n° d'ordre : **1700**

50376 1996

THESE

gan 20102056

En vue de l'obtention du grade de Docteur d'Université

Présentée à

l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Spécialité : GENIE-CIVIL

Par

KHATI Salah Ingénieur Génie-Civil

Titre

COMPORTEMENT DES MATERIAUX GRANULAIRES : ETUDE MICRO-MACRO DU FROTTEMENT ET DE LA DILATANCE

Soutenue le 15 Janvier 1996 devant la commission d'examen composée de :

J. Biarez M. P. Luong J.-C. Roth G. De Saxce I. Shahrour N.E. Abriak Président Rapporteurs

Examinateurs



La Science sans la conscience est la ruine de l'âme.

A. E.

A mes parents, A mes frères et soeurs A mon épouse

Avant-propos

Ce travail a été mené, en collaboration, au laboratoire de Mécanique des Sols & Structures de l'Ecole Centrale de Lille (L.M.L.) et au Département Génie -Civil de l'Ecole des Mines de Douai.

J'exprime ma plus vive reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je ne saurai ni trouvé les mots pour exprimer toute ma gratitude à Isam SHAHROUR, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, ni mesurer la grandeur de ces valeurs tant scientifiques qu'humaines. Merci Isam.

Nor-Edine ABRIAK, responsable du Laboratoire de Mécanique des Sols et des Matériaux Granulaires, toujours présent, dont le soutien et la confiance n'ont fait défaut et Alain De Mets, ex-chef Département, pour m'avoir reçu au sein de son équipe, je leur témoigne de ma reconnaissance.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Jean BIAREZ, Professeur à l'Ecole Centrale de Paris, d'avoir accepté de présider mon jury et pour toutes les discussions et recommandations qui ont jalonné mon travail.

Monsieur Minh Phong LUONG, Directeur de Recherche au CNRS à l'Ecole Polytechnique, et Jean-Claude ROTH, Professeur à l'Université de Metz, ont rapporté sur mon travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements pour leur remarques constructives et pour les nombreuses discussions et suggestions.

Je remercie également Géry DE SAXE, Professeur à l'Université de Lille, d'avoir accepté d'examiner et de participer au jury.

Je tiens à remercier messieurs Jean-Claude WEBER, Professeur à l'Université de Metz et Pierre EVESQUE, Directeur de Recherche au CNRS à l'Ecole Centrale de Paris, pour tout l'intérêt qu'ils portent à mon travail et le temps qu'ils m'ont consacré.

A mon épouse, je dirai simplement merci d'avoir su trouver la patience de supporter mes horaires impossibles.

Comportement des matériaux granulaires : Etudes micro-macro du frottement et de la dilatance. Granular materials behaviour : Micro and macro studies of friction and dilatancy.

RESUME

Le travail effectué constitue une contribution expérimentale à la caractérisation du comportement des matériaux formés de grains.

Lors de l'écoulement, le milieu se déforme suivant des lignes de glissements. Leur naissance est aléatoire et favorisée par la présence de défauts de structures. Notre objectif est donc d'analyser ce phénomène de localisation des déformations à l'échelle du milieu continu et à l'échelle du grain et de rendre compte du processus d'écoulement.

L'approche adoptée repose sur la définition, à la base, du frottement intergranulaire comme paramètre intrinsèque. Nous avons abordé, dans un premier temps, le processus de mobilisation du frottement à la boite de cisaillement et de l'influence de la variation du degré de liberté des grains et des conditions de charge. L'utilisation d'un matériau analogique de Schneebeli et l'adaptation d'une méthode basée sur le traitement d'images permettent d'investir le comportement à l'échelle du grain.

Dans un second temps, on aborde les écoulements du même matériau considérés comme une suite de déformations où l'on observe simultanément frottement et localisation. On montre le caractère critique de son état à l'écoulement établi en fonction des données morphométriques des particules et du frottement des parois.

ABSTRACT

This work is an experimental contribution to behaviour characterisation of grains formed material.

During the flow, surroundings get out of shape along random slide lines are favoured by structure failures. Our objective is to analyse this localization phenomenon of deformation at the grain scale and at the continuous surroundings scale to explain the flow process.

The methodology is based on the intergranular friction definition as an intrinsic parameter. First, we deal with the process of friction mobilization under direct shear conditions and the influence of mouvement dgree of grains and load conditions. The use of Schneebeli material and adapted method based on image analysis allow us to accede to the study of behaviour at the grain scale.

Then, we deal with the materials flowing. This process is considered as deformations series where one observes friction and localization simultaneously. Under control of morphometric data's of particles and partition friction, we demonstrate the critical state of the material density during flow set up.

SOMMAIRE

Introduction1

CHAPITRE I :

Etude expérimentale du frottement intergranulaire:

I.1 Introduction15
I.2 Difficultés de mesures17
I.2.1 Fluctuations des valeurs
I.2.2 Influence de l'humidité
I.2.3 Influence de l'état de surface 19
I.3 Choix d'un dispositif21
I.3.1 Introduction
I.3.2 Description du dispositif expérimental
I.3.3 Mode opératoire
1.3.4 Déroulement des essais
I.3.5 Sources d'erreurs
I.4 Matériaux
I.4.1 Choix des matériaux26
I.4.2 Caractérisation physique27
I.5 Essais réalisés
I. 6 Conclusion

CHAPITRE II :

Frottement : Analyse macroscopique

II.1 Introduction	
II.2 Essais bloc-bloc	
II.2.1 Résultats des essais	35
II.2.2 Frottement	
II.3 Essais sur sable	43
II.4 Essais sable-bloc	45

II.4.1 Résultats des essais	
II.4.2 Frottement	45
II. 5 Influence de la procédure	51
II. 6 Analyse statistique	53
II.6.1 Rproductibilité des essais	
II.6.2 Fluctuations internes (propres)	
II.6.3 Analyses des écart-types	
II.7 Conclusion	59

CHAPITRE III :

Analyse micro - macro du comportement des matériaux de Schneebeli

III. 1 Introduction	2
	~
III. 2 Frottement intergranulaire	2
111.2.1 Résultats des essais	3
111.2.2 Frottement	4
III.3 Effet structure	7
III.3.1 Dispositif expérimental6	7
III.3.2 Sources d'erreurs7	0
III.3.3 Essais réalisés7	1
III 4 Analyse globale 7	1
III 4 1 Influence du confinement	Δ
III. 4.2 Influence de la taille de l'échantillon	4
III. 5 Analyse à l'échelle du grain	6
III. 5.1 Repartition des microvides et des points de contact	7
III. 5.2 Evolution des rotations au cours du cisaillement	4
III 6 Mécanisme de cisaillement 8	7
III 6 1 Cisaillement aux points de contact:	7
III 6.2 Arrangement régulier monodisperse	2
III 6 3 Arrangement aléatoire	1
III 6.4 Relation entre 0 et 0	т 8
μ or ψ max	0
III.7 Conclusion)8

CHAPITRE IV :

Matériaux granulaires en écoulement

Sommaire

IV. 1 Introduction101
IV. 2-Dispositif expérimental
IV. 3 Analyse cinématique de l'écoulement107
IV. 4 Mode d'écoulement
IV. 5 Analyse paramétrique
IV.6 Conclusion
Conclusion générale125
Bibliographie

ANNEXES

Annexe A:

Caractéristiques morphométriques des matériaux granulaires

A.1 Caractérisation des grains	
1.1 Introduction:	
1.2. Forme des grains	
1.3 Sphéricité	144
1.4 Granulométrie	144
1.5 Angularité ou arrondi	145
1.6 Etat de surface ou texture	145
A.2- Porosité des matériaux granulaires	146
2.1 Introduction	146
2.2 Limites de porosités	148
2.3 Mesure de la porosité	148
A.3 Conclusion	150

Annexe B

Milieu continu - milieu discontinu

B.1	: Milieux	continus	s équivales	1515	2
-----	-----------	----------	-------------	------	---

1.1 Introduction 1.2 Hypothèse de continuité	152
1.3 Milieux formés de grains	154
1.4 Passage du milieu discret au milieu continu	156
1.5 Conclusion	158
B.2 : Propriétés de matériaux granulaires	159
2.1 Introduction	159
2.2 Mécanismes gouvernants les milieux granulaires	159
2.3 Phénomène de dilatance	162
2.4 Anisotropie	163
B.3 Caractérisation des Matériaux granulaires	164
3.1 Introduction	164
3.2 Caractéristiques physiques	164
3.3 Caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires	165
3.4: Influence de la morphométrie des grains sur l'angle de frottement	168
3.5 Relation contrainte-dilatance	170
B.4 Conclusion	172

Annexe C :

Matériaux granulaires ensilés

C.1 Introduction
C.2 Efforts développés à l'intérieur de enceintes de stockage
2.1 Poussée due au gonflement174
2.2 Poussée réelle
2.3 Poussée de détente176
C.3 Formation de voûtes stables
3.1 Cas des matériaux cohérent177
3.2 Cas des matériaux non cohérents 178
C.4 Types d'écoulements rencontrés
4.1 Ecoulement en masse
4.2 Ecoulement en cheminée
4.3 Ecoulement mixte
C.5 Approches développées
5.1 Approche mécanique
5.2 Approche statistique
5.3 Approche par simulation
5.4 Approches empiriques
C.6 Conclusion

Liste des figures

CHAPITRE I_____

Fig. I.1 : Détermination de l'angle de frottement intergranulaire.	16
Fig I.2: Variation du frottement en fonction du pas d'échelle (Procter & Barton, 1974)	
Fig I.3 : Influence de l'humidité sur le frottement (Horn & Deere 1962)	19
Fig. I.4 : Frottement intergranulaire du Quartz (Lambe & Whitman, 1969)	19
Fig. I.5 : Dispositif expérimental de mesure de φ_{11}	
Fig. I.6 : Plan de mesure du frottement intergranulaire (matériau de Schneebeli)	23
Fig. I.7 : Influence du balancement du chapeau sur les variations de volume	
Fig. I.8 : Effet du défaut de planimétrie sur le cisaillement bloc-bloc.	
Fig. I.9 : Observation au M.E.B. de la surface de l'échantillon de quartz	
Fig. I.10 : Courbe granulométrique des sables concassés utilisés	
Fig. I.11 : Analyse morphométrique des matériaux en grains	
Fig. I.12 : Rugosité des matériaux	
Fig. I.13 : Rugosité des matériaux bidimensionnels.	

CHAPITRE II_____

Fig. II.2 : Cisaillement bloc-bloc réalisés à différents confinements (10 à 250 kPa) : Quartz
Fig. II.3 : Cisaillement bloc-bloc réalisés à différents confinements (10 à 250 kPa) : Calcite 39 Fig. II.4 : Influence du confinement sur le glissement bloc-bloc de matériaux naturels. 40 Fig. II.5 : Effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement des matériaux testés. 41 Fig. II.6a : Variation du frottement entre surfaces planes en fonction de la dureté des matériaux (Cambou 1979). 41 Fig. II.6b : Effet de l'accroissement du chargement normal (Lambe & Withman 1969) 41 Fig. II.7: Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement. 42 Fig. II.9 : Frottement au pic en fonction du confinement. 43 Fig. II.1 : Cisaillement sable-sable à différents confinement (10 à 200 kPa). 44 Fig. II.1 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse. 46 Fig. II.1 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse. 47 Fig. II.1 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse. 47 Fig. II.13 : Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement
Fig. II.4 : Influence du confinement sur le glissement bloc-bloc de matériaux naturels. 40 Fig. II.5 : Effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement des matériaux testés. 41 Fig. II.6a : Variation du frottement entre surfaces planes en fonction de la dureté des matériaux (Cambou 1979). 41 Fig. II.6b : Effet de l'accroissement du chargement normal (Lambe & Withman 1969) 41 Fig. II.7 : Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement. 42 Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa) 44 Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement. 43 Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse 46 Fig. II.13 : Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement. 49 Fig. II.14 : Frottement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse. 47 Fig. II.15 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction du confinement. 49 Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986). 53 <t< td=""></t<>
Fig. II.5 : Effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement des matériaux testés. 41 Fig. II.6a : Variation du frottement entre surfaces planes en fonction de la dureté des matériaux (Cambou 1979). 41 Fig. II.6b : Effet de l'accroissement du chargement normal (Lambe & Withman 1969) 41 Fig. II.7 : Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement. 42 Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa) 44 Fig. II.9 : Frottement au palier en fonction du confinement. 43 Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement. 43 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse. 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse. 47 Fig. II.13 : Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement. 48 Fig. II.14 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.15 : Frottement des grains en fonction de la nugosité de surface des matériaux. 52 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986). 53 Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm²). 55
Fig. II.6a : Variation du frottement entre surfaces planes en fonction de la dureté 41 Fig. II.6b : Effet de l'accroissement du chargement normal (Lambe & Withman 1969) 41 Fig. II.7: Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement. 42 Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa) 44 Fig. II.9 : Frottement au pic en fonction du confinement. 43 Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse 47 Fig. II.13 :Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement 48 Fig. II.14 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.15 : Frottement sable-bloc en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la rugosité de surface des matériaux. 52 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986) 53 Fig. II.18 : Distribution des coefficients de variation en fonction du déplacement. 54 Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm²) 55 Fig. II.20 : Amplitudes des fluct
des matériaux (Cambou 1979).41Fig. II.6b : Effet de l'accroissement du chargement normal (Lambe & Withman 1969)41Fig. II.7: Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement.42Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa).44Fig. II.9 : Frottement au pic en fonction du confinement.43Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement.43Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse.46Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse.47Fig. II.13 :Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement .48Fig. II.14 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction de la densité relative.49Fig. II.15 : Frottement sable-bloc en fonction de la densité relative.49Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la nugosité de surface des matériaux52Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986).53Fig. II.19 : Fréquence de distribution des coefficients de variation en fonction du déplacement.54Fig. II.20 : Amplitudes des fluctuations pour les différentes surfaces en fonction du confinement.56Fig. II.21 : Amplitudes des fluctuations pour différentes rugosités en fonction du confinement.56
Fig. II.6b : Effet de l'accroissement du chargement normal (Lambe & Withman 1969) 41 Fig. II.7: Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement. 42 Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa) 44 Fig. II.9 : Frottement au pic en fonction du confinement. 43 Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement. 43 Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse 47 Fig. II.13 :Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement 48 Fig. II.14 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.15 : Frottement sable-bloc en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la rugosité de surface des matériaux. 52 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986) 53 Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm²) 55 Fig. II.20 : Amplitudes des fluctuations pour les différentes rugosités en fonction du confinement 56
Fig. II.7: Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement. 42 Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa). 44 Fig. II.9 : Frottement au pic en fonction du confinement. 43 Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement. 43 Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse. 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse. 47 Fig. II.13 : Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement
Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa)
Fig. II.9 : Frottement au pic en fonction du confinement. 43 Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement. 43 Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse. 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse. 47 Fig. II.13 :Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement
Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement. 43 Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse. 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse. 47 Fig. II.13 :Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement
Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse 46 Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse 47 Fig. II.13 :Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement
Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface rugueuse
Fig. II.13 :Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement 48 Fig. II.14 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.15 : Frottement sable-bloc en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur 52 Fig. II.18 : Distribution des coefficients de variation en fonction du déplacement. 53 Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm²). 55 Fig. II.20 : Amplitudes des fluctuations pour les différentes surfaces en fonction du confinement. 56 Fig. II.21 : Amplitudes des fluctuations pour différentes rugosités en fonction du confinement. 56
Fig. II.14 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.15 : Frottement sable-bloc en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la rugosité de surface des matériaux. 52 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur 53 Fig. II.18 : Distribution des coefficients de variation en fonction du déplacement. 54 Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm²). 55 Fig. II.20 : Amplitudes des fluctuations pour les différentes surfaces en fonction du confinement. 56 Fig. II.21 : Amplitudes des fluctuations pour différentes rugosités en fonction du confinement. 56
Fig. II.15 : Frottement sable-bloc en fonction de la densité relative. 49 Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la rugosité de surface des matériaux. 52 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986). 53 Fig. II.18 : Distribution des coefficients de variation en fonction du déplacement. 54 Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm²). 55 Fig. II.20 : Amplitudes des fluctuations pour les différentes surfaces en fonction du confinement. 56 Fig. II.21 : Amplitudes des fluctuations pour différentes rugosités en fonction du confinement. 56
 Fig. II.16 : Déplacement des grains en fonction de la rugosité de surface des matériaux
 Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986)
le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986)
Fig. II.18 : Distribution des coefficients de variation en fonction du déplacement
Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm ²)
Fig. II.20 : Amplitudes des fluctuations pour les différentes surfaces en fonction du confinement
Fig. II.21 : Amplitudes des fluctuations pour différentes rugosités en fonction du confinement
Fig. II.22 : Amplitude des fluctuations à différentes rugosités en fonction du confinement
Fig. II.23 : Corrélation du frottement et des amplitudes moyennes des fluctuations
Fig. II.24 : Variation des écart-type en fonction de la contrainte normale

CHAPITRE III

Fig. III.1 : Essais de cisaillement des matériaux analogiques de Schneebeli	65
Fig. III.2 : Effet du confinement sur le frottement de glissement des matériaux bidimensionnels	
Fig. III.3 : Variation du frottement en fonction de l'élasticité des matériaux	66
Fig. III.4: Dispositif expérimental	67
Fig. III.5 : Organisation des différentes taches et opérations sur traitement d'images	69
Fig. III.6 : Comparaison des résultats en fonction des dimensions des boîtes.	72
Fig. III.7 : Essais de cisaillement des matériaux bidimensionnels	72
Fig. III.8: Déplacements des grains au cours du cisaillement.	73

Fig. III.9 : Coefficient de variation en fonction du déplacement des essais	
pour différents confinements.	75
Fig. III.10 : Coefficient de variation en fonction du déplacement relatif	75
Fig. III.11 : Essai de cisaillement à contrainte normale constante.	77
Fig. III.12 : Distribution des micro-vides au cours du déplacement	79-80
Fig. III.13 : Distribution du nombre de points de contact par particule	
Fig. III.14 (a, b & c) : Evolution du nombre de coordinance et de l'indice des vides	
Fig. III.14d : Variation du nombre total des vides en fonction du déplacement	
Fig. III.15 : Evolution des rotations au cours du cisaillement	85
Fig. III.16a : Essais de cisaillement à deux diamètres	
Fig. III.16b : Distribution des rotations des essais à deux diamètres	
Fig. III.17: Influence du frottement et de la sphéricité sur le nombre de points roulants	
Fig. III.18 : Cisaillement dans les matériaux granulaires	87
Fig. III.19 : Cisaillement de matériaux bidimensionnels à 0 degré de liberté (diamètre 4 mm)	90
Fig. III.20 (a &b) : Cisaillement de matériaux bidimensionnels à 1 degré de liberté	92
Fig. III.20 c : Rotations des particules au cours du cisaillement (1 degré de liberté)	93
Fig. III.21 : Cisaillement de matériaux bidimensionnels à 2 degré de liberté	94
Fig. III.22: Roulement des particules en fonction de la sphéricité	97
Fig. III.23: Relation entre φ_{ii} et φ_{max} .	97
Fig. III.24 : Répartition du frottement mobilisé en fonction de l'évolution de la structure	97

-

CHAPITRE IV_____

Fig. IV.1a : Dispositif expérimental : Dispositif global	103
Fig. IV.1b : Dispositif expérimental : Dispositif modulaire	104
Fig. IV.2 : Trajectoires des particules au cours de l'écoulement	110
Fig. IV.3 : Profils des vitesses au cours de l'écoulement	110
Fig. IV.4 : Plans de discontinuité des vitesses horizontales	111
Fig. IV.5 : Répartition des principales zones d'écoulement	112
Fig. IV.6 : Mode d'écoulement dans un essai à fond plat	113
Fig. IV.7 : Débit en fonction du rapport diamètre du grain ouverture	115
Fig. IV.8 : Débit en fonction du frottement paroi-matériau	116
Fig. IV.9 : Variation de l'indice des vides en fonction de l'ouverture et du diamètre des particules	117
Fig. IV.10 : Variation de l'indice des vides en fonction du frottement des parois.	119
Fig. IV.11 : Indice des vides en fonction de l'inclinaison de la trémie (d = 3 mm)	119
Fig. IV.12 : Variations locales de l'indice des vides en fonction du frottement des parois	121
Fig. IV.13 : Variation de l'indice des vides (Brown & Richard 1970)	121

ANNEXE A_____

Fig. A.1 : Approche par projection du matériau granulaire (Harr 1981)	.143
Fig. A.2 : Variation de la forme des grains (Harr 1981)	.143
Fig. A.3 : Mesure de la sphéricité des matériaux granulaires	. 144
Fig. A.4 : Mesure de l'angularité	.145
Fig. A.5 :Etat limite de compacité d'un matériau granulaire fonction de Cu et de la	
forme des grains (Biarez & al 1989)	.149

ANNEXE B_____

Fig. B.1 : Contrainte dans un matériau	153
Fig. B.2 : Répartition des forces dans un matériau formé de grains	154
Fig. B.3 : Distribution des forces en fonction de la profondeur	156
Fig. B.4 : La statistique des contraintes fonction de la longueur de continuité	157
Fig. B.5 : Contact de deux particules de forme quelconque	159
Fig. B.6 : Contact de Hertz	160
Fig. B.7 : Glissement au point de contact : Théorie de Mindlin	161
Fig. B.8 : Arrangements limites des matériaux granulaires monodisperses	162
Fig. B.9 : Cisaillement dans les matériaux granulaires	165
Fig. B.10 : Condition de rupture de Mohr-Coulomb	166
Fig. B.11 : Frottement glissant et cisaillement plan d'un matériau de coulomb	167
Fig. B.12 : Influence du confinement sur l'indice des vides critique	167

Fig. B.13 : Influence de la distribution granulaire sur l'angle de frottement	
Fig. B.14 : Répartition du frottement dans un sable artificiel (Kirkpatrick 1965)	
Fig. B.15 : Influence du pourcentage de billes de verre concassées et de la sphéricité	
sur l'angle de frottement interne	
Fig. B.16 : Influence de la dimension et du pourcentage d'angulaire sur l'angle de	
talus naturel (Azimi 1976)	

ANNEXE C

Fig. C.1 : Formation de voûtes stables liée à la nature compressible du matériau (Luong 1989)	175
Fig. C. 2 : Poussée réelle des matériaux confinés	175
Fig. C. 3 : Variation des pressions en fonction de l'ouverture de la trappe (Szechy 1970)	179
Fig. C. 4 : Limite de stabilité des voûtes en fonction du frottement	179
Fig. C.5 : Approches d'analyses du comportement des matériaux granulaires ensilés	181

Liste des Tableaux

Tab. I.1: Influence des conditions d'essais sur l'angle de frottement	20
Tab. I.2 : Influence de la polarité de la solution saturante (Horn & Deere 1962)	20
Tab. I.3 : Minéralogie des matériaux utilisés.	27
Tab. I.4 : Rugosité des matériaux bidimensionnels.	30
Tab. 1.5 : Caractéristiques des sables utilisés	32

Tab. II.1 : Frottement moyen des essais bloc-bloc en fonction de la dimension des surfaces.	
Tab. II.2 : Données des essais sable-bloc et sable-sable présentés -(Silice et Calcite)	
Tab. II.3 : Données des essais sable-bloc et sable-sable présentés (Quartz)	
Tab. II.4 : Comparaison des angles de frottement moyens en fonction de la procédure	

Liste des photos

Photo III.1, 2 & 3: Sélection et extraction des vides et des rotations par traitement d'images Photo III.4 : Définition du contour des objets en fonction des conditions aux limites			
Photo IV.1 : Plan de visualisation de l'écoulement Photo IV.2 : Couches limites dans les matériaux granulaires	105		
Photo IV.3 : Zones de rupture et formation des lignes de glissement	108		

Introduction générale

La part des matériaux en grains ou en poudres produits par les industries chimiques, pharmaceutiques et agro-alimentaires n'a cessé d'augmenter au cours des dernières années. Les problèmes liés aux installations de stockage, de dosage et de transport de ces matériaux (silo, trémies, transporteuses à vis ou à bande, transport pneumatique,...) représentent un enjeu majeur pour les industriels aujourd'hui.

Depuis que l'homme a cherché à emmagasiner des produits en vrac, les charges qu'exerce la matière ensilée a fait l'objet de nombreux travaux . La recherche incessante d'une qualité de production meilleure associée à une bonne rentabilité incite les industriels à concevoir ces matériels d'une façon harmonieuse et optimale. Par ailleurs, les règlements et les normes développés depuis quelques dizaines d'années favorisent l'aspect "structure" du dimensionnement où les installations doivent être calculées pour résister aux charges exercées, au dépend de l'aspect fonctionnel et de coulabilité. Ce dernier aspect s'est avéré essentiel et a mis en évidence l'importance et la complexité du comportement rhéologique des matériaux granulaires.

Les problèmes rencontrés sont liés à leur diversité et à la difficulté de caractériser leur comportement qui demeurent mal connus en dépit des nombreuses recherches entreprises pour les définir, particulièrement le cas des matériaux en écoulement. Cette difficulté est liée, entre autre, aux caractéristiques des grains et à l'état sous lequel ils se présentent qui peut varier d'un point à un autre au sein du même matériau. Ils ne sont ni un solide car ils coulent facilement et ne résistent pas à la traction, ni un liquide, vue l'existence d'un talus naturel au repos. La complexité de leur comportement peut être en partie attribuée à deux phénomènes : (i)- Le désordre d'empilement que présente les matériaux granulaires, qui peut être le foyer et à la source du déclenchement d'un processus de localisation de déformations (Dantu 1957, de Josselin de Joung & al 1972, Ammi 1987,...); (ii)- La présence, d'un point de vue local, d'un comportement non-linéaire lié au contact élastique entre grains ou au frottement intergranulaire (Mindlin 1951 & 1953, Biarez 1962, Barton & al 1974, Hardin 1978, Luong 1989).

Les techniques d'homogénéisation, utilisées particulièrement dans l'approche par analyse numérique de tels matériaux, font appel à la description à une échelle suffisamment grande (continue) pour considérer un comportement équivalent homogène moyen où les fluctuations tendent à s'annuler. Cette continuité est définie à une échelle où le grain perd sa singularité et devient un élément très petit devant les échelles de longueurs caractéristiques du dispositif considéré (Annexe B.1). Le traitement statistique, qui considère le plus souvent des grandeurs physiques qui sont les moyennes spatiales sur le volume représentatif attachées à chaque point du milieu continu équivalent, peut induire des contradictions quant à la définition de la taille *minimum* du domaine représentatif (Huet 1980). Certaines fonctions sont définies tant que leur domaine de définition tend vers zéro.

Le développement numérique a donné naissance à de nouvelles approches basées sur le contact des particules où l'échelle de mesure est définie au niveau du grain. Ce point de vue a pris de l'essor, tandis que les méthodes expérimentales de détermination des paramètres à l'échelle du grain se cherchent encore. Par ailleurs, l'essentiel de ces approches est développé dans le but d'unifier le comportement mécanique régi par les forces de frottement aux points de contact et les propriétés géométriques des matériaux formés de grains (Biarez 1962, Rowe 1962, 1969 & 1971, Horne 1965 & 1969, Cundall & al 1979, Faugeras 1979, Chang & al 1990 & 1992, Cambou 1980, 1985a & 1995, Bathurst 1985, Harr 1981, etc...). L'action est mise sur la dualité existante entre le micro et le macro comportement.

