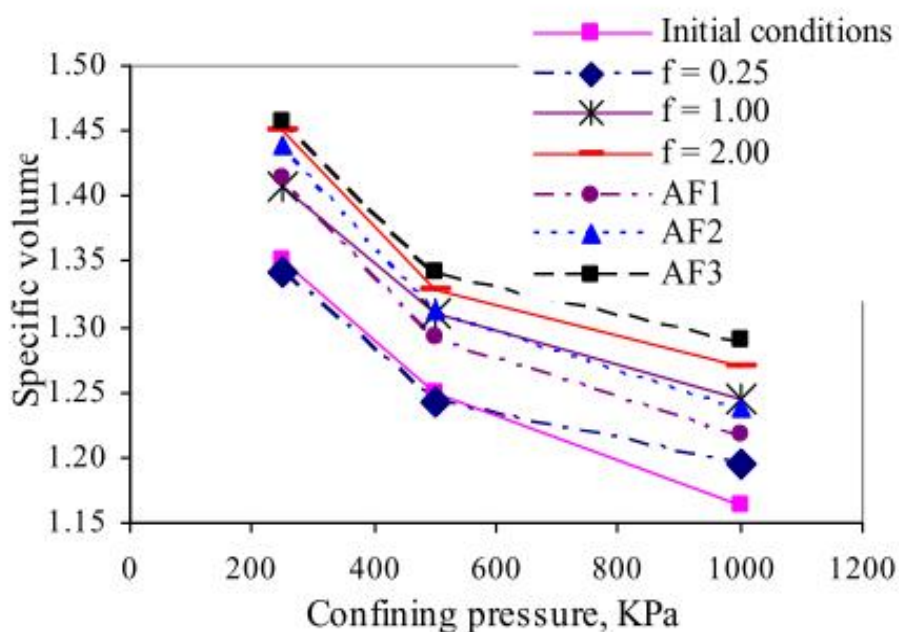


Figure (III.13) : Les frontières d'état critiques pour les grains circulaires (coefficients inter-particulaires des différents frottements) avec celles de différents groupes de facteur d'angularité ($f = 0.5$) (SALLAM. A. M, ASHMAWY. A. K, 2009).

Des frontières d'état critiques pour des groupes de forme et d'angularité avec celles de grain circulaire ont été évaluées. On a conclu que les frontières d'état critiques, pour les différents groupes de forme et d'angularité, ont été décalées vers le haut en comparant à celles des grains circulaires, ce qui indique une augmentation de contrainte, par conséquent, de dilatation volumétrique. L'effet du coefficient de frottement inter particulaire sur le comportement a été également étudié. Les frontières d'état critiques ont montré la dépendance significative de frottement inter-particulaire. Une tentative a été faite en employant un frottement inter-particulaire équivalent à des différents modèles de forme de grains. On a conclu aussi qu'il n'y a aucune équivalence linéaire entre le frottement inter-particulaire et la forme ou l'angularité (SALLAM. A. M, ASHMAWY. A. K, 2009).

Conclusion

Les sols sont faits de grains, leur forme émerge comme paramètre significatif, elle est manifestée sur plusieurs différentes échelles relatives à la dimension des grains. La caractérisation cherche généralement à décrire la forme sur une des trois catégories relatives, celles qui correspondent à la forme, à l'arrondi et à la rugosité. Chaque catégorie reflète des aspects de l'histoire de formation, et participe à faire déterminer le comportement global de la masse du sol. La mesure directe de la rugosité des particules est encombrante et ses effets demeurent mal connus.

L'excentricité est une mesure de forme de grains, un peu d'excentricité mène à un nombre de coordination et une dilatation accrues, et elle influe sur l'angle de frottement interne, l'anisotropie de force, le nombre de coordination, et la dilatation. L'excentricité élevée mène à l'arrangement des particules. Par conséquent, l'augmentation de la résistance au cisaillement atteint son pic, puis diminue avec l'augmentation de l'excentricité. Les valeurs des particules moins arrondies conduisent à un ralentissement de la rotation. Elles provoquent également une diminution de la localisation et la formation de bande de cisaillement. La rugosité de particules à l'anéantissement de rotation. L'augmentation d'irrégularité de grains (angularité et/ou excentricité) mène à une augmentation dans : e_{\max} et e_{\min} et $I_e = e_{\max} - e_{\min}$, l'indice des vides maximal dépend du coefficient d'uniformité et de la forme des grains.

En raison de la large influence de la forme des grains sur le comportement des sols, la forme devrait être considérée à chaque fois que le sol est classifié.

Conclusion de la première partie

Pour bien connaître le milieu granulaire sec, il faut d'abord bien connaître ses caractéristiques et les grains qui le constituent, ainsi que les phénomènes d'interaction entre ces grains.

La taille et la forme des grains de sol reflètent leur histoire de formation, la forme des grains joue un grand rôle dans le comportement des sols granulaires ainsi que dans la distribution granulométrique. Il est difficile de quantifier la forme des grains. La sphéricité, l'arrondi et la rugosité caractérisent les différents critères qui lui sont associés, on se contente plutôt de qualifier ses formes en termes généraux, dans le cadre d'une identification visuelle des sols grossiers, suivant les critères (arrondies, sous arrondies, sous angulaire et angulaires).

Dans le chapitre parlant de l'effet de la forme des grains sur le comportement du sol, on pourra constater qu'elle a une influence prépondérante sur leur comportement en frottement.

On recommande à ce que la forme des grains soit caractérisée en tant qu'élément de chaque expérience de caractérisation du sol. On doit également tenir compte de l'influence de cette forme sur le comportement des sols.

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre IV Etude expérimentale

Chapitre V Résultats et analyses

Introduction de la deuxième partie

Dans tous les problèmes de stabilité des sols, il est nécessaire de connaître la résistance du sol aux déformations et à la rupture. Cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent. Elle peut être définie par de nombreux critères : résistance à la compression simple, essai CBR, essai pénétrométrique, essai pressiométrique, essai triaxial.

Le choix du type d'essai doit être guidé par la nature du matériau étudié et par les aspects de la loi de comportement que l'on cherche à étudier. Un « bon » essai est un essai précis, facilement reproductible et dans une certaine mesure aisé à réaliser. Le présent mode opératoire s'applique exclusivement à l'essai de cisaillement rectiligne, dit « essai à la boîte de Casagrande ». Le cisaillement effectué sur un matériau se caractérise, peut être plus que tout autre essai effectué sur d'autres appareils (triaxial, biaxial, etc.) par une difficulté extrême d'accès direct à l'échantillon étudié à l'intérieur de la boîte ; de ce fait les seuls moyens d'analyse pour les chercheurs sont les courbes.

Le comportement mécanique d'un matériau granulaire est régi par sa structure et l'effort qui lui est appliqué, la structure est faite de grains minéraux présentant les formes les plus variées, la sphéricité, l'arrondi et la rugosité, la distribution en taille des grains détermine le grain qui régit les forces inter-particulaire, par conséquent, la distribution granulométrique joue un rôle essentiel dans le système de la classification des sols. En effet, la forme des grains est une caractéristique intrinsèque qui joue un rôle majeur dans le comportement mécanique des milieux granulaires. Dans cette partie, on représente les essais à la boîte de Casagrand, qui ont été faits, pour pouvoir enfin déterminer quelques influences de la forme des grains sur le comportement mécanique des sables.

Cette partie est consacrée à l'étude expérimentale et divisée en deux chapitres repartie comme suit :

Le premier chapitre, représente une description détailler de mode opératoire da la boîte de Casagrande et du matériau naturel utilisé.

Le second chapitre, regroupe les différents résultats des essais et leurs interprétations.

Chapitre IV

Etude expérimentale

Introduction

La rupture d'un sol peut entraîner la ruine de l'ouvrage ou son enfoncement pour cela il est impératif de déterminer toutes ces caractéristiques mécaniques et physiques.

Plusieurs types d'appareils sont habituellement utilisés pour la détermination des caractéristiques au cisaillement. On distingue les essais de laboratoire, tels que la boîte de Casagrande (appareil de cisaillement rectiligne) ou l'appareil de compression triaxiale ou alors les essais in situ, tels que le scissomètre et le pénétromètre.

Les essais effectués sur notre matériau ont été réalisés à la boîte de Casagrande au laboratoire de Génie civile de l'université de Tizi-Ouzou.

IV.1 - Définition de l'essai

L'essai de cisaillement direct est la plus vieille issue des expériences de Coulomb, il s'effectue à l'aide d'une boîte de cisaillement, dans laquelle on cherche à obtenir la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé. L'idée première d'une boîte de cisaillement appartient au français Alexandre COLLIN (1846), dont la forme la plus récente, qu'on lui connaît actuellement, a été élaborée par Arthur CASAGRANDE en (1932). Cette boîte est constituée de deux parties qui se déplacent l'une par rapport à l'autre dans un plan horizontal.

IV.2 - Notion de résistance au cisaillement

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement, qui entraînent des déformations du sol. Ces déformations peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle surfaces de glissement ou surfaces de ruptures.

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de la rupture, au moment de la rupture.

Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans l'essai de laboratoire, ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage, elle est bien expliquée dans l'annexe présentant la résistance au cisaillement et la rupture des sols.

En effet, si on porte l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la déformation (ε), on obtient le graphique indiqué sur la figure (IV.1).

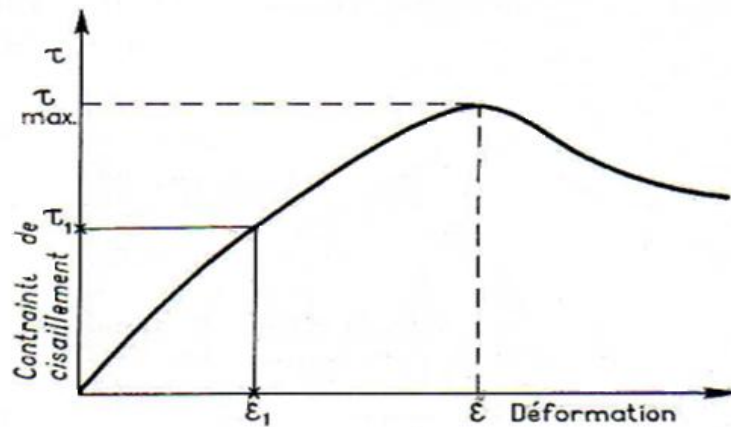


Figure (IV.1) : Courbe contrainte-déformation dans un essai de cisaillement.

IV.3 - But de d'essai

Le but de l'essai est l'évaluation de la résistance au cisaillement des sols à la rupture le long d'un plan de cisaillement. Les valeurs sont portées sur un graphique en fonction de la contrainte normale (σ) et qui s'appliquent sur le plan de rupture.

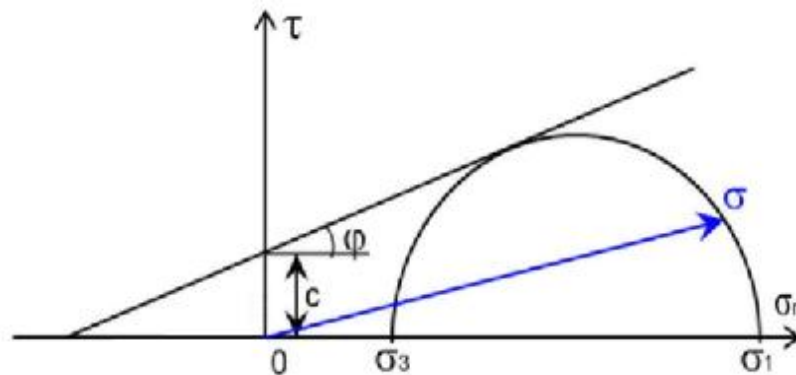


Figure (IV.2) : La courbe intrinsèque.

La courbe obtenue est approximativement une droite appelée « droite intrinsèque », l'angle que fait cette droite avec l'axe des abscisses est appelé angle de frottement (φ) et l'ordonnée à l'origine de cette droite est appelée cohésion (c).

L'équation de cette droite est donc :

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{IV.1})$$

Le sol étudié est un sol pulvérulent et la droite de Coulomb passe donc par l'origine, c'est -à-dire que le terme C est nul. L'équation de Coulomb devient :

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{IV.2})$$

IV.4 - Principe de la méthode

L'essai consiste à placer l'échantillon du matériau à étudier entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre et à le soumettre à une charge verticale N et à une charge horizontale T , que l'on augmente progressivement jusqu'à la rupture, le plan de rupture se développe progressivement le long du plan horizontal imposé par le déplacement de la partie inférieure de la boîte de cisaillement définit les conditions de rupture.

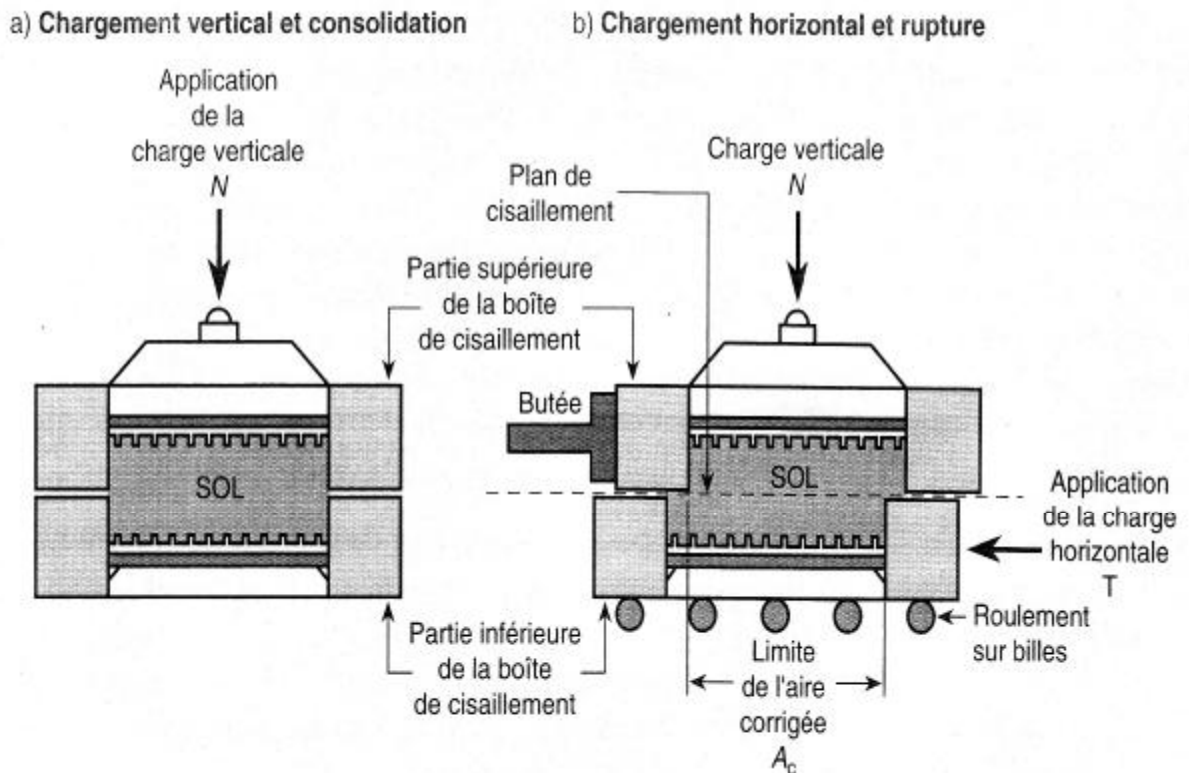


Figure (IV.3) : Principe de l'essai de cisaillement direct.