La principale difficulté réside dans la définition des paramètres d'état. La recherche d'une méthode d'analyse pour les définir, simultanément à l'échelle continue et locale, semble être nécessaire.

Le travail effectué constitue une contribution expérimentale à la caractérisation du comportement des matériaux formés de grains. Il est répartis en 4 chapitres

Dans le premier, nous avons abordé le problème de contact entre particules. L'approche expérimentale adoptée repose sur la définition, à la base, du frottement intergranulaire comme paramètre intrinsèque. Les difficultés de détermination de valeurs représentatives ont été abordées. L'accent est mis sur la nécessité de définir un mode opératoire standard. Nous avons défini les différents paramètres et les caractéristiques des matériaux testés.

Le second chapitre est consacré aux résultats des essais obtenus en fonction de la nature des matériaux, de la liberté de mouvement des grains, des dimensions des échantillons et des conditions de charge.

12

Le troisième chapitre est consacré à la méthode et aux résultats obtenus à l'échelle microscopique (échelle du grain). Les lois de comportement, à l'échelle macroscopique, font intervenir des variables phénoménologiques (tenseur de contrainte et de déformation, variables liées à l'état interne du milieu,...). Le comportement à l'échelle du grain est dominé par l'interaction des particules représentée par les forces de contact et leur déplacements.

L'utilisation d'un matériau analogique bidimensionnel et l'adaptation d'une méthode basée sur le traitement d'images permettent d'investir le comportement à l'échelle du grain. Les résultats obtenus sont présentés en fonction des dimensions des échantillons et des paramètres de charge. Un paragraphe est consacré aux mécanismes de cisaillement sur un matériau monodisperse en fonction de la liberté de mouvement des particules.

Le 4ème chapitre aborde les écoulements des matériaux granulaires considérés comme une suite de déformation où l'on observe simultanément frottement et localisation. L'adaptation de mesure de la densité par traitement d'image nous permet d'examiner le caractère critique de l'état du matériau à l'écoulement établi, en fonction de la forme et de la dimension des grains et du frottement des parois.

Les annexes reprennent les données et les définitions des différents paramètres utilisés. Ainsi, l'annexe A englobe les différents paramètres liés aux grains et à la caractérisation de la structure. L'annexe B résume en trois paragraphes les données "micro." et "macro." du comportement, les propriétés et les caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux granulaires. Et enfin, l'annexe C reprend des données liées à l'écoulement des matériaux granulaires. CHAPITRE I :

Etude expérimentale du frottement intergranulaire:

Nous présentons, dans ce chapitre, les principaux paramètres qui peuvent avoir une influence sur le frottement intergranulaire. Par la suite, nous présentons le dispositif expérimental choisi pour son investigation, le mode opératoire utilisé et les caractéristiques des matériaux testés.

I.1 Introduction:

La détermination expérimentale du frottement intergranulaire ($\varphi\mu$) est délicate et présente des difficultés vue la rugosité des surfaces des particules et la nature des contacts interparticulaires qui se font sur des surfaces très petites, voire ponctuelles. Aussi, plusieurs méthodes et techniques ont été proposées pour la mesure de cet angle.

Nascimento (1977) mesure la force de glissement entre deux grains à l'aide d'un goniomètre (figure I.1.1). Penman (1953) et Procter & al (1974) utilisent un système analogue à la boîte de cisaillement pour faire glisser deux blocs (ou deux grains) de même matériau (figure I.1.2 et I.1.3 respectivement). Habib (1974) mesure l'effort nécessaire pour tirer une particule de forme sphérique soumise à un chargement N à l'aide du dispositif montré dans la figure I.1.4. Tschebotarioff & Welch (1948) remplacent la partie supérieure de la boîte de cisaillement par un bloc poli du même matériau à tester (figure I.1.5), par contre Rowe (1962) et Skinner (1969) remplacent la partie inférieure par un bloc du matériau à tester et la partie supérieure est composée de particules de ce même matériau (figure I.1.6). Rowe (1969) puis Procter (1974) ont montré que la détermination de l'angle de frottement à l'aide de l'essai triaxial donne un angle φ_f compris entre l'angle de frottement intergranulaire φ_u et l'angle de frottement à l'état critique φ_{cv} .

Le frottement intergranulaire peut être défini de deux façons : D'un coté au sens défini par Rowe (1962, 1971) Skinner (1969), Tschebotarioff & Welch (1948) qui met en jeu l'effet des caractères pétrographiques ou morphométriques des grains (Annexe A) sur leurs propriétés mécaniques. Les conséquences sur les caractéristiques de l'assemblage constitué par ces grains restent une question ouverte.

D'un autre coté, au sens défini par les autres auteurs (Horn & Deere 1962, Penman 1953, Procter & Barton 1974,...) qui considèrent le glissement sans effet lié à l'interaction des grains et de l'état de leur surface. Se pose alors la question de l'échelle de mesure et de la validité des résultats obtenus.





Fig. I.1 : Détermination de l'angle de frottement intergranulaire

I.2 Difficultés de mesures

I.2.1 Fluctuations des valeurs:

L'angle de frottement est sensible aux conditions de déroulement de l'essai. La préparation des surfaces est une phase importante. La présence de fluides ou le traitement chimique du matériau peuvent avoir un effet lubrifiant ou antilubrifiant.

De Jageer (1991) note que le frottement intergranulaire est sensible aux variations des conditions atmosphériques. Les valeurs obtenues pour le quartz, à l'état sec semblent être faibles (Horn et Deere 1962). La grande dispersion entre les valeurs est due non seulement au procédé utilisé (grain-grain, grain-bloc, etc...) mais aussi à l'échelle de mesure, à la nature de la surface et du produit d'entretien utilisé (tableau I.1). Les essais de Horn & Deere (1962) ont été réalisés en considérant le glissement de surfaces singulières de grains sur une plaque très lisse de même nature. Nous n'avons pas de précisions quant à la marge d'erreur des mesures réalisées comme celle donnée par Nascimento (1977) sur les mesures à l'échelle du grain au goniomètre. Welch & *al* (1948) utilisent du CaCl₂ pour sécher le matériau avant essai et obtiennent un angle de frottement de 6° sur le quartz pour un angle de 24° dans le cas saturé. Rowe (1962) montre une variation de l'angle mesuré en fonction de la granulométrie. Cette variation est-elle due au frottement propre du matériau ou à l'interaction (enchevêtrement) des grains?

Le procédé de détermination de l'angle joue un rôle dans la dispersion des valeurs (tableau I.1). Si le frottement intergranulaire est défini comme un paramètre intrinsèque (propre au matériau) lié aux glissements de deux matériaux de même nature, l'interaction des grains complique les données du problème par l'influence qu'il peut avoir sur la réponse du matériau. Chaque type d'essai développé pour la mesure du frottement intergranulaire met en jeu de nouveaux paramètres dont l'importance peut cacher l'effet induit par le frottement propre du matériau. La difficulté de détermination du frottement intergranulaire est liée à la mise en évidence de chaque paramètre et à la séparation de leur interaction. Les essais réalisés par Procter & Barton (1974) montrent la prédominance de la micro-topologie. Les mesures ponctuelles (à l'échelle du grain) de l'angle de frottement au point de contact ne semblent pas être représentatives, compte tenu de leur grande variation. Ainsi leur choix s'est porté sur une méthode de dépouillement pouvant fournir une valeur moyenne représentative à partir d'un ensemble de mesures micrométriques aux points de contact (fig. I.2) :

$$F_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (F_1)_i$$
 et $F_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (F_3)_i$ (1.1)

$$\varphi_{\mu} = \beta - a \tan\left(\frac{F_1}{F_3}\right) \text{ avec } \beta = a \tan\left(\frac{\Delta X}{\Delta Y}\right)$$

$$\Delta Y = y_n - y_1 \text{ et } \Delta X = x_n - x_1$$
(1.2)

Ceci revient à considérer une échelle plus grande où les fluctuations autour de la valeur moyenne deviennent petites et statistiquement admissibles.



Fig 1.2 (a & b) : Variation du frottement en fonction du pas d'échelle (Procter & Barton, 1974)

I.2.2 Influence de l'humidité:

Les études antérieures ont montré le rôle anti-lubrifiant de l'eau sur le quartz qui est un cristal à structure tridimensionnelle (Penman 1953, Schebotarioff & Welch 1948). Ce même liquide de saturation peut être un lubrifiant pour les minéraux à feuillets à structure bidimensionnelle. La figure I.3 (Horn & Deere 1962) représente les variations du frottement en fonction de l'humidité sur une surface très lisse. On remarque une différence dans le comportement des matériaux avec l'augmentation de l'humidité. Ainsi, le frottement enregistré dans le cas du quartz (*structure tridimensionnelle*) croît avec l'humidité. Par contre, dans le cas de la Muscovite (*structure en feuillets*), la saturation joue un rôle inverse et crée une chute du frottement. L'effet anti-lubrifiant de l'eau semble dépendre de la structure cristallographique du matériau (Horn & Deere 1962).



Fig I.3 : Influence de l'humidité sur le frottement (Horn & Deere 1962).

La dispersion des valeurs obtenues dépend aussi de la polarité des solutions utilisées (tab. I.2).

I.2.3 Influence de l'état de surface:

La figure I.4 (Lambe & Whitman 1969) résume l'influence des conditions de surface (état de surface, rugosité) et d'humidité sur le frottement granulaire du quartz, dans le cas des très faibles rugosités. Le frottement intergranulaire (φ_{μ}) dépend du procédé de préparation de la surface (fig. I.4) (Mitchell 1993). L'utilisation de produits chimiques, pour le traitement des surfaces lisses, peuvent créer des liaisons intermoléculaires et générer une augmentation du frottement (Harr 1981). L'angle de frottement intergranulaire dans le cas du quartz tend vers une valeur constante ($\varphi_{\mu} \cong 26^{\circ}$) avec la rugosité. Il est à signaler que la surface du quartz est rugueuse de nature.



(Condition de cisaillement: ■: submergé, □: air)
Fig. I.4: Frottement intergranulaire du Quartz :
(Lambe & Whitman, 1969)

Minéral	Conditions	Procédée	φμ *	Références
	de l'essai			
Quartz	sec	Goniomètre	16±10,2	Nascimento
				(1977)
Quartz hyalin	sec	bloc-bloc	6	Horn & Deere
	saturé	surface très lisse	23	(1962)
		(2)*		
Quartz laiteux	sec		9	
	saturé	"	27	н
Quartz rose	sec	·	7,5	
	saturé	"	24	"
Quartz	anylamine		31	
transparent	Carbone-tetrachloride	11	11	"
Quartz	sec	bloc-bloc	11	Penman
	saturé	(2)*	33	(1953)
		Particules sur	silt 30	Rowe
Quartz	Saturé	surface polie	fin 28	(1971)
		(6)*	sable moyen 25	
			gros. 23	
Quartz	Sec	II	15°-20°	de Jageer (1991)
Quartz	Saturé	Particule-	26	Procter & Barton
·····		particule (3)*		(1974)
Quartz	sec (CaCl ₂)	bloc-particules	6	Tschebotarioff &
	Humide à saturé	cimentées (5)*	24,5	Welch (1948)

(* voir figure 1.1)

Tab. I.1: Influence des conditions d'essais sur l'angle de frottement

Frottement	Produit	Quartz hyalin	Quartz rose	Muscovite	Phlogosite
	Eau	22,8	24,2	12,4	8,5
	Ethylène				
Polarisant	glycol	30	28,4	17,2	13,5
	Amyalamine	31,5	-	-	9,6
	Carbone			20,3	14
	tetrachloride	11,3	14,6		
	Décahydro-				
Non polarisant	naphthalène	11,3	-	19,8	13,5
	sec	6,5	7,5	22,3	17,2

Tab. I.2 : Influence de la polarité de la solution saturante (Horn & Deere 1962)

I.3 Choix d'un dispositif de mesure

I.3.1 Introduction

Nous sommes confrontés, pour la détermination expérimentale de l'angle de frottement intergranulaire (φ_{μ}) à l'absence d'une procédure standard. Le premier examen a montré l'importance de la dispersion des résultats recensés. La divergence des procédés et leur multiplication, l'influence des différents paramètres (humidité, surface, nature, etc...) rendent leur interprétation difficile. Les mesures à l'échelle du grain nécessitent un matériel de précision et une méthode permettant de nous affranchir de l'effet de la micro-topologie. La méthode utilisant la boîte de Casagrande est la plus répandue (Horne 1965, Skinner 1969, Lambe & Whitman 1969, De Jaeger 1991). Elle permet l'utilisation d'un matériel et d'un mode opératoire existant (référence au cisaillement direct). L'analyse des différentes données recensées, la disponibilité du matériel et la facilité d'exécution nous ont conduis au choix de ce mode opératoire. Des procédures sont définies suivant le degré de liberté des grains. L'influence des paramètres extérieurs tels que l'humidité, la température et la solution saturante ne sera pas abordée expérimentalement. On tiendra compte de la surface, de la nature et de la rugosité du matériau en fonction du libre mouvement des grains.

I.3.2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental retenu est représenté dans la figure I.5. Il est composé de:

- i- Une boîte de Casagrande munie d'une ouverture en Plexiglas permettant de visualiser les mouvements des grains au cours du cisaillement;
- ii- Deux capteurs de déplacement LVDT pour les variations du volume. Leur disposition, symétriques par rapport à l'axe de transmission de la charge, permet de mesurer l'inclinaison du chapeau au cours du cisaillement.
- iii- Un capteur LVDT pour la mesure du déplacement relatif horizontal.
- iv- Un capteur de force à jauge pour la mesure des efforts de cisaillement (tangentiels).
- v- Un système d'acquisition automatisé piloté par micro-ordinateur. Il permet l'enregistrement de 20 points à la minute, en moyenne. Les essais ont été réalisés à une vitesse de 0,4 mm/mn.



1, 2 et 3: capteurs de déplacements, 4: capteur de force, 5 et 6: système d'acquisition automatique. fig I.5: Dispositif expérimental de mesure du frottement intergranulaire (ϕ_{μ})

Les capteurs sont connectés à un voltmètre alimenté en 10 V, permettant ainsi leur réglage et leur contrôle journalier.

Le dispositif expérimental ne présente pas de rigidité parfaite, vue le raccordement par une liaison simple (des déformations horizontales peuvent avoir lieu dans le sens du déplacement sans contact avec le capteur de force) de la boîte de cisaillement au capteur de force.

I.3.3 Mode opératoire

Les essais sont réalisés à la boîte de cisaillement de Casagrande. Le mode opératoire est celui défini par le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (1987).

On définit trois procédures liées aux mouvements des grains au niveau du plan de cisaillement ou de glissement. Chaque procédure correspond à un type d'essai, à savoir bloc-bloc, sable-bloc et sable-sable.

Dans le premier cas (bloc-bloc), la structure de l'échantillon est rigide (pas de mouvements relatifs entre les grains). Il permet le contact et le frottement entre les éléments composants le matériau par glissement des deux blocs. Dans le cas du matériau analogique de Schneebeli (bidimensionnel) (Schneebeli 1956), les essais sont réalisés sur des rouleaux de même diamètre, disposés longitudinalement dans le sens du cisaillement (figure I.6). Ils sont considérés comme des blocs en contact ne pouvant subir qu'un mouvement de translation suivant leur longueur. Le cisaillement s'effectue par glissement sous forme de deux blocs (Biarez 1962).

Chapitre I : Etude expérimentale du frottement intergranulaire



fig 1.6 : Plan de mesure du frottement intergranulaire (matériau de Schneebeli)

Dans le cas sable-bloc, la partie inférieure est constituée d'un bloc intact et la partie supérieure de grains (sable) de même nature (Rowe 1962). Au cours du cisaillement, les grains de la partie supérieure sont soumis à des mouvements de translation et de rotation au contact de la surface du bloc constituant un plan de cisaillement prépondérant. Et enfin, le cas sable-sable qui représente les essais classiques de cisaillement direct où le plan de cisaillement est localisé dans la zone de séparation des deux demi-boîtes.

- Préparation des échantillons:

Les échantillons en blocs sont découpés directement dans la roche aux dimensions de la boîte de cisaillement. Ils sont lavés et étuvés à 105 °C pendant 24 heures puis laissés à l'air libre pendant la durée des essais. Ce procédé permet d'éviter la contamination de la surface de cisaillement par collage ou cimentation des grains. (ciment, plâtre, etc...). Le bloc de la partie supérieure a une dimension longitudinale inférieure de la longueur relative du déplacement total par rapport à la partie inférieure.

Par la suite, les surfaces sont polies au carbure de silicium à deux niveaux différents. Le choix a été fait d'une façon à obtenir une surface suffisamment rugueuse ayant des variations de volume relativement faibles et une surface lisse, sans induire un frottement parasite créé par réduction de la distance entre molécules (Harr, 1981). La rugosité des surfaces qui est une notion relative est présentée par la grosseur du grain équivalent. Ainsi, la surface lisse correspond à une grosseur de grain de 12,5 μ m de diamètre et la surface rugueuse à une grosseur de 180 μ m (qui correspondent respectivement à une granulométrie de 1200 et de 80 dans les normes DIN 69176).

On notera que le diamètre inférieur des sables utilisés est compris entre les deux limites de rugosité définies.

I.3.4 Déroulement des essais

La mise en place des échantillons est effectuée d'une façon systématique pour les différentes procédures définies. Les blocs de la partie inférieure sont placés directement dans la cellule de cisaillement. Les blocs de petites surfaces de la partie supérieure sont calés dans une cellule modulable pour éviter le balancement de l'échantillon. La mise en place de la partie en sable se fait par déversement à l'entonnoir puis tassement à l'aide d'une spatule. La mise en marche de la machine se fait après application de la charge normale correspondant au confinement souhaité. La hauteur de l'échantillon est lue directement sur le réglé collé à la spatule par rapport à la hauteur de la boîte.

Le capteur de force subit un contrôle externe avant le début des essais et réglé manuellement à une valeur initiale constante et identique d'un essai à un autre. La mise à zéro des capteurs de déplacements se fait d'une façon automatique.

L'acquisition est mise en marche au même temps que le cisaillement. Son arrêt survient automatiquement à la valeur limite du déplacement introduite au préalable.

I.3.5 Sources d'erreurs:

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

- (i)- Contact entre les deux demi-boîtes: L'essai est effectué en introduisant un espace entre les deux parties de la boîte. Cet espace, d'environ 1 mm, est introduit pour empêcher le frottement parasite provenant du contact entre les deux parties de la boîte. Mais, cette espace peut faciliter la perte du matériau en grain au cours de l'essai, qui peut introduire des variations de la contrainte normale (Oyenuga 1989).
- *(ii)- Perte de matériau*: Pour éviter le débordement du matériau, les essais sont arrêtés à un déplacement inférieur ou égal à 6 mm.
- (*iii*)- Rotation du chapeau de la boîte: Ces rotations sont estimées à travers les mesures des 2 capteurs de déplacement placés par rapport à l'axe de symétrie du point de transmission de la charge normale (fig. I.7). La rotation du chapeau est plus importante dans le cas du cisaillement sable-sable pour des confinements élevés. Le déplacement considéré est la moyenne des deux capteurs.

Chapitre I : Etude expérimentale du frottement intergranulaire



Fig. I.7 : Influence du balancement du chapeau sur les variations de volume

- *(iv)- Répartition de la densité sur la surface de contact:* Pour éviter une distribution non homogène des grains à la surface de contact de l'échantillon, le remplissage se fait par déversement continu à l'entonnoir.
- (v)- Défauts de planimétrie des surfaces des blocs : La surface des échantillons est préparée à l'aide d'une tête diamantée. Cependant des erreurs de planimétrie peuvent subsister. Leur influence sur le comportement des matériaux reste négligeable (fig. I.8).



Fig. I.8 : Effet du défaut de planimétrie sur le cisaillement bloc-bloc.

Les erreurs des capteurs de déplacement et de force, alimentés par une tension de 10 V (volts) sont de $1\mu m$ pour une course totale de 10 mm et 0,5 N (Newton) pour une charge totale de 500 daN respectivement.

I.4 Matériaux

I.4.1 Choix des matériaux:

Les matériaux utilisés sont séparés en deux catégories:

- Matériaux dit "naturels":

La catégorie des "matériaux naturels" regroupe les matériaux tels qu'ils se présentent dans la nature. Ils sont soit cohérents (on les appellera "bloc") ou réduit en grains (on les nommera "sable"). Leur minéralogie (tableau I.3) a été déterminée par analyse semiquantitative par fluorescence et diffraction aux rayons-X et au microscope électronique (M.E.B. et M.E.T.). Les échantillons sont désignés par le nom du composant majoritaire de la roche étudiée. On traitera trois échantillons :

- (i)- Silice: Cet échantillon est essentiellement composé de Silice "amorphe" de type opale CT. Cassé, il donne lieu à des éclats de roche acérés et fins. La cimentation est de même nature que la majorité des éléments qui compose le matériau. Sa dureté est équivalente à 7 sur l'échelle de Mohs.
- (ii)- Quartz: Issue du grès des Vosges, cet échantillon est formé en majorité de grains de quartz faiblement cimentés entre eux, donnant lieu à une porosité relativement grande. Cassé, le matériau est réduit à des grains de quartz intacts de différentes tailles. Sa dureté est de 7.



Fig. I.9 : Observation au M.E.B. de la surface de l'échantillon de quartz .

(iii)- Calcaire: Il est formé globalement de calcite (microsparite) (91%). Cassé, il donne lieu à des grains de forme ovoïde et allongée. Sa dureté est équivalente à 3 (plus facile à rayer que la silice et le quartz).

Echantillon	CO3Ca (%)	SiO2 (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fer (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)
Calcite	91	5	0,7	2,7	0,2	-
Silice	-	77	2	5	1	12
Quartz	-	80	10	2	7	1

Tab. 1.3 : Minéralogie des matériaux utilisés.

- Matériaux analogiques bidimensionnels:

Cette catégorie regroupe les matériaux bidimensionnels formés d'un seul composant ayant subit un traitement et moulés sous la forme de rouleaux cylindriques. Nous disposons de rouleaux de P.V.C. (2 lots) et de laiton de différents diamètres disponible au Laboratoire, de duralumin et de bois de l'Ecole Centrale de Paris.

I.4.2 Caractérisation physique

-Courbe de granulométrie

Les sables utilisés sont obtenus par concassage et tamisât des échantillons en blocs. Les courbes de granulométrie (figure I.10) obtenues par mélange des différentes fractions sont très proches pour les trois matériaux. Le choix de l'uniformité du sable a été motivé par le besoin d'assurer un *maximum* de contact avec la surface dans le cas des essais sablebloc.

-Paramètres morphométriques:

Les caractéristiques morphométriques ont été déterminées suivant les définitions données dans l'annexe C. La méthode employée est fonction du paramètre recherché:

(i)- Angularité, sphéricité: Une caméra CCD équipée d'un zoom reliée au microordinateur permet la saisie automatique des images. Le traitement se fait par extraction des contours des grains à l'aide du traitement d'images (fig. I.11) et par détermination des diamètres circonscrits et des "micro-diamètres" formés par les arrêtes des grains.



fig I.10 : Courbes granulométriques des sables concassés utilisés



Fig.I.11 : Analyse morphométrique des matériaux en grains

Des erreurs peuvent se produire dans la mesure de l'Angularité, dues à l'appréciation de l'opérateur. La détermination du nombre des microdiamètres n'est pas automatique. Cette opération est répétée, en moyenne, sur 20 grains de différentes tailles.

Les résultats obtenus (tab. I.5) montrent des grains de quartz plus arrondis et plus anguleux. Les grains de Silice sont plus allongés avec des arrêtes plus vives, contrairement aux grains de Calcite (allongés et arrêtes arrondies) (fig. I.11).

Au touché, le quartz est plus rugueux et la silice plus lisse. L'examen à la loupe de la surface confirme les résultats obtenus au touché et au traitement d'image.

(ii)- Rugosité: La rugosité de surface des matériaux est estimée par un palpeur muni d'une tête de 5 μ m de rayon pouvant détecter des irrégularités fines (de 2 ± 1μ m) (fig. 11). La vitesse de palpage est de (0,5 mm/s). L'appareil ne permet que la détection suivant une coupe de profil sur une section partielle de la surface allant jusqu'à 40 mm. Il est nécessaire de réaliser plusieurs mesures pour chaque surface afin de vérifier l'homogénéité de la répartition de la rugosité. La mesure de la rugosité est ainsi une mesure par échantillonnage.



Fig.I.12 : Rugosité des matériaux

Les paramètres utilisés sont définis par:

- Profondeur moyenne de rugosité R_z (fig. I.12): Elle correspond à la moyenne des profondeurs isolées de rugosités relevées sur 5 longueurs élémentaires "Le" consécutives, tels que $R_z = \sum_{i=1}^{5} Z_i/5$. Elle donne une indication sur la fracturation verticale moyenne (Sander 1992). Elle est la caractéristique

principale de l'état de surface.

 Profondeur maximale de rugosité R_{max} : Elle correspond à la plus grande des valeurs isolées (Zi) relevées sur les 5 longueurs de base consécutives "Le"

La rugosité des matériaux "naturels" a été imposée par polissage des surfaces. Elle est rapportée en fonction de la dimension du diamètre équivalent du grain. Des mesures de contrôle au rugosimètre ont été effectuées pour constater sa répartition et son homogénéité pour les différents échantillons. Les valeurs moyennes de R_z retrouvées pour les échantillons de silice et de calcite sont de $38,5 \ \mu m$ et $2,6 \ \mu m$ pour les surfaces rugueuses et lisses respectivement. Nous n'avons pas pu aller au bout de la mesure pour les échantillons de quartz, vue l'existence d'une forte porosité. Contrairement aux matériaux "naturels", les matériaux bidimensionnels n'ont subit aucun traitement de surface. Les résultats obtenus (voir tab. I.4) représentent l'état de surface intact qui est semblable dans le sens longitudinal du glissement pour les matériaux testés, à l'exception du bois où nous avons enregistré un léger écart, particulièrement dans le sens transversal. Nous présentons dans la figure I.13 une partie des profils obtenus sur les matériaux bidimensionnels des profils obtenus sur les matériaux bidimensionnels dans le sens longitudinal et transversal respectivement.

Rugosité	Bo	ois	P.V.C	.1&2	Dura	lumin	Lai	ton
(µm)	R _z	R _{max}	Rz	R _{max}	Rz	R _{max}	Rz	R _{max}
Longitudinal	3,62	5,35	2,32	3,06	1,15	1,83	1,085	1,256
Transversal	12,47	19,4	3,24	4,45	3,02	4,76	0,82	1,13

Tab. I.4 : Rugosité des matériaux bidimensionnels.





Fig. I.13 : Rugosité des matériaux bidimensionnels.

- Compacité :

La densité sèche des matériaux est mesurée sur des échantillons étuvé à 105 °C pendant 24 heures par immersion dans du mercure. Les indices des vides extrêmes (e_{min} et e_{max} respectivement) sont déterminés sous conditions ambiantes dans un moule cylindrique de 51,4 mm de diamètre et 63,4 mm de hauteur. La taille du plus gros grains est inférieure à 2,5 mm (voir figure I.10).

Malgré leur différence de nature, les grains de quartz et de calcite présentent des paramètres morphométriques (sphéricité, Angularité) peu différents, ce qui leur confèrent des caractéristiques de mise en place voisines $[I_e (quartz) \cong I_e (calcite)]$ (tab. I.5). L'augmentation de l'écart entre les indices des vides limites des échantillons de silice peut être justifiée par la diminution de la sphéricité. La présence d'une forte angularité associée à une faible sphéricité peut procurer plus de stabilité entre les grains empilés, ce qui nécessiterai un effort relatif plus

Matériau	Quartz	Calcite	Silice
Densité sèche (γ_s)	2,32	2,55	2,27
$Cu = d_{60}/d_{10}$	3,88	3,82	3,89
d ₅₀ (mm)	0,548	0,568	0,470
e _{max}	0,7545	0,789	1,0933
e _{min}	0,4357	0,483	0,6839
$Ie = e_{max} - e_{min}$	0,3188	0,306	0,4094
Sphéricité (ψ_{2R})	0,901	0,809	0,777
Angularité (C)	0,152	0,254	0,343
Dureté (Mohs/e10)	≈ 7	≈ 3	≈ 7

important lors du cisaillement pour les échantillons de silice (Biarez & al 1989a, De Jaeger 1991).

Tab. 1.5 : Caractéristiques des sables utilisés

I.5 Essais réalisés

Le mode opératoire utilisé pour la détermination du frottement intergranulaire permet d'examiner et de comparer différentes procédures définies en fonction de la liberté de mouvement des grains. Il présente un aspect pratique lié à l'essai de cisaillement à la boîte.

Par ailleurs, le choix des matériaux s'est fait en fonction de leur nature et des données morphométriques ou pétrographiques obtenues après concassage.

Afin de mieux comprendre les mécanismes de mobilisation du frottement et l'influence sur ce dernier des principaux paramètres, nous avons mené une campagne d'essais sur les matériaux dits "naturels" et "bidimensionnels".

Pour chaque matériau, nous avons étudié l'influence de : (i) niveau de confinement, (ii) la dimension de l'échantillon, (iii) la nature de l'état de surface et de la procédure. Les essais sont réalisés à des confinements relativement faibles pour minimiser la cassure des grains (Wilkins 1970, Cambou 1979).

I.6 Conclusion

Le mode opératoire défini permet de rendre compte du comportement des matériaux en fonction des différentes procédures. L'utilisation de matériaux en bloc nous affranchis, dans un premier temps des erreurs liées à la contamination des surfaces et permet de rendre compte des effets de la rugosité des surfaces. Les échantillons de quartz et de silice présentent une même nature minéralogique mais des données morphométriques différentes, la calcite, par contre, est de nature différente.

L'utilisation du matériau de Schneebeli permet de rendre compte du même comportement à une échelle plus petite en tenant compte des mêmes paramètres.

Les résultats obtenus sont séparés, en fonction de l'échelle d'analyse, en deux parties représentant les deux chapitres qui vont suivre respectivement.

CHAPITRE II :

Frottement - Analyse macroscopique

Nous présentons, dans ce chapitre les différents résultats obtenus sur les essais à la boite de cisaillement. Ils sont repartis en fonction des procédures, de la nature des surfaces de cisaillement et des paramètres de charge.

Le dernier paragraphe est consacré à l'étude statistique des fluctuations enregistrées.

II.1 Introduction

L'angle de frottement intergranulaire représente un caractère intrinsèque lié à un mécanisme simple, basé essentiellement sur le contact glissant de deux parties du même matériau. Nous avons montré, dans le chapitre précédent, la difficulté d'interpréter les données expérimentales existantes et la non existence d'un consensus quant à la définition même du frottement intergranulaire.

L'utilisation d'un même mode opératoire et la comparaison de différentes procédures permet de mieux comprendre la réponse des matériaux et les mécanismes mis en jeu, à travers la combinaison de l'influence des différents paramètres.

II.2 Essais bloc-bloc (b-b)

Les résultats des essais des trois matériaux testés à des rugosités et à des dimensions de surface différentes sont présentés dans les figures (II.1, II.2 & II.3). Ils sont soumis à plusieurs confinements (10 à 250 kPa) et chaque essai a été répété plusieurs fois.

II.2.1 Résultats des essais:

Nous avons noté, dans ce cas, une légère différence dans le comportement de cisaillement en fonction de la nature de la surface du matériau (fig. II.1, II.2 & II.3). Ainsi, à faible rugosité, le comportement des différents matériaux (silice, calcite et quartz) est du type élastique parfaitement plastique. Cependant, on note un léger accroissement de la résistance de la calcite vers la fin des essais. Cet accroissement se manifeste indépendamment du confinement et des variations de volumes qui sont dues, en majorité, au défaut de planimétrie. Sa variation relativement faible n'a pas d'effet visible sur la réponse des matériaux. Le changement de l'état de surface (augmentation de la rugosité) provoque un accroissement de la résistance au cisaillement avec la formation d'un pic dans le cas de la silice. Ce pic est plus important dans le cas des faibles confinements (fig. II.1b). La comparaison des résultats des essais de la calcite, pour les surfaces rugueuses, présente des dispersions indépendante de la contrainte normale. L'examen des surfaces après la fin de chaque essai a montré la présence d'une fine
pellicule du matériau pour les confinement élevés (fig. II.3b). Elle est, vraisemblablement, induite par l'usure des épontes due à la faible dureté de la calcite (3 sur l'échelle de Mohs qui en compte 10) (Lee *et al* 1967). Les essais réalisés sur le quartz dont la surface est composée de nombreuses aspérités ont donné des résultats similaires pour les deux niveaux de rugosité considérés (fig. II.2). Les échantillons sont constitués de grains cimentés avec la présence d'une forte porosité (environ 38 %) qui favorise l'imbrication des grains. Les variations de volumes restent très faibles.

II.2.2 Frottement:

Pour des raisons d'homogénéité et pour faciliter la comparaison des résultats obtenus, nous avons considéré la résistance moyenne au palier pour représenter le frottement intergranulaire des matériaux testés. Cette considération est facilitée par une réponse globalement élastique-parfaitement plastique des matériaux. De plus, la valeur du frottement établi (au cours de déformation) semble être plus représentative de la nature du matériau, évitant ainsi les blocages dus à la topologie de la surface.

-Influence du confinement

Les figures (II.4a, b & c) résument les variations de l'angle de frottement bloc-bloc des trois matériaux testés en fonction de la contrainte normale. Dans le cas de la surface lisse, les valeurs du frottement sont indépendantes de cette contrainte. La modification de l'état de surface (rugosité $R = 180 \ \mu m$) induit un comportement différent et fonction de la nature du matériau. Ainsi, si les valeurs du frottement de la calcite restent peu sensibles, celles de la silice et du quartz sont plus grandes pour les très faibles confinements. Ces matériaux présentent les mêmes caractéristiques topologiques initiales de la surface, à la différence de leur nature structurale et de leur dureté.



Fig. II.1 : Cisaillement bloc-bloc réalisés à différents confinements (10 à 250 kPa) : Silice.

a : $R = 12,5 \ \mu m$ (Surface = 32,12 cm²) b : $R = 180 \ \mu m$ (Surface = 32,12 cm²) c : $R = 12,5 \ \mu m$ (Surface = 8,85 cm²)



Fig. II.2 : Cisaillement bloc-bloc à différents confinements (10 à 250 kPa) : Quartz

a : Surface = 31,27 cm² b : Surface = 20,54 cm² c : Surface = 9,20 cm²



Fig. II.3 : Cisaillement bloc-bloc à différents confinements (10 à 250 kPa) Calcite

a : R = 12,5 μm b : R = 180 μm



- Influence de la rugosité

La figure II.5 représente l'évolution de la contrainte de cisaillement moyenne en fonction de la contrainte normale. La modification de l'état de surface induit un comportement différent en fonction de la nature des matériaux. Ainsi, les échantillons de silice à surfaces lisses présentent un comportement du type Coulomb passant par l'origine. L'augmentation de la rugosité produit une cohésion apparente et une importante augmentation du frottement avec la réduction de la contrainte normale. Les valeurs moyennes des pentes des droites joignant les différents points sont regroupées dans le tableau II.1. Le frottement enregistré dans le cas de la calcite croît modérément avec la rugosité ($\approx 5^{\circ}$). La dispersion des résultats, de même nature que dans le cas de la surface lisse, est indépendante du confinement. Cette différence de comportement à surface rugueuse des deux matériaux est due probablement à leur duretés respectives qui laissent apparaître des épontes plus vives dans le cas de la silice et plus arrondies dans le cas de la calcite. L'usure des épontes, dans le cas des matériaux à dureté faible et malgré les contraintes normales relativement peu élevées, peut être à l'origine des dispersions, ainsi que des variations (accroissement) du frottement au palier (fig; II.6b). Pour un même état de surface, Cambou (1979) a montré que le frottement entre deux surfaces planes pour différentes contraintes normales est une fonction décroissante de la dureté des matériaux (fig. II.6a). Dans notre cas, cette caractéristique est vérifiée pour un état de surface lisse mais ne semble pas être vraie pour un état de surface rugueux qui fait intervenir, en plus de la nature du matériau, un nouveau paramètre lié à la géométrie de cette surface et à la résistance à la rupture des aspérités imbriquées les unes dans les autres.



Fig. II.5 : Effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement des matériaux testés.





Fig. II.6a : Variation du frottement entre surfaces planes en fonction de la dureté des matériaux (Cambou 1979).

Fig. II.6b : Effet de l'accroissement du chargement normal (Lambe & Withman 1969)

- Influence de la dimension de la surface des blocs

Des surfaces de différentes dimensions ont été découpées et testées à différents confinements pour un même état de surface. Pour le quartz, nous avons testés des échantillons avec des surfaces $S=31,27 \text{ cm}^2$, $S=20,54 \text{ cm}^2$ et $S=9,20 \text{ cm}^2$. Pour la silice, les surfaces sont de $S=31,12 \text{ cm}^2$, $S=16,70 \text{ cm}^2$ et $8,85 \text{ cm}^2$. Le comportement des surfaces moyennes est du même type que celui des grandes surfaces traité précédemment. Par contre, les petites surfaces présentent un accroissement linéaire de la résistance en fonction du déplacement (fig. II.1 & II.2).

Nous avons porté sur les figures II.7 les valeurs du frottement des différentes surfaces utilisées en fonction de la contrainte normale. Les valeurs moyennes au palier ne montrent pas de différence avec la variation de la surface. Elles restent indépendantes du confinement, contrairement à l'écart à la moyenne qui montre des fluctuations plus importantes avec la réduction de la surface de glissement ainsi que de la contrainte normale imposée. Les résultats des valeurs moyennes en fonction des sections sont présentés dans le tableau II.1.



Fig. II.7: Variation du frottement en fonction de la dimension de la surface et du confinement.

Matériaux									
	Quartz			Silice					
Surface	(φμ) ^{bb}	Ecart-type	Surface	(φμ) ^{bb}	Ecart-type				
(cm ²)	(°)	(°)	(cm ²)	(°)	(°)				
31,27	24,75	1,2	32,12	22,91	0,95				
20,54	26,06	0,7	16,70	23,35	1,2				
9,20	23,95	1,3	8,85	24,13	0,9				

Tableau II.1 : Frottement moyen des essais bloc-bloc en fonction de la dimension des surfaces.

II.3 Essais sable-sable

Les essais de cisaillement réalisés à la boite de Casagrande sur les sables obtenus par concassage sont présentés sur les figures II.8. Le tableau I.5 rappelle leurs principales caractéristiques et les données liées aux grains. Dans l'ensemble, les essais de sables utilisés présentent un comportement dilatant, particulièrement dans le cas des échantillons de silice. La forme et l'angularité des grains auguraient un tel comportement. Nous rappelons que la mise en place des échantillons est identique pour tous les essais. Le comportement reste relativement sensible à la densité relative. Les angles de frottement au pic enregistrés pour les différents matériaux augmentent pour les très faibles confinements et présentent une légère différence en fonction de leur nature et des données de formes (fig. II.9). Les petites valeurs sont obtenues pour les essais de quartz, malgré la forte rugosité de surface des grains mais associée à une sphéricité importante ($\psi_2 = 0.901$). L'angle déterminé au palier quand les variations de volume sont nulles montre une indépendance vis à vis de la contrainte normale (fig. II.10). Cependant, des dispersions sont enregistrées, particulièrement dans le cas du quartz à très faible confinement où l'on a enregistré des valeurs semblables à celles obtenues pour la silice. Une chute nette des valeurs se manifestent dès le confinement de 50 kPa. Il est vrai que l'appareil de cisaillement direct n'est pas réellement adapté aux mesures en grandes déformations (Oyenuga 1989 et Negussey & al 1988), malgré la qualité des résultats obtenus, mais cela ne suffit pas pour justifier cette différence qui se manifeste de la même façon pour les valeurs au pic. Les échantillons de quartz et de silice, composés en majorité par un même minéral, présentent des comportements différents au pic et au palier avec l'augmentation de confinement. La réponse à cette différence est à chercher dans l'influence du facteur de forme. Le matériau le plus anguleux associé à une forte sphéricité ne présente pas le plus grand frottement.







Fig. II.10 : Frottement au palier en fonction du confinement



¢

Fig. II.8 : Essai de cisaillement sable-sable à différents confinements (10 à 200 kPa)

a : Silice

- b : Quartz
- c : Calcite

II.4 Essais sable-bloc (s-b)

De même que dans le cas des essais bloc-bloc, les essais sable-bloc sont réalisés à différents confinements (10 à 200 kPa) et répétés plusieurs fois. Les résultats sont présentés dans les figures (II.11 & II.12). Nous avons examiné, particulièrement, l'influence des différents états de surface, du confinement et de la densité de mise en place.

II.4.1 Résultats des essais

Les résultats en contrainte-déplacement de la silice et de la calcite, portés dans les figures (II.11 & II.12) en fonction de l'état de surface, montrent un comportement sans pic et avec une augmentation linéaire de la résistance en fonction du déplacement. L'état de surface n'a pratiquement pas d'influence sur leur réponse globale, à l'exception de trois essais obtenus à très faible confinement et à faibles densités relatives. Les essais de quartz présentent un comportement du type sable dense avec des pics plus importants aux très faibles confinements (fig. II.12c). La résistance de cisaillement au palier reste stable. Les variations de volume manifestent un comportement plus dilatant dans le cas des surfaces rugueuses. Cette variation reste relativement faible. L'épaisseur moyenne des échantillons est de 15 mm. La variation de hauteur *maximum* enregistrée ne dépasse pas 2,5%.

II. 4.2 Frottement

Effet du confinement

Les résultats des variations du frottement moyen au palier en fonction de la contrainte normale sont présentés dans la figure II.13. Les trois matériaux montrent un comportement différent en fonction du confinement et indépendant de la rugosité de surface. La résistance au cisaillement de la silice et du quartz augmente aux très faibles confinements, par contre les valeurs de la calcite restent insensibles. L'analyse des écarts à la moyenne montre, à l'exception du cas du quartz où ils varient en fonction du confinement, un comportement différent du frottement moyen, indépendant du confinement et de l'état de surface.



b

Fig. II.11 : Cisaillement sable-bloc à différents confinement (10 à 200 kPa) : Surface lisse

a : Silice b : Calcite



с

Fig. II.12 : Cisaillement sable-bloc à différents confinements (10 à 200 kPa): Surface rugueuse

a : Silice b : Calcite c : Quartz



(•: $R = 12,8 \ \mu m$, Δ : $R = 180 \ \mu m$)

Fig. II.13 : Frottement moyen et écart-type des essais bloc-sable en fonction du confinement

a : Silice b : Quartz c : Calcite

- Influence de la densité relative

Nous avons présenté dans les figures II.14 & II.15 les variations du frottement en fonction de la densité relative. Les données des essais traités sont regroupées dans les tableaux (II.2 & II.3). Pour les surfaces lisses de la calcite, on note que le frottement varie linéairement en fonction de la densité. L'augmentation de la rugosité de surface efface cet effet et le frottement devient indépendant de la densité relative de mise en place. Le frottement de la silice et du quartz restent insensibles à la densité pour les différentes rugosités. Le frottement *maximum* sable-bloc déterminé au pic présentent des valeurs supérieures au frottement du sable au palier, particulièrement dans le cas des surfaces rugueuses.



Fig. II.14 : Frottement sable-bloc de la calcite en fonction de la densité relative.

a : R = 12,5 μ m b : R = 180 μ m



a b

Fig. II.15 : Frottement sable-bloc en fonction de la densité relative.

a : Silice

b : Quartz

	Cisaillement sable-bloc						Calcite		
	Surface lisse			Surface rugueuse			sable		
Contrainte normale (kPa)	I _D (%)	φ ^{sb} _{max} (°)	* φ ^{sb} _μ (°)	I _D (%)	φ ^{sb} max (°)	* \$\phi^{sb}_{\mu}(^{\mu})\$	I _D (%)	φ _{max} (°)	φ _{pp} (°)
11,11	32.03	30,26	28,96	37.67	28,53	27.94	45.89	54,64	
11,11	82.35	33,38	30,98	81.24	42,62	30.61	42.94	55,18	
25	53,48	29,56	27,27	46,07	32,38	30,77	58,19	48,03	36,12
25	26,26	27,19	26,56	52,04	28,33	26,52	67,28	50,26	
25	32,24	27,09	25,5	71,69	27,57	26,43	-	_	
25	75,24	32,29	29,73	-	-	-	-	_	
50	28,09	27,62	26,44	65,33	29,71	29,15	48,54	41,63	35,38
50	33,66	30,34	29,34	73,13	33,06	31,27	43,87	42,49	
75	60,25	28,90	27,6	18,33	39,56	30,39	51,18	37,98	32
75	75,10	30,54	28,84	86,37	30,51	27,43	49,23	39,87	
100	49,08	31,94	30,28	30,91	36,24	34,52	58,73	36,93	
100	59,56	32,60	30,75	82,02	32,25	29,93	30,37	37,68	
150	42,51	30,12	27,67	54,28	32,74	30,72	39,41	38,31	36,0
150	47,74	31,88	29,66	65,56	33,02	31,17	67,55	40,79	36,8
200	53,43	31,09	29,46	25,44	31,40	29,52	53,25	38,48	35,0
200	-	-	-	43,93	32,87	30,85	62,33	38,30	35,11

	Cisaillement sable-bloc					Silice			
	Surface lisse		Surface rugueuse			sable			
ontrainte normale (kPa)	I _D (%)	φ ^{sb} _{max} (°)	* ^{sb} µ(4 _D (%)	φ ^{sb} _{max} (°)	* ^{sb} µ(Ъ (%) _{тг}	x(°)	$\phi_{pp}(^{\circ})$
11,11	25,23	36,93	36,16	62,39	37,48	35,34	54,93	49,09	
11,11	46,56	36,04	34,13	57,28	36,98	35,08	66,47	51,25	42,12
25	80,5	32,88	31,40	48,74	32,32	30,74	55,74	46,99	40,65
25	20,9	34,14	31,58	49,71	31,83	29,51	-	-	
50	62,25	30,66	28,70	58,54	30,72	28,56	71,76	46,33	40,07
50	49,76	30,96	29,02	-	-	-	-	-	
75	47,67	29,83	27,62	47,76	32,27	30,0	88,42	44,70	37,95
75	62,16	31,55	29,17	62,92	29,50	27,97	-	-	
100	55,87	31,84	29,82	63,57	30,36	27,94	76,19	44,47	39,69
100	66,99	30,96	29,68	78,56	30,33	28,29	-	-	
150	63,71	31,66	29,63	76,46	31,66	30,15	85,7	40,85	37,23
150	86,23	31,94	29,29	-	-	-	-	-	
200	68,16	31,64	29,77	61,69	30,95	28,5	84,17	39,01	37,5
200	54,28	31,92	30,01	-	-	-	-	-	

* Angle de frottement moyen au palier

Tab. II.2 : Données des essais sable-bloc et sable-sable présentés

a : Calcite

b : Silice

Quartz	Cisaillement sable-bloc				Cisaillement sable			
Contrainte normale (kPa)	I _D (%)	e ₀ (-)	φ ^{sb} _{max} (°)	* φ ^{sb} μ (°)	I _D (%)	e₀(-)	φ _{max} (°)	φ _{pp} (°)
11,11	53,05	0,585	39,98	28,07	56,43	0,574	48,42	40,69
11,11	37,78	0,634	39,09	28,97	53,44	0,584	48,50	40,69
25	55,35	0,578	32,55	26,67	66,85	0,541	43,22	36,12
25	62,19	0,556	32,75	27,87	51,95	0,588	47,110	36,27
50	28,07	0,665	28,90	25,69	41,69	0,621	41,317	33,82
50	59,76	0,564	30,30	26,22	53,46	0,584	45,630	40,69
75	50,21	0,594	28,33	25,91	51,16	0,591	36,589	31,38
75	57,6	0,571	29,44	26,87	59,52	0,564	39,549	32,22
100	20,55	0,688	27,55	26,31	42,83	0,618	32,330	30,11
100	41,78	0,621	27,74	26,41	60,43	0,561	36,516	32,2
150	28,06	0,667	27,15	26,80	51,31	0,591	36,441	31,79
150	88,84	0,471	28,37	27,83	62,66	0,554	36,495	31,38
200	43	0,617	26,76	26,16	41,2	0,623	34,592	30,45
200	87,07	0,477	27,12	27,06	55,03	0,579	34,991	30,96

* Angle de frottement moyen au palier

Tab. II.3 : Données des essais sable-bloc et sable-sable présentés (Quartz)

II. 5 Influence de la procédure

Les essais de cisaillement réalisés sous des contraintes normales variables montrent des différences de comportement en fonction de la procédure. Dans le cas du cisaillement blocbloc, le comportement des matériaux s'est avéré sensible à l'augmentation de la rugosité de surface mais reste relativement insensible au confinement. La nature des matériaux et leur dureté influent sur leur résistance au cisaillement. Le changement du bloc de la partie supérieure par du sable du même matériau montre une résistance au cisaillement globalement indépendante de l'état de surface. La présentation du matériau sous forme de grains (sable) fait intervenir de nouveaux paramètres liés aux données morphométriques (rugosité des grains, angularité, sphéricité,...) et à la géométrie de l'assemblage. Ces données ont une influence directe sur les possibilités de ruptures locales des grains, de glissement et de roulement (grains-bloc et grain-grain) (fig. II.16). La comparaison du frottement sable bloc de la calcite et de la silice ne montre pas de différences significatives entre les valeurs moyennes, malgré la différence intrinsèque de la nature des matériaux (tab. II.4). La considération d'un tel frottement nous laisse supposer des matériaux de même nature, or ce n'est pas le cas. La rugosité de surface, dans le cas bloc-bloc fait intervenir une composante supplémentaire liée à l'imbrication des épontes sur la surface de glissement.

La comparaison aux essais à l'interface (sable-acier) montre une légère différence dans le comportement. Les résultats des essais à l'interface réalisé, sur l'appareil de torsion, par Yoshimi et al (1981) montrent que l'augmentation de la rugosité de la plaque induit un accroissement de la résistance au frottement plus important aux faibles rugosités. Cette augmentation est marquée par un point d'inflexion à partir duquel on observe un adoucissement des variations des valeurs du frottement. Ce même résultat a été observé sur des essais de cisaillement simple par Uesugi et al (1986) qui définissent une rugosité critique à partir de laquelle les variations du frottement tendent à se stabiliser (fig. II.17). Ils notent aussi que la contrainte normale et l'étalement de la granulométrie n'ont pas d'influences significatives sur les valeurs du frottement. Cette stabilité des valeurs du frottement peut être liée à la formation d'une couche de grains bloqués entre les "dents" formées par la rugosité de la plaque, donnant lieu à un cisaillement du type bloc-sable d'un même matériau. A partir de ce moment, l'interaction matériau-acier n'a plus lieu et le frottement devient peu différent du comportement observé sur les essais sable-bloc. La figure II.17 montre que, pour des valeurs supérieures à la rugosité critique, le frottement est variable en fonction du matériau. Les trois sables sont majoritairement constitués de quartz (même nature) pour un état de compacité peu variable $(0,134 < I_e < 0,152 \text{ et } I_e = 0,056 \text{ pour les billes de verres})$. La différence des valeurs du frottement à la rugosité critique est liée à la variation des données morphométriques des grains.

Frottement									
Procédures	Bloc-bloc (b-b) Sable-bloc (s-b) Sable								
Etat de	Lisse	Rugueux	Lisse	Rugueux	φ _{max}	φ _{pp}			
Surface	(12,5 µm)	(180 µm)	(12,5 µm)	(180 µm)					
Calcite	$26,1 \pm 1,5$	$30,2 \pm 1,9$	28,6 ± 1,2	$29,5 \pm 1,5$	$42,9 \pm 6,4$	35,2 ± 1,5			
Silice	22,9 ± 0,9	33,6 ± 3,3	30,5 ± 1,5	$29,7 \pm 1,5$	$46,2 \pm 4,1$	39,3 ± 1,8			
Ouartz	24,7 ±	: 1,2	27,3 ±	± 1,2	$40,1 \pm 5,5$	$32,8 \pm 3,2$			

Tab. II.4 : Comparaison des angles de frottement moyens en fonction de la procédure.









Plaque d'acier à rugosité variable

Modèle utilisé en cisaillement simple

Fig. II.17 : Effet de la rugosité de l'acier et de la nature des matériaux sur le coefficient de frottement à l'interface (Uesugi & Kishida 1986).

II. 6 Analyse statistique

Les essais bloc-bloc (b-b) et sable-bloc (s-b), réalisés sur la boite de Casagrande, sont traités en considérant une valeur moyenne du frottement. Les variations des grandeurs mesurées donnent lieu, d'une part, à des dispersions entre les valeurs obtenues sur différents échantillons de même nature et d'autre part à des fluctuations des résultats obtenus sur le même échantillon (Evesque & *al* 1993).

La reproductibilité des essais est examinée en considérant le coefficient de variation en fonction du déplacement de l'ensemble des essais de même nature, en fonction de la rugosité, de la nature et de la dimension des surfaces. Par la suite, nous avons examiné les fluctuations propres de chaque essai en considérant les fréquences de distribution des écarts par rapport à sa valeur moyenne. Ces fréquences sont déterminées en fonction de la nature des matériaux, de la rugosité et de la dimension de leur surface pour les différents confinements.

II. 6.1 Reproductibilité des essais:

Les résultats des fluctuations des essais sont présentés dans la figure II.18. Nous rappelons que les essais sont pilotés en déplacement à une vitesse constante de 0,4 mm/mn.