IV.5 - Appareillage

Le dispositif expérimental est composé de:

IV.5.1 - 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 la figure (IV.4).



Figure (IV.4) : Un modèle de boîtes de cisaillement.

Une 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.

Le piston et la demi- boîte inférieure possèdent des orifices pour la mise en eau des pierres poreuses (figure (IV.5)).

Les dimensions de la boîte utilisée dans notre essai sont $(6 \times 6 \times 4)\text{cm}^3$.

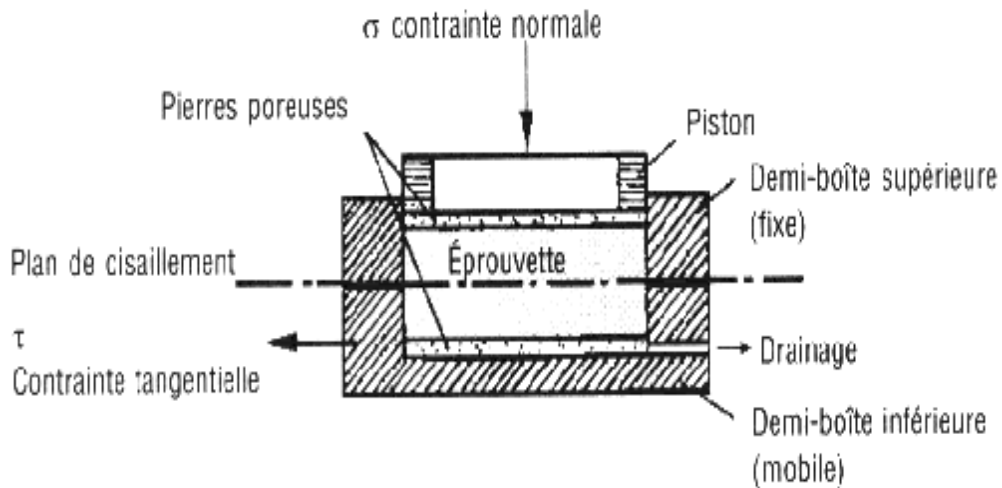


Figure (IV.5) : Schéma présentatif de la boîte de cisaillement directe.

IV.5.2 - Les poids

Ce sont des disques plats fendus, permettant leur centrage et leur superposition sur le plateau de charge du levier du bâti (figure(IV.6.b)).

IV.5.3 - La machine de cisaillement à déformations contrôlées

Elle cisaille le sol à vitesse constante.

Elle peut être manuelle, mais dans ce cas, les essais à vitesse lente sont exclus.

Elle est le plus souvent à moteur et à plusieurs vitesses, la machine décrite ci-dessous (figure (IV.6)) est de ce type suivant :



Figure (IV.6) : La machine de cisaillement.

Elle comporte essentiellement (figure(IV.6.a)) :

- Ø Un chariot porte boîte, entraîné horizontalement à vitesse constante, entraînant lui-même la demi-boîte inférieure et l'éprouvette d'essai ;
- Ø Un anneau dynamométrique, retenant la demi-boîte supérieure, dont les déformations indiquent les efforts tangentiels développés dans le plan de cisaillement ;
- Ø Un comparateur pour mesurer les déformations verticales au cours de cisaillement ;
- Ø Un système levier étrier, appliquant sur le piston de la boîte les charges normales désirées, à l'aide de différents poids.

Pour tous les détails de mise en place de fonctionnement de la machine, suivre strictement les instructions et recommandations de chaque constructeur.

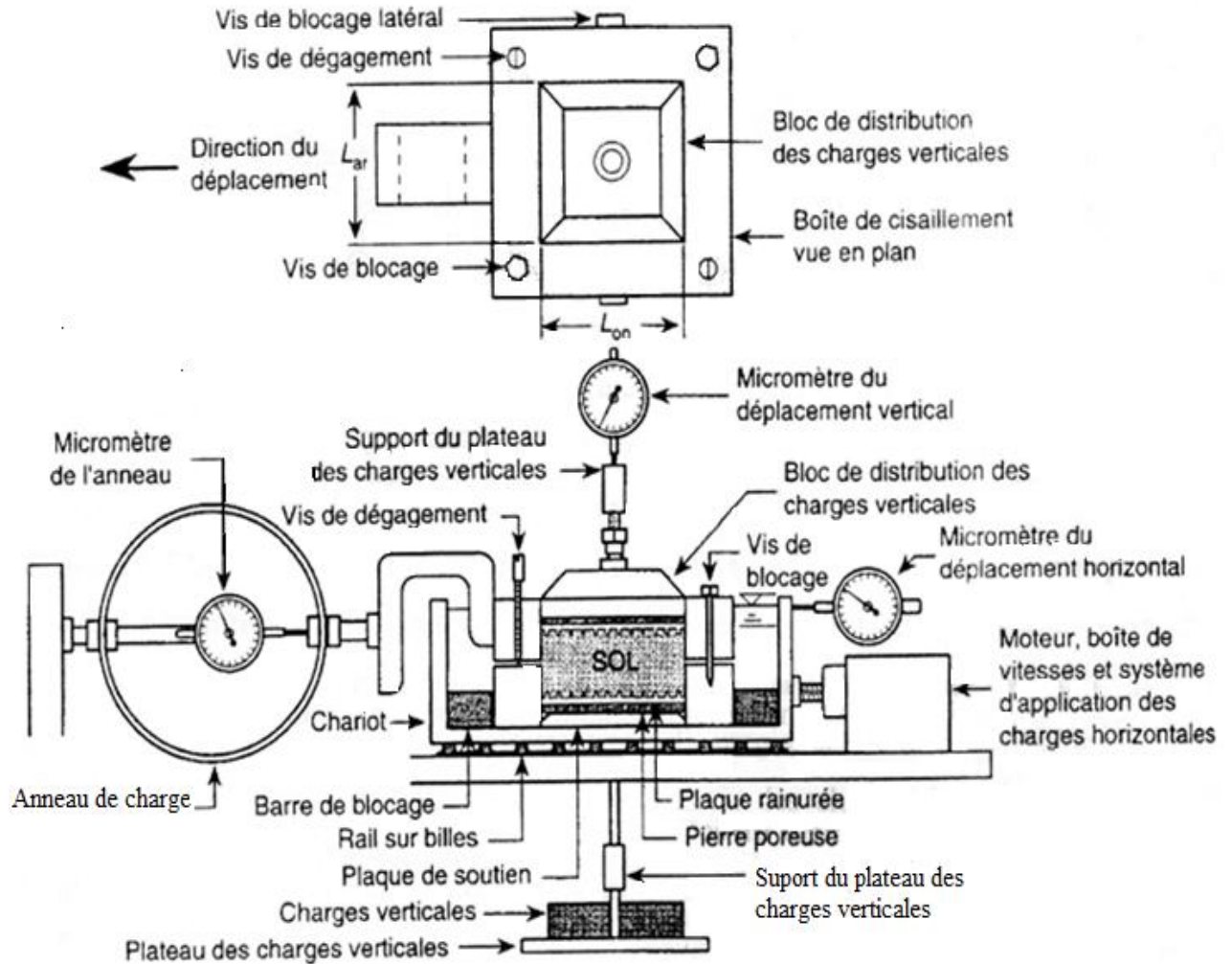


Figure (IV.7) : Montage d'un essai de cisaillement directe (Fascicule D'essai, 1987).

IV.6 - Essai de cisaillement direct

On prélève un échantillon de sol représentatif en quantité suffisante pour effectuer au moins trois essais avec des charges verticales différentes. 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 préférable d'employer la boîte circulaire avec les sols cohérents, la largeur ou le diamètre intérieur de la boîte devrait être supérieure à 5 cm, sans jamais être inférieure 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 6 cm de côté. Si le sol contient une certaine quantité de gravier, il faudra utiliser une boîte de 10 cm ou de 30 cm de côté.

On assemble solidement les deux parties de la boîte de cisaillement au moyen des deux vis de blocage et on mesure sa hauteur (H_{au}), sa longueur (L_{on}) et sa largeur (L_{ar}) à l'intérieur (figure IV. 6) ; on présume que la longueur est parallèle à la direction du déplacement. On

installe ensuite la plaque de soutien au fond de la boîte, puis on place une pierre poreuse et une plaque rainurée et perforée par-dessus. On dépose le sol dans la boîte suivant une méthode qui permet de reproduire le fidèlement possible les conditions que l'on veut mesurer. Le compactage se fait à l'aide d'un pilon dont la surface de contact est égale ou inférieure à la moitié de la section intérieure de la boîte. La hauteur finale de l'échantillon doit atteindre au moins 1,2 cm, sons ne jamais être inférieure à six fois le diamètre équivalent des plus grosses particules. Il faut que le rapport entre la largeur et la hauteur de l'échantillon soit toujours égal ou supérieur à deux ; dans certains cas c'est la hauteur de l'échantillon qui détermine les dimensions de la boîte de cisaillement.

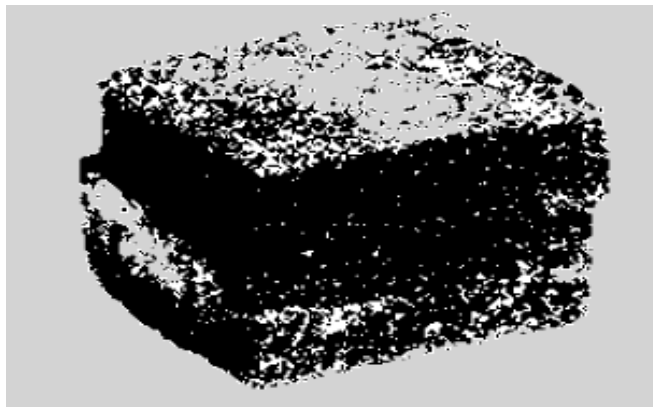


Figure (IV.8) : Eprouvette parallélépipédique cisailée.

IV.6.1 - Sources d'erreurs

Dans la configuration classique utilisée de la boîte de cisaillement, les plus importantes erreurs peuvent provenir de :

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. Ce déplacement n'atteint pas le centimètre, l'erreur est donc de 10% au maximum ; mais cette incertitude est néanmoins gênante.

La réédition des contraintes sur le plan de cisaillement n'est pas uniforme ; la contrainte de cisaillement est maximale au centre et décroît pour s'annuler vers les bords ; tandis que la répétition de la pression verticale est recommandée par les légers mouvements du piston qui ont souvent tendance à basculer.

L'essai est effectué en introduisant un espace entre les deux parties de la boîte. Cet espace, d'environ 1mm, est introduit pour empêcher le frottement parasite provenant du contact

entre les deux parties de la boîte. Mais, cet espace peut faciliter la perte du matériau en grain au cours de l'essai, qui peut introduire des variations de la contrainte normale.

Les frottements parasites ; il s'agit principalement du frottement des parties métalliques de la demi partie supérieure sur la partie cisailée de l'échantillon ; Ils sont mal connus et difficiles à prendre en compte.

IV.7 - Choix des matériaux

Les matériaux utilisés pour notre travail sont naturels divisés en deux catégories :

- Ø Le sable d'une rivière.
- Ø Le sable de la mer.

Ces matériaux sont de taille assez petite par rapport aux dimensions des échantillons, ce choix s'impose de lui-même à cause des dimensions de la boîte utilisée (petite boîte (6× 6 × 4)cm³).

IV.7.1 - Définition du sable

C'est une masse de matières minérales inorganisées, finement granuleuses, habituellement composées de quartz (silice), et d'une petite proportion de mica, de feldspath, de magnétite et autres minéraux durs. C'est le résultat de l'érosion, de la dégradation et de l'abrasion des roches par des processus chimiques et mécaniques. Quand les grains viennent de se former, ils sont habituellement anguleux et très pointus. Par la suite, sous l'action du vent et de l'eau, ils s'usent, s'arrondissent et deviennent de plus en plus petits.

IV.7.2 - L'analyse morphologique

A l'œil nu, les grains ont une forme irrégulière, les grains de sable de mer sont arrondis et les grains de sable de rivière sont sous arrondis, sous angulaires et angulaires (les figures (IV.9), (IV.10), (IV.11) et (IV.12)).



Figure (IV.9) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est arrondie.



Figure (IV.10) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est sous arrondie.



Figure (IV.11) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est sous angulaire.

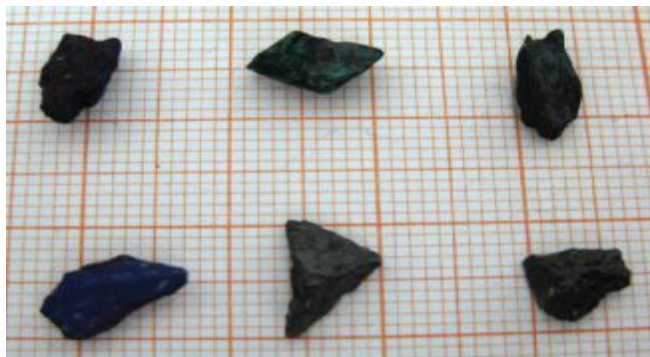


Figure (IV.12) : Photographie des grains de sable de rivière dont la forme est angulaire.

IV.7.3 - Caractérisation physique

IV.7.3.1 - L'analyse granulométrique

- ✚ On fait l'analyse granulométrique pour chaque classe granulaire.
- ✚ On classe une série de tamis par ordre croissant de haut vers le bas, puis on verse le sable en haut de la colonne des tamis, et un vibromètre est mis en marche pendant 10 minutes à une fréquence de 50Hz.
- ✚ On définit le tamisât comme étant le poids du granit passant à travers un tamis et le refus comme étant le poids du granit retenu par le même tamis.



Figure (IV.13) : Conduite de l'essai granulométrique du sable.

IV.7.3.2 - La courbe granulométrique

L'analyse granulométrique se traduit par la courbe granulométrique, cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés, elle est notamment utilisée pour la classification des sols grenus.

La courbe granulométrique est représentée en portant les ouvertures des tamis en abscisses sur une échelle logarithmique et les pourcentages de tamisât en ordonnées sur une échelle arithmétique (figure (IV.14)).

IV.7.3.3 - Interprétation

Notre étude concerne 4 fractions de sable dont la distribution des tailles des grains est contrôlée par tamisage mécanique :

1^{re} fraction « Sable de rivière dont la forme est arrondie » représente le milieu granulaire qui ne contient que des diamètres de 2mm à 5mm.

2^{ème} fraction « Sable de rivière dont la forme est sous arrondie » représente le milieu granulaire qui ne contient que des diamètres de 2,5mm à 5mm.

3^{ème} fraction « Sable de rivière dont la forme est sous angulaire » représente le milieu granulaire qui ne contient que des diamètres de 2,5mm à 5mm.

4^{ème} fraction « Sable de rivière dont la forme est angulaire » représente le milieu granulaire qui ne contient que des diamètres de 2,5mm à 5mm.

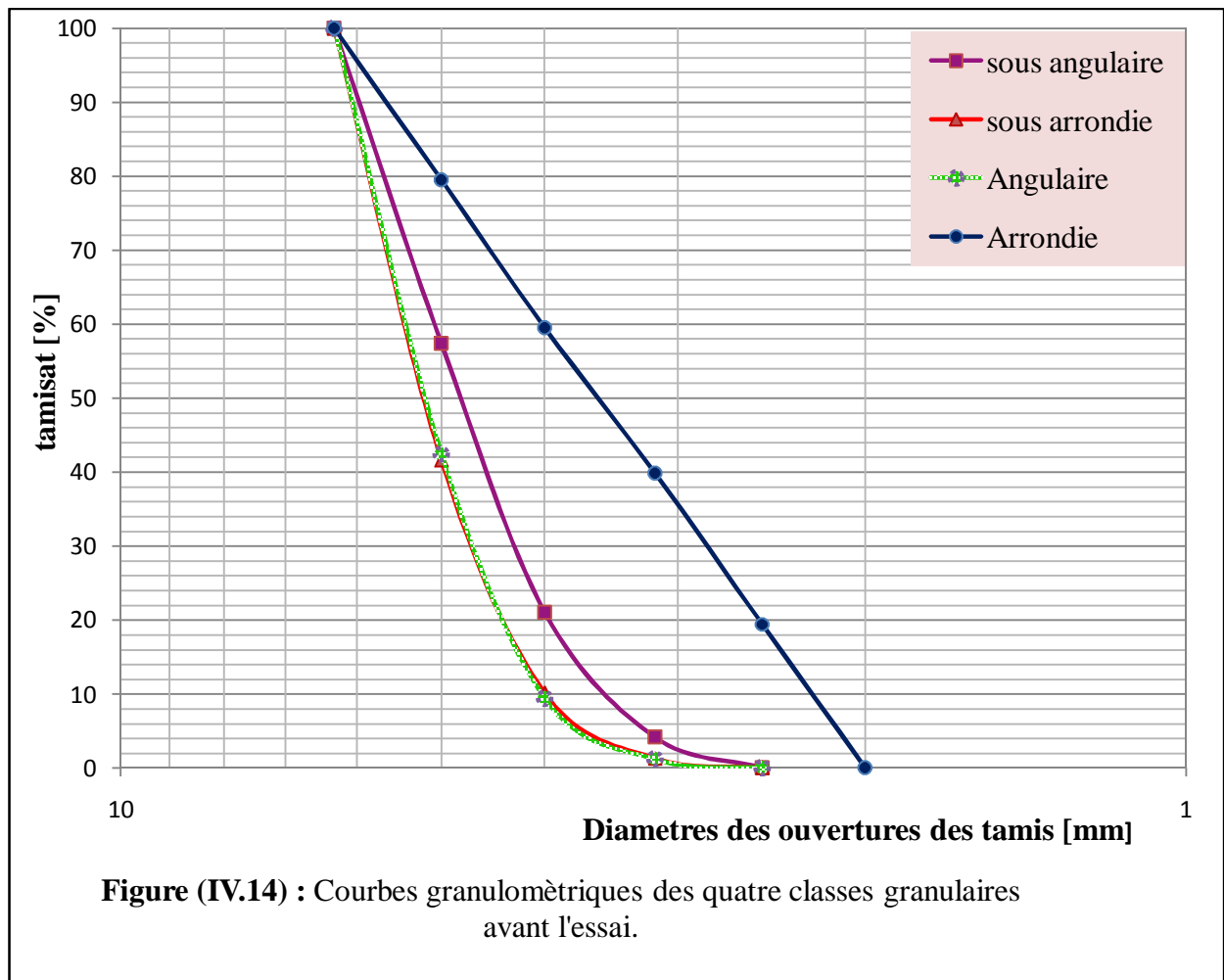
*Coefficient d'uniformité de HAZEN « Cu » :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ de toutes les formes } < 3 .$$

*Coefficient de courbure « Cc » :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \cdot D_{60})} \text{ de toutes les formes est entre 1 et 3.}$$

Résultats : le sable utilisé est un sable propre de granulométrie étroite (uniforme),



IV.8 - Déroulement des essais

La mise en marche de la machine ne se fait qu'après le choix :

La vitesse de l'essai est de 1,5mm/mn, elle n'est pas trop lente pour que l'essai ne soit pas trop long, mais suffisamment rapide pour obtenir des résultats de précision et pouvoir considérer l'évolution de l'échantillon comme étant constituée d'une suite d'états d'équilibre infiniment voisins (un état quasi-statique).

Application de contraintes normales relativement faibles qui varient entre 100 et 300 KPa pour minimiser la cassure des grains (Wilkins, 1970 et Cambou, 1979)

Chaque essai a été répété plusieurs fois avec des échantillons de même nature et de même granulométrie. La mise en place de ces échantillons est identique pour tous les essais, afin de quantifier les caractéristiques mécaniques de ces matériaux.

IV.9 - Fin de l'essai

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

IV.10 - Essais réalisés

L'utilisation d'un même mode opératoire permet de mieux comprendre la réponse des matériaux en cisaillement, les mécanismes mis en jeu à travers la combinaison de différents paramètres et d'analyser les phénomènes et les mécanismes qui se produisent dans le plan de cisaillement à travers :

- ü La nature des grains : on a affaire à deux matériaux de même nature (c'est un sable) d'origines différentes (rivière et mer).
- ü Le niveau de contrainte normale : la contrainte verticale appliquée sur le chapeau de la boîte varie de 100 KPa à 400 KPa pour tous les matériaux naturels.
- ü La rugosité de la surface des grains : les grains de forme arrondie sont très lisses, les grains qui ont la forme sous arrondie sont peu lisses, les grains qui ont la

forme sous angulaire sont rugueux et les grains qui ont la forme angulaire sont très rugueux.

ü La morphologie des grains : arrondie, sous arrondie, sous angulaire, angulaire.

ü La taille des grains : Pour les formes sous arrondie, sous angulaire et angulaire est entre 5 mm et 2.5 mm et pour la forme arrondie et entre 5mm et 2mm.

Conclusion

L'essai de cisaillement est un essai précis, facilement reproductible et dans une certaine mesure aisé à réaliser. Le mode opératoire défini permet de rendre compte du comportement des matériaux, en vue de la composition des phénomènes et des mécanismes qui se produisent lors du cisaillement et estimer les propriétés de ces matériaux.

L'essai de cisaillement direct permet de déterminer des paramètres de résistance du sol, comme l'angle de frottement interne (φ), qui est souvent représenté par la courbe intrinsèque ou droite de coulomb.

Chapitre V

Résultats et analyses

Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les différents résultats obtenus sur des essais à la boîte de cisaillement pour les deux matériaux testés.

Lors des essais de cisaillement réalisés à la boîte de Casagrande sur des échantillons de matériau naturel (sables de rivière et de mer), des déformations apparaissent. Il se produit des déplacements relatifs entre les grains qui se traduisent par frottement au point de contact. Nous rappelons que la mise en place des échantillons est identique pour tous les essais et que chaque essai a été répété plusieurs fois de façon à confirmer systématiquement la reproductibilité des résultats obtenus et pour quantifier les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires.

Une interprétation judicieuse des courbes nous permet d'apprécier et d'analyser les phénomènes qui se produisent le long du plan de rupture à travers la combinaison et l'influence des différents paramètres à savoir :

- ▶ La nature des grains ;
- ▶ Le niveau de confinement ;
- ▶ La rugosité de la surface des grains ;
- ▶ La morphologie des grains ;
- ▶ La taille des grains.

V.1 - Traitement des résultats

A l'aide des lectures lues sur les comparateurs du déplacement horizontal et vertical, on calcule les déformations horizontales (ΔH) et verticales (ΔV) en millimètres, en tenant compte des unités inscrites au cadran de chaque comparateur. Si le comparateur du déplacement vertical n'était pas à zéro au début de l'essai, on ramène la déformation verticale initiale à zéro et on convertit les autres déformations verticales en fonction de cette nouvelle valeur avant d'effectuer les calculs. Cette opération permet de mieux visualiser les mouvements verticaux de l'échantillon de sol.

On calcule ensuite la force horizontale associée à chaque valeur lue sur le comparateur de l'anneau :

$$T = \text{lecture} * K_{\text{anneau}}$$

Avec T : force horizontale(N).

K_{anneau} : constante de l'anneau.

Enfin, on calcule la résistance au cisaillement et la contrainte normale correspondante associée à chacune de ces forces :

$$\tau' = \frac{T}{Ac}$$

$$\sigma_n' = \frac{N}{Ac}$$

Ou : $Ac = A_0 - (L_{ar} * \Delta H)$: (la section corrigée (cm²)).

L_{ar} : largeur de la boîte, mesurée perpendiculairement à la direction du déplacement de la boîte (cm).

N : charge verticale totale appliquée sur le sol (N).

La charge verticale totale doit inclure le poids de tous les éléments qui s'appuient sur le sol, c'est-à-dire la pierre poreuse et le plateau des charges verticales, les charges verticales elles mêmes et enfin la partie supérieure de la boîte de cisaillement, qui avait été fixée au bloc de distribution des charges verticales.

V.2 - Photographie des différents types des échantillons avant et après l'essai

Nous avons remarqué que l'état des grains change après les différents essais de cisaillement. Pour cela, une comparaison entre les états de chaque échantillon (grains contenus) avant et après l'essai a été faite, à partir des Photos jointes ci après (dans les figure (V.1), (V.2), (V.3) et (V.4).) :

L'apparition d'une poudre ou de grains cassés et écrasés augmente proportionnellement avec l'augmentation de la contrainte normale appliquée. L'état des grains obtenus change avec la variation de type de grains et de la forme des grains. Il faut souligner que dans le cas de la forme arrondie, les poudres apparaissent seulement pour les contraintes très élevées. Par contre dans le cas de la forme angulaire et sous angulaire, on remarque l'apparition d'une quantité importante de poudre, même pour les faibles contraintes.



Arrondie avant le cisaillement.



Sous 100 KPa



Sous 200 KPa



Sous 300 KPa



Sous 400 KPa

Figure (V.1) : Photographies de la fraction «1» (la forme arrondie) avant et après essai.



Sous arrondie avant le cisaillement.



Sous 100 KPa



Sous 200 KPa



Sous 300 KPa



Sous 400 KPa

Figure (V.2) : Photographies de la fraction «2» (la forme sous arrondie) avant et après essai.



Sous angulaire avant le cisaillement



Sous 100 KPa



Sous 200 KPa



Sous 300 KPa



Sous 400 KPa

Figure (V.3) : Photographies de la fraction «3» (la forme sous angulaire) avant et après essai.



Angulaire avant le cisaillement.



Sous 100 KPa



Sous 200 KPa



Sous 300 KPa

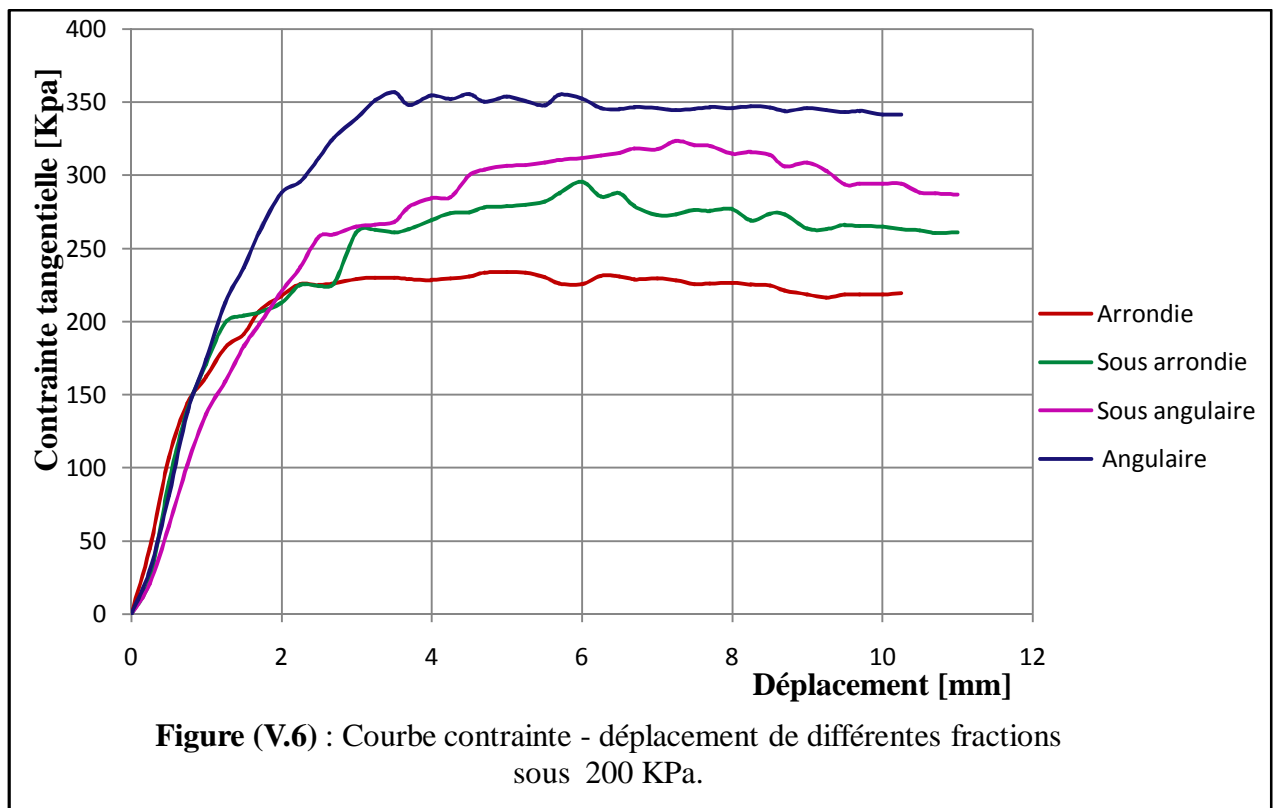
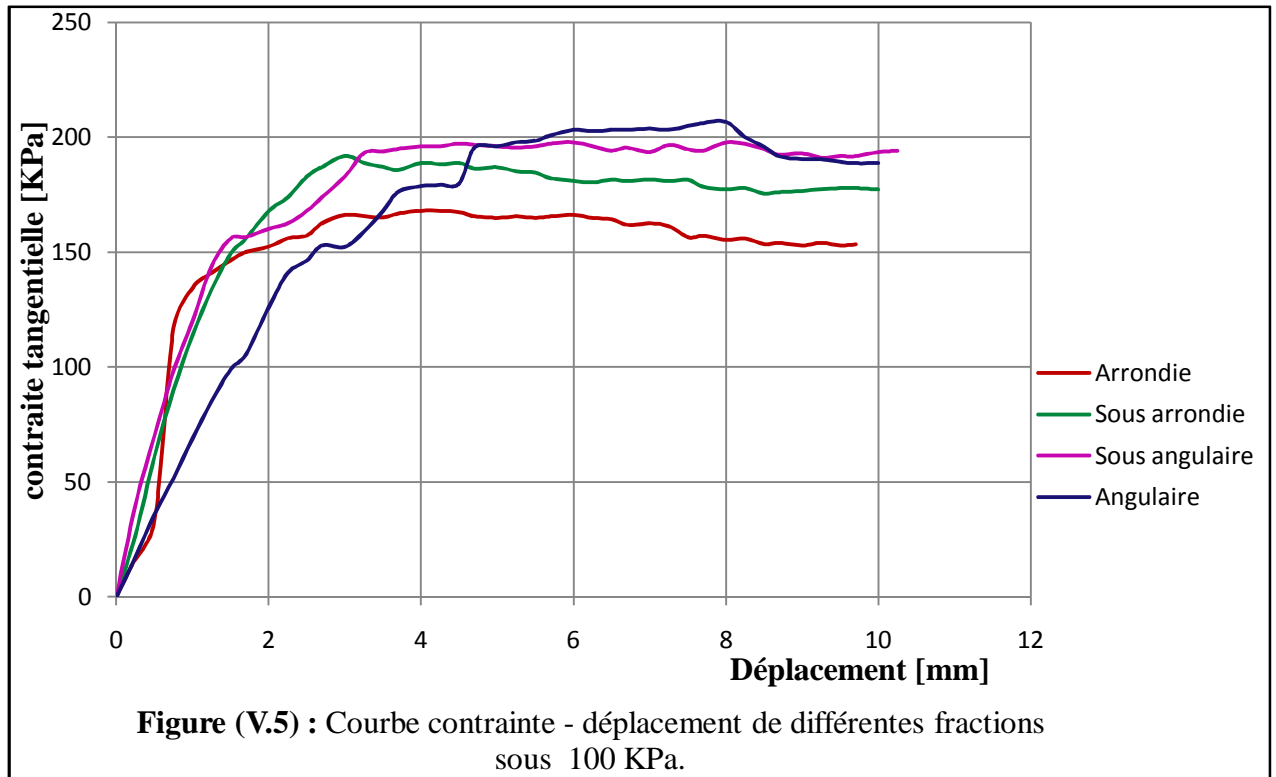