Les matériaux testés présentent la même tendance moyenne d'évolution du coefficient de variation en fonction du déplacement. On remarque une très grande dispersion des résultats, au début de l'essai, particulièrement dans le cas de la calcite. La réduction de la surface de glissement induit une amplification des fluctuations du coefficient de variation, tout en gardant des valeurs moyennes voisines. La réduction de la surface de cisaillement n'a pas une grande influence sur la valeur moyenne du frottement. Les essais effectués sur le quartz (fig. II.18c) présentent des valeurs moyennes des écarts allant de 5,56 % à 7,38 % pour les grandes et petites surfaces et de 6,79 % à 7,29 % pour les grandes et petites surfaces des essais de silice respectivement (fig. II.18d).

Par contre, l'augmentation de la rugosité réduit l'amplitude de ces fluctuations, particulièrement dans le cas de la calcite (fig. II.18b), mais présente une plus grande dispersion entre les essais.



Fig. II.18 : Distribution du coefficient de variation en fonction du déplacementa : Nature des matériauxb : Rugosité (Calcite)c : Surface (Silice)d : Surface (Quartz)

II. 6.2 Fluctuations propres (internes):

La figure II.19 montre la fréquence de distribution des amplitudes des fluctuations représentées par les écarts par rapport à la valeur moyenne de chaque essai. Les fluctuations sont examinées à travers l'évolution de leurs amplitudes moyennes déterminée pour chaque essai par : $[\Sigma (f, |\tau - \langle \tau \rangle | \sigma)]$, où f représente la fréquence de distribution des fluctuations.



Fig. II.19 : Fréquence de distribution des écarts (quartz, essai bloc-bloc, S= 20,54 cm²).

Les résultats des variations des amplitudes moyennes en fonction du confinement sont présentés sur les figures (II.20, II.21 & II.22).

Les valeurs des amplitudes obtenues sur les essais bloc-bloc sont indépendantes ou diminuent avec l'augmentation de la contrainte normale. La réduction de la surface de glissement, à l'exception de la surface moyenne du quartz (20,54 cm²) où les variations sont qualitativement différentes (fig. II.20a), ne modifie pas l'amplitude des fluctuations. La modification de l'état de surface des blocs dans le cas de la silice produit une augmentation des amplitudes indépendamment du confinement. Cette augmentation peut être attribuée à la dilatance que peut induire la rugosité de surface. Les essais de la calcite, par contre, montrent de grandes dispersions d'un essai à un autre indépendamment du confinement.

Dans le cas du cisaillement sable-bloc, le même phénomène d'accroissement des fluctuations en fonction du confinement a été observé pour les deux états de surface, à l'exception des deux points correspondant à une charge normale de 12,8 kPa, dans le cas de la calcite (fig. II.22).



a: Quartz, bloc-bloc

b :Silice, bloc-bloc





a: Silice, bloc-bloc

b : Calcite, bloc-bloc

Fig. II.21 : Amplitudes moyennes des fluctuations pour différentes rugosités en fonction du confinement.



Calcite, sable-bloc

Fig. II.22 : Amplitude moyennes des fluctuations à différentes rugosités en fonction du confinement.

Les amplitudes enregistrées pour l'ensemble des essais sont non nulles et évoluent en fonction de la nature des matériaux et de la procédure. Byerlee (1970) a noté que le glissement des matériaux fragiles (donc dureté élevée) est plus stable pour une surface lisse quand la contrainte normale est faible. Dans le cas de la calcite (dureté faible), le rôle joué par la nature du matériau semble être plus important dans l'évolution de son comportement que l'état de surface sous lequel il se présente. Globalement, Il n'y a pas de correspondance entre la résistance moyenne au glissement et les variations des amplitudes dans le cas des essais blocbloc (•) ou des essais sable-bloc (□) (fig.II.23). Mais, dans le cas des surfaces rugueuses, les quarte points des amplitudes *maximum* indiqués par une (*) sur la figure II.21b correspondent aux grandes résistances au glissement. Elles sont vraisemblablement dues à des imbrications des aspérités.



(■ : essais bloc-bloc, □ : essai sable-bloc)

Fig. II.23 : Corrélation du frottement et des amplitudes moyennes des fluctuations

II. 6.3 Analyse des écart-types

Nous avons déterminé pour chaque essai l'écart moyen des fluctuations par rapport à la valeur moyenne de la résistance au cisaillement pour un confinement donné. Les variations des valeurs des écarts à la moyenne en fonction de la contrainte normale sont présentées dans la figure II.24 pour les différents matériaux, en fonction de la dimension et de l'état de surface.

L'influence du confinement sur les variations des écart-types est fonction de la procédure et de la nature des matériaux. Globalement, ils répondent à la même tendance que les variations des valeurs moyennes du frottement, dans le cas des essais bloc-bloc. Dans le cas sable-bloc, ils sont indépendants du confinement, contrairement à la résistance au cisaillement.

La réponse du matériau à l'augmentation de la rugosité est de deux types :

- Une augmentation des écarts très sensible particulièrement aux très faibles confinements dans les essais bloc-bloc (cas de la silice) (fig. II.24b);
- Une variation indépendante de la rugosité et du confinement dans les essais sablebloc (fig. II.13) et bloc-bloc (cas de la calcite) (fig. II.24a).

Dans le cas des petites surfaces de glissement (fig. II.24 c & d), les variations sont plus sensibles aux très faibles confinements. Cette différence par rapport aux valeurs des plus grandes surfaces tend à diminuer avec l'augmentation de la contrainte normale. Elle est plus importante pour le quartz où la surface est plus rugueuse. Nous rappelons que les valeurs des angles moyens sont peu sensibles à la variation des dimension de la surface.



Fig. II.24 : Variation des écart-type en fonction de la contrainte normale.

a: Rugosité (calcite) b : Rugosité (silice)

c : Surface (quartz) d : Surface (silice)

II.7 Conclusion

Le mode opératoire développé nous a permis de tester plusieurs matériaux en fonction des différentes procédures définies.

L'analyse des résultats obtenus et la démarche suivis ont révélé des différences dans le comportement des matériaux testés en fonction de leur nature, du mode de cisaillement et du chargement auquel ils sont soumis. Les principaux résultats sont discutés en trois points essentiels liés à la mobilisation du frottement :

- Les essais de glissement bloc-bloc montrent une différence en fonction de la nature minéralogique des matériaux. Les valeurs obtenues, indépendantes du confinement et de la surface de cisaillement, sont relativement en accord avec celles obtenues par d'autres auteurs sur des essais de même nature. La variation de la rugosité de surface modifie le comportement des matériaux testés en introduisant de nouvelles variables liées à l'état de surface. Cette modification se manifeste par une augmentation plus importante du frottement mobilisé pour les matériaux à dureté élevée.

- Dans le cas des essais sable-bloc, les résultats obtenus sur les mêmes matériaux à différentes rugosités de surface montrent peu de différence dans les valeurs du frottement mobilisé. Cependant, dans le cas des surfaces lisses, on note une sensibilité de la calcite à la variation de la densité relative. L'écart par rapport aux valeurs des essais bloc-bloc à surface lisse est plus important pour les matériaux à dureté élevée. Cette différence met en évidence, en plus de l'effet lié à la nature du matériau, l'influence des caractéristiques moyennes des grains que l'on peut définir par un facteur de forme (Frossard 1978, 1979, Azimi 1976, Biarez & al 1989a). Ces caractéristiques morphométriques des grains (sphéricité, angularité, dimension,...) conditionnent leur mouvement (rotation, glissement) et leur interaction en fonction de la rugosité de surface.

Dans les deux cas, l'angle de frottement intergranulaire peut être représenté par :

$$\varphi_{\mu} = \varphi_{\mu}{}^{bb} + \kappa (A, B, \ldots)$$

Où $\varphi_{\mu}{}^{bb}$, κ représentent le frottement bloc-bloc pour une surface lisse et l'angle lié au facteur de forme induisant une variation de la dilatance. *A*, *B* représentent l'influence des données morphométriques et de la rugosité de surface respectivement. Ils sont étroitement liés à la nature du matériau.

La caractérisation du comportement des matériaux par l'analyse des fluctuations montre la diversité de la réponse des systèmes considérés. Ce phénomène est sans doute lié à l'existence d'autres paramètres cachés.

- Les valeurs au palier dans les essais de cisaillement sable-sable résultent de la combinaison de l'effet du frottement intergranulaire et du degré d'enchevêtrement produisant une variation de volume nulle. Elles définissent un angle de frottement, de même que les essais sable-bloc, fonction de la nature minéralogique du matériau et des données morphométriques.

Le frottement intergranulaire peut être défini par l'angle de glissement bloc-bloc à surface lisse ($\theta = 0$). Cette valeur moyenne peut être considérée valable à l'échelle du grain, malgré les grandes dispersions enregistrées, où il est très difficile de s'affranchir de l'effet lié à la micro-topologie.

Dans ce cas, la difficulté de définition du frottement intergranulaire comme paramètre intrinsèque des matériaux granulaires est réduite à la validité des valeurs obtenues avec la variation de l'échelle de mesure.

CHAPITRE III:

Analyse micro-macro du comportement des matériaux de Schneebeli

Nous présentons dans ce chapitre les principes de la méthode adaptée pour l'analyse à l'échelle du grain. Le premier paragraphe est consacré au frottement intergranulaire des matériaux de Schneebeli en fonction de leur nature. Par la suite nous montrons la comparaison des essais obtenus sur les différentes boîtes de cisaillement et les résultats de l'analyse effectuée à l'échelle du grain. La comparaison des mécanismes mobilisés montre la différence entre les valeurs du frottement interne et du frottement intergranulaire.

III. 1 Introduction

Les matériaux granulaires sont composés de particules discrètes de différentes formes, arrangés de façon stochastique. Ils n'ont pour interactions que la pesanteur et les forces de contact. Leur mouvement se produit non pas par un déplacement général suivant une surface continue, mais par rupture des chaînons suivant des plans tangents aux différentes facettes en contact (Caquot et al. 1966, Newland et al 1957, Dantu 1957) matérialisée par une zone de glissement (Rowe 1962, Vardoulakis et al 1982, Scarpelli & al 1982, Desrues 1984,...). Il se manifeste par une dilatance et des fluctuations de la résistance au cisaillement (Astier 1983, Meftah et al 1993, Ganiou et al 1993, Ganiou 1994). Les grains se déplacent (glissement ou rotation) librement en fonction des conditions aux limites. La considération des concepts de la mécanique des milieux continus supposent une déformation en bloc ignorant les mouvements individuels de particules. De plus, on constate le plus souvent l'utilisation d'hypothèses qui favorisent le glissement au dépend du roulement des particules, considéré comme négligeable (Newland et al 1957, Rowe 1962, Horne 1965 & 1969, Muruyama 1977). Les travaux de Chapuis (1976) et de Oda et al (1982) au biaxial sur des matériaux bidimensionnels ont montré l'existence de rotations non nulles. L'augmentation du frottement intergranulaire induit plus de rotations et une stabilité de la résistance au cisaillement (Oda et al 1982). Ces observations sont réalisées à l'échelle du grain. Le développement des modèles analogiques a permis la compréhension de certains mécanismes et l'approche du comportement des matériaux aux points de contact (Biarez 1962, Cambou 1972, Matsuoka 1974, Gourves et al 1988). Dans le prolongement de ces travaux, nous avons adapté la technique du traitement d'images à la visualisation et aux suivis des particules à l'échelle du grain. L'utilisation de la boîte de cisaillement direct, localisant le plan de glissement, permet d'appréhender le comportement des matériaux bidimensionnels en fonction de la déformation et de l'apparition des fluctuations.

III.2 Frottement intergranulaire

Nous abordons, dans ce paragraphe, le cas du glissement des matériaux bidimensionnels particules sur particules (fig. I.7), en fonctions de la nature des matériaux. L'examen de l'état de surface a montré une rugosité faible, semblable pour tous les matériaux. Par contre, la détermination de leur élasticité a révélé une différence nette de comportement en particulier

pour les deux lots de P.V.C. (tab. III.1). On les distinguera par leur ordre d'acquisition (P.V.C.1 et P.V.C.2 respectivement). Les essais, répétés plusieurs fois, sont réalisés à différents confinements (10 à 250 kPa).

Matériaux	Bois	P.V.C.2	P.V.C. 1	Duralumin	Laiton
Module d'élasticité (daN/mm ²)	173	298	873	2667	3525

Tab. III.1 : Elasticité des matériaux bidimensionnels.

III.2.1 Résultats des essais

Les réponses en contrainte-déplacement des matériaux sont présentées sur la figure III.1. Les variations de volumes enregistrées dans ce cas sont négligeables. Le cisaillement des rouleaux du P.V.C.2 présentent un comportement du type sable dense avec la formation d'un pic, puis un radoucissement suivi d'un accroissement de la contrainte au palier (fig. III.1b). Ce pic correspond au cumul de l'énergie élastique, qui sera libérée après une certaine déformation, donnant lieu à une valeur *minimum*. Au delà, la réponse du matériau tend vers un palier stable. En l'absence de variation de volume et de rupture de grains, le travail dissipé peut être décomposé sous la forme : $W = W_E + W_\mu$, où W_E et W_μ représente le travail élastique cumulé et le travail dissipé par frottement respectivement. Les échantillons formés de rouleaux de P.V.C.1 présentent un comportement du type élastique-parfaitement plastique (fig. III.1a). Les deux matériaux tendent vers des valeurs de frottement au palier identiques. Nous rappelons que ces deux matériaux ne sont différents que par leur élasticité.

Le duralumin et le laiton (fig. III.1 c & d) présentent un même comportement élastiqueparfaitement plastique que le P.V.C.1. Dans le cas du bois par contre, le comportement est marqué par l'apparition de fluctuations (stick-slips ?) dont l'amplitude varie en fonction de la contrainte normale (fig. III.1 e). Par ailleurs, aux très faibles confinements, le comportement est de même nature que le P.V.C.2. L'examen des différents paramètres, en dehors de l'élasticité, n'a pu fournir une réponse satisfaisante à ce phénomène. Cependant, il est comparable à celui obtenu lors du cisaillement de matériaux saturés (Skinner 1969, Cambou 1979, De Jagaer 1991). Byerlee (1970) note que ce genre de comportement se manifeste avec l'augmentation de la contrainte normale, dans le cas des glissements de surfaces polies de matériaux fragiles (donc dureté élevée). Le bois présente une dureté très faible. Les essais réalisés à un état saturé ne présentent plus de fluctuations. Jaeger (1969) considère que ce comportement est lié à la rigidité de l'ensemble du système. Il se comporte comme un ressort qui se comprime jusqu'à la valeur maximum du frottement. Le glissement survient jusqu'à la libération totale de l'énergie élastique accumulée. Ce phénomène se produit à une vitesse constante et à une période inversement proportionnelle à la rigidité de l'ensemble (Jaeger 1969).

II.2.2 Frottement:

La figure III.2 présente les variations du frottement en fonction de la contrainte normale. Globalement, le frottement des matériaux testés est sensible aux très faibles confinements. Cette influence est plus importante pour les valeurs au pic. Les deux matériaux de P.V.C. traités affichent un frottement moyen au palier semblable ($\approx 13^{\circ}$), malgré la très grande différence des valeurs au pic ($\approx 10^{\circ}$ de différence). Le frottement enregistré pour le bois est présenté en fonction des valeurs *maximum* et *minimum* (fig. III.3b). Au palier, la variation de l'amplitude des fluctuations se fait par la variation des valeurs *maximum* du frottement alors que les valeurs *minimum* restent pratiquement insensibles à l'augmentation du confinement. Les valeurs au pic diminuent en fonction du confinement et tendent à se confondre avec les valeurs au palier.

Les valeurs moyennes obtenues sur l'ensemble des essais pour les contraintes normales considérées sont présentées sur le tableau III.2. Au frottement établi, les matériaux ne présentent pas une grande différence de comportement pour un état de surface équivalent.

Frottement	P.V.C.1	P.V.C.2	Laiton	Duralumin	Bois
(φμ)pp	13,05±1,4	13,35±1,5	12,25±2,0	10,62±1,8	14,28±2,0
(φμ) pic	**	24,04±1,8	**		24,85±6,5

Tab. III.2 : Angles de frottement moyens des matériaux bidimensionnels.

La figure III.3 reprend les angles de frottement moyens donnés dans le tableau III.2 en fonction de l'élasticité des matériaux (tab. III.1). L'augmentation de l'élasticité fait tendre la réponse des matériaux vers un comportement élastique- parfaitement plastique où les valeurs au pic sont confondues à celles au palier. Les valeurs au pic sont d'autant plus importantes que la rigidité du matériaux est faible.

Ce résultat est comparable à celui obtenu par Cambou (1979) en considérant la dureté des matériaux pour un même état de surface.





(•): Bois, (■): P.V.C.1, (∇): P.V.C.2, (•): duralumin, (*): Laiton.
Fig. III.3: Variation du frottement en fonction de l'élasticité des matériaux.

III. 3 Effet structure

Nous avons repris, dans ce paragraphe, le dispositif expérimental et le mode opératoire retenu pour l'examen et le suivis de l'évolution de la structure des matériaux en place en fonction du déplacement.

III.3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé (fig. III.4) est le même que celui présenté dans le premier chapitre. Des modifications ont été apportées sur les capteurs de déplacements et le chariot pour améliorer le déplacement sans frottement et permettre de recevoir des boîtes de dimensions variables avec des déplacements plus grands. Nous avons conçu, pour cette partie, trois boîtes de différentes tailles avec des ouvertures frontales, permettant de visualiser le mouvement des particules (Abriak 1991). Leurs dimensions sont respectivement (b.h.l) de (60.40.60 mm³), (60.100.60 mm³) et (60.100.120 mm³). Le choix des dimensions a été fait en fonction des performances du traitement d'image par rapport à la plus petite dimension des particules et tel que la longueur soit au *minimum* supérieure à dix fois le diamètre de la grosse particule (voir Annexe B1).



1, 2 et 3 : capteurs de déplacements, 4 : capteur de force et 5 & 6 : système d'acquisition

Figure III.4: Dispositif expérimental

Déroulement des essais

Au préalable, Les diamètres des rouleaux sont matérialisés d'une couleur différente du reste du matériau pour faciliter le suivis sur image des particules au cours des déformations. La mise en place se fait par empilement successif d'une façon aléatoire, sauf pour les essais monodisperses où les rouleaux sont ordonnés en maille triangulaire. Les essais sont filmés à travers l'ouverture pratiquée sur les différentes boîtes. Les plans de déroulement des films incluent des points repères constants invariables d'un essai à un autre. La mesure de la densité en place est réalisée avant et après application de la force normale.

L'acquisition se fait de la même façon que celle présentée au premier chapitre I.

Le traitement des données se fait en deux temps :

- Un traitement global systématique réalisé à partir de l'acquisition des mesures des différents capteurs;
- Un traitement local basé sur l'analyse des films associé aux résultats du premier traitement.

La fenêtre d'analyse ne prend pas en considération les rouleaux aux abords de la boîte.

- Analyse par traitement d'images

L'utilisation d'un matériau bidimensionnel permet de mettre en évidence, à travers l'analyse locale, l'évolution des déplacements et des rotations de chaque particule et de l'influence de la répartition des micro-vides sur la déformation globale de l'échantillon. Pour cela, nous avons adapté la technique du traitement d'images qui permet le relevé systématique d'informations ciblées par différentiation par rapport à l'ensemble de l'échantillon. La méthode développée pour l'analyse locale consiste à sélectionner puis à séparer les objets représentant l'information recherchée par différentiation des niveaux de gris (seuillage). L'image est balayée ligne par ligne et chaque objet, repéré par ses coordonnées, est quantifié par un niveau de gris. L'image analogique ainsi obtenue est en réalité un tableau de pixels doté d'un niveau de gris variant entre 0 et 255. Elle représente un ensemble d'informations qui fait intervenir une succession d'opérations (segmentation, contour, filtrage...) dépendant de la qualité du matériel utilisé. L'ensemble des opérations réalisées sur les images, développées sur le logiciel Pc-Scope (1989), sont résumées sur la figure III.5.



Fig. III.5 : Organisation des différentes taches et opérations sur traitement d'images

Les taches d'extraction et de stockage des informations (micro-vides, rotations) (photos III.2 & 3), à partir des films ou des photos par utilisation d'une caméra CCD, ont été automatisées. Les fenêtres d'analyses sélectionnées ne contiennent pas les grains des abords de la boîte. Les micro-vides et les rotations sont déterminés par détection de contour et segmentation respectivement. Les rotations sont notées négatives dans le sens du déplacement de la boîte, correspondant au sens des aiguilles d'une montre. Le contrôle de la correspondance des rotations entre les images successives par l'affichage des numéros des particules est effectué manuellement. Seuls les déplacements des grains sont déterminés point par mesure des distances en pointant leur centre de masse par rapport aux points "repères laboratoire" sélectionnés.



Photo 1: Image initiale digitalisée Photo 2: Micro-vides

Photo 3: Rotations

Photos III.1, 2 & 3: Sélection et extraction des vides et des rotations par traitement d'images respectivement.

III.3.2 Sources d'erreurs

Le traitement d'images est développé sur une carte dont la définition (512×512 pixels) limite l'usage et les performances. Les précautions à prendre concernent particulièrement:

- *i- la dimension <u>maximum</u> de la fenêtre d'analyse:* Elle est définie comme étant la surface *maximum* filmée lors du déroulement de l'essai qui inclue, en plus de la masse des grains à analyser, les points des repères laboratoire.
- *ii- Niveau de seuillage:* La multiplication des couleurs au niveau du grain et la diffraction de la lumière d'exposition induisent une diffusion du seuillage rendant la séparation des objets incertaine (Photo III.4).
- *iii- Analyses des rotations:* La détection se fait par balayage horizontal. L'ordre de détection des objets peut être modifié par rapport au traitement initial. Dans ce cas, une intervention manuelle par réaffectation des mesures est nécessaire. L'erreur de mesure sur les rotations est de $\pm 2^{\circ}$.



Photo III.4 : Définition du contour des objets en fonction des conditions aux limites (couleur, dimension pixel,...).

Les erreurs qui découlent d'une analyse au traitement d'images, liées le plus souvent à l'appréciation de l'opérateur, sont difficiles à quantifier. Cependant, l'automatisation des différentes tâches élimine les erreurs systématiques (relatives) entre chaque opération. On tiendra compte aussi des erreurs, exposées précédemment, liées à l'essai de cisaillement.

III.3.3 : Essais réalisés

Les essais présentés sont réalisés sur un matériau de Schneebeli formé de rouleaux en P.V.C. (P.V.C.1) dont les caractéristiques sont présentées au premier chapitre. Ils sont repartis en séries en fonction de la contrainte normale, de la composition granulométrique et de la structure et enfin des dimensions de la boîte de cisaillement. Ils sont pilotés en déplacement à une vitesse constante de (0,4 mm/s).

Nous nous sommes intéressés, dans un premier temps à la réponse des échantillons composés de 2 et 3 diamètres différents en fonction de la contrainte normale et de la répartition aléatoire de la structure, qui est obtenue par remaniement de l'échantillon à un même volume constant. Nous avons examiné, à travers ces essais l'influence du remaniement induit par le mouvement local des grains sur la réponse globale et de la dilatance sur la résistance au cisaillement des matériaux granulaires analogiques.

On examine la répétabilité des essais et les effets induits par le confinement et les dimensions des échantillons. Tous les essais sont répétés une dizaine de fois (10 à 12 fois). Les résultats de l'analyse sont transcrits par l'évolution du coefficient de variation qui représente le rapport de l'écart-type sur la valeur moyenne de l'ensemble des essais traités pour les mêmes conditions de chargement. Les échantillons sont constitués de mélanges de trois (3) diamètres de rouleaux en P.V.C. de 2 mm, 3 mm et 4 mm à des proportion en masse de 25 %, 50 % et 25 % respectivement ou de deux (2) diamètres de 4 mm et 6 mm à des proportions en masse de 40 % et 60 % respectivement.

Dans un second temps et afin de distinguer les différents mécanismes intervenant à l'échelle du grain, nous avons réalisé des essais sur des échantillons monodisperses dense de 4 et 6 mm de diamètre en fonction de la liberté de mouvement des grains.

III. 4 : Analyse globale

Les résultats des essais obtenus en contrainte-déplacement pour un confinement de 50 kPa sont présentés dans la figure III.8. Ils montrent, dans la plupart des cas, une augmentation stable avant l'apparition de fluctuations qui surviennent rapidement dans le cas de la petite boîte (fig. III.8). Elles sont ponctuées par des pics de contraintes qui dénotent les chutes brutales et instantanées de la résistance au cisaillement liées à des restructurations de l'échantillon au cours de la déformation. Leur influence n'est pas toujours apparente sur les variations de volumes, particulièrement dans le cas de la petite et moyenne boîtes (fig. III.6).


Fig. III.6 : Comparaison des résultats en fonction des dimensions des boîtes.

La déformation volumique est représentée par les variations de la hauteur de l'échantillon. L'épaisseur de la zone de perturbation observée n'englobe pas la totalité de l'échantillon et semble ne pas être constante. Elle est globalement équivalente à 4 ou 5 gros grains, localisée au niveau du plan de glissement où l'on enregistre la globalité des mouvements des grains (fig. III.7). Cependant, des ruptures de chaînons verticaux de grains provoquent des chutes brusques des grains donnant lieu à des orientations de glissement différentes du plan global précédemment observé. La chute de dilatance mobilisée provoque la réorganisation de la structure dont l'étendue peut dépasser instantanément la zone de localisation.



Fig. III.7: Déplacements des grains au cours du cisaillement.



Fig. III.8 : Essais de cisaillement des matériaux bidimensionnels Confinement = 50 kPa a : Petite boîte

- b : Moyenne boîte
- c : Grande boîte

La réponse du matériau est conditionnée par la disposition des grains. En effet, pour les mêmes conditions, des essais justes remaniés au même volume (surface) exhibent des différences importantes dans leur comportement mécanique (figures III.8). Elles peuvent être progressives ou brutales dont l'effet peut se répercuter sur la distribution des forces, à travers les points de contacts qui évoluent en fonction de l'état de contrainte. Cambou (1981) et Matsuoka (1974) attribuent ces différences aux conditions cinématiques au voisinage du plan de glissement imposé. En d'autres termes, l'assemblage de particules et leur mouvement au voisinage de ce plan gouvernent la force de cisaillement et la rupture de l'échantillon. La transmission des efforts au sein du milieu granulaire se voit donc modifier par l'évolution de la structure granulaire due au cisaillement. Le milieu granulaire passe nécessairement par une phase de réarrangement qui peut conférer à l'échantillon une nouvelle résistance au cisaillement ou une perte de sa résistance.

III. 4.1 Influence du confinement:

L'étude comparative, réalisée par Ganiou (1994) sur des essais à des contraintes normales allant de 25 kPa à 900 kPa montre une évolution du coefficient de variation moyen peu sensible au confinement. De plus, l'augmentation de la contrainte normale retarde l'apparition des premiers pics. La figure III.9 représente l'évolution du coefficient de variation du frottement mobilisé, obtenu sur des séries composées de 12 essais réalisés sur la petite boîte dans les mêmes conditions, pour différents confinements. Elle montre un comportement, au début des essais, fonction du confinement. Pour de faibles déplacements, les essais sont plus reproductibles avec l'augmentation de la contrainte normale. Les fluctuations des essais sont plus importantes pour les grands déplacements et avec l'augmentation du confinement. La valeur moyenne du coefficient de variation est équivalente à 17,5 % environ pour chacun des cas considérés.

III. 4.2 Influence de la taille de l'échantillon:

Les figures (III.10 a, b & c) représentent l'évolution des coefficients de variation, obtenus sur les séries d'essais présentées à la figure III.8, en fonction du déplacement. Elles montrent la dispersion de la réponse des échantillons en contrainte par rapport à la valeur moyenne pour les mêmes conditions de chargement. Les échantillons contiennent 265, 580 et 1050 rouleaux dans la petite, la moyenne et la grande boîte respectivement. On constate un comportement semblable pour la petite et moyenne boîtes, ponctué par une dispersion au début des essais suivi d'un petit palier stable. Cette dispersion qui se manifeste par une augmentation du coefficient de variation met en évidence la différence des conditions cinématiques au voisinage du plan de glissement qui gouverne la réponse en contrainte des échantillons. L'augmentation de la hauteur de l'échantillon ne semble pas avoir d'influence sur le comportement global du matériau.



Fig. III.9 : Coefficient de variation en fonction du déplacement des essais pour différents confinements (Petite boîte).



Par ailleurs, les résultats des simulations des essais biaxiaux de compression sur des échantillons de différentes tailles ne montrent pas de différence du frottement moyen avec la présence de fluctuations plus importantes pour les petits échantillons (Yemmas 1993, Rohani 1995). Yemmas (1993) constate que la distribution des forces de contact normale est indépendante de la taille de l'échantillon.

L'augmentation du rapport LD (longueur d'échantillon-diamètre du plus gros grain) de 15 à 30 se manifeste par une chute du coefficient de variation de 17,5% à une valeur moyenne inférieure à 10%. Il est de même pour les amplitudes des fluctuations propres des différents échantillons, sans pour autant réduire leur nombre. Ces fluctuations restent un caractère intrinsèque du comportement des matériaux formés de grains (Meftah *et al.* 1993). Malgré un rapport LD de 15, supérieur aux limites définies dans le cas statique (équivalent à 10) (Cambou 1979, Gourves & *al* 1980 et Abriak 1991), la moyenne du coefficient de variation obtenue (17,5 %) reste relativement élevée. Ceci indique que ce coefficient dépend des conditions de chargement.

En résumé, on peut dire que les fluctuations qui décrivent la reproductibilité des essais, liées aux conditions cinématiques au voisinage du plan de glissement sont fonction de l'effet d'échelle. Les essais affichent des fluctuations admissibles pour des longueurs de continuité trois fois plus importantes que celles obtenues dans le cas statique. Ces longueurs peuvent être appelées longueurs de continuité cinématique. Elles sont globalement indépendantes du confinement. L'amplitude *maximum* des fluctuations internes aux essais diminue en fonction de ce rapport.

III. 5 : Analyse à l'échelle du grain

L'essai de la figure III.11 représente la réponse type des matériaux granulaires bidimensionnels réalisé sur la grande boite. L'échantillon est composé de rouleaux de P.V.C. de 2 mm, 3 mm et 4 mm de diamètre à des proportion de 25%, 25% et 50% en poids respectivement. Soumis à un confinement de 50 kPa, il montre un comportement dilatant avec présence de fluctuations de différentes amplitudes. L'analyse à l'échelle du grain passe nécessairement par la localisation des points susceptibles de fournir les informations sur le changement de comportement en assurant la continuité du dépouillement des résultats. Pour cela, nous avons extrait du vidéo film de l'essai, à chaque point du graphe indiqué par une (*), une photo qui sera examinée à l'échelle du grain par traitement d'images. Les informations englobant l'évolution des micro-vides, des rotations des grains et des points de contact sont présentées sous forme de courbes ou d'histogrammes.



Fig. III.11 : Essai de cisaillement à contrainte normale constante.

III. 5.1 Répartition des micro-vides et des points de contact:

L'ensemble des résultats des fréquences de distribution des micro-vides en fonction des surfaces élémentaires et des fréquences du nombre de points de contact par particule sont donnés dans les figures III.12 & III.13.

La mise en charge de l'échantillon induit une consolidation matérialisée par la translation des vides particulièrement ceux formés de quatre (4) particules en contact ou plus (fig. III.12). Elle se manifeste par l'augmentation du nombre de points de contact La structure initiale est dominée par le contact entre trois (3) particules de 2 mm de diamètre et entre quatre (4) particules de 3 mm de diamètre. Le tableau III.3 montre la dimension des surfaces élémentaires en fonction du nombre et du type des contacts considérés.

Assemblage	Surface (mm ²)	Assemblage	Surface (mm ²)	
3Ø2	0,161	2Ø3-1Ø4	0,434	
2Ø2-1Ø3	0,206	2Ø4-1Ø3	0,526	
2Ø2-1Ø4	0,238	3Ø4	0,645	
2Ø3-1Ø2	0,27	2Ø6-1Ø4	0,824	
1Ø4-1Ø3-1Ø2	0,318	2Ø4-1Ø6	1,08	
3Ø3	0,363	3Ø6	1,45	
2Ø4-1Ø2	0,378			
	Ass	emblage carré		
4Ø2	0,858	Min	1,29	
4Ø3	1,931	4Ø6	7,72	
4Ø4	3,434			

Tableau III.3: Distribution des vides en fonction des contacts des particules

L'examen des fréquences de distribution des micro-vides montre que l'augmentation du volume de l'échantillon se produit en majorité par augmentation de la dimension des gros vides. Les petits vides formés par le contact de trois particules, assurant un *maximum* de points de contact à l'exception des points de fluctuations, diminuent au cours du déplacement. Cette distribution évolue d'un point à un autre mettant en évidence la perte et le gain de nouveaux points de contact. Les particules qui constitues les gros vides voient leur nombre de contact diminuer jusqu'à l'instabilité. La rupture locale des contacts se manifeste par une redistribution des vides et une chute de contrainte. Le nombre total de micro-vides restent relativement constant. Il passe de 450 éléments avant chargement à une moyenne de 350 au cours du déplacement, pour l'essai à 50 kPa et de 340 à une moyenne de 330 pour l'essai à 75 kPa (fig. III.14d). Dans ce cas, les variations de volume proviennent de l'évolution de la géométrie de la maille formée par les grains en contact que par la multiplication des vides initiaux comme cela peut se produire lors des chutes de contrainte.

La figure III.14 montre l'évolution du nombre de points de contact moyen et de l'indice des vides, obtenu par sommation des micro-vides contenus dans la fenêtre d'analyse, en fonction du déplacement. Dès le début de l'essai, la dilatance est suivie d'une variation du nombre moyen des points de contact par particules. Les fluctuations observées (points 2 à 3, 4 à 5 & 6 à 7) sont dues, dans la plupart des cas, à une augmentation des gros vides puis une chute induisant une restructuration de la masse granulaire. A partir du point 8, on observe une diminution du nombre de petits vides (formés de 3 points de contact) et une augmentation des gros vides (\geq 4 points de contact) articulée autour de l'intervalle compris en majorité entre les vides formés par 3 ou 4 points de contact. Le nombre moyen de points de contact par particule diminue. Ce passage se manifeste par un adoucissement de la contrainte malgré la tendance à l'augmentation du volume total de l'échantillon.

La corrélation entre l'indice des vides et le nombre moyen de contact par particule montre globalement une diminution des points de contact en fonction de l'augmentation des vides (fig. III.14c). Des résultats similaires ont été obtenus par Field (1963) et Oda (1977) sur des

matériaux tridimensionnels à différents arrangements. Dans notre cas, cette tendance peut être considérée linéaire sur l'intervalle des indices des vides examiné. Au point 4, l'augmentation de l'indice des vides sans chute du nombre de points de contact peut être liée à l'augmentation des contacts de 3 particules et des contact de 4 particules induisant une stabilité du nombre de points de contact et une légère augmentation de la somme des vides.



Fig. III.12: Distribution des micro-vides au cours du déplacement.











Chapitre III : Analyse micro-macro du Comportement des matériaux de Schneebeli





2

3

4

5

6

7

Fig. III.13 (suite): Distribution du nombre de points de contact par particules.

Confinement = 50 kPa Déplacement relatif = 12 mm Matériau : P.V.C.1



Fig. III.14 d : Variation du nombre total des vides en fonction du déplacement.

III. 5.2 Evolution des rotations au cours du cisaillement

La distribution des fréquences des rotations, de l'essai présenté dans la figure III. 11, est déterminée pour chaque point sélectionné par intervalle de +/- 5°. Les résultats sont présentés dans la figure III.15.

Les rotations sont calculées par rapport à l'état initial après mise en charge (point 1). Globalement, elles présentent un comportement symétrique avec une moyenne voisine de zéro. Elles se manifestent dès le début de l'essai.

Au début de l'essai (point 2), sur les 39,14% des particules qui ont subit un mouvement, seulement 34 % des particules n'ont pas subit de roulement. Ce comportement est vraisemblablement favorisé par la forme circulaire des particules (sphéricité = 1), malgré le faible frottement intergranulaire ($\phi_{\mu} = 13^{\circ}$). La figure III.15 montre que le nombre de points glissants diminue avec le déplacement. A la fin de l'essai, seulement 14,25% des particules ont glissé sans roulée.

Nous avons porté dans le tableau III.4 les valeurs du rapport des points glissants et des points roulants par rapport aux différents points localisés au cours du déplacement. Au début de l'essai, les particules ont plus tendance à glisser. Les variations de volume sont localisées autour des vides formés de plus de 3 points de contact. Après le premier pic, le déplacement est marqué par plus de particules qui roulent. La chute de contrainte (fluctuations) aux points 3, 5 et 7 se produit avec moins de roulement par rapport à l'état précédent. A partir du point 9, le frottement mobilisé tend à diminuer malgré l'augmentation du volume. Le rapport des points glissants et des points roulants tend globalement à diminuer au cours du déplacement avec l'augmentation du volume. Il passe de 0,50 à 0,20 à la fin de l'essai. Nous avons noté, pour notre cas, une correspondance entre ce rapport et le nombre de points de contact moyen par particule (N) (tab.III.4). L'augmentation du volume et la réduction du nombre de points de contact favorisent les rotations des grains.

La figure III.16 présente les résultats des essais à deux diamètres pour deux états de mise en place différents. Ils sont réalisés sur la boîte moyenne à une contrainte normale de 25 kPa et à un indice des vides de 0,181 et 0,116 respectivement. La faible contrainte normale ne restreint pas l'augmentation de volume de l'échantillon. Le second essai est plus dilatant que le premier et mobilise un frottement qui va du simple au double. Mais cette différence est elle due uniquement à l'état initial de mise en place?

Les rotations présentées dans la figure III.16b sont déterminées à des points communs aux deux essais. Elles sont symétriques avec une somme peu différente de zéro, identique au cas précédent. La détermination du rapport G/R montre plus de particules qui glissent sans rouler dans l'essai 2, alors que pour l'essai 1, la plupart des particules subissent un roulement (tab. III.5). Ceci nous laisse supposer que les roulements aussi ont une part dans la différence du comportement observé sur les deux essais. D'autre part, les résultats obtenus sur des particules de formes différentes montrent une augmentation des roulements en fonction du frottement interparticulaire, sans pour autant multiplier le frottement mobilisé, particulièrement pour le cas des particules de sphéricité égale à 0,91 (Oda *et al* 1982). Le rapport entre le nombre de points glissants et les points roulants, dans le cas du biaxial sur un matériau bidimensionnel en polyuréthanne, est compris entre 0,2 et 0,51 pour des valeurs de $\varphi_{\mu} = 26^{\circ}$ et entre 0,12 et 0,23 pour $\varphi_{\mu} = 52^{\circ}$. Les résultats obtenus sur le P.V.C. sont compris entre 0,17 et 0,85 malgré les faibles valeurs de φ_{μ} , mais avec une sphéricité égale à l'unité. La figure III.17, où est regroupé l'ensemble des résultats, montre une influence comparable du frottement et de la forme des particules. L'augmentation du frottement interparticulaire augmente le nombre de points roulants, de même que l'augmentation de la sphéricité.



Fig.III.15 : Evolution des rotations en fonction du déplacement

n° du point	2	3	4	5	6	7	9	10
Dépl. (mm)	1,62	1,68	1,96	2,28	4,13	4,16	5,22	8,17
N (-)	4,50	4,53	4,51	4,59	4,40	4,47	4,35	4,23
Rot. Moy.(°)	-0,03	0,95	-1	0,87	0,25	-0,27	0,26	-0,41
G/R (-)	0,50	0,52	0,31	0,41	0,25	0,54	0,29	0,20

Tab. III.4 : Evolution de la structure au cours du cisaillement

	G/R (-) (nombre de points glissants sur les points roulants)					
Dépl. (mm)	0,31	1,73	3,05	4,04	4,58	5,55
Essai 1	0,58	0,29	0,29	0,20	0,40	0,24
Essai 2	0,85	0,36	0,80	0,69	0,22	0,35

Tab. III.5 : Evolution du rapport des points glissant et des points roulants.



Fig. III.16b: Distribution des rotations des essais à deux diamètres.



III. 6 : Mécanisme de cisaillement

Le cisaillement de matériaux constitués d'assemblage de particules dépend de:

(i)- frottement intergranulaire défini par ϕ_{μ} ;

(ii)- arrangement des particules;

(iii)- distribution des vides caractérisée globalement par la compacité;

(iv)-distribution granulaire;

(v)- données morphométriques des particules liées à l'état de surface et à la texture.

Ces matériaux se déforment le plus souvent avec une variation de volume. Ces déformations représentent l'ensemble des déplacements aux points de contact.

III. 6.1 Cisaillement aux points de contact:

On considère une masse granulaire formée de particules en contact les unes aux autres soumises à une contrainte normale constante uniformément repartie. La surface de rupture est formée par les glissements des particules dans la zone localisée (figure III.18a). La répartition des efforts pour la particule *i* est représentée sur la figure III.18b, où θ et φ_{μ} représentent l'angle de glissement et l'angle de frottement au point de contact respectivement et A_i représente la projection de la surface de glissement au point de contact par rapport au plan horizontal, tels que:



a : Plan de rupture (Echelle macro) Fig. III.18 : Cisaillement dans les matériaux granulaires La force de cisaillement nécessaire pour faire glisser la particule *i* est donnée par :

$$\tau \cdot A_i = \sigma \cdot A_i \cdot tg(\phi_{11} + \theta_i) \tag{3.2}$$

Si on applique le même principe à l'ensemble des surfaces de glissement, la force totale sera donnée par:

$$\sum \tau_i \cdot A_i = \sigma \cdot \sum A_i \cdot tg(\phi_{\mu} + \theta_i)$$
(3.3)

Elle représente, pour un frottement de contact constant, la somme de la résistance au cisaillement due au glissement de chaque particule, quelque soit son orientation.

Pour un déplacement horizontal δx , chaque particule *i* mobilisant du frottement subit un déplacement vertical δy_i qui induit une variation de volume δv_i , tels que:

$$\delta V = \sum \delta v_i = \sum A_i \cdot \delta y_i \tag{3.4}$$

Où δV représente la variation du volume total. Posons $\delta x \cdot \sum A_i = \delta \Delta$ (Newland *et al* 1957), nous aurons

$$\delta V_{\delta\Delta} = \frac{\sum A_i \cdot tg\theta_i}{\sum A_i}, \quad \text{avec } (\delta y_i/\delta x) = tg\theta i$$
(3.5)

Lors du cisaillement, sous faible rapport de contrainte, on enregistre un état contractant dû à l'enchevêtrement des particules induisant une augmentation du nombre de points de contact, sans grandes modifications des orientations des surfaces de glissement. Le frottement mobilisé à la limite de l'équilibre est équivalent au frottement intergranulaire ($\Psi \equiv \varphi_{\mu}$) (Biarez 1962, Rowe 1969 & 1971). L'augmentation du rapport de contrainte crée des microglissements aux points de contact entraînant un désenchevêtrement qui se traduit par une dilatance (Luong 1980). L'utilisation d'arrangement régulier de matériaux analogique permet de mettre en évidence la contribution de chaque paramètre lié à la particule dans la mobilisation du frottement total et de suivre son évolution au cours du cisaillement.

III. 6.2 Arrangement régulier monodisperse:

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que les particules, au cours du cisaillement, peuvent rouler ou glisser en fonction de leur frottement intergranulaire et de leur sphéricité. Le frottement mobilisé est fonction de la liberté de mouvement que peuvent avoir ces particules. A travers des essais simples liés aux mouvements des particules, nous avons cherché à séparer et à comprendre les effets des différents paramètres qui interviennent et les mécanismes qui mobilisent le frottement. L'utilisation de particules bidimensionneles identiques et de même diamètre permet de réduire le nombre de paramètres et de suivre instantanément les particules au cours du cisaillement, grâce au mode opératoire mis en place.

Nous avons réalisé des essais de cisaillement à la grande boîte sur des rouleaux en P.V.C. de 4 mm de diamètre et sur de mêmes rouleaux sur lesquels sont collés des grains de silice, pour des angles de frottement intergranulaires de 13° et de 23° respectivement, avec des arrangements triangulaires (monodisperse dense) qui permettent de considérer un plan de glissement moyen θ constant. Ces essais sont réalisés à des confinements relativement faibles (50 kPa) pour limiter les effets liés au décollement des grains dont on ne contrôle pas les conséquences et suffisamment grands pour assurer le contact entre les particules.

Les essais sont repartis en fonction du degré de liberté des particules (rotations, glissements), tels que :

- *i- 0 degré de liberté:* Cet essai est équivalent au déplacement de deux blocs compacts sans mouvement local des grains avec une répartition homogène et identique de la rugosité de surface. Il permet de séparer la part du frottement de celle liée à la dilatance.
- *ii- l degré de liberté:* les grains composants le bloc inférieur sont collés tels que leur mouvement individuel (rotation, glissement) soit nul. Les particules de la partie supérieure peuvent glisser et rouler librement.
- *iii- 2 degré de liberté:* les grains composants les deux parties formées par les deux demis boîtes peuvent rouler et glisser indépendamment.
- Les deux derniers cas permettent de comparer le frottement mobilisé en fonction du mouvement des particules. L'effet de la dilatance peut être déterminé à tout instant en fonction de l'inclinaison du plan de glissement des particules par rapport à l'horizontale. Les résultats des essais sont présentés en fonction de la résistance au cisaillement, de la variation de volume et de l'évolution des rotations au cours du déplacement.

- Essais à 0 degré de liberté (Mesure de l'angle intergranulaire):

L'essai tel qu'il est réalisé correspond au glissement de deux blocs (avec $\theta_i = \theta$ et $\delta V/\delta \Delta = tg\theta$) à une variation d'échelle (rugosité) équivalente au diamètre de la particule. Les valeurs de θ varient au cours du déplacement. Les résultats des essais sont présentés dans la

figure III.19. Seul deux paramètres interagissent : le frottement de contact et la dilatance. Le frottement *maximum* mobilisé correspond à l'angle de dilatance *maximum*, de pente moyenne égale à $tg\theta = 0,28$ qui représente la moitié de l'inclinaison de la surface de glissement initiale (fig. III.19a). Pour un déplacement proche du diamètre de la particule, on constate une diminution de la résistance avec le volume suivi d'une chute brusque des contraintes. La période du cycle est équivalente au diamètre du grain.

La séparation de l'effet dû à la dilatance du frottement total, par soustraction de l'énergie due aux variations de volumes, montre des variations quasi-linéaires et constantes du "frottement vrai" mobilisé, représenté par la courbe ($\tau */\sigma$), sauf aux points de chute de la dilatance où l'on enregistre une valeur inférieure à zéro. Cette valeur correspond à la valeur du frottement intergranulaire calculée.

Dans ce cas, où l'inclinaison des plans de glissements est la même, on peut écrire que:



a : Représentation des plans de glissement



b : P.V.C.1

c : Silice collée sur P.V.C.

Fig. III.19 : Cisaillement de matériaux bidimensionnels à 0 degré de liberté (diamètre 4 mm).

Le collage de grains de sable permet d'augmenter le frottement intrinsèque du P.V.C. avec une micro-rugosité liée aux dimensions des grains (≤ 80 µm). L'essai présenté dans la figure III.19c montre des valeurs du frottement corrigé (moins l'effet de la dilatance) légèrement supérieures au frottement intergranulaire. Les variations de volume dues à la microrugosité restent négligeables, mais l'effet des micro-enchevêtrements des grains induit une augmentation du frottement tels que: ($\phi > \phi_{\mu}$). On peut remarquer que cette augmentation est équivalente à celle enregistrée dans les essais bloc-bloc examinés au chapitre II.

Dans ce cas, le frottement est donné par:

$$\tau / \sigma = tg(\varphi + \theta), \qquad (3.7a)$$

$$\tau * / \sigma = tg. \varphi \qquad \text{et} \qquad {\delta V / \atop \delta \Delta} \equiv tg. \theta \qquad (3.7b)$$

(3.7b)

et

- Essais à 1 degré de liberté:

A la différence du premier cas, les grains de la partie supérieure de cet essais peuvent rouler et glisser. Nous avons déterminé, en plus de la résistance au cisaillement, les variations des rotations aux points caractéristiques (pic et variation de volume nulle). Les résultats sont présentés dans la figure III.20.

Les déformations (rotations et glissements) sont localisées sur une épaisseur de deux couches de particules qui forment deux blocs rigides séparés par une lignes de particules (Biarez et al 1992). Les particules de chaque couche présentent un même déplacement et des rotations indépendantes l'une de l'autre. Les pentes de dilatances enregistrées au pic sont 0,24 et 0,30 pour le premier et le second cycle. La différence des variations de volume aux points 2 et 4 est liée à la différence des angles de glissements mobilisés par les rouleaux entre les deux cycles. Au point 2, pendant que la surface de glissement de la première chaîne est horizontale $(\theta_1 = 0)$, la seconde, mesurée directement sur les images, fait un angle moyen $\theta_2 = 16^\circ$ sur toute la surface. Par contre, au point 4, les deux chaînes sont l'une sur l'autre avec des angles de glissement voisins de zéro. Nous avons déterminé, à chaque point caractéristique, les variations de volume par mesure sur images des différents plans de glissements et en utilisant l'équation (3.5) que nous avons comparé aux valeurs moyennes enregistrées, par la suite les angles de frottements corrigés tels que : $\tau^*_{\sigma} = \tau_{\sigma} - \delta \nu_{\delta\Delta}$ (tab. III.6).

Point	1	2	3	4
τ/σ (-)	0,54	0,25	0,64	0,18
(δV/δΔ) _{mov.}	0,24	0	0,30	0
τ*/σ ()	0,30	0,25	0,34	0,18
$(\delta V/\delta \Delta)_{calculée}$	0,326	0,14	0,42	0
$\tau * / \sigma(-)_{calculé}$	0,214	0,11?	0,22	0,18

Tab. III.6 : Valeur du frottement aux points caractéristiques.

Les valeurs mesurées du "vrai frottement" représentent, en plus du frottement intergranulaire, un frottement supplémentaire mobilisé par les écarts par rapport à la valeur moyenne de la dilatance. On peut remarquer, par contre, au point 2 que l'écart du plan de glissement différent de zéro n'intervient pas dans le bilan du frottement. La couche de particules, maintenue en place par un effort *minimum*, apparaît comme une partie rigide par rapport à la couche supérieure qui nécessite moins d'effort pour glisser ou rouler. De plus une part de l'énergie dissipée est réduite par la présence de rotations non négligeables. Elles varient d'une façon non homogène avec une somme non nulle (fig. III.20c).

Dans le cas des essais avec du sable collé, l'imbrication des grains entrave la liberté de mouvement des particules, particulièrement les roulements. L'effet du frottement de contact sur le roulement et la résistance au cisaillement n'a pu être examiné. Le résultat obtenu (figure III.20*b*) est analogue à celui obtenu précédemment. Il montre que si les particules se déplacent en masse sans roulement, le frottement total est équivalent à la somme du frottement intergranulaire, de l'effet lié à la rugosité de la surface et de la dilatance, quand les particules présentent le même plan de glissement.



a: P.V.C.







Fig.III.20c : Rotations des particules au cours du cisaillement (1 degré de liberté)

- Essais à 2 degré de liberté:

Dans ce cas, les particules des deux parties supérieure et inférieure de la boîte peuvent glisser ou rouler librement. Le comportement obtenu est analogue à celui décrit dans le cas des essais à 1 degré de liberté. La dilatance se produit sur deux chaînes de particules solidaires avec le même déplacement. Au moment où la première atteint une surface de glissement horizontale où l'effet de la dilatance est nul ($\theta_1=0$), la seconde est à un angle moyen par rapport à l'horizontal de 10° (tg $\theta_2 = 0,18$). Le déplacement vertical mesuré (dh= 0,81 mm) correspond à 75 % du déplacement total théorique des deux chaînes pour des particules de 4 mm de diamètre. La valeur moyenne du frottement corrigé ($tg\phi \approx 0,3$), comme dans le cas à 1 degré de liberté, est supérieure au frottement intergranulaire et inférieure à la valeur obtenue en tenant compte des micro-déplacements. Les rotations des particules, déterminées aux points caractéristiques, sont symétriques et différentes de zéro, avec une moyenne voisine de zéro (fig. III.21c), contrairement au cas précédent. Le rapport des points glissants sur les points roulants (tab. III.7) montre globalement une légère différence aux points caractéristiques des deux cas considérés (1 et 2 degré de liberté respectivement). L'augmentation du volume après le pic des contraintes induit le roulement des particules qui réduit l'effort nécessaire au désenchevêtrement. La chute de l'effort observée dans le second cycle des essais à un degré de liberté est suivie d'une déplacement dominé par le roulement des particules.

La chute quasi instantané des variations de volume est suivie de la chute de la contrainte à une valeur voisine de zéro. Elle se produit d'une façon périodique dont la valeur est équivalente au diamètre des particules. Ce même phénomène de fluctuations est observé sur des essais triaxiaux et biaxiaux pour différents matériaux disposés avec la même configuration monodisperse dense (Lateb & *al* 1995, Evesques & *al* 1993).



Fig. III.21 : Cisaillement de matériaux bidimensionnels à 2 degré de liberté

Rapport points glissants sur points roulants					
$tg.\varphi\mu = 0,23$	1 degré de liberté	2 degré de liberté			
Point 1	0,28	0,45			
Point 2 0,39		0,31			
Point 3	0,41	0,53			
Point 4	0,18	0,40			

Tab. III.7 : Relation rotations et degré de liberté des particules bidimensionneles.