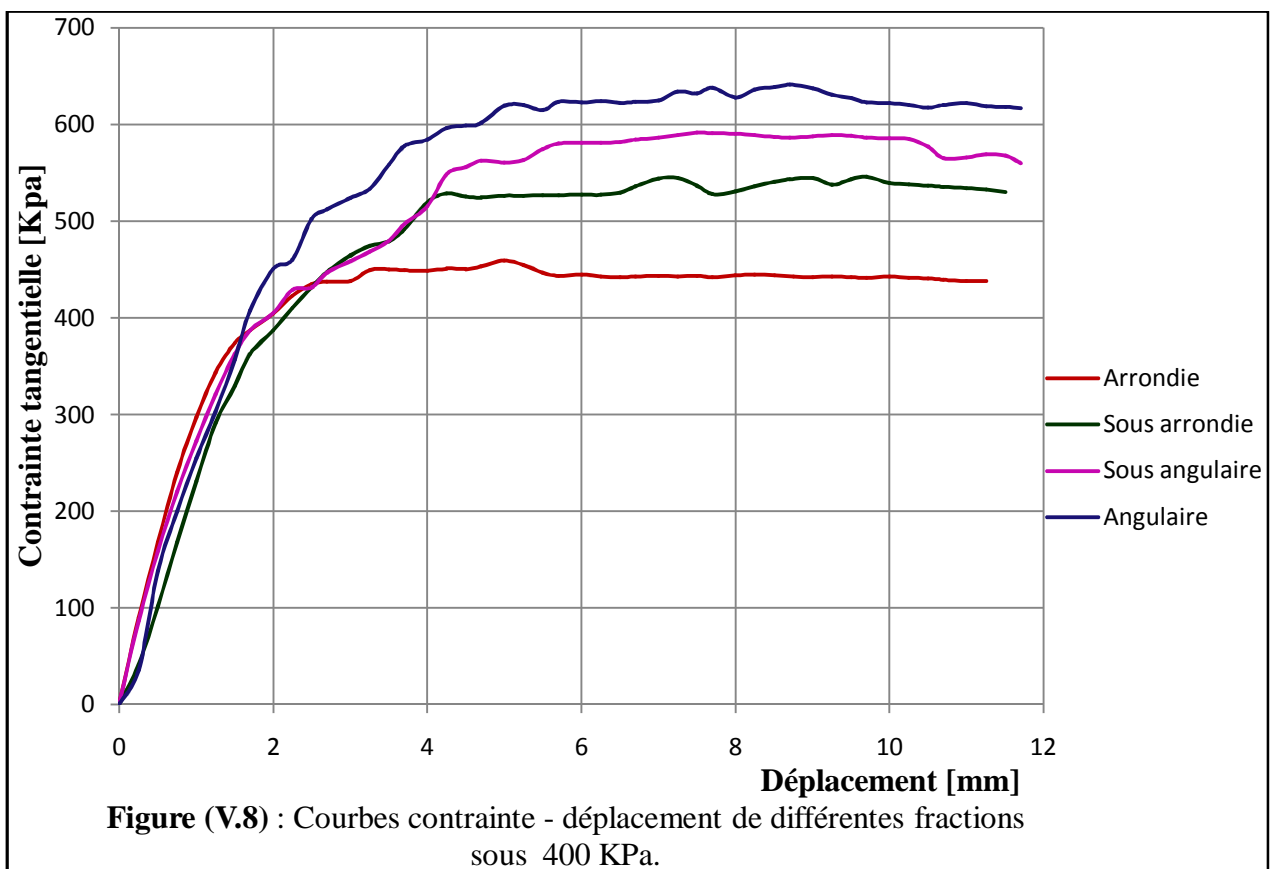
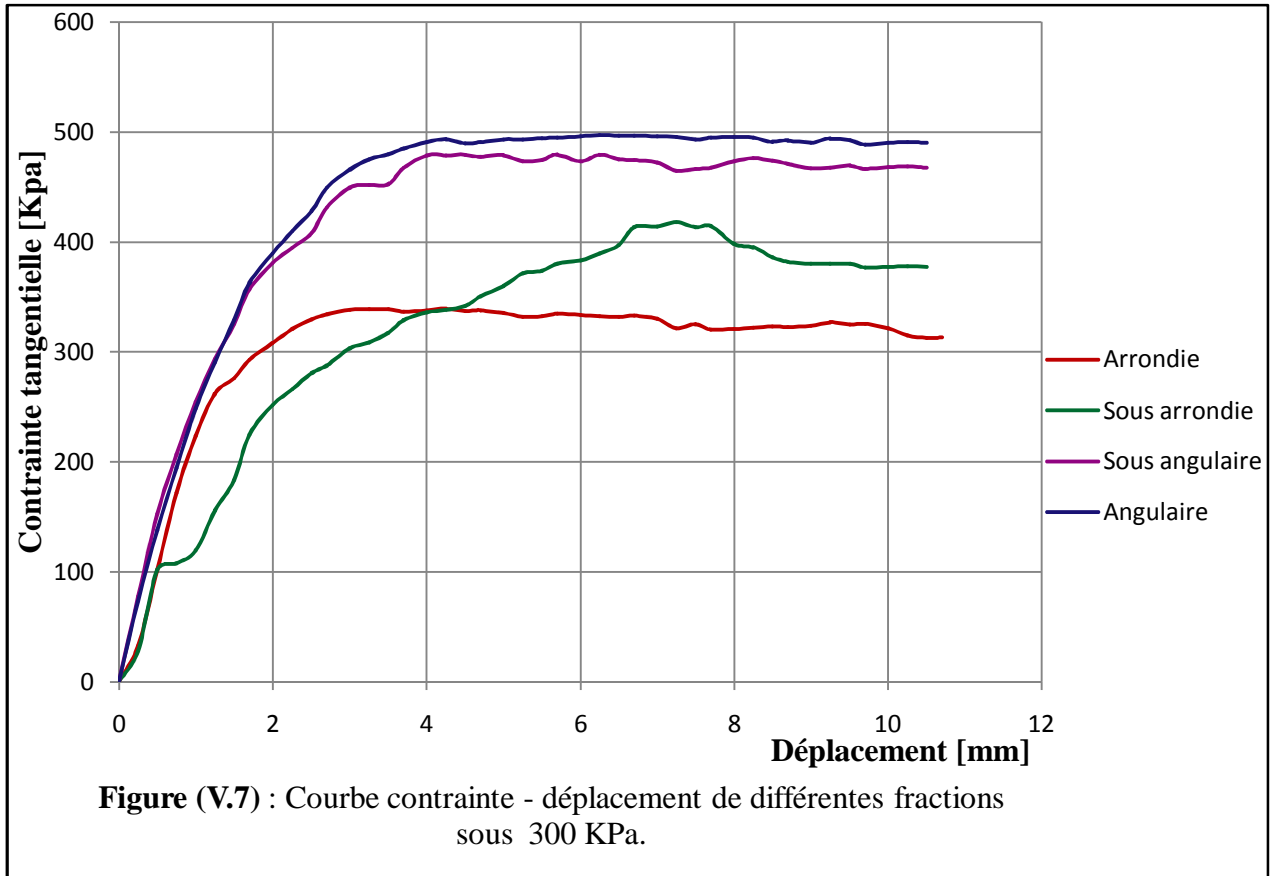
Sous 400 KPa

Figure (V.4) : Photographies de la fraction «4» (la forme angulaire) avant et après essai.

V. 3 - Présentation des diagrammes contrainte-déplacement

On trace les graphiques de la résistance au cisaillement [KPa] en fonction du déplacement horizontal [mm] (figures (V.5), (V.6), (V.7) et (V.8).) :





V.3.1 - Interprétation des résultats

En analysant les courbes contrainte tangentielle - déplacement, on constate que :

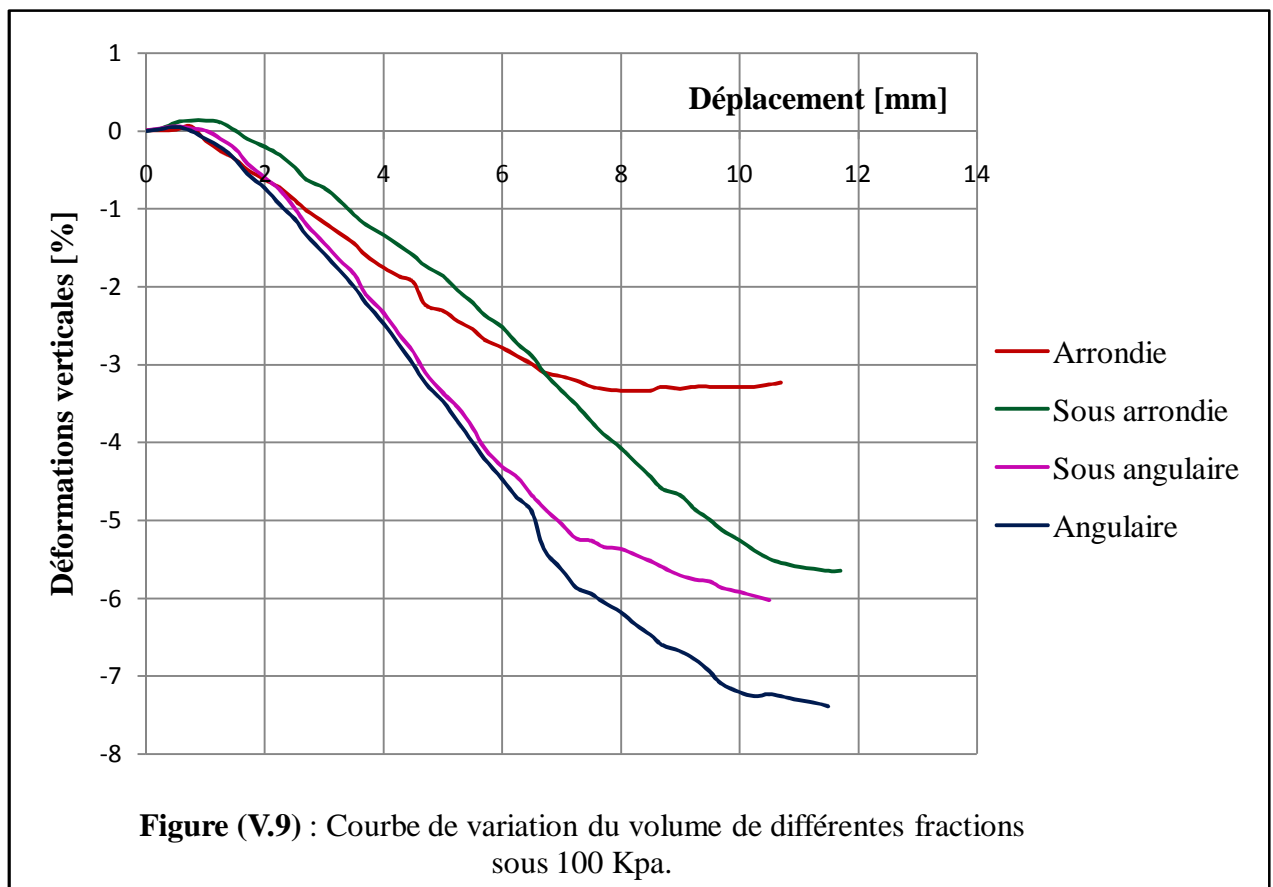
- Dans la plupart des cas, une augmentation linéaire de la contrainte tangentielle dans la phase élastique avant l'apparition d'un palier. Ce palier est suivi d'une fluctuation de faibles amplitudes.
- A cet effet, au début des essais, on remarque une première tranche régulière de la courbe suivie par une réaction en chaîne qui commence par le premier élément résistant qui dépasse sa contrainte admissible. Ainsi, quand un grain est sollicité fortement et se déplace, il bouleverse la structure grâce à l'apport d'énergie par cisaillement et entraîne un réarrangement granulaire qui modifie complètement le chemin de distribution des contraintes de manière à obtenir une structure dépensant un minimum d'énergie et une contrainte non admissible par les autres parties résistantes (*Combé.G (2001)*). Cette modification supprime un grand nombre d'éléments résistants, ce qui provoque une chute de l'effet de cisaillement. Le réseau des chemins est brutalement modifié avant de reprendre son déroulement d'où apparition de fluctuations.
- Les courbes sont constituées de deux phases :
 1. Une première phase régulière où le régime strictement quasi-statique est observé et caractérisé par une suite continue d'états d'équilibre ; le comportement du matériau est considéré comme élastique ou pseudoélastique. En effet, les réactions normales, contrairement aux réactions tangentielles, donnent lieu à des déformations élastiques et il n'y a aucune rupture et ceci est d'autant plus significatif que la sollicitation de cisaillement au point de contact est petite. Ce régime prend fin dès que la liste initiale des contacts ne suffit plus à supporter le confinement imposé, c'est pour cela que la forme arrondie ayant la surface très lisse atteint le palier rapidement, par contre la forme angulaire ayant la surface rugueuse l'atteint lentement.
 2. On entre ensuite dans la seconde phase où les déformations ont pour origine les réarrangements inter granulaires et où les réactions tangentielles donnent lieu à des déformations inélastiques et à une dissipation d'énergie qui résulte des déformations plastiques. Les comportements macroscopiques alors observés mettent en évidence des alternances d'états d'équilibre et de phase de réarrangement. Les grains libres peuvent se déplacer sans problème, soit ils glissent par rapport aux grains voisins, soit ils roulent d'où l'apparition des paliers ou pics marqués. Dans le cas de la forme