III. 6.3 Arrangement aléatoire:

Les particules sont reparties d'une façon aléatoire, de même que leur surface de glissement. La rupture se produit simultanément sur plusieurs orientations formant des lignes potentielles de glissement différentes de la ligne moyenne théorique. Comparé au cas des empilements réguliers périodiques où les plans de glissement moyens sont constants, on

remarque une nette augmentation de la valeur du frottement corrigé ϕ * par rapport au frottement intergranulaire ϕ_{μ} .

$$\frac{\gamma_{\sigma}}{\bar{\sigma}} = tg(\phi^* + \bar{\theta}) \tag{3.10}$$

Avec

$$\overline{\theta} \approx \frac{\delta V}{\delta \Delta} \quad et \quad \varphi^* = \varphi_{\mu} + \varphi_r$$
 (3.11)

Où ϕ_r représente les effets de la redistribution et du réarrangement des grains. Il tient compte de l'effet dû à l'écart des surfaces de glissement par rapport à la moyenne et des rotations des particules, tels que:

$$\varphi_{r} = \varphi_{d} - \varphi_{\theta}$$
avec
$$\varphi_{d} = f(\frac{1}{\sigma}\sum_{i}^{n} (\tau_{i} - \langle \tau \rangle), \varphi_{\theta})$$
(3.12a, b & c)
et
$$\varphi_{\theta} = f(\varphi_{\mu}, A^{*})$$

Où φ_d , φ_θ représentent le frottement dû à l'écart de l'orientation des micro-surfaces de glissement par rapport à la valeur moyenne et aux rotations des particules respectivement, le coefficient A* représente l'influence des données morphométriques. Le rapport du nombre de points glissants sur le nombre de points roulants est sensible à la forme et à l'état de surface des particules et à leur frottement intergranulaire.

Dans le cas où l'on néglige les rotations des particules, la divergence entre les valeurs de φ^* par rapport à φ_{μ} est d'autant plus grande que le nombre de point de contact sur le plan de rupture et l'écart à la valeur moyenne des surfaces de glissement sont grands.

Considérer les équations 3.3 & 3.5 revient à distinguer, du point de vue énergétique, les différents travaux mobilisés par le système tels que: $W = W_v + \Sigma W_i$, où W_v et W_i représentent le travail externe nécessaire pour permettre les variations de volume et le travail interne absorbé par l'échantillon respectivement (Skempton & Bishop 1950, Hardin 1978). La séparation de l'énergie externe due aux variations de volume ne donne pas d'information sur les valeurs du frottement intergranulaire, vue l'existence d'une dilatance interne représentée par φ_r . Le rapport entre les points glissants et les points roulants est fonction des données morphométriques et de la nature des particules (frottement intergranulaire). L'énergie de roulement est beaucoup plus faible par rapport au glissement. Les particules soumises à la charge N se mettent à rouler sous un effort T appliqué à la hauteur du centre de gravité. Le mouvement s'effectue sous un couple de roulement $C_R = T.b$ articulé au point I qui représente le centre instantané de rotation. Le couple de rotation est équivalent à $C_R = N.a$. Le coefficient de frottement est définie par :

$$tg\phi_{\mu_{R}} = T / N = a / b$$

$$T \xrightarrow{\qquad N \\ ha} \xrightarrow{\qquad b \\ ha} \xrightarrow{\qquad b \\ ha} \xrightarrow{\qquad ha}$$

ł. .

Où a et b représentent les distances horizontale et verticale du centre de masse par rapport au centre instantané de roulement. Cette mesure ne peut être quantifiée qu'à l'échelle du grain, son influence sur la répartition du frottement n'est pas maîtrisée. Lambe et Withman (1969) considèrent que la valeur du frottement de roulement est très inférieure à 0,1 et dépendant de l'état de surface.

Pour les mêmes données, les particules rouleront plus facilement pour des sphéricités voisines de l'unité associées à des grandes valeurs du frottement intergranulaire φ_{μ} . La forme des grains, de même que l'orientation des forces de contact, jouent un rôle déterminant dans le pouvoir de roulement des particules par rapport au glissement. Dans le cas où la plupart des particules roulent avec des faibles écarts des micro-surfaces de glissement par rapport à la valeur moyenne, la valeur du frottement mobilisé φ^* peut être inférieure au frottement intergranulaire, tels que: $\varphi_r = \varphi^* - \varphi_{\mu} < 0$. En grande déformation, l'échantillon se déforme suivant un chemin au *minimum* d'énergie et la valeur de φ_r tend vers une valeur critique asymptotique tels que: $\varphi^* = \varphi_{rv}$.

Les résultats du frottement *maximum* obtenus sur les rouleaux de P.V.C. à la boîte, dans cette étude, et sur le polyuréthanne au biaxial par Oda (1982) sont portés sur le graphe de la figure III.22, en fonction du frottement intergranulaire. En parallèle, nous avons tracé le rapport du nombre de points glissants sur le nombre de points roulants en fonction de la forme des particules (sphéricité) (fig. III.23). Il est probable que ce rapport augmente asymptotiquement avec la chute de la sphéricité. La figure III.22 montre que pour un frottement intergranulaire $\varphi_{\mu} = 52^{\circ}$ et une sphéricité $\psi_2 = 0.91$, on obtient une résistance au cisaillement inférieure au frottement intergranulaire, quelque soit l'orientation de mise en place des particules.



Fig. III.22: Roulement des particules en fonction de la sphéricité



Dans ce cas, la distribution des énergies dissipées lors du cisaillement (fig. III.24a : Rowe 1962) se voit modifier et l'angle de frottement φ_f obtenu par séparation de l'effet de la structure et du frottement par la relation contrainte-dilatance peut prendre une valeur comprise dans la totalité de la zone hachurée.

Si l'effet de roulements n'est plus négligeable, alors la valeur du frottement de Coulomb φ_{cv} peut être inférieure à celle du frottement intergranulaire. Dans ce cas, on constate une redistribution des énergies dissipées lors du cisaillement (fig. III.24b).





(D, R, F énergie de dilatance, de réorganisation et frottement respectivement)Fig. III.24 : Distribution des énergies dissipées lors du cisaillement des matériaux granulaires

III.6.4 Relation entre φ_{μ} et φ_{cv} (φ_{max})

La comparaison et la recherche d'une relation entre φ_{μ} et φ_{cv} a fait l'objet de nombreux travaux (Horne 1965, 1969, Caquot & *al* 1966, Skinner 1969, Procter 1974, Sadasivan & *al* 1977, Hardin 1978). L'analyse des résultats obtenus montre une différence dans la définition de ces angles. Ainsi, on peut parler du frottement intergranulaire φ_{μ} d'un matériau, quelque soit les caractéristiques morphométriques du sable obtenu et d'un frottement au palier φ_{pp} ou φ_{cv} de ce sable dépendant des données morphométriques des particules, quelque soit son état de mise en place. φ_{μ} ne dépend que de la nature du matériau indépendamment de la structure, alors que φ_{cv} résulte d'un effet combiné de la nature, des caractéristiques des particules et de la structure (Procter 1974).

Vue la difficulté de mesure de φ_{μ} , Negussey & *al* (1988) et Oyenuga & *al* (1989) considèrent que φ_{cv} représente la clé intrinsèque des matériaux granulaires (sables). Donc, la recherche d'une relation entre les deux angles ne s'impose pas.

III.7 Conclusion

La réponse des matériaux granulaires à une sollicitation de cisaillement a été examinée à travers le comportement du matériau de Schneebeli au cours du déplacement. L'analyse du comportement des essais à l'échelle du grain est rendue possible grâce à l'utilisation des techniques du traitement d'images. Les outils développés nous ont permis de traiter un grand nombre d'objets à la fois et de quantifier les données de structure par la caractérisation des micro-vides et des mouvements des particules par mesure des rotations et des déplacements.

Les résultats obtenus peuvent être résumés en 3 points :

- Les essais de cisaillement présentent deux types de fluctuations, de même que ceux examinés au chapitre II. Les premières sont propres à chaque essais, les secondes représentent la dispersion entre les essais de même nature. Dans les deux cas, leurs amplitudes moyennes sont fonction du rapport LD (longueur d'échantillon-diamètre du plus gros grain), indépendamment du confinement. La reproductibilité des essais est considérée valable pour un coefficient de variation inférieur à 10%. Il correspond à une échelle de continuité cinématique 3 fois plus importante que celle obtenue dans le cas statique (au repos).

- Le processus de mobilisation du frottement est fonction du degré de liberté des particules et de la répartition des micro-vides. Les essais de cisaillement présentent une rotation moyenne voisine de zéro pour d'importantes rotations des particules, favorisées par une sphéricité égale à l'unité, malgré le faible frottement intergranulaire. Leur répartition globale présente une forme symétrique. La sphéricité présente un effet de roulement équivalent à un important frottement intergranulaire. L'équilibre du rapport des points glissants et des points roulants, observé au début de l'essai, tend à diminuer vers des valeurs plus petites avec la diminution du nombre de points de contact, au cours du déplacement. La distribution des énergies dissipées est modifiée par la présence de rotations non négligeables.

- Le frottement de réarrangement et de redistribution φ_r est une fonction du frottement intergranulaire, des caractéristiques morphométriques et de leur mise en place. Il représente la somme des variations enregistrées à l'échelle du grain, par rapport à la valeur moyenne, en fonction de la redistribution des forces de contact et des micro-vides. A l'état critique, φ_r tend vers une valeur stable tels que : $\varphi_{cv} = \varphi_{\mu} + \varphi_r$.



CHAPITRE IV :

MATERIAUX GRANULAIRES EN ECOULEMENT

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus sur les écoulements des matériaux analogiques. Le mode d'écoulement est examiné en fonction du frottement des parois, de l'ouverture de vidange et de l'inclinaison de la trémie. Par la suite, nous discutons la méthode de mesure de la densité au cours d'écoulement et les résultats obtenus.

IV. 1 Introduction

Les matériaux granulaires se présentent sous diverses formes. Leurs propriétés d'écoulement dépendent essentiellement des conditions de frottement, liées au nombre et à l'état des contacts entre grains et du degré de consolidation, si le matériau peut développer une cohésion. Ces facteurs sont influencés par les données physico-chimiques des grains, les conditions d'exploitation (inclinaison de la trémie, rugosité des parois,...) et d'environnement (humidité, température,...) (Baklouti & al 1995, Abriak 1991, Khati 1991, Biarez & al 1989b, Song 1989, Te Borg 1982). La teneur en eau, la granularité, la teneur en fine et la densité apparente jouent des rôles prépondérants sur l'aptitude du matériau à développer une cohésion. Par ailleurs, la granularité, l'état de surface et l'angularité conditionnent le frottement dans le matériau.

Les techniques de dimensionnement classiques des enceintes de stockage sont basées sur les travaux de Janssen, axés sur la détermination des contraintes aux parois. Cette méthode, basée sur des hypothèses simplificatrices, considère l'équilibre limite d'une tranche horizontale de matériau pesant et frottant sur les parois (Walker 1966, Walters 1973, Sokol 1984). Les études expérimentales ont montré la variation des pressions sur les parois au cours du temps et des processus fonctionnels. Il existe au début de la vidange une phase transitoire où le matériau se dilate pour acquérir une masse volumique optimale à l'écoulement. Il s'ensuit une forte poussée, supérieure aux contraintes développées en statique et en écoulement établi, pouvant endommager la structure (Bransby & Blair-Fish 1975, Blight 1986, Kmita 1991). Une autre approche développée par Jenike (1961 & 1964) considère les équations d'équilibre d'un élément infinitésimal de matériau qui conduit à la formulation d'un système d'équations différentielles nécessitant l'introduction de nouvelles hypothèses (Khelil 1989, Ranaivosson 1991). Cette dernière approche, développée dans le cas des matériaux cohésifs et présentée sous forme d'abaques, permet de déterminer l'ouverture minimale de l'orifice de vidange pour assurer sa coulabilité en tenant compte des caractéristiques à la rupture des matériaux. Les constatations expérimentales ont permis de se rendre compte du rôle déterminant du comportement des matériaux ensilés dans la détermination des efforts.

L'étude du stockage ou de la vidange des matériaux granulaires (voir Annexe C) présente trois aspects fondamentaux basés sur :

i- L'analyse des champs de vitesse (qui peuvent dépendre de l'état de contrainte) pour évaluer le débit;

- *ii- L'analyse des contraintes développées en statique et pendant l'écoulement permettant de dégager les critères de dimensionnement du point de vue résistance;*
- *iii- La définition du comportement du matériau et de ses propriétés d'écoulement.*

Il est généralement admis que leur état de volume constitue un paramètre de base de leur comportement (Schofield et al. 1968). Jenike (1964) considère la courbe d'état critique définie par Roscoe comme le lieu d'écoulement stationnaire où les déformations sont permanentes et l'augmentation des contraintes de cisaillement et de l'indice des vides ne sont plus possible. Les caractéristiques contraintes et déformations à l'intérieur de l'enceinte dépendent de l'évolution de cette densité, engendrée par le mouvement des grains. Les déformations irréversibles sont d'autant plus grandes que le matériau est lâche. Leur comportement au cours d'écoulement évoque certaines caractéristiques liées à des mécanismes de cisaillement. Il peut être approché par référence aux problèmes de déformations et de ruptures des sols (Michalowski 1990) ou assimilé à celui d'un fluide visqueux (Haff 1983, Weisse 1991). L'analyse des voûtes enregistrées (voir Annexe C) confirme le lien étroit qui existe entre les différentes déformations développées. La différence de pression qui règne à l'intérieur du silo en fonction de la profondeur favorise la compaction des matériaux stockés (Khelil 1989). Leur état de mise en place tend asymptotiquement vers la compacité limite, mais peut présenter des dispersions locales. Cette densification, liée entre autre au pouvoir de compressibilité des matériaux, présente une grande influence sur leur déformabilité et leur caractéristiques de rupture (Luong 1989 & 1993). Ceci nous renvois à l'influence du mode de remplissage et au temps de séjour sur la variation de la porosité et aux conséquences qui en découlent (surpression, blocage par formation de voûtes ou cheminée...). La mise en évidence de l'influence d'une répartition hétérogène de la densité sur les écoulements pose le problème de la mesure in-situ. Les mesures et le prélèvement local d'échantillons restent très sensibles au remaniement malgré le développement de techniques sophistiquées tels que la congélation (Clayton & al 1994) et pratiquement inaccessible sur des silos en vraie grandeur. L'emploi des rayons-X ou des ultrasons s'effectue sur de petites surfaces et nécessite, de même que la congélation, l'arrêt de l'écoulement (Michalowski 1984). L'utilisation de modèles réduits, dont l'essor peut être attribué aux faibles coûts de revient et à la facilité de mise en place de l'instrumentation et des méthodes d'acquisition, permet d'élaborer des études paramétriques et de multiplier le nombre d'essais. Par ailleurs, nous sommes conscients du problème d'interprétation et de transposition des résultats aux ouvrages réels, lié aux conditions de similitude, que peut induire l'utilisation de tels modèles, particulièrement dans le cas du bidimensionnel (Mandel 1962, Weber 1971, Munch-Andersen & al 1986, Luong 1986, Bouchend'homme 1993).

L'avantage des modèles bidimensionnels réside essentiellement, en plus de leur simplicité de mise en place, dans la possibilité de visualiser et de mesurer les déplacements du matériau. L'utilisation d'un matériau bidimensionnel associé à la technique du traitement d'image permet de mesurer les variations de la densité au cours de l'écoulement et de décrire les mécanismes qui se développent au cours de la déformation.

IV. 2 Dispositif expérimental:

Le dispositif utilisé, représenté sur la figure 1 est constitué :

(i)- d'un silo modulaire qui permet de varier la largeur (b) du silo, l'orifice de vidange (D), l'inclinaison de la trémie (α) par rapport à l'horizontale et la rugosité des parois obtenue par collage de feuilles adhésives de Téflon pour les parois lisses (L.), sur une surface d'acier pour les parois semi-rugueuses (S.R.) et par collage de grains de P.V.C. de différents diamètres (différents frottements paroi-matériau ϕ_p) pour les parois rugueuses (R.) respectivement. Les butées peuvent recevoir des capteurs de force ou de déplacement.

(ii)- d'une balance pilotée par micro-ordinateur qui permet de mesurer la masse écoulée en fonction du temps. Une mesure est enregistrée toute les (0,20 sec.). La balance supporte une masse totale de 56 kg avec une erreur relative de 0,018%.

(iii)- de Caméras vidéo à 25 images par seconde, pour le suivis vidéo des écoulements sur différents plans définissant chacun une zone du dispositif d'écoulement.



Fig. IV.1a : Dispositif expérimental : Dispositif global



Fig. IV.1b : Dispositif expérimental : Silo modulaire

• IV. 2.1 Mode opératoire

- Déroulement des essais:

Après avoir fixé les différents paramètres géométriques du modèle, le silo est rempli sous l'effet de la pesanteur par couches successives tels que les génératrices des rouleaux soient parallèles entre elles. L'utilisation de rouleaux de même diamètre (monodisperse) permet d'obtenir des densités initiales reproductibles, déterminée pour chaque essai par analyse au traitement d'images. Des défauts d'empilement peuvent être observés localement, dus aux défauts de forme des rouleaux, avoisinant l'indice des vides moyen à une valeur de 0,11 pour une valeur théorique de mise en place de 0,103.

- Acquisition des données:

La visualisation de l'écoulement se fait par marquage du massif d'un maillage de 50 mm de coté et par prise de vue à différents échelles.

Les différents plans des films projetés permettent (photos IV.1):

(i)- la mesure du champs de déplacement au cours de l'essai à travers l'évolution du maillage global réalisé sur l'échantillon;

(ii)- la mesure de l'évolution de la zone de transition et la visualisation du mode d'écoulement sur un plan rapproché. La mesure est basée sur la localisation et le suivi des différentes lignes de glissement;

(iii)- la visualisation de l'influence de la rugosité des parois.

Les trois plans sont définis à des positions relatives fixes. Ceci nous permet de dégager des repères de laboratoires fixes à tout instant et reproductibles d'un essai à un autre.



a : Grand plan (échelle continue)

b : Plan rapproché (échelle du grain)

Photo IV.1 : Plan de visualisation de l'écoulement

IV.2.2 Traitement des données

Le traitement des données est basé essentiellement sur l'exploitation des différents films associés à la mesure du débit.

Le dépouillement des essais a nécessité:

- (i)- la mise au point, sur traitement d'images, d'une méthode d'acquisition et de détermination de l'évolution des différents paramètres (indice des vides, épaisseur des couches).
- (ii)- l'adaptation de la table à digitaliser à l'acquisition automatique et au stockage des coordonnées des points d'une image à une autre.

- Détermination des trajectoires et des vitesses des particules:

Les coordonnées (x, y) des différents points du maillage sont déterminés en fonction du temps directement sur les photos extraites des films, à l'aide de la table à digitaliser.

Le vecteur joignant deux positions successives d'un point est le vecteur déplacement $\Delta \vec{x}$ de ce point. Si Δt est l'incrément temps entre les deux positions, la vitesse du point est $\vec{u} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$. Les images sont extraites à un intervalle de temps constant.

- Détermination de la densité au cours d'écoulement:

Les mesures de la densité du matériau au cours d'écoulement sont effectuées à deux échelles différentes, à savoir par rapport au volume total en place contenu dans le silo à l'instant t ou uniquement par rapport au volume libéré par la masse écoulée, qui représente globalement les variations enregistrées dans la zone inférieure du silo. La mesure du volume est effectuée, à l'aide du traitement d'images, par analyse et séparation des niveaux de gris (voir chapitre III). La masse écoulée est mesurée en continue en fonction du temps. Les photos sont extraites du film, toute les 0,20 seconde, par prise d'image d'une façon automatique. La procédure est rendue possible grâce à la réduction de la vitesse du déroulement du film (Temps réel*1/5), sachant que le temps réel nécessaire pour la lecture et le stockage des données sur disque sans encombrement de la carte d'acquisition est de 0,43 à 0,75 seconde en fonction de la taille de l'image. Le temps d'acquisition des images choisi de 0,20 seconde coïncide avec la mesure automatique du débit.

IV. 2.3 Essai réalisés

Les essais sont réalisés sur un matériau bidimensionnel formé de rouleaux en P.V.C. de forme circulaire de différents diamètres et de forme elliptique de 2 mm et 2,5 mm de petit et grand diamètres respectivement. Sa masse volumique avoisine 1400 kg/m^3 .

Les essais réalisés sont étalés en plusieurs séries, vue le temps long nécessaire pour la préparation des échantillons.

Ils sont séparés en trois parties visant chacune à caractériser l'écoulement en fonction :

(*i*)- de l'inclinaison (α) de la trémie et de la largeur (*b*) du modèle;

(ii)- des dimensions (D) de l'orifice de vidange et du diamètre (d) des particules;

(iii)- de la nature des parois (rugosité) et de la forme des particules (sphérique ou elliptique).

Par la suite, nous avons réalisé des essais d'écoulement sur des billes de verre sur un modèle du même type que celui décrit précédemment.

La hauteur de l'empilement (de remplissage) (h) considérée, pour la plupart des essais, est supérieure à 2 fois la largeur (b) du dispositif.

IV. 3 Analyse cinématique de l'écoulement:

Le dispositif d'écoulement présente des caractéristiques symétriques par rapport à l'axe vertical de l'orifice de vidange. Les trajectoires des particules sont fonctions de leur position par rapport à cet axe de symétrie. Les différents profils sont définis en fonction de leur position par rapport à la base du silo. La figure IV.2 représente les déplacements de différents points des profils, calculés par rapport à l'axe vertical de symétrie (x = 0). Elles montrent des déplacements en fonction du temps quasi-constant dans la partie élancée du silo. Ce résultat est obtenu sur l'ensemble des essais examinés avec un élancement (h/b) > 2. Au voisinage de l'orifice de vidange, les grains subissent une variation de vitesse en fonction de leur position par rapport à l'axe de symétrie. Cette augmentation de vitesse est d'autant plus importante que l'orifice de vidange est grand. Des observations similaires ont été faites sur les écoulements du blé de Chartres par Khelil (1989) et Weisse (1988) et sur des matériaux de différentes natures par Kmita (1991). Les particules voisines des parois présentent des trajectoires sinueuses à l'intérieure de la zone d'influence du frottement paroi-matériau φ_p . Elles se manifestent par des ralentissements et des variations aléatoires des vitesses, représentées dans la figure IV.3a. La zone de perturbation dont l'épaisseur augmente avec le frottement paroi-matériau présente un comportement qui peut être approché de celui d'une couche limite dans l'écoulement des liquides (photo IV.2). Le comportement de cette zone instable et l'analogie fluide-milieu granulaire a fait l'objet des travaux de Yacoub (1994).


Photo IV.3 : Zones de rupture et formation des lignes de glissement

Les variations des vitesses horizontales déterminées par rapport à l'axe de symétrie met en évidence l'orientation des particules vers la zone de chute libre située en amont de l'orifice de vidange (fig. IV.3b). La partie élancée se déplace en masse sans variation de vitesse. La distribution globale des vitesses semble prendre forme à partir de l'axe géométrique de symétrie sans, pour autant, qu'elles soient instantanément symétriques. A la rencontre des particules, dans la zone de chute libre, les vitesses horizontales sont voisines de zéro. Pour un élancement (h/b) > 2, les essais présentent un effet piston où la partie centrale (noyau) se déplace en bloc

La figure IV.4 représente les variations des vitesses horizontales de couches successives différentes couches du matériau à un instant donné t. Les discontinuités de vitesses entre les différentes couches laissent apparaître des lignes de glissement qui favorisent le déplacement en bloc du matériau. A la vitesse verticale croissante des particules qui rentrent dans la zone instable s'ajoute une vitesse horizontale discontinue en fonction de sa position dans l'espace. Les fluctuations brusques des vitesses provoquent une rupture du matériau par glissement de blocs suivant un plan localisé. Les zones de ruptures induites ne sont pas fixes dans l'espace, mais se déplacent avec le matériau (photo IV.3). Les vitesses horizontales au niveau des parois lisses présentent un caractère fluctuant plus important lié à l'instabilité de la zone morte. Ce caractère diminue en fonction de la rugosité des parois.



Fig. IV.2 : Trajectoires des particules au cours de l'écoulement



a : Vitesses verticales.



b: Vitesses horizontales

Fig. IV.3 : Profils des vitesses au cours d'écoulement



IV. 4 Mode d'écoulement:

L'observation des essais réalisés et l'examen des profils de vitesses montrent une cinématique de l'écoulement cyclique, à l'image de la formation des zones de rupture dans la partie inférieure du silo. Le même phénomène a été observé, en utilisant la technique des rayons-X, par Lee & *al* (1974), Bransby & *al* (1974), Michalowski (1987), Cutress & *al* 1967, Müllins (1982) dans l'écoulement de sable à travers une trémie. Un mécanisme semblable de propagation de la déformation a été décrit, plus récemment, par Aouichat (1988) sur une monocouche de billes et par Sakaguchi *et al* (1993) sur un matériau bidimensionnel.

Les écoulements en masse ainsi observés peuvent être réparties en trois différentes zones (fig. IV.5):

- (i)- Ecoulement permanent ou piston : Les trajectoires des points d'un même profil sont confondues. Les déplacements s'effectuent à vitesses constantes en masse rigide. L'indice des vides reste constant. Des perturbations peuvent exister au niveau des parois, dues essentiellement aux frottements grain-paroi.
- (ii)- Ecoulement pseudo-permanent ou de transition: On définit une zone dite de "transition" où existe un gradient de vitesse faible mais non nul. Elle peut être séparée en deux parties:
 - (a)- zone de rupture où se produisent la majorité des glissements et des perturbations dues à l'écoulement;
 - (b)- La zone de chute libre où les particules composant le matériau s'individualisent et atteignent la vitesse *maximum* de sortie. Elle représente la zone au dessus de l'orifice de vidange. L'essentiel de la variation de l'indice des vides se produit dans cette partie.
- (iii)- Ecoulement conditionné : La zone dite "morte" où les vitesses sont voisines de 0 (zéro) présente un écoulement nul ou instable influencé par de nombreux paramètres (caractéristiques des matériaux, dimension du modèle, frottement matériau-paroi, etc...).



Fig. IV.5 : Répartition des principales zones d'écoulement

La figure IV.6 décrit le processus d'écoulement des essais à fond plat à grand élancement (h/b>2) qui se fait essentiellement en deux temps :

- *Ecoulement naissant*: marqué par la propagation de lignes de glissement, au voisinage de l'orifice de vidange, laissant apparaître une première chute libre du matériau. La visualisation image par image montre la formation d'une "voûte virtuelle" instable, juste après la chute libre. L'augmentation du volume au voisinage de l'ouverture déclenche un processus d'affaissement latéral.



fig. IV.6 : Mode d'écoulement dans un essai à fond plat

- *Ecoulement stationnaire*: correspond à la phase où les déformations apparaissent d'une façon quasi-périodique. Les déplacements de la matière se font par bloc le long des lignes de glissement qui se produisent sous l'action de l'effet piston. Ils créent une perturbation instable des couches de cisaillement et ceci d'une manière cyclique induisant une onde de déplacement dont l'effet ne dépasse pas la zone inférieure du silo, vue l'absence de perturbations au delà de cette zone. Leur variation est plus importante dans le cas des écoulements dans des silos à parois lisses. Kamgueu (1979) aussi a fait état de l'existence d'une onde de dilatation qui monte au fur et à mesure que la surface libre descend avec l'augmentation de la porosité. Ce mécanisme disparaît et laisse place à un écoulement en cheminée symétrique avec la disparition de la hauteur de la zone piston.

Les mouvement latéraux du matériaux induisant des fluctuations des zones de localisations tendent à disparaître avec l'augmentation de l'inclinaison de la trémie. Cette présence favorise la chute libre et le glissement en masse des particules vers l'orifice de vidange.

Pour de faibles élancements, l'écoulement se fait, dès le début de l'essai, en cheminée.

IV. 5 Analyse paramétrique

IV. 5.1 Introduction

Nous présentons, dans ce paragraphe, les résultats obtenus de l'influence du frottement des parois, de l'ouverture de l'orifice de vidange, de la dimension des particules et de l'inclinaison de la trémie sur les valeurs moyennes du débit. Les essais traités sont formés d'empilements de matériau monodisperses à des élancements supérieurs à deux (h/b>2). Par la suite et grâce à l'utilisation de la technique du traitement d'images, nous avons déterminé pour les mêmes essais, les variations de l'indice des vides au cours d'écoulement, ainsi que l'évolution de la hauteur de la zone de transition qui correspond à la hauteur *maximum* contenant des déformations et des lignes de glissement du matériau. Elle est déterminée directement sur les images traitées. Les résultats sont présentés en fonction de la hauteur écoulée pour les différents frottements paroi-matériau considérés.

L'interdépendance des différents paramètres examinés ne permet pas d'en tenir compte de chacun séparément. L'analyse est présentée en considérant l'ensemble des paramètres.

IV. 5.2 Variation du débit, évaluation de la zone de transition

Nous avons présenté dans les figures IV.7 et 8 les variations du débit moyen en fonction respectivement du rapport diamètre des particule - ouverture de l'orifice de vidange et de la variation du frottement des parois.

La masse de matériau mesurée au cours d'écoulement présente un variation constante et reproductible en fonction du temps. Les variations du débit moyen en fonction de l'ouverture de l'orifice de vidange D (diminution du rapport d/D), pour les différents diamètres des particules, sont non linéaires. Ces résultats sont de même nature que ceux obtenus par Beverloo (1961) et Weisse (1988). L'augmentation de la rugosité des parois, par contre, induit un comportement différent en fonction de l'inclinaison de la trémie.

Pour un fond plat ($\alpha = 0$), les écoulement sont plus lents pour de faibles angles de frottements paroi-matériau ($\phi_p = 6^\circ$). La masse de matériau en amont de la zone de transition se déplace en piston sans déformation et exerce une charge équivalente sans grande contribution des parois à sa répartition (Abriak & al 1992). Ce comportement se manifeste par de grande variation de l'épaisseur de la zone de transition (fig. IV.10). L'augmentation du

frottement des parois réduit la charge sur la zone de transition et permet un écoulement plus rapide (augmentation du débit). Au delà d'un frottement limite fonction de la nature du matériau, on enregistre un nouveau ralentissement accompagné de perturbations plus importantes au niveau des parois. Cette valeur limite du frottement est plus importante pour les particules de forme elliptique (fig. IV.8). Les valeurs *maximum* de l'épaisseur de la zone de transition sont obtenues pour les valeurs limites du frottement qui correspondent à un *maximum* du débit (fig. IV.10).

Pour les écoulements avec trémie ($\alpha = 60^{\circ}$), le débit moyen enregistré diminue en fonction de l'augmentation de frottement des parois, indépendamment de la forme des particules testées. La masse du matériau est canalisée d'une façon symétrique vers l'orifice de vidange et évacuée en chute libre. L'inclinaison de la trémie ne permet pas la présence de zone morte. L'essentiel de la dilatance observée se produit, dans le cas des faibles frottement de paroi, en amont de l'orifice. Par contre, des lignes de glissement peuvent être observées même au delà de la limite supérieure de la trémie. L'étendue de la zone de transition est plus importante pour les particules de formes sphérique.



a : Rouleaux de P.V.C.

b : Billes de verre

Fig. IV.7 : Débit en fonction du rapport diamètre du grain ouverture



Fig. IV.8 : Débit en fonction du frottement paroi-matériau

a : B = 200 mm b : B = 300 mm

IV.5.3 Evaluation de l'indice des vides au cours d'écoulement

L'indice des vides au cours d'écoulement a été déterminé sur le matériau bidimensionnel monodisperse qui présente des caractéristiques géométriques connues. Ses variations ont été mesurées en fonction de l'ouverture de vidange, de la dimension et de la forme des grains, du frottement des parois et de l'inclinaison de la trémie. L'ensemble des graphes sont présentés en fonction de la hauteur écoulée du matériau. Chaque point des courbes tracées représente une photo analysée au traitement d'images.

Variation globale de l'indice des vides

-Influence de la dimension de D et de b :

La figure IV.9 regroupe les variations de l'indice des vides pour différentes ouvertures et dimensions des particules respectivement, pour des parois semi-rugueuses. L'augmentation des dimensions de l'orifice de vidange ne semble pas avoir une grande influence sur les valeurs de l'indice des vides. Les indices des vides moyens sont compris entre 0,18 et 0,20. Les essais de la figure IV.11b sont réalisés avec les mêmes données du dispositif (largeur *b*, ouverture de l'orifice *D*, frottement des parois ϕ_p) pour des particules de 3 et 6 mm respectivement. L'augmentation du diamètre des particules, pour la même largeur b, induit une légère variation de l'indice des vides. Les valeurs moyennes sont comprises entre la limite inférieure et supérieure des indices des vides théoriques.

L'accroissement des valeurs de l'indice des vides vers la fin de l'essai correspond au début de l'écoulement en cheminée.





b : Diamètre des particules.



-Influence du frottement des parois

Nous avons porté sur la figure IV.10 les variations de l'indice des vides et des zones de transitions en fonction du frottement des parois pour les particules de forme elliptique et circulaire respectivement.

L'indice des vides au cours d'écoulement des particules circulaires, dans le cas des essais à parois lisses et à fond plat ($\alpha = 0$), évolue rapidement vers une valeur moyenne de 0,2, malgré les fluctuations du début de l'essai, qui correspondent à des phases de forte dilatance du matériau. Pour les parois semi-rugueuses, l'évolution se fait d'une façon progressive au cours d'écoulement pour rejoindre la valeur moyenne de 0,2. Au delà de 10 cm de matériau écoulé, l'indice des vides des essais à parois rugueuses augmente rapidement pour atteindre une valeur supérieure à l'indice des vides *maximum*. A la variation des vides de la zone de transition s'ajoute les perturbations croissantes induites par le frottement le long des parois.

La zone de transition présente des fluctuations plus importantes pour les surfaces lisses qui s'atténuent avec l'augmentation du frottement. L'indice des vides est indépendant des variations de cette zone de transition.

Le même phénomène est observé, dans le cas des particules elliptiques (fig. IV.10b), avec des valeurs moyennes de l'indice des vides supérieures à celles obtenues avec l'écoulement des particules circulaires, pour les mêmes valeurs du frottement des parois. L'indice des vides initial mesuré est légèrement inférieur que dans le cas des particules circulaires. Les variations de la zone de transition n'affiche pas de grande différence pour les variations du frottement des parois considéré.

- Influence de l'inclinaison de la trémie

La présence de la trémie inclinée à un angle suffisamment grand induit un mode d'écoulement différent par rapport aux essais à fond plat. L'essentiel des variations de volume se produisent en amont de l'orifice de vidange par chute libre du matériau. Les variations de l'indice des vides global, déterminé pour une inclinaison de la trémie de 60°, sont légèrement inférieures à celles obtenues pour les essais à fond plat (fig. IV.11b). Contrairement au cas précédent, Les variations obtenues pour les parois rugueuses ne dépassent pas la valeur *maximum* de l'indice des vides.



Fig. IV.10 : Variation de l'indice des vides en fonction du frottement des parois. a: Particules circulaires (d =3 mm) b : Particules elliptiques (d = [2-2,5] mm)



Fig. IV.11 : Indice des vides en fonction de l'inclinaison de la trémie (d = 3 mm)

Variation locale de l'indice des vides

Les mesures des variations locales correspondent à la somme des vides laissés par la masse du matériau écoulée. Il ne s'agit pas d'une mesure ponctuelle de l'indice des vides dans une partie de l'échantillon, mais de la réaction de la totalité de l'échantillon aux vides laissés par le matériau écoulé. Contrairement au cas précédent, cette mesure ne tient pas compte de la totalité du volume de l'échantillon. Elle détermine le taux d'occupation des vides libérés par le matériau. Elle constitue un bon indicateur de la répartition des micro-vides dans l'échantillon. Le matériau occupera plus d'espace quand les vides se répartissent sur une grande surface (volume) de l'échantillon. Il se manifeste par des variations locales de l'indice des vides faibles qui correspond dans ce cas à une chute de la densité du matériau. Par ailleurs, la localisation de la totalité des variations des vides dans la zone de chute libre ou dans une partie du silo se manifeste par de grandes variations locales de l'indice des vides. Seul une petite partie se dilate pour permettre le déplacement compacte de la totalité de l'échantillon. Dans ce cas, la densité du matériau varie peu.

Dans le cas des essais à parois lisses, les déformations et les variations de volume sont localisées dans la zone de transition. La figure IV.12 présente la comparaison des résultats obtenus sur les deux indices des vides ainsi définis. Les grandes fluctuations des valeurs de l'indice des vides local met en évidence le caractère cyclique de l'écoulement, alternant entre les phases de glissement de la masse supérieure sans variation de volume (points *maximum*) et des phases de dilatance ralentissant le glissement en bloc du matériau en amont (points *minimum*). Par contre, nous n'avons pas observé de correspondance entre ces fluctuations et celles de la zone de transition.

Dans le cas des essais à surfaces rugueuses, au fur et à mesure que l'écoulement avance, les variations tendent à diminuer de leur importance et présentent des valeurs inférieures à l'indice des vides global. Le frottement des parois assure la répartition des vides sur une grande partie de l'échantillon. Il est de même pour les essais à parois semi-rugueuses où l'on peut remarquer un juste équilibre dans la répartition des vides.

On notera, par ailleurs, un résultat similaire obtenu par Brown & Richard (1970) sur des écoulements de billes de roulement formé d'un seul diamètre (fig. IV.13). Ils obtiennent d'importantes fluctuations au cours d'écoulement. Il mesure les variations de l'indice des vides par comptage des billes sur une surface constante de la partie inférieure du silo. Ces mesures sont effectuées sur des photos prises à une vitesse de 500 images /seconde. Cette mesure est

équivalente à la notre, dans le cas où toutes les variations de l'indices des vides sont contenues



dans la partie filmée de l'écoulement.



a b



¢



b : Paroi semi-rugueuse

c : Paroi rugueuse

Fig. IV.12 : Variations locales de l'indice des vides en fonction du frottement des parois



Matériau : Billes de roulement Fig. IV. 13 : Variation de l'indice des vides (Brown & Richard 1970). Obtenu sur la moitié inférieure du silo

Les mesures des variations des vides ont été effectuées sur des empilements de rouleaux de P.V.C. monodisperses ordonnés. L'indice des vides mesuré, au cours de l'écoulement, semble être sensible à la forme des particules, à la rugosité des parois et à un degré moindre à l'inclinaison de la trémie. Il tend vers une valeur moyenne constante. Il correspond au vide nécessaire pour permettre les déplacements du matériau sous les conditions aux limites imposées. Pour les parois lisses et semi-rugueuses, l'indice des vides tend vers une valeur moyenne égale à 0,2.

D'un autre coté, les essais réalisés sur le biaxial par Biarez *et al* (1992), sur un matériau de même forme circulaire mais de diamètre et de nature différentes, présentent en grande déformation un indice des vides voisin de 0,2. Il correspond à une compacité équivalente à celle obtenue par Bideau (voir Biarez & al 1992) sur des empilements désordonnés. Ils comparent cet indice des vides à l'indice des vides critique obtenu en plasticité parfaite.

Dans les essais d'écoulement, la plupart des déformations sont localisées dans la partie inférieure du silo

IV. 6 Conclusion

L'écoulement des matériaux granulaires présente un processus de déformation complexe. L'adaptation des techniques du traitement d'images associée à l'utilisation d'un matériau bidimensionnel a permis le suivis détaillé du processus d'écoulement et de se rendre compte de son évolution en fonction des conditions aux limites imposées.

L'écoulement des matériaux granulaires se produit par glissement du matériaux en blocs sur des lignes localisées, suivant un processus cyclique et non périodique. Il peut être examiné à travers l'analyse des variations locales de l'indice des vides en fonction de la vidange du matériau. Ses fluctuations indiquent l'état globale du matériau et ses réactions. Ces variations font état de suite de dilatance et de contractance du matériau, alors que le débit mesuré à la sortie reste constant au cours d'écoulement. Mais il présente des variations en fonction de la forme du matériau et de la rugosité des parois.

L'analyse de l'indice des vides met en évidence la criticalité du processus de déformation. Il montre une évolution globale stable caractérisée par une valeur moyenne constante. Elle est fonction des conditions aux limites. La valeur moyenne de 0,2, obtenue pour les faibles frottements des parois, correspond à la valeur des empilements désordonnés en grandes déformations.

La déformation "macroscopique" enregistrée représente l'ensembles des microglissements formés de déplacements et de rotations des grains. Elle nécessite une scission critique localement pour débloquer le mouvement des grains. Le même principe est observé sur les métaux (Loi de Schmidt). CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

- Rappel des objectifs

Ce travail avait pour but l'étude du comportement des matériaux granulaires pour des chargement quasi statique ou en écoulement. Compte tenu du manque de données expérimentales, une partie importante a été consacrée à la réalisation des essais.

- Travail effectué

Le présent travail s'inscrit dans le cadre des recherches actuellement en cours pour la modélisation expérimentale du comportement des matériaux granulaires en général et des matériaux ensilés en particulier. L'analyse effectuée a permis de dégager une démarche basée sur :

- l'adaptation et le développement de méthodes de mesure, à la fois, à l'échelle du grain et à l'échelle continue.
- la caractérisation du comportement intrinsèque des matériaux testés

Le travail effectué comporte 4 parties :

- Caractérisation du frottement de contact et mise au point du mode opératoire;
- Adaptation des techniques du traitement d'images à l'acquisition et à l'analyse des essais de cisaillement et des écoulements;
- Analyse des essais de cisaillement à l'échelle du grain;
- Analyse du comportement des matériaux en écoulement.

- Résultats obtenus

Les principaux résultats obtenus sont résumés en quelques points :

Les matériaux en vrac présentent des différences de comportement fonction de leur nature, des données morphométriques et des conditions de charges. Le frottement intergranulaire peut être défini par l'angle de glissement bloc-bloc à surface lisse. Il présente un caractère intrinsèque fonction de la nature du matériau et indépendant de l'échelle de mesure, malgré l'amplitude des dispersions dues essentiellement à la microtopologie. Par ailleurs, la caractérisation du comportement des matériaux par l'analyse des fluctuations montre la diversité de la réponse des systèmes considérés. Ce phénomène peut être attribué à l'existence de paramètres cachés.

Les essais de cisaillement du matériau analogique montrent qu'à l'échelle microscopique, les particules peuvent présenter des déformations en plus de leurs mouvements de glissement et de rotation. Le volume (surface) représentatif élémentaire est défini pour une valeur du rapport LD (longueur d'échantillon/diamètre du plus gros grain) égale à 30 qui est 3 fois supérieure à la valeur définie au repos. Dans ce cas, la déformation globale représente la somme des glissements et rotations des particules sous l'effet du système de force et du réarrangement. Ce dernier est fonction du frottement intergranulaire, des états de surfaces et de la liberté de mouvement des grains.

Dans les essais de cisaillement direct, les rotations enregistrées présentent une moyenne voisine de zéro pour d'importantes rotations des particules. La rotation locale présente un degré de liberté supplémentaire dans la cinématique du matériau, d'où une moindre dissipation d'énergie par rapport aux milieux continus.

L'analyse de l'écoulement des matériaux granulaires sous gravité montre un processus de déformations dominé par la présence de lignes de glissement localisées. Il représente la somme des déformations des surfaces (volumes) élémentaires composées des micro-glissements formés de déplacements et de rotations des particules.

L'écoulement se produit à un indice des vides moyen constant et fonction du frottement des parois, de la forme des particules et de l'angle d'inclinaison de la trémie. L'augmentation du frottement des parois favorise le développement d'une zone de perturbation équivalente à la couche limite observée dans les liquides. L'utilisation des variations locales de l'indice des vides permet de rendre compte du mode d'écoulement et de la variation de la densité locale au cours d'écoulement.

Ce travail a permis, par la superposition des échelles, de comprendre une partie du déroulement du processus de déformation des matériaux granulaires et de dégager des résultats qui nous permettent d'envisager le développement d'une modélisation du comportement.

BIBLIOGRAPHIE

•

 \gtrsim

- *Abriak N. E. (1991)* "Ecoulement d'un matériau granulaire à travers un orifice : Effet de parois"- Thèse de Doctorat de Mécanique, Université des Sciences et Technologie de Lille.
- Abriak N. E., Gourves R. (1992) "Ecoulement d'un matériau granulaire à travers un orifice" Rev. Franç. de Géotech., nº 61, pp 47-61.
- Abriak N. E., Parsy F. (1993) -"Etude d'un matériau granulaire. Passage du milieu discontinu au milieu continu : Approche expérimentale"- Rev. Franç. Géotech., n° 65, pp 29-35.
- *Ahmadi G. (1983)* -"A generalized continum theory for flow of granular materials"-Trans. Tech. Publications, vol. 2, pp 497-527.
- Ammi M. (1987) "Analyse de quelques propriétés de milieux granulaires modèles" Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes I, Spécialité: Physique, soutenue le
 18 Décembre 1987.
- *Aouichat M. (1988)* "Approche quasi-statique discrète de l'écoulementgravitaire des matériaux granulaires"- Thèse de Doctorat soutenue à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Juillet 1988.
- Aribert J.M., Ragneau E. (1989) "Modèle numérique par éléments finis pour le calcul des actions de la matière ensilée sur les parois."- Construction métallique, n° 2
- Astier R. (1983) "Milieux granulaires: approche probabiliste des états de contraintes ét de déformations sur modèle analogique"- Thèse de Docteur-Ingénieur, soutenue le 14 Décembre à l'Université de Clermont II.
- Azimi (1976) "Contribution à l'étude géologique et géotechnique des glacis d'accumulation en Iran"- Thèse de Doctorat, Université de Grenoble

- Bagnold R.A. (1954) "Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a Newton fluid under shear"- Proc. R. Soc. Lond. Ser. A,225, pp 49-63.
- Baklouti M., Laurent A. (1995) "Sécurité des stockages de matériaux en grains-Influence de la conductivité thermique"- Récents progès en Génie des Procédés, GFGP, Vol. 9, n° 42, pp 153-158.
- **Bathurst J. R. (1985)** -"A study of stress and anisotropy in idealised granular assemblies"- Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Queen's University at Kingston, Ontario, Canada, Octobre 1985.

- Beverloo W. A., Leniger H. A., Van de Velde J. (1961) -"The flow of granular solids through orifices"- Chemical Engineering Science, Vol. 15, pp 260-269.
- *Biarez J. (1962)* "Contribution à l'étude des propriérés mécaniques des sols et de matériaux pulvérulents, Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences, Grenoble.
- Biarez J., Evesque P., Meftah W. (1992) "De l'ordre au 'desordre'"- Rapport du Greco-Géomatériaux, pp 718-726
- Biarez J., Favre J.L., Hicher P.Y., Rahma A. (1989a) -"correlations for granular media, classification logic and connections between classes"- Powders and grains, Proceedings of the international conference on micromechanics of granular media, Clermont-Ferrand, Biarez & Gourves Ed, pp 201-209.
- Biarez J., Fleureau J.M., Indarto Taibi S. & Zerhouni M. I. (1989b) -"Influence of water negative pore pressure on the flow of granular materials in silos"- Powders and grains, Proceedings of the international conference on micromechanics of granular media, Clermont-Ferrand, Biarez & Gourves Ed, pp 385-392.
- *Biarez J., Hicher P. Y. (1990)* -"Lois de comportement des sols remaniés et des matériaux granulaires"- Tome 1 : Approche expérimentale, 3e édition, Ecole Centrale des Arts et Métiers de Paris, 150 p.
- Biarez J., Hicher P. Y. (1994) "Elementary mechanics of soil behaviour, saturated remoulded soils"- Balkema Ed. Rotterdam, 200 p.
- Biarez J., Wiendeck K. (1963) "La comparaison qualitative entre l'anisotropie mécanique et l'anisotropie de structure des milieux pulvérulent"- C. R. Acad. Sci. 256, pp 1217-
- Bishara A.S., Mahmoud M.H. (1977) -"Finite element formulation for farm silo analysis"- Journal of the structural division"-
- Blight G.E. (1986) -"Pressures exerted by materials stored in silo: part I, coarse materials"- Géotechnique, Vol. 36, n° 1, pp 33-46.
- Bouchend'homme (S. (1993) -"Efforts sur les parois d'un silo conique rempli de matière granulaire- Etude théorique et expérimentale"- Thèse de Doctorat de l'Univers. de Poitiers, Spécialité : Génie-Civil, soutenue le 28 Mai 1993.
- Bowden F. P. & Tabor D. (1954) -"Friction and lubrication of solids"- The University press, Oxford,
- Bransby P. L. & Blair-Fish P. M. (1975) -" Initial deformations during mass flow from a bunker: Observations and idealisations, Powder Technology, 11, pp 273-288.
- Bransby P., Blair-Fish P.M. (1974) -"Wall stress in mass-flow bunkers"- Chemical Enginneing Science, Vol. 29, pp 1061-1074.
- Brown R. L., Richards J. C. (1965) -"Kinematics of the flow of dry powders and bulk solids"- Rheol. Acta., 4, pp 153-165.
- Brown R. L., Richards J. C. (1970) -"Principes of powder mechanics"- Pergamon Press, Oxford, First ed., p 221.

Byerlee J. D. (1970) - "The mechanics of stick-slip"- Techtonophysics, n° 9, pp 475-486.

×

- Cambou B, Dubujet P., Emeriault F. & Sidoroff F. (1995) "Homogenization for granular materials"- Eur. J. of Mech., A/Solids, Vol. 14, n°2, pp 255-276.
- *Cambou B. (1972)* "Compressibilité d'un milieu pulvérulent, influence de la forme et de la dimension des particules sur les propriétés mécaniques d'un milieu pulvérulent"- Thèse de 3ème cycle, Grenoble
- Cambou B. (1979) "Approche du comportement d'un sol considéré comme un milieu non continu"- Thède de Doctorat d'Etat ès-Sciences, Univer. Claude Bernard -Lyon, présentée le 19 Mars 1979.
- Cambou B. (1981) "Analyses du comportement des milieux granulaires basées sur leur nature discontinue"- R.F.G. n°14, pp 3-23.
- *Cambou B. (1985a)* -"Les micromécanismes de déformations plastiques dans les sols granulaires"- R. F. G.,n°31, pp 39-51.
- *Cambou B., Sidoroff F. (1985b)* "Description de l'état d'un matériau granulaire par variables internes statiques à partir d'une approche discrète"- J. Mech.Théor. App. vol. 4, n°2, pp 223-242.
- Caquot A., Kerisel J. (1966) "Traité de mécanique des sols"- 4ème édition, Paris, Gauthier-Villars, p 506
- *Chang C. et Misra A. (1989)* "Theoretical and experimental study of regular packings of granules"- Journal of Engineering Mechanics, vol. 115, n° 4, pp 704720.
- *Chang C., Ma L. (1990)* -"Modeling of discrete granulates as micropola continua"-Journal of Engineering Mechanics, vol. 116, n° 12, pp 2703-2721.
- Chang C., Ma L. (1992) -"Elastic material constants for isotropic granular solids with particle rotation"- J. Solids Structures, vol. 29, n° 8, pp 1001-1018.
- Chapuis R. P. (1976) "De la structure géométrique des milieux granulaires en relation avec leur comportement mécanique" - Thèse de Docrorat ès Sciences Appliquées, Montréal, Novembre 1976
- Clayton C. R. I., Bica A. V. D. & Moore S. R. (1994) "A resin impregnation technique for the determination of the density variations in completed specimens dry cohesionnless soil"- Géotechnique, Vol. 44, n° 1, pp 165-173.
- Cundall P. A., Strack O. D. L. (1979) -"A discret numerical model for granular assemblies"- Geotechnique 29, n°1, pp 47-65.
- Cutress J. O., Pulfer R. F. (1967) -" X-Ray investigations of flowing powders"-Powder Technology, Vol. 1, pp 213-220.

- **Dantu P. (1957)** -"Contribution à l'étude mécanique et géométrique des milieux pulvérulents"- Proceedings of the 4th ICSMFE, Londres, Vol. 1, pp 144-148.
- **De Jaeger J. (1991)** -"Influence de la morphologie des sables sur leur comportement mécanique"- Thèse de Doctorat ès Sciences Appliquées, Louvain-la-Neuve
- *de Josselin de Jong G., Verruijt A. (1969)* -"Etude photo-élastique d'un empilement de disque"- Can. Grpe Etude Rheol., n° 2, pp 73-86
- **Desrues J. (1984)** -"La localisation de la déformation dans les matériaux granulaires"-Thèse de Doctorat ès Sciences, USMG & INPG, Grenoble.
- Deutsch G. P., Schmidt L. C. (1969) -"Pressures on dilo walls"- J. Eng. for Industry, Trans. ASME, pp 450-459.
- Drescher A., de Josselin de Yong G. (1972) -"Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material"- J. Mech. Physics of Solids, 20, pp 337-351.
- Drücker D. C. & Prager W. (1952) "Soil mechanics and plastic analysis or limit design"- Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, pp 157-165.
- Drücker D. C. & Providence R. I. (1954) "Coulomb friction, plasticity and limit loads"- Journal of Applied Mechanics, pp 71-74.

X

Evesque P., Meftah W. & Biarez J. (1993) -"Mise en évidence de variations brutales et d'évolutions quasi discontinues dans les courbes contrainte-déformation d'un milieu granulaire bi-dimensionnel de rouleaux"- C. R. Acad. SCi. Paris, T. 316, série II, pp 321-327.