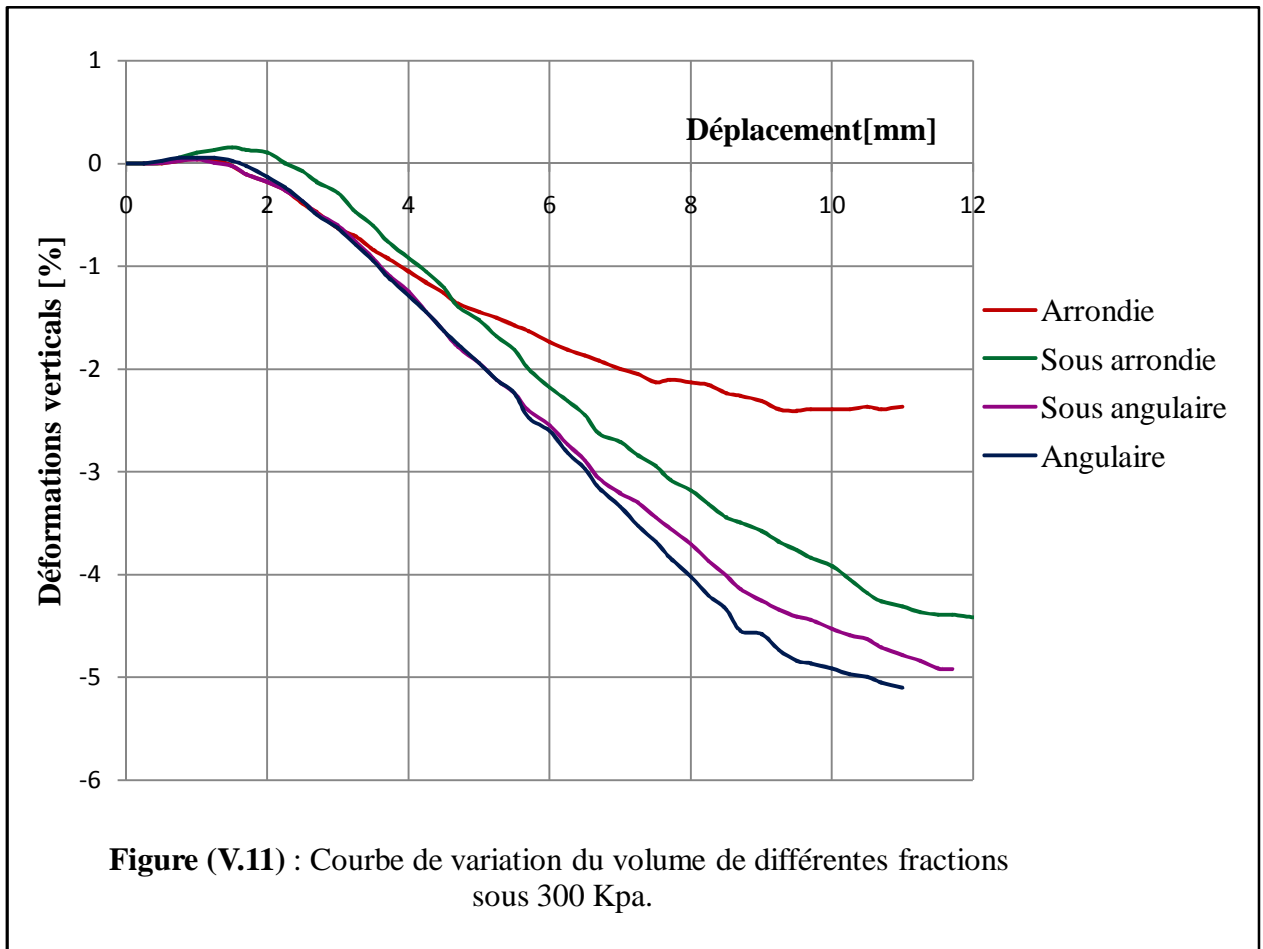
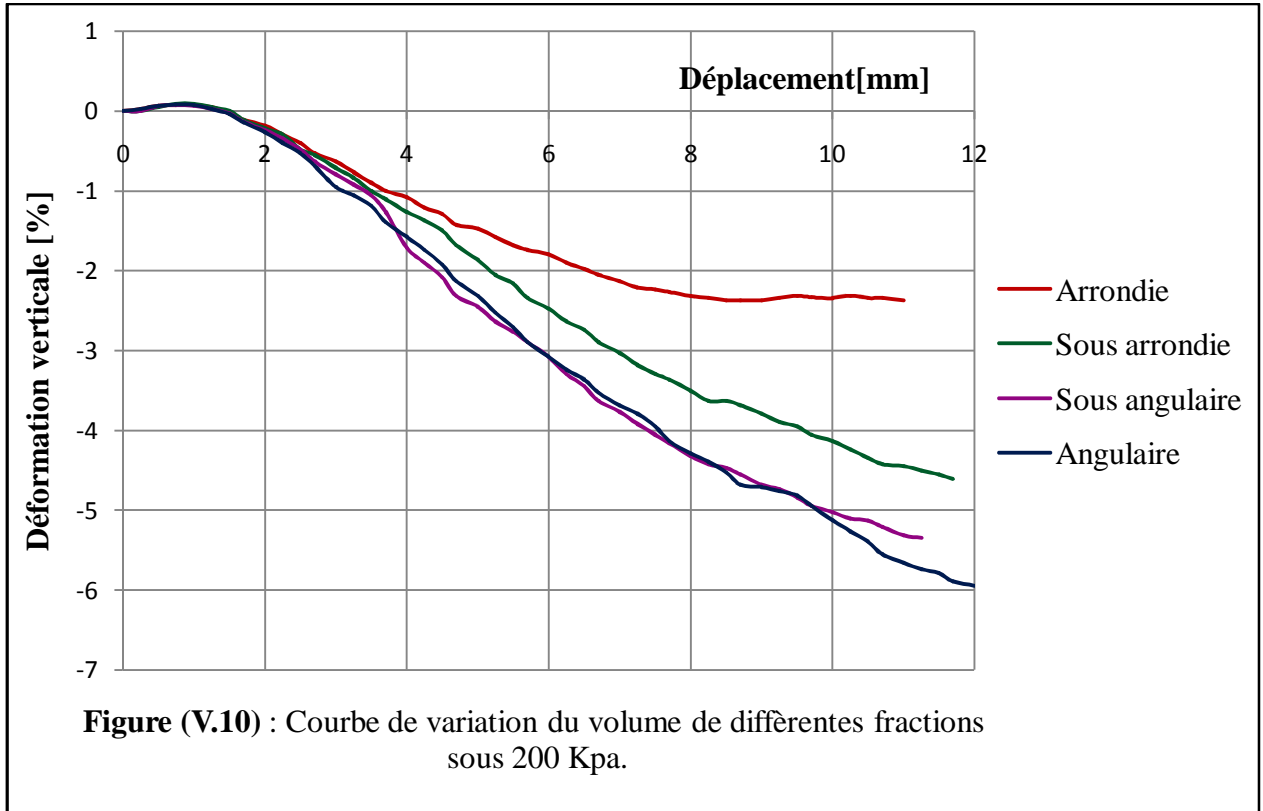
arrondie, les grains glissent, par contre dans le cas des trois autres formes, les grains roulent beaucoup plus.

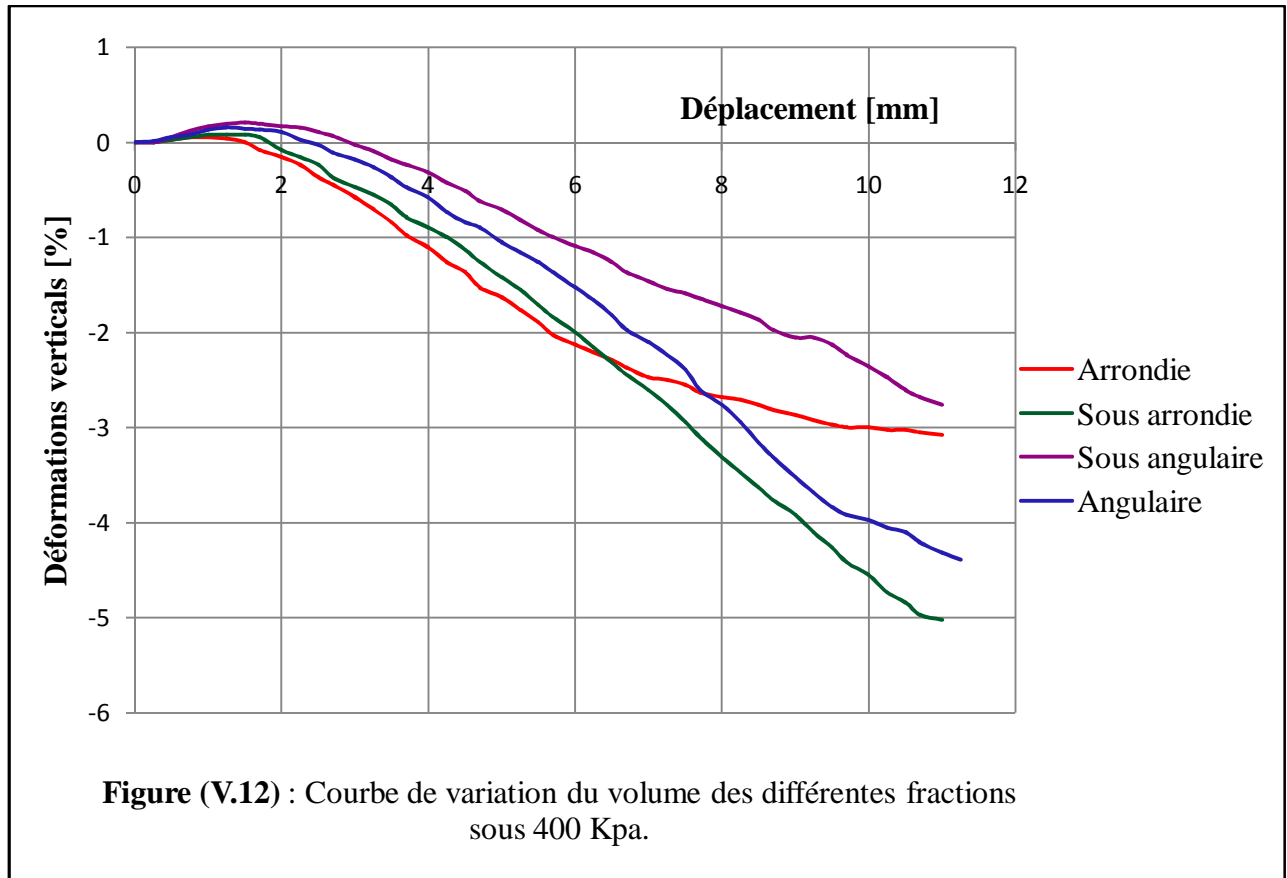
- Les pics plus ou moins marqués s'expliquent par le fait qu'un grain doit plutôt rouler que glisser.
- La valeur des amplitudes des paliers ou des pics est d'autant grande que la contrainte normale est importante.
- La forme angulaire résiste mieux que la forme sous angulaire, la forme sous angulaire résiste mieux que la forme sous arrondie et la forme sous arrondie résiste mieux que la forme arrondie. Donc plus que la forme est irrégulière et angulaire plus que la résistance au cisaillement augmente.

V.4 - Présentation des courbes de variation du volume

On trace les graphiques de déplacement vertical (variation de hauteur) [mm] en fonction de déplacement horizontal [mm] (figures(V.9 à V.12)).







V.4.1 - Phénomène de dilatance et de contractance

Un matériau granulaire peut être fabriqué à différentes densités suivant la méthode de tassement utilisé, ceci veut dire que l'effet de dilatance observé sera d'autant plus fort que la densité initiale du tas sera grande. De même, une déformation peut engendrer une diminution du volume total du tas, c'est-à-dire une contractance lorsque le tas est trop lâche.

V.4.2 - Interprétation des résultats

Au cours de l'essai, on remarque une grande variation du volume représentée par des variations de la hauteur de l'échantillon. En plus du tassement instantané qui se produit lors du chargement, il y a :

- ü Une contractance (enchevêtrement des grains) caractérisée par une diminution de la hauteur.
- ü Suivie d'une dilatance (désenchevêtrement des grains) caractérisée par une augmentation de la hauteur.

En effet, durant la phase élastique, les grains sont libres de se mouvoir et à se déplacer vers les vides afin de minimiser leur énergie élastique. Par la suite, il y a une montée du

couvercle c'est-à-dire une augmentation de la hauteur qui correspond à un désenchevêtrement des grains compactés afin de faciliter le passage des uns sur les autres.

Le mouvement des grains qui se produit, non pas par un déplacement général suivant une surface continue, mais par rupture des chainons matérialisés par une zone de glissement. Ainsi, les courbes de variation hauteur – déplacement horizontal font apparaître des comportements qualitativement identiques, c'est-à-dire une première phase de contractance suivie par une phase de dilatance en passant par un état caractéristique.

La dilatance augmente quant l'effort normal appliqué est faible (la figure (V.9)).

Notons enfin que la dilatance affaiblit l'arrangement granulaire (par la diminution de compacité), donc c'est un facteur essentiel de la localisation.

La forme arrondie a un comportement plus dilatant que la forme angulaire qui a un comportement contractant puis dilatant.

V.5 - La courbe intrinsèque

La courbe intrinsèque (la figure (V.13)) est la droite constituée l'**enveloppe de rupture**, c'est-à-dire la limite linéaire où se trouve la gamme des contraintes agissant sur le plan de rupture. Il ne peut y avoir aucun point au-dessus de cette droite, car au-delà de cette limite, l'équilibre des contraintes est rompu, et le sol est instable. Un point situé sous l'enveloppe représente des contraintes en équilibre et une résistance au cisaillement suffisante pour assurer la stabilité du sol.

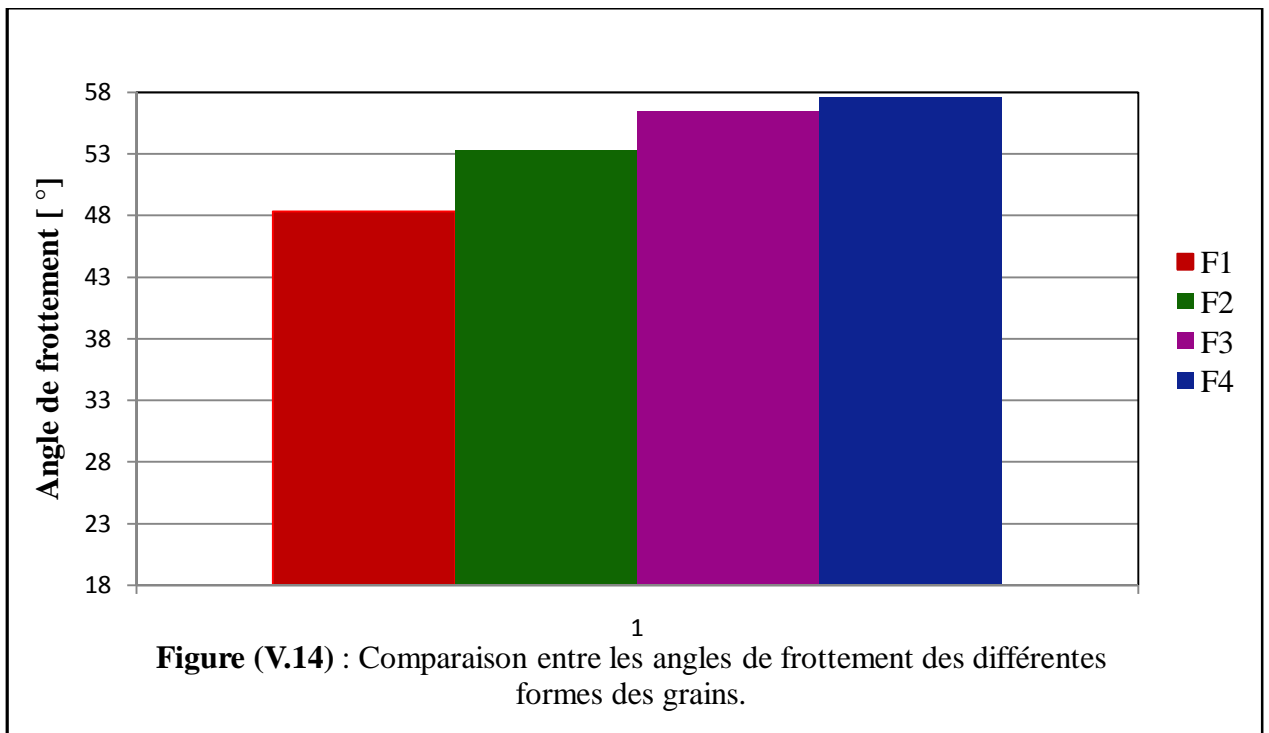
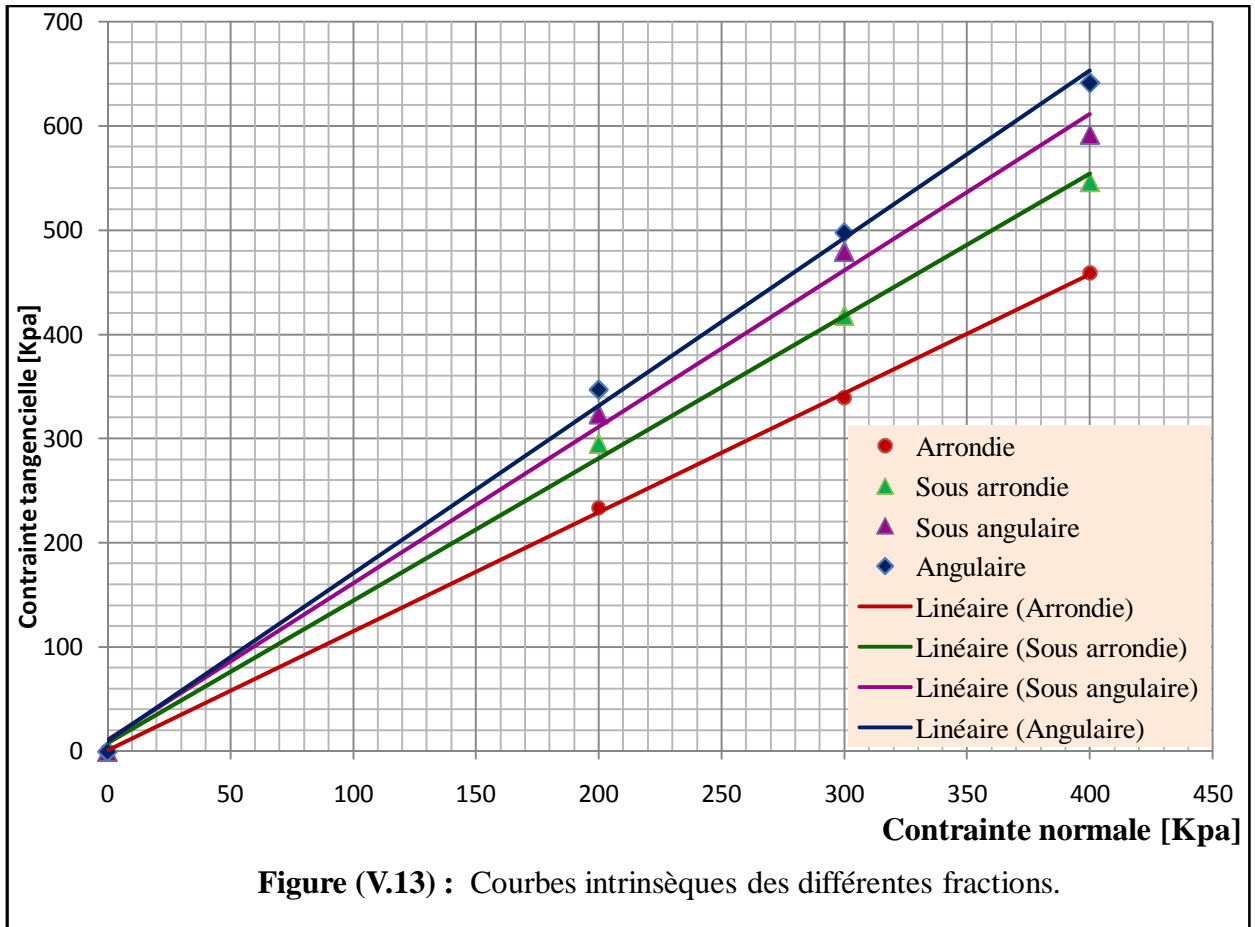
V.5.1 - Détermination de l'angle de frottement interne

Lorsqu'on soumet un matériau granulaire à des sollicitations, des déformations apparaissent. En effet, de la sollicitation, il se produit des déplacements relatifs entre les grains qui se traduisent par des frottements aux points de contact, même dans des conditions simples, le frottement est un phénomène compliqué.

Pour déterminer cette résistance par frottement, on trace sur le plan de Mohr – Coulomb la courbe intrinsèque qui définit la position du plan de glissement à l'aide de l'angle de frottement interne.

Cet angle est défini au maximum de la contrainte de cisaillement :

$$\varphi = \text{Arctan} \left(\frac{\tau_{\max}}{\sigma} \right) \quad (\text{V.1})$$

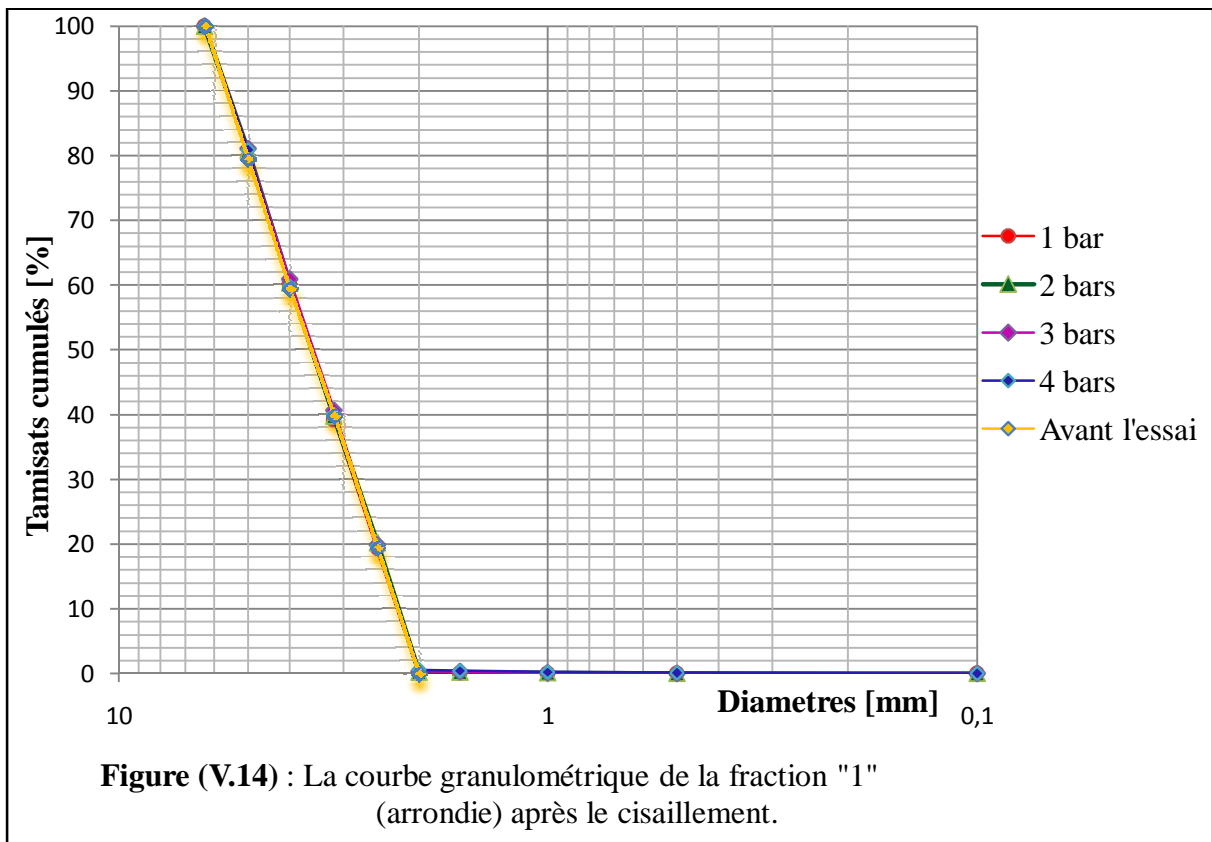


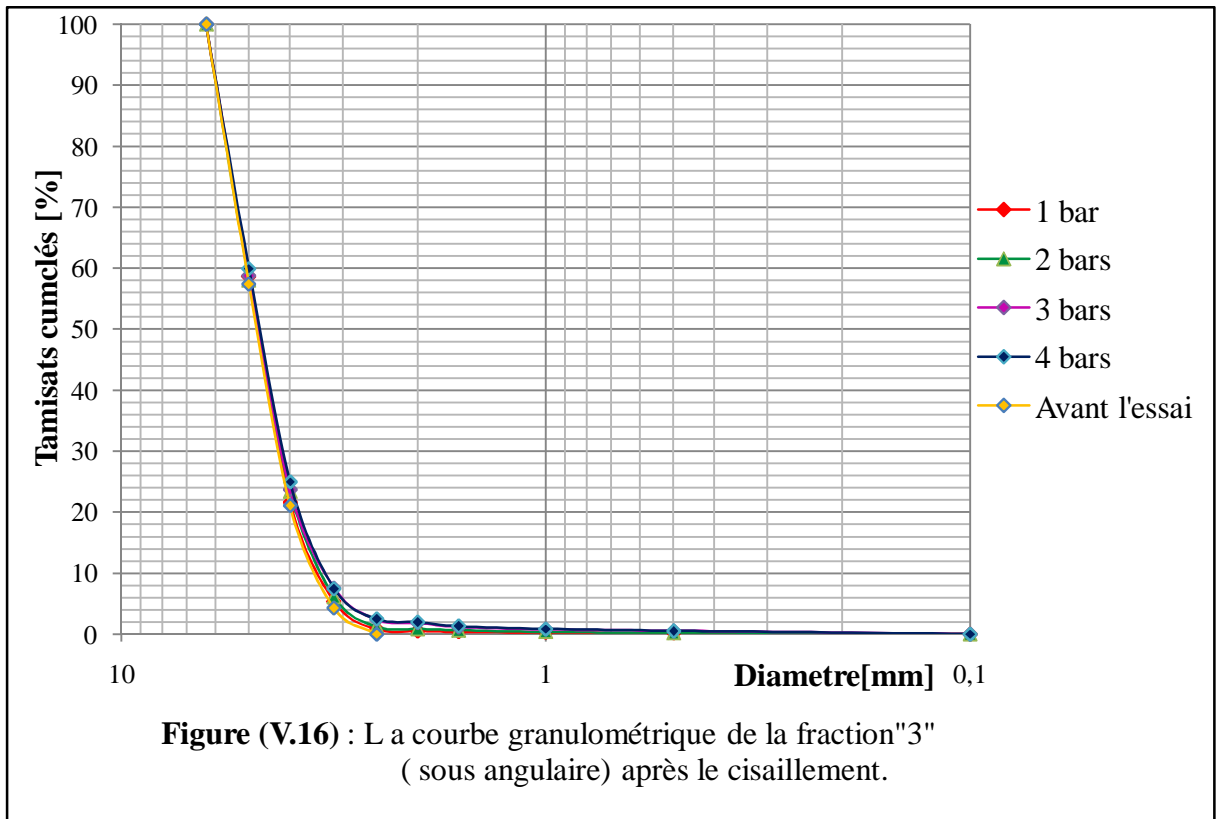
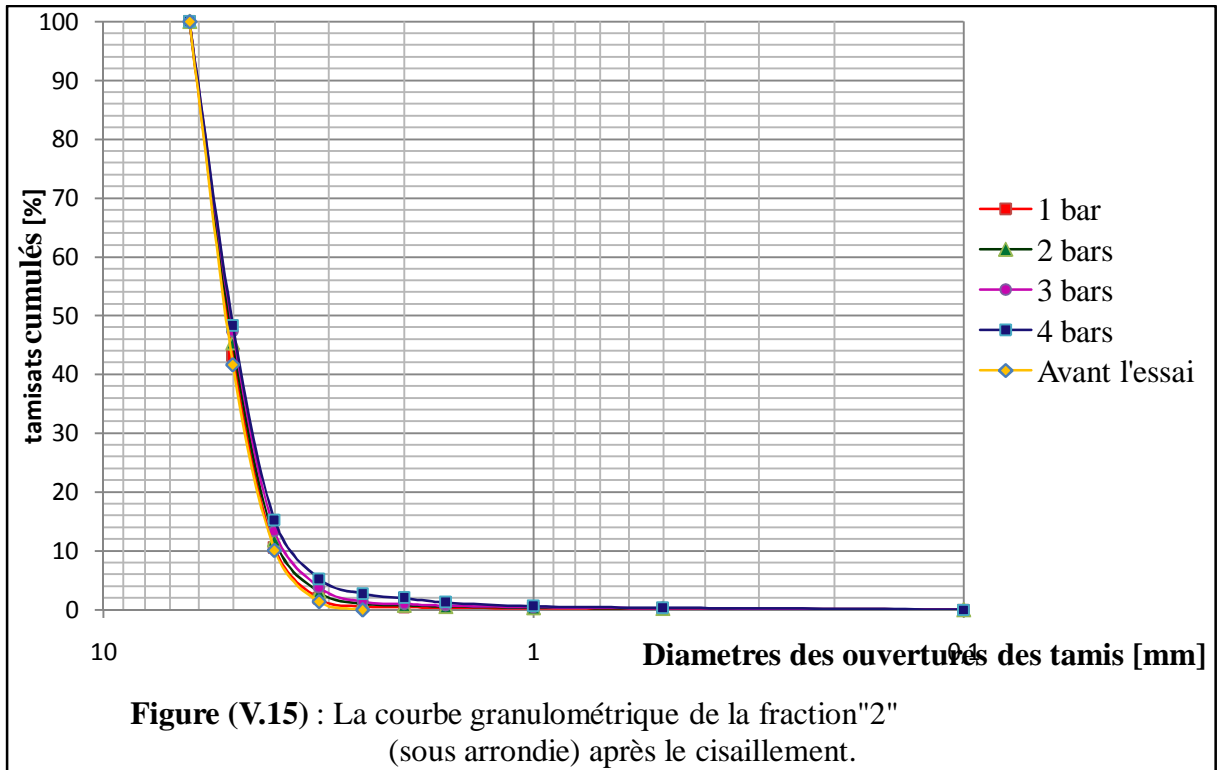
Ainsi, pour des chargements normaux allant de 100 KPa à 400 KPa, on déduit de la droite intrinsèque les angles de frottement interne suivants : $\varphi \approx 57,6^\circ$ pour la forme angulaire, $\varphi \approx 56,6^\circ$ pour la forme sous angulaire, $\varphi \approx 53,3^\circ$ pour la forme sous arrondie et $\varphi \approx 48,3^\circ$ pour la forme arrondie (la figure (V.13)).

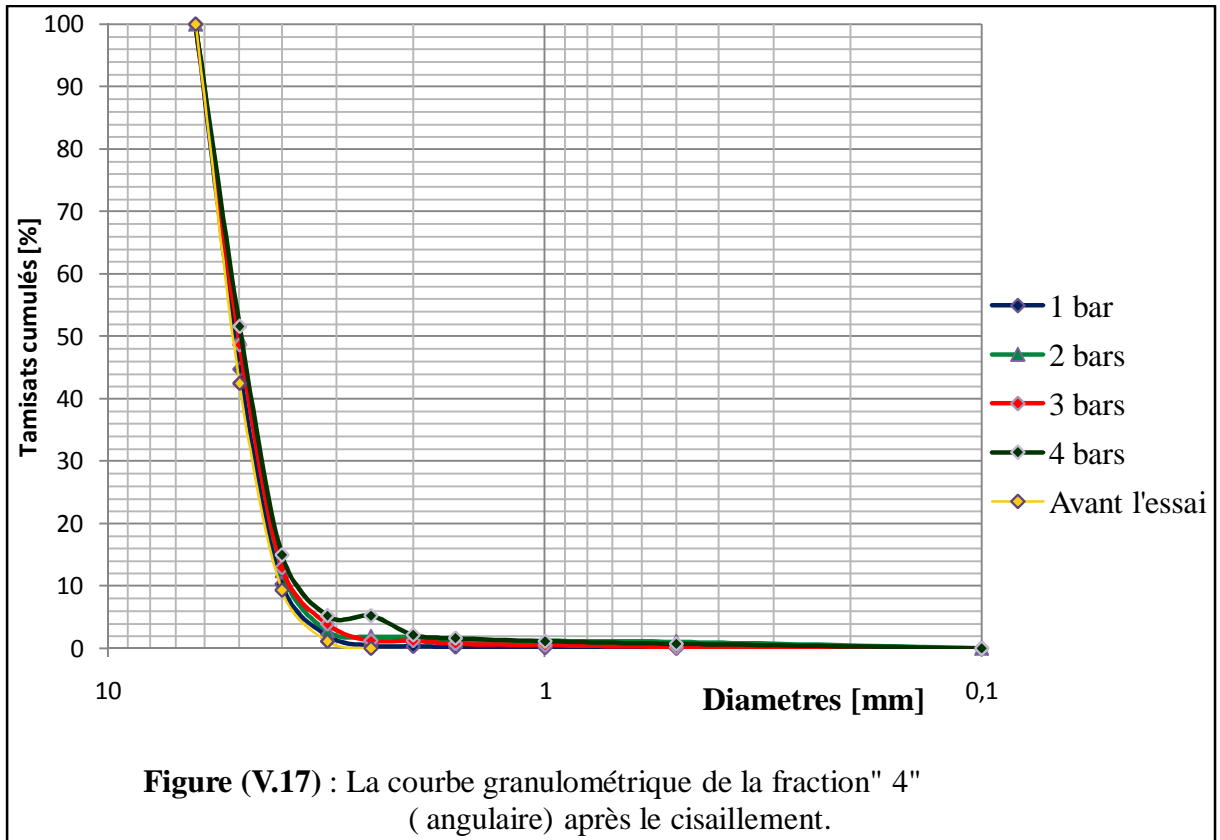
On remarque donc que le frottement augmente proportionnellement avec la rugosité et l'angularité des grains. Donc plus que le grain est irrégulier et rugueux plus l'angle de frottement interne augmente (la figure (V.14)).

V.6 - Les courbes granulométriques après l'essai

Nous avons cherché à analyser l'état des grains après les différents essais de cisaillement, une comparaison entre la courbe granulométrique avant l'essai et les courbes granulométriques de chaque échantillon après l'essai a été réalisée sur la figure (V.14) ci après :







V.6.1 - Interprétation des résultats de la granulométrie

Les courbes granulométriques obtenues après écrasement (les figures (V.14), (V.15), (V.16), (V.17)) sont étalées pour les différentes formes des grains. Elles s'écartent légèrement suivant l'ordre croissant des charges appliquées (100, 200, 300, 400 KPa) en fonction de la rugosité et de l'angularité des grains. L'écrasement obtenu est de plus en plus important.

Conclusion

On peut finalement conclure que le cheminement des perturbations, au plan de cisaillement, est influencé par le niveau du confinement, l'état de surface, la forme et la taille des grains.

Les différents résultats expérimentaux obtenus ont montré que :

- Les contraintes de cisaillement au palier sont d'autant plus grandes que la contrainte normale σ est élevée.
- Le changement de l'état de surface (augmentation de la rugosité) provoque un accroissement de la résistance au cisaillement.
- La résistance au cisaillement augmente avec la taille des grains.
- Les résultats des essais montrent un comportement du type élastoplastique.
- Les essais utilisés présentent un comportement contractant puis dilatant en passant par un état caractéristique, avec un accroissement de la dilataance d'une façon régulière quand la contrainte normale appliquée est faible confirmant ainsi le caractère dense des matériaux étudiés.
- La forme arrondie présente un comportement plus dilatant que la forme angulaire qui a un comportement contractant puis dilatant.
- plus le grain est irrégulier et rugueux plus l'angle de frottement et la résistance au cisaillement augmentent.
- Plus la contrainte normale appliquée (100, 200, 300, 400 KPa) augmente, plus la rugosité et l'angularité des grains augmentent et l'écrasement devient de plus en plus important.

Conclusion de la deuxième partie

La Mécanique des Sols étudie plus particulièrement le comportement des sols sous leurs aspects résistance et déformabilité. Les essais de cisaillement permettent de déterminer les paramètres de cisaillement du matériau et de trouver les courbes intrinsèques dans le plan de Mohr. On distingue l'essai à la boîte de cisaillement, qui est appelé aussi « essai à la boîte de Casagrande ». La boîte est constituée de deux demi-coquilles sur lesquelles on exerce perpendiculairement au plan de jonction des deux demi-coquilles, une contrainte normale constante. L'échantillon, comprimé subit une compaction. L'une des deux coquilles étant fixe, on exerce alors une pression latérale (un cisaillement croissant), tendant à faire glisser l'autre parallèlement à leur séparation. En augmentant progressivement cette contrainte, on constate que la résistance de l'échantillon croît, passe par un maximum, puis décroît jusqu'au moment où se produit la rupture. L'usage de cet essai est notamment approprié pour l'étude des glissements de terrain.

La forme des particules qui composent un sol va conditionner ses propriétés mécaniques, un sol composé des grains arrondis présentera une résistance au cisaillement et un angle de frottement faibles; à l'inverse d'un sol composé de grains très angulaires qui aura une résistance au cisaillement et un angle de frottement plus importants, plus que le grain est irrégulière et rugueux plus que l'angle de frottement et la résistance au cisaillement augmentent, plus que la charge appliquée (100, 200, 300, 400 KPa), la rugosité et l'angularité des grains augmentent, l'écrasement est de plus en plus important.

L'allure des courbes « contrainte tangentielle – déformation » évolue presque de la même manière et cela quelque soit la fraction étudiée et quelque soit la contrainte normale appliquée. Elle possède un début régulier dans un domaine assez restreint puis des alternances d'états d'équilibre et de phase de réarrangement, ce comportement est de type élastoplastique.

Lors du cisaillement, on peut observer une grande variation du volume représentée par des variations de la hauteur de l'échantillon, il se produit une contractance suivi d'une dilatance en passant par un état caractéristiques, cette dernière augmente quand la contrainte normale appliquée est faible, la dilatance affaiblit l'arrangement granulaire (par la diminution de compacité), donc c'est un facteur essentiel de la localisation. La forme arrondie ce dilate rapidement, donc on peut dire qu'elle a un comportement plus dilatant que celui de la forme angulaire qui a un comportement contractant puis dilatant. Dans le cas de la forme arrondie,

les grains glissent, par contre dans le cas des trois autres formes, les grains roulent beaucoup plus. Les pics plus ou moins marqués s'expliquent par le fait qu'un grain doit plutôt rouler que glisser. La valeur des amplitudes des pics est d'autant grande plus que le chargement normales est important.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les milieux granulaires composent notre environnement immédiat, l'existence de toute espèce passe plus ou moins directement par leur utilisation et leur compréhension. Ils présentent une variété de comportement qui les rend difficiles à classer parmi les habituels états de la matière. Car sur la quasi-totalité de la surface terrestre, les géométraux se présentent comme des collections des grains (grains d'argile, grains de sable, graviers, etc.). Ces grains peuvent être de nature (taille, forme, surface, composition, etc.) très diverse.

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondations, ouvrages de soutènement, remblais, talus, etc.), il est nécessaire de connaître la « résistance » du sol aux déformations et à la rupture. Cette « résistance » est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent, elle peut être définie par de nombreux critères : résistance à la compression simple, essai CBR, essai pénétrométrique, essai pressiométrique et l'essai triaxial. Mais, les seuls moyens d'analyse pour les chercheurs sont les courbes.

Le choix du type d'essai doit être guidé par la nature du matériau étudié et par les aspects de la loi de comportement que l'on cherche à utiliser, un « bon » essai est un essai précis, facilement reproductible et dans une certaine mesure aisé à réaliser. Le présent mode opératoire s'applique exclusivement à l'essai de cisaillement rectiligne, dit « à la boîte de Casagrande ». C'est un essai de laboratoire qui permet de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement du sol, soit l'angle de friction interne (φ) et la cohésion (c), qui sont souvent représentés par la courbe intrinsèque ou la droite de coulomb.

La forme des particules joue un rôle important dans le comportement des sols granulaires ainsi que dans la distribution granulométrique. On peut quantifier la forme des particules mais le degré de précision n'est pas justifié en géotechnique. On se contente plutôt de qualifier ses formes en termes généraux, dans le cadre d'une identification visuelle des sols grossiers, suivant les critères : arrondies, sous-arrondies, sous angulaire et angulaires. On peut distinguer aussi des méthodes récentes qui ont été employées par certains chercheurs telles que l'analyse d'image.

Dans le cinquième chapitre intitulé « *Résultats et analyse* », on pourra constater que la forme des grains a une influence prépondérante dans le comportement mécanique des matériaux.

Un sol composé de grains arrondies (et /ou diminution de la rugosité) présentera une résistance au cisaillement et un angle de frottement faible; à l'inverse d'un sol composé de grains très angulaires (et /ou augmentation de la rugosité) qui aura une résistance au cisaillement et un angle de frottement plus important. Plus la charge appliquée (100, 200, 300, 400 KPa) augmente, plus la rugosité et l'angularité des grains augmentent et l'écrasement engendré est de plus en plus important.

Lors du cisaillement, on peut observer une grande variation du volume représentée par des variations de la hauteur de l'échantillon, il se produit une contractance suivie d'une dilatance en passant par un état caractéristique. Cette dernière augmente quand la contrainte normale appliquée est faible, la dilatance affaiblit l'arrangement granulaire (par la diminution de compacité). La forme arrondie se dilate rapidement, donc on peut dire qu'elle a un comportement plus dilatant que celui de la forme angulaire qui a un comportement contractant puis dilatant. Dans le cas de la forme arrondie les grains glissent, par contre dans le cas des trois autres formes, les grains roulent beaucoup plus. Les pics ou paliers plus ou moins marqués s'expliquent par le fait qu'un grain doit plutôt rouler que glisser.

On recommande à ce que la forme des grains soit l'un des paramètres principaux, qu'il faut prendre en compte dans chaque expérience de caractérisation du sol, en raison de sa large influence sur le comportement mécanique de ce dernier.

Références bibliographiques

- **ALTKIRCH (2010)** - « La physique des milieux granulaires » Applications dans la vie quotidienne. Olympiades de Physique, Paris.
- **AL HUSEIN. M (2001)** - « Étude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques » Mémoire d'Ingénieur en Mécanique de l'Université JOSEPH FOURIER - GRENOBLEI.
- **BECQUART. F (2006)** - « Caractérisation du comportement mécanique d'un mâchefer dans la perspective d'une méthodologie de dimensionnement adaptée aux structures de chaussées » thèse de l'Ecole des Mines de Douai – 59508 Douai Cedex, France.
- **BENAISSA. A (1992)** - « Éléments de mécanique des sols » Office des publications universitaires. Alger.
- **BLASZCZYK. F (1994)** - « Etude de comportement mécanique des milieux pulvérulents en écoulement » Thèse de doctorat de l'Université de TOURS.
- **BOWMAN. E.T, SAGA. K et DRUMMOND. T.W (2000)** - «Particle Shape Characterisation using Fourier Analysis» CUED/D-Sols/TR315.
- **CHO. G-C, DODDS. J et SANTAMARINA. J.C (2006)** - « Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness and Strength -Natural and Crushed Sands- » www.fi.uba.ar.
- **COMBE. G (2001)** - « Origines du géométriques du comportement quasi- statique des assemblages granulaires denses : étude par simulation numérique » Thèse de doctorat de l'E.N.P.C.
- **CONDOTTA. R (2005)** - « Coulabilité des poudres cohésives : mesures aux faibles contraintes, granulaires humides et application a une poudre industrielle » Thèse de docteur de l'institut national polytechnique de TOULOUSE.
- **DEBOEUF. S (2005)** - « Transitions et coexistence « Solide-Liquide » Dans les matériaux granulaires » thèse de doctorat de l'institut de physique du Globe de Paris.
- **DEGOUTTE. G et ROYET. P (2005)** - « Aide-mémoire de mécanique des sols » Les publications (école nationale du génie des eaux et des forêts), Document pédagogique, Edition ENGREF – 98 p.

- **DESRUES. J (2002)** - « Limitations du choix de l'angle de frottement pour le critère de plasticité de Drucker-Prager » Laboratoire 3S (CNRS - INPG -UJF).
- **DODDS. J (2003)** - «Particle shape and stiffness - Effects on soil behavior »
Institut de la Géorgie de technologie, mémoire de maîtrise.
- **DYSLI. M (1997)** - « Géologie Appliquée à l'Ingénierie et à l'Environnement » Ecole polytechnique Département de génie civil, Laboratoire de mécanique des sols, 3^{ème} édition, Paris.
- **ESTRADA MEJIA. N (2008)** - « Etude numérique du cisaillement des géomatériaux granulaires cohésifs : relation micro-macro, microstructure, et application à la modélisation de glissements de terrain » thèse de doctorat de l'université de Montpellier II -Sciences Et Techniques Du LANGUEDOC.
- **EVESQUE. P (2000)** - « Eléments de mécanique quasi-statique des milieux granulaires mouillés ou secs » poudres & grains NS1, 60 p.
- **Fascicule D'essai (1987)** - « Essai de cisaillement à la boîte » Laboratoire central des pont et chaussées - Paris L.C.P.C – 27 p.
- **FROSSARD.E (2004)** - « Localisation de Déformations et Chaînon de Contraintes en Mécanique des Milieux Granulaires » poudres & grains NS3 , 1-119 p.
- **GABRYSIAK. F (2007)** - « Les Granulats » - Chapitre 2, 35 pages, Edition Académie de Nancy-Metz, Strasbourg GAYE, M.G. (1995). www.ac-nancy-metz.fr.
- **GUILLON. J (2001)** - « Interprétation morphologique de l'évolution du glissement-coulée de Poche et caractérisation physico-mécanique des matériaux marneux » Mémoire de maîtrise de géographie physique l'Université Louis Pasteur Faculté de géographie, Alpes-de-Haute-Provence, France.
- **HOLTZ. R et KOVACS. W, Traduit par JEANLAFLEUR (1991)** - « Introduction à la géotechnique » Edition de l'école polytechnique de Montréal.
- **LERAU. J (2006)** - « Cours de Géotechnique 1 » Institut national des sciences appliquées de TOULOUSE Département de Sciences et Technologies pour l'ingénieur.
- **LERAU. J (2006)** - « Cours de Géotechnique 2 » Institut national des sciences appliquées de TOULOUSE, Département de Sciences et Technologies pour l'ingénieur.

- **MAGNAN. J-P (1997)** - « Description, identification et classification des sols » Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, Paris, vol 1, article C 208.
- **NACER. S (2003)** - « Etude du comportement mécanique des milieux granulaires » Mémoire de Magister en Génie Civil, Université des sciences et de la technologie Houari BOUMEDIENE.
- **RAYMOND (1995)** - « Siliciclastics: Grain Shape» Introduction à Pétrologie, Université de Colombie britannique, EOSC 221.
- **REIFFSTECK. P , TACITA J-L, MESTAT. P et PILNIÈRE.F (2007)** - « La presse triaxiale pour éprouvettes cylindriques creuses du LCPC adaptée à l'étude des sols naturels », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussée n°270-271.
- **RICHARD. P (2000)** - « Etude de la géométrie de milieu granulaires modèles tridimensionnels par simulation numérique » Thèse de doctorat de Physique de l'Université de Physique et des Matériaux de Rennes 1.
- **ROBITAILLE.V, TREMBLAY.D (1997)**
« Mécanique des sols » Modulo Editeur.
- **SALLAM. A.M et ASHMAWY. A. K (2009)** - « Effect of particle shape and angularity on dilation of granular soils: a discrete element approach» 17^{ème} Conférence internationale sur le sol « Mécanique Et Technologie Géotechnique » de l'Université américaine de Dubai.
- **SANTAMARINA J.C et CHO, G.C (2004)** - «Soil Behavior: The Role of Particle Shape» Proc. Skempton conférence, March, London.
- **UTHUS. L, HOFF. I et HORVLI. I (2005)** - «Evaluation of grain shape characterization methods for unbound aggregates» 7^{ème} conférence internationale sur la portance de la route, des chemins de fer et des terrains d'aviation Trondheim, Norvège.
- **VERHASSELT. A (1984)** - « Sable-cendre volante : influence de la nature du granulat » Bulletin de l' Association Internationale de géologie de l'ingénieur N° 30, Paris.
- **VOIVRET. Ch (2008)** - « Texture et comportement des matériaux granulaires à grande polydispersité » Thèse de doctorat de l'université MONTPELLIER 2, France.

Annexe

Introduction

La résistance au cisaillement des sols constitue l'aspect le plus important de la géotechnique. La capacité portante des fondations superficielles et profondes, la stabilité des pentes, la conception des murs de soutènement et de façon indirecte, le calcul des épaisseurs des pavages, sont tous influencés par la résistance au cisaillement du sol dans la pente, derrière le mur de soutènement ou près de la fondation ou de la chaussée. On doit concevoir les structures et les pentes de façon à éviter qu'une rupture ne se produise lorsqu'elles sont soumises aux charges maximales. C'est pourquoi on utilise couramment les méthodes dites à *l'équilibre limite*, ce sont des méthodes qui exigent une connaissance de la résistance ultime ou limite du sol.

1 - Définition de la rupture du sol

La définition de la rupture dans un sol ne pose pas seulement un problème de choix de la cinématique de la rupture. Il faut également définir à quel moment se produit la rupture dans les essais qui servent à mesurer la résistance à la rupture du sol, que l'on appelle habituellement résistance au cisaillement.

1.1-Les modes de rupture

Faute de pouvoir décrire de façon précise le comportement d'un massif de sol depuis son état initial jusqu'à la rupture, la mécanique des sols s'est inspirée des modes de rupture observés dans la nature pour développer des lois de comportement simplifiées. La nature montre l'existence de deux principaux modes de rupture :

- Ø les ruptures par glissement sur une surface ;
- Ø les ruptures par plastification et écoulement d'une masse de sol.

La représentation de la résistance au cisaillement des sols par une relation entre la contrainte tangentielle τ et la contrainte normale σ correspond au premier mode de rupture.

En pratique, la rupture d'une éprouvette de sol (ou du sol autour de la sonde de mesure, dans le cas des essais en place) s'apprécie d'après les déformations du sol : on trace en cours d'essai la courbe représentant la sollicitation qui l'a produite (déviateur dans l'essai de compression à l'appareil triaxial, contrainte de cisaillement dans l'essai de cisaillement à la boîte, pression dans la sonde pressiométrique, couple appliqué au scissomètre) en fonction de la variation de la déformation du sol (déformation axiale de l'éprouvette triaxiale, déplacement de la boîte de cisaillement, expansion volumique du pressiomètre, rotation du

scissomètre). Ces courbes ont, suivant la nature et l'état du sol, l'une des deux allures représentées sur la figure (1) :

2 - La résistance au cisaillement

2.1 - Les facteurs intervenant dans la résistance au cisaillement des sables

Le sable étant un matériau « frictionnel », on pourrait s'attendre à ce que les facteurs qui interviennent dans sa résistance au frottement interne .On peut résumer ces facteurs comme suit :

1. L'indice des vides ou l'indice de densité relative ;
2. La forme des particules ;
3. La distribution granulométrique ;
4. La rugosité de la surface des particules ;
5. La présence d'eau ;
6. La contrainte principale intermédiaire ;
7. La grosseur des particules ;
8. Le degré de sur consolidation .

2.2 - Courbe effort-déformation

Les courbes « effort-déformation » [τ en fonction de ε dans les essais à la boîte ou ($\sigma_1 - \sigma_2$) en fonction de ε dans les essais triaxiaux] ont de façon générale l'allure de l'une des courbes de la figure (1).

_ Pour les sols compacts ou denses (indice des vides faible), la contrainte de cisaillement passe par un maximum, puis décroît vers une valeur sensiblement constante (courbe a). La valeur de ce maximum sert à définir la résistance au cisaillement, l'effort nécessaire pour désenchevêtrer les grains au voisinage du plan de cisaillement.

_ Pour les sols peu compacts ou lâches (indice des vides e élevé), la contrainte de cisaillement croît régulièrement jusqu'à une valeur asymptotique (courbe b). On définit alors la rupture pour une valeur conventionnelle de la déformation, ε_{\max} , en pratique inférieure à 20%.

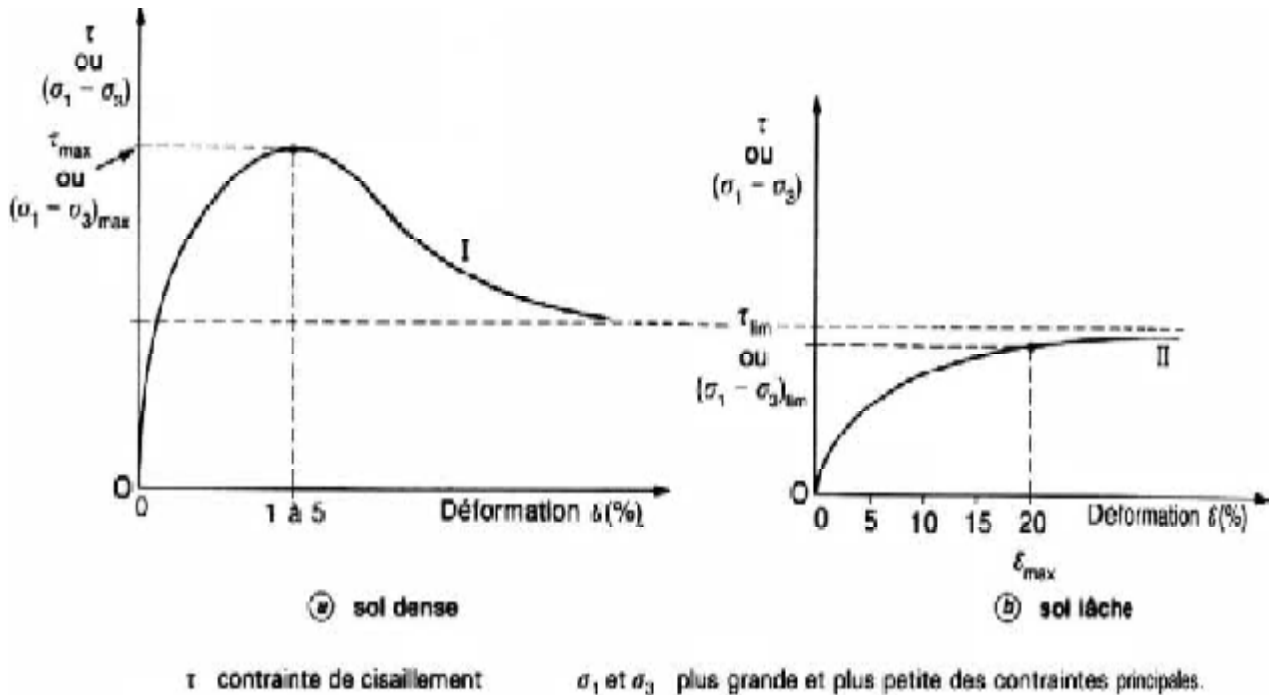


Figure (1) : Courbe « contrainte-déformation » d'un sol pulvérulent dans un essai de cisaillement.

2.3 - Courbe intrinsèque

En reproduisant l'essai pour des valeurs différentes de la contrainte normale σ ou de la contrainte latérale σ_3 , on peut déterminer la courbe intrinsèque.

2.3.1 - Représentation de Mohr

Dans la représentation de Mohr, la courbe intrinsèque est déterminée soit comme ensemble des points (τ, σ) obtenus à la boîte de cisaillement, soit comme enveloppe des cercles de Mohr à la rupture pour les essais triaxiaux.

Cette courbe est une droite passant par l'origine (figure (2)), tant pour le sol dense (I) que pour le sol lâche (II). La densité a une influence sur la pente de cette droite.

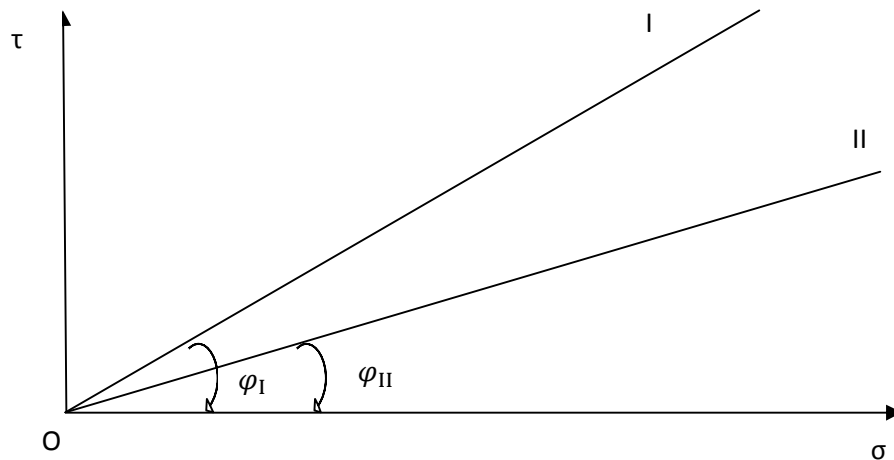


Figure (2) : Courbe intrinsèque d'un sol pulvérulent.

La relation entre τ et σ s'écrit donc simplement :

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

et la relation correspondante entre σ_1 et σ_3 s'écrit :

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

avec :

τ : résistance au cisaillement (contrainte tangentielle limite) ;

σ : contrainte normale ;

c : cohésion ;

φ : angle de frottement interne du sol ;

$\tan \varphi$: coefficient de frottement interne du sol.

Lorsque le sable est humide ou légèrement cimenté, la courbe intrinsèque ne passe plus par l'origine. L'ordonnée à l'origine est appelée *cohésion* et l'équation de la courbe intrinsèque devient :

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

La cohésion c , indépendante de la contrainte normale σ , est due :

Ø pour partie aux liaisons mécaniques pouvant exister entre les grains et créées par la cimentation ;

Ø pour partie aux ménisques d'eau existant aux points de contact entre les grains.

Cette dernière composante disparaît dès que la teneur en eau du sable augmente.

Pour les calculs dans lesquels l'état de rupture est atteint dans la masse du sol sans formation de surface de glissement, on utilise plutôt une formulation en contraintes principales, généralement exprimée en fonction des contraintes principales majeure et mineure :

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

avec : σ_1 contrainte principale majeure ;

σ_3 : contrainte principale mineure ;

c cohésion, φ angle de frottement interne.

D'autres expressions équivalentes en termes de (s, t) ou (p, q) sont également employées. Elles utilisent toutes les paramètres c et φ pour caractériser la résistance au cisaillement.

Dans certains cas, l'enveloppe des cercles de Mohr peut ne pas être une droite. On se ramène néanmoins, pour les calculs, à une droite de paramètres c et φ , en linéarisant l'enveloppe des cercles de Mohr dans l'intervalle des contraintes susceptibles d'exister dans le massif de sol étudié.

L'équation précédente peut, selon les cas, être écrite en contraintes totales ou en contraintes effectives. Le choix des paramètres correspondants est discuté dans le paragraphe suivant.

2.4 - Choix des paramètres

Dans la plupart des calculs courants, on suppose que le sol est isotrope et l'on se contente de déterminer une valeur des paramètres c et φ . En pratique, on utilise principalement, pour tous les types de sols et d'essais, l'appareil triaxial de révolution, qui garantit la maîtrise totale des conditions de drainage et n'impose pas le plan de rupture.

Pour les sols pulvérulents et les essais drainés sur les sols cohérents, on réalise aussi fréquemment des essais à la boîte de cisaillement.

Pour les études de stabilité des ouvrages sur sols cohérents mous, on utilise les essais au scissomètre de chantier, complétés par des essais triaxiaux de type CU lorsque l'on doit évaluer les variations de la cohésion non drainée en fonction de la consolidation du sol.

Les autres types d'essais ne sont pas utilisés de façon systématique. On utilise leurs résultats à titre d'information complémentaire.

Le choix du mode de représentation de la résistance au cisaillement en vue des calculs est une étape essentielle dans l'analyse du comportement des sols.

Pour les *sols pulvérulents* ou grenus à forte perméabilité (galets, graviers, sables grossiers, etc.), quelles que soient les conditions d'application de l'effort, on observe toujours un comportement drainé.

_ Pour les *sols pulvérulents*, la résistance au cisaillement est toujours analysée en contraintes effectives. La grande perméabilité de ces sols rend pratiquement instantanée la dissipation des surpressions interstitielles créées par le chargement, de sorte que l'on n'est jamais dans les conditions dites « non drainées ». La résistance au cisaillement est décrite par l'équation :

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (5)$$

avec : c' : cohésion effective ;

φ' angle de frottement interne ;

$\sigma' = \sigma - u$: contrainte normale effective, u : pression interstitielle.

Pour certains types de problèmes (par exemple, pour l'analyse du comportement des sols pulvérulents sous charges cycliques), la connaissance de la droite caractéristique est également utile.

Conclusions

La forme de la courbe de sollicitation en fonction de la déformation appliquée n'est pas spécifique d'un mode de rupture: la diminution de la contrainte ou du couple appliqué au-delà d'un pic s'observe tant pour les ruptures sur surfaces de glissement que pour les ruptures par plastification de la masse du sol. Elle est, par contre, révélatrice de l'état du sol : les sables denses présentent un pic de résistance, comme les argiles à structure intacte, tandis que les sables lâches et les argiles remaniées ont habituellement un comportement de type asymptotique.

Pour les calculs de stabilité des ouvrages en géotechnique, la résistance au cisaillement des sols est classiquement représentée par la relation suivante entre les contraintes normale et tangentielle sur la surface de rupture :

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Cette équation est celle de l'enveloppe des cercles de Mohr, dont on admet qu'elle est une droite.