- Faugeras (1979) "L'essai de compressibilité des sols au pénetromètre statique et son interprétation sur modèle analogique"- Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, spécialité : Génie-Civil, Soutenue le 25 Septembre.
- Favre J. L. (1980) "Milieu continu- milieu discontinu: Mesure statistique indirecte des paramètres rhéologiques et approche probabiliste de la sécurité"- Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, de l'Université Pierre et Marie-Curie, Paris 6, Spécialité : Physique
- *Field W. G. (1963)* -"Towards the statistical definition of a granular mass"- 4th Auctralia-New-Zeeland Conference on Soil Mechanics and Foundation, Adelaïde, pp 143-148.
- *Frossard E. (1978)* "Caractérisation pétrographique et propriétés mécaniques des sables"- Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre et Marie-Curie, Paris 6.

Frossard E. (1979) -"Effect of sand grain shape on interparticle friction; indirect measurement by Rowe's stress dilatancy theory"- Géotechnique 29, n° 3, pp 341-350.

X

- Ganiou F. & Abriak N.E. (1993) -"Shear test and microscopic approach of granular material by image analysis"- Powders and Grains, Thornton Ed., pp 441-442.
- Ganiou F. (1994) "Etude de la localisation des déformations dans les matériaux granulaires par traitement d'images"- Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université de Lille.
- Gourves R., Faugeras J-C (1980) "Mesure des contraintes au sein d'un massif analogique de Schneebeli"- Revue Franç. Géotec. nº 11.
- Gourves R., Mezghani F. (1988) "Micromécanique des milieux granulaires, approche expérimentale utilisant le modèle de Schneebeli"- Rev. Franç. Geotech., n° 42, pp 11-25.

- Habib P. (1974) -"Scale effects for shallow footings on dense sand"- Proc. ASCE, gt 1, pp 95-99.
- Haff P.K. (1983) "Grain flow as fluid mechanical phenomenon"- J. Fluid. Mech., vol. 134, pp 401-430.
- Hammad W. I. (1991) "Modélisation non linéaire et étude expérimentale des bandes de cisaillement dans les sables"- Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble I.
- Hardin B. O. (1978) -"The nature of stress-strain behavior for soils"- ASCE geotechnical engineering division SPEC conf. earthquake engineering and soil dynamics, Pasadena, pp 3-90.
- Harmens A. (1963) -"Flow of granular material through horizontal apertures"-Chemical Engineering Science, Vol. 18, pp 297-306.
- Harr M. E. (1981) -"Mécanique des milieux formés de grains"- Ed. Presses Polytechnique Romandes, Lausanne, p514
- Haüssler & Eibl (1984) -"Numerical investigation on discharging silos"- ASCE SM, Vol. 6,
- Horn H. M., Deere M. S. (1962) "Frictional characteristics of minerals"- Géotechnique 12, pp 319-335.
- Horne M. R. (1965) "The behaviour of an assembly of rotund, rigid, cohesionless particles : part I & II"- Proc. Roy. Soc. serie A, Vol. 286, pp 62-97.
- Horne M.R. (1969) -" The behaviour of an assembly of rotund, rigid, cohesionless particles : part III"- Proc. Roy. Soc. serie A, Vol. 310, pp 21-34.

Huet (1980) - "Remarques sur la procedure d'assimilation d'un matériau hétérogène à un milieu continu équivalent"- Comportement rhéologiques et structure des matériaux, C. R. 15ème Coll. G. F. R., Paris, pp 231-245.

- Jaeger J. C. (1971) "Friction of rocks and stability of rock slopes"- Géotechnique, Vol. 21, n° 2, pp 97-134.
- Jenike A. W. (1961) -" Gravity flow of bulk solids"- Bulletin 108, Utah Eng. Exper. Station, University of Utah
- Jenike A. W. (1964) -"Storage and flow of solids"- Bulletin 123, Utah Eng. Exper. Station, University of Utah
- Jenike A. W. (1987) "A theory of flow of particulate solids in converging and diverging channels based on conical yield function"- Powder Technology, 50, pp 229-236.

- *Kamgueu V. (1979)* "Contribution à l'étude de l'écoulement gravitaire des matériaux pulvérulents ensilés"- Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INSA de Rennes, spécialité : Génie-Civil, soutenue le 5 Juin 1979.
- *Khati S. (1991)* "Comportement des poudres chimiques sous l'effet de la température et de l'humidité relative"- Memoire de D. E. A. en Génie-Civil, Ecole Centrale de Lille, Octobre 1991, 63p.
- *Khelil A. (1989)* -"Etude des champs de vitesses et de contraintes dans les silos métalliques"- Thèse de Doctorat de l'INPL de Nancy
- *Khelil A., Roth J. C. (1989)* -"Theoretical and experimental studies of stresses in full scale silos at the Chartres experimental base"- Powders and Grains, Clermont-Ferrand, pp 453-460.
- *Khelil A., Roth J. C. (1990)* "Spécification des charges et des écoulements dans les silos métalliques"- Rev. Franç. Géotech., n° 52, pp 11-25.
- Kirkpatrick W. M. (1965) -"Effects of grain size and granding on the shearing behaviour of granular materials"- C. R. 6ème Cong. Int. Méch. Sols Fond., Montreal, Vol. 2,
- *Kmita J. (1991)* -"An experimental analysis of internal silo loads"- Bulk solids handling, Vol. 11, n° 2, pp 459-468.
- Koerner R. M. (1970) "Effect of particle characteristics on soil strenght"- Proc. ASCE, SM 4, Vol. 96, pp 1221-1234
- Kotchanova I.I. (1970/71) -"Experimental and theoretical investigations on the discharge of granular materials from bins"- Powder Technology, Vol. 4, pp 32-37.

X

X

L. P. C. (1987) - "Essai de cisaillement à la boite" - Méthode d'essai LPC, nº 21, Fevrier

- Lambe T. W., Whitman R. V. (1969) -"Soil mechanics"- John Wiley & Sons Ed., New York, p 553.
- Lateb G., Biarez J., Evesque P. (1995) "Aspect fluctuant d'un matériau granulaire"-Actes du 12e Congrès Français de Mécanique, Strasbourg 4 au 8 Sept., Vol. 4, pp 237-240
- Lee J., Cowin S. C., Templeton J. S. (1974) -"An experimental study of the kinematics of flow through hoppers"- Trans. of the Society of Rheology, Vol. 18, n° 2, pp 247-269
- Lee K. L. & Seed H. B. (1967) "Drained strenght characteristics of sand"- J. of the soil Mechanics and Foundation Division, A.S.C.E., Vol. 93, SM 6
- Lenczner D. (1966) -" Cohesive arching of bulk materials in bunkers and silos"- Civil. Eng. And public works review, Transactions of the ASME, pp 13-16
- *Litwiniszyn J. (1963)* -"The model of a random walk of particles adapted to researches on problemes of mechanics of loose media"-Bulletin de L'academie Polonaise des sciences, Ser. Sc. Tech., vol XI, n°10.
- Lorig L., Gibson W., Alvial J., Cuevas J. (1995) -"Gravity flow simulations with the particle flow code (PFC)" News Journal, ISRM, Vol. 3, n° 1, pp 18-24.
- Luong M. P. (1978) "Etat caractéristique d'un sol"- C. R. Acad. Sci., 287, B, pp 305-307.
- Luong M. P. (1980) -"Phénomènes cycliques dans les sols pulvérulents"- Revue Française de Geotechnique, n° 10, pp 39-53
- Luong M. P. (1993) -"Arching characterisation of particulate solids"- The reliable flow of particulate solids II, Proceedings EFChE Publication serie n° 96, Oslo, 23-25 August, pp 61-74.
- Luong M.P. (1986) -"Simulation des forces de masses"- Annales ITBTP 442, Essais et mesures 204, pp 11-122
- Luong M.P. (1989) "Rhéologie des grains agro-alimentaires ensilés"- Construction métallique, n° 2, pp 81-89.
- Luong M.P. (1990) "Coulabilité des matériaux agro-alimentaires"- Rev. Franç. Geotech., n° 52, pp 37-4

X

Ma D. & Ahmadi G. (1988) -"A kinematic model for rapid granular flows of nearly elastic particles including interstitial fluid effects"- Powder Technology, 56, pp 191-207.

- Mandel J. (1962) "Essais sur modèles réduits en mécanique des terrains, étude des conditions de similitude"- Revue de l'industrie Minérale, Vol. 44, n° 9, pp 611-620
- Mandel J. (1974) -"Introduction à la mécanique des milieux continus déformables"-Académie Polonaise des Sciences, Editions Scientifiques de Pologne, Varsovie, p 215.
- *Matsuoka H. (1974)* -"A microscopic study on shear mechanism of granular materials"-Soil and Foundation, Vol. 14 n° 1, pp. 29-43.
- Mc Cabe R. P. (1974) "Flow patterns in granular material in circular silos"-Geotechnique 1, p 74.
- Meftah W., Evesque P., Biarez J., Sornette D. & Abriak N.E. (1993) -"Evidence of local 'seisms' of microscopic and macroscopic stress fluctuations during the deformation of a packing of grains"- Powders & Grains 93, Ed. Thornton, pp 173-178.
- Michalowski R. L. (1984) "Flow of granular materials through a plane hopper"-Powder Technology, Vol. 39, pp 29-40.
- Michalowski R. L. (1987) -"Flow of granula media through a plane parallel / converging bunker"- Chemical Engineering Science, Vol. 42, n° 11, pp 2587-2596.
- *Michalowski R. L. (1989)* -"Periodic patterns of granular flow trough a plane container"- 3e International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Niagarafalls, pp 305-310.
- Michalowski R. L. (1990) -"Strain localisation and periodic fluctuations in granular flow processes from hoppers"- Geotechnique 40; n°3 pp 389-403
- Mindlin H. D., Deresiewicz H. (1953) -"Elastic spheres in contact under varying oblique forces"- J. Appl. Mech., Trans. ASME, Vol. 75, pp 327-
- Mindlin H. D., Mason W.P., Osmer T.F. & Deresiewicz H. (1951) -"Effects of an oscillating tangential force on the contact surfaces of elastic spheres"- Proc. 1st Nat. Cong. Appl. Mech., Chicago, pp 203-208.
- *Mitchell J. K. (1993)* -" Fundamentals of soil behavior"- Second ed., John Wiley and Sons Ed., U.S.A., 426p.
- *Moroto N. (1988)* -" Some Considerations on shearing resistance angles of sands"-Micromechanics of granular materials, edited by M. Sakate and J.T. Jenkins, Elsevier Science publishers, Amsterdam, 1988, pp 47-54.
- Müllins W.W. (1972) -"Stochastic theory of particle flow under gravity"- J. Appl. Phys., Vol. 43, n° 2, pp. 665-678.
- Munch-Andersen J. & Nielsen J. (1986) -"Size effects in slender grain silos"- Bulk Solids Handling, Vol. 6, pp 885-889.

- Munch-Andersen J. & Nielsen J. (1989) "The internal pressures in the outlet zone and the transition zone of a silo"- Third Interna. Conf. on bulk materials, storage, handling and transp., Newcastle 27-29 June, pp 235-239.
- *Muruyama S. (1977)* -"Constitutive equation of particulate material in the plastic state"-Proc. 9th ICSMFE, specialty session 9, pp 175-

X

- Nascimento U. (1977) -"Goniometer for determining interpartivle friction"- 9th ICSMFE, Tokyo, pp 229-233.
- Nedderman R. M., Tüzun U. (1979) "A kinematic model for the flow of granular materials"- Powder Tech., 22, p 243.
- Negussey D., Wijewickreme W. K. D. & Vaid Y. P. (1988) "Constant-volume friction angle of granular materials"- Can. Geotech. J. 25, pp 50-55.
- Newland P. L. & Allely B. H. (1957) -"Volume changes in drained triaxial tests on granular materials"- Géotechnique, vol. 7, n° 4, pp 17-34.
- Nielsen J., Askegaard V. (1977) -"Scale errors in model tests on granular media with special reference to silo models"- Powder and Technology, vol. 16, pp 123-130.

X

- Oda M. (1977) -"Co-ordination number and its relation to shear strengh of granular material"- Soils and foundations, vol. 17, n° 2, pp 29-42.
- *Oda M., Konishi J. & Nemat-Nasser S. (1982)* -"Experimental micromechanical evaluation of strength of granular materials : Effects of particle rolling"-Mechanics of Materials, Vol. 1, pp 269-283.
- *Oda M., Konishi J. (1974)* -"Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear"- Soils and foundations 14 n° 4, pp. 25-38.
- Oyenuga D. A., Tisot J. P. (1989) -" Looking for an intrinsic key for sands"- Powders and Grains, Proc. ICMGM, Clermont-Ferrand, Balkema Ed., pp 171-175.
- *Oyenuga O. (1989)* "Comportement de l'interface sol pulvérulent / acier"- Thèse de Doctorat de l'I.N.P.L., soutenue le 13 Juin 1989.

X

PC-Scope (1989) - "Manuel d'utilisation" - I2S, 150p.

- Penman A. D. M. (1953) "Shear characteristics of saturated silt measured in triaxial compression"- Géotechnique, Vol. 3, pp 312-328.
- **Procter D. C. (1974)** -"An upper bound value for of in the stress-dilatancy equation"-Géotechnique, vol. 24, n° 3, pp 269-288.
- Procter D. C., Barton R. R. (1974) -"Measurements of the angle of interparticle friction"- Géotechnique, Vol. 24, n° 4, pp 581-604.

- Ragneau E. & Aribert J.M. (1992) -"Solutions analytiques à divers ordres d'approximations pour le calcul des actions dans les silos cylindriques en phase de remplissage"- Construction Métallique, n° 1, pp 23-42
- Ranaivosson D. (1991) -" Dosage des granulats : étude des phénomènes d'écoulement et de voûte. Application à la conception des trémies doseuses"- Etudes et Recherches des L P C, série Géotechnique GT 46, 282p

Richmond O. (1963) -" Gravity hopper design"- Mech. Eng.; Vol. 85, p 46

Riley N. A. (1941) - "Projection sphericity" - J. Sedim. Petrol., Vol. 11, pp 94-97

- Rohani S. Y. (1995) "Simulation numérique du comportement des matériaux granulaires"- Thèse de Doctorat de l'Université de Metz, Spécialité : Mécanique, Option : Génie-Civil, soutenue le 12 Juillet 1995.
- *Rombach G., Eibl J. (1988)* -"Consistent modellind of filling and discharging processes in silo"- Silos Forschung und Praxis, Universitat Karlsruhe, pp 1-15.
- Roscoe K. H., Schofield A. N., Wroth C. P. (1958) -"On yielding of soils"-Géotechnique, Vol. 8, pp 22-53.
- *Rowe (P. W. (1962)* "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact"- Proc. Roy. Soc. A, Vol. 269, pp 500-527
- **Rowe P.W. (1969)** -"The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plain strain and direct shear"- Géotechnique, Vol. 19, n° 1, pp. 75-86.
- Rowe P.W. (1971) -"Theortical meaning and observed values of deformation parameters for soil"- Proc. Roscoe Symp. Stress-Strain Behaviour of Soils, Cambridge Univ. pp. 143-194.
- **Runesson K., Nillson L. (1986)** -"Finite element modeling of the gravitational flow of granular material"- Bulk solid handling, vol. 5, n°5, pp

R

- Sakaguchi H. & Ozaki E. (1993) "Analysis of the formation of arches plugging the flow of granular material"- Powders and Grains, Thornton Ed., pp 351-356.
- Sander M. (1992) "Pratique de la mesure d'état de surface" Feinprüf Perthen GmbH
- Satake M. (1993) -"Discrete-mechanical approch to granular media"- Powders and Grains, Thornton Ed., pp 3-9..
- Savage S. B. (1979) "Gravity flow of cohesionles granular materials in chutes and channels"- J. Fluid. Mech., vol. 92, pp 53-96.
- Savage S.B., Sayed M. (1980) -"Experiments on dry cohesionnless material in an annular cell at high strain rates"- Euromech. 133, statics dynamics of granular materials, Oxford Univ.

- Scarpelli G., Wood D. M., (1982) -"Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests"- Proc. IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials, Delft, pp. 473-484, Rotterdam, Balkema.
- Schlosser F. (1974) -"Influence des déformations des grains dans les milieux granulaires"- Bull. Liason Lab. P. et Ch., n° 69, pp 97-103, janv.fev.
- Schneebeli G. (1956) -"Une analogie mécanique pour les terres sans cohesion"-Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Tome 243, 125, Paris.
- Schofield A. N, Wroth C. P. (1968) -"Critical state soil mechanics"- McGraw-Hill Ed., London, p 310
- Sekanoor K. Sadasivan & Vegesna S. Raju (1977) -" Theory for shear strength of granular materilas"- J. of the Geotech. Eng. Div., ASCE,, Vol. 103, n° GT8, pp 851-861.
- Sid M., Weber J. D., Roth J. C. (1995) -"Dynamique des milieux granulaires et similitude de Froude"- Actes du 12e Congrès Français de Mécanique, Strasbourg 4 au 8 Sept., Vol. 1, pp 429-432
- Skempton A. W. & Bishop A. W. (1950) -"Measurement of shear strength of soils. Discussion by A. W. Bishop"- Geotechnique, Vol. 2, n° 2, p 113
- Skinner A. E. (1969) "A note on the influence of interparticle friction on the shearing strengh of a random assembly of spherical particles"- Géotechnique 19, nº 1, pp 150-157.
- Sokol L. (1984) "Bin loads in vertical silos" Int. J. of BulkSolids in Silos, Vol. 1, nº 1
- **Song Y. (1989)** -"Influence de l'angularité des granulats sur les caractéristiques rhéologiques des milieux granulaires non liés"- Thèse de Doctorat en Génie-Civil soutenue le 28 Sept. à l'Institut National Polytechnique de Lorraine.

Szechy K. (1970) - "Traité de construction de tunnels"- Dunod Ed., Paris, 701p

X

- ter Borg L. (1982) -"Evaluation of shear test results on bulk solids in chimical industry"- Ger. Cem. Eng. 5, pp 59-63.
- Terzaghi K. Richard F. E. (1952) "Stress in rock about cavities" Geotechnique, pp 57-90.
- Terzaghi K., Peck R. B. (1965) "Mécanique des sols appliquée" Dunod Ed., Paris, 565p
- *Tschebotariof G. P., Helch J.D. (1948)* -"Lateral earth pressure and friction between soil minerals"- Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, Vol. 7, pp 135-138.

X

Uesugi M., Kishida H. (1986) -"Influential factors of friction between steel and dry sands"- Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 26, n° 2, pp 33-46.

X

- Valdes E. & Castelain J.-M. (1995) -"Simulation robuste des effets du frottement sec dans les systèmes mécaniques articulés"- Actes du 12e Congrès Français de Mécanique, Starsbourg 4 au 8 Septembre, vol. 4, pp 421-424
- Van Zanten D. C., Richards P.C., Mooij A. (1977) -"Bunker design : Part 2 and 3"- J. Eng. for Industry, Trans. ASME, pp 814-823.
- Vardoulakis I., Graf B. (1982) -"Imperfection sensitivity of the biaxial test on dry sand"- IUTAM, Conf. Def. Fail. Gran. Mat., Delft, pp 485-491.

X

- Wadell H. A. (1933) -"Sphericity and roundness of rock particles"- Am. J. Geol., Vol. 41, pp 310-331
- *Walker D. M. (1966)* "An approximate theory pressures and arching in hopper"- Chem. Eng. Sc., Vol. 21, pp 975-997.
- Walters J. K. (1973) -"A theoritical analysis of stresses in silos with vertical walls"-Chem. Eng. Sc., Vol. 21
- Weber J D. (1971) "Les applications de la similitude physique aux problèmes de la mécanique des sols"- Eyrolles Ed., Paris, 60p.
- Weber J. (1966) "Recherches consernant les contraintes intergranulaires dans les milieux pulvérulents"- Bull. Liaison L. P et Ch, n°20; pp 3.1-3.20.
- *Weisse D. (1988)* "Caractérisation des écoulements des matériaux granulaires Application aux silos"- D.E.A. INPL, Nancy.
- *Weisse D.(1991)* "Modélisation de l'écoulement gravitaire d'un matériau granulaire"-Thèse de Doctorat I.N.P.L., Nancy.
- *Wilkins J. K. (1970)* -"A theory for the shear strenght of rockfill"- Rock mechanics, vol. 2, pp 205-222.

X

- Yacoub B. (1994) "Modélisation de l'écoulement gravitaire des milieux granulaires dans un silo : Analogie milieux granulaires-fluides dans le cas de l'écoulement piston"- Rapport de D.E.A., Université de Metz.
- Yemmas R. (1993) "Simulations numériques des matériaux granulaires"- Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, Spécialité : Mécanique, soutenue le 20 Décembre 1993.
- *Yoshimi Y., Kishida T. (1981)* "A ring torsion apparatus for evaluating friction betwen soil and metal surfaces"- Geotechnical testing Journal, Vol. 4, n° 4, pp145-152.

ANNEXES

Annexe A:

Caractéristiques morphométriques des matériaux granulaires

A.1 Caractérisation des grains

- 1.1 Introduction
- 1.2. Forme des grains
- 1.3 Sphéricité
- 1.4 Granulométrie:
- 1.5 Angularité ou arrondi
- 1.6 Etat de surface ou texture

A.2 Porosité des matériaux granulaires

- 2.1 Introduction
- 2.2 Limites de porosités
- 2.3 Mesure de la porosité

A.3 Conclusion

A.1 Caractérisation des grains

1.1 Introduction:

L'analyse des propriétés rhéologiques des matériaux granulaires s'intéresse de plus en plus aux caractéristiques géométriques des grains. En effet, de ces caractéristiques dépendent la structure, la maniabilité, la stabilité, etc...

Pour définir les caractéristiques géométriques d'un matériau quelconque, il faut une infinité de paramètres. Dans la pratique, on se limite à une description approchée à l'aide d'un nombre fini de paramètres. La diversité des définitions, des normes et des disciplines concernées ne simplifie pas les données du problème.

Nous pouvons noter que l'état de surface, l'angularité, la forme et la granularité représentent les principales caractéristiques géométriques des matériaux granulaires.

Vue la difficulté de mesurer la surface ou le volume des granulats et des grains, l'examen tridimensionnel est remplacé par un examen bidimensionnel de la silhouette de la plus grande projection du grain sur le plan.

1.2. Forme des grains:

Les matériaux granulaires se présentent sous différentes formes, la plupart du temps difficile à définir d'une façon satisfaisante. On procéde par analyse de leur silhouette qui peut approcher plus ou moins un sphère, un cube, un disque, une aiguille, etc...

On définit les 3 dimensions de la particule projetée sur le plan de stabilité *maximum* par la *longueur L*, la *largeur B* et l'épaisseur T, tels que :

Si,

- $L \cong B = T$, la forme de la particule est voisine d'une sphére

- $L \cong B > T$, la particule est plate,

- $L > B \cong T$, la particule est en aiguille.



fig.A.1: Approche par projection du matériau granulaire (Harr, 1981)

Les coefficients de forme sont définis par:

- $f = \frac{B}{T}$ (aplatissement) - $e = \frac{L}{B}$ (élongation) - $D_e = \sqrt{\frac{4.S}{\pi}}$ (diamètre équivalent ou projeté) avec S = B.L

On peut distinguer globalement 6 différentes formes de grains :



(a) Anguleuse; (b) subanguleuse; (c) subarrondie; (d) arrondie; (e) bien arrondie; (f) en forme d ϵ capsule.

Fig. A.2: Variation de la forme des grains (Harr 1981)
1.3 Sphéricité:

La sphéricité est décrite par le diamètre du plus grand cercle inscrit ou du plus petit cercle circonscrit à l'image d'un grain et par le diamètre équivalent défini sur l'image de ce grain, tels que:



$$C_s = \frac{D_e}{D_c} \qquad \qquad C_s' = \frac{D_i}{D_e}$$

 D_i et D_c : diamètres inscrit et circonscrit respectivement.

Fig. A.3 : Mesue de la sphéricité des matériaux granulaires

La sphéricité mesure l'écart entre la forme d'une particule et celle de la sphère équivalente.

Pour plus de simplicité, Riley (1941) cité par Dejager (1991) propose une définition plus simple de la sphéricité, basée sur le rapport des diamètres inscrit et circonscrit, tel que:

$$\psi_{2R} = \sqrt{\frac{d_i}{d_c}}$$

1.4 Granulométrie:

La granulométrie met en examen les différentes proportions cumulées des fractions composant le matériau. La courbe granulométrique représente la distribution des différentes dimensions des grains. L'uniformité de cette distribution est représentée par le coefficient d'uniformité de Hazen **Cu**, tel que:

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

où d₁₀, d₆₀ représentent les dimensions des tamis correspondant à 10 % et 60 % de passants respectivement.

Les faibles valeurs de Cu correspondent à une granulométrie plus ou moins uniforme.

1.5 Angularité ou arrondi:

L'angularité représente l'état des sommets et des arrêtes des grains. Elle est définit au moyen des rayons de courbures des aspérités et du diamètre équivalent, tels que:



$$c = \frac{\sum r_i}{NR}$$
(Wadell,1933)

 $R = \frac{D_i}{2}$

où r_i rayons de courbures, N nombre de bosses

Fig. A.4 : Mesure de l'angularité

Si les arêtes sont très arrondies, le rayon de courbure r se rapprochera du rayon inscrit R et c tendera vers 1.

Remarque: La sphéricité mesure les irrégularité de l'ordre de grandeur du diamètre du grain et la rondeur les irrégularités de petite dimension par rapport au grain.

1.6 Etat de surface ou texture:

Ce paramètre n'est pratiquement pas quantifiable. On estime l'état de surface de la particule par un examen visuel. Les grains peuvent être plus ou moins rugueux, mats ou luisants.

Cette analyse qualitative peut nous suggérer certaines conclusions quant à son influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires.

A.2 Porosité des matériaux granulaires

2.1 Introduction:

Le comportement mécanique des matériaux granulaires est fonction non seulement des caractéristiques physiques des grains constitutifs, mais aussi de leur structure représentée par l'arrangement géometrique des grains, leur positions relatives, etc...

Pour la description complète de l'arrangement des grains, la connaissance des coordonnées de tous les grains ainsi que le système de forces qui leur est appliqué est nécessaire. Une telle description n'est envisageable que pour l'état initial d'un empilement régulier de sphères ou de cylindres. Pour un milieu granulaire réel, on est limité à une description statistique de la structure. Les études antérieures considèrent le nombre moyen de point de contact par particule dans la masse granulaire, représenté par le nombre de coordination N. Ce nombre est déterminé facilement pour des sphères du même diamètre. La solution tend vers l'impossible quand la dimension de chaque particule varie, ou dans le cas où la forme des particules s'écartent de la forme sphérique.

Pour décrire un milieu granulaire, on fait appel aux paramètres suivants:

- Poids volumique sec γ_d qui est le rapport du poids des grains P_s sur le volume total.

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V}$$

- L'indice de compressibilité est le rapport de la différence des poids volumiques γ_{d1} et γ_d du matériau tassé et non tassé respectivement sur le poids volumique tassé γ_{d1} .

$$C_p = \frac{\gamma_{d1} - \gamma_d}{\gamma_{d1}}$$

- La cohésion est la résistance du matériau aux contraintes tangentielles lorsque la contrainte normale est nulle. La présence de l'humdité et des fines favorise l'apparition des forces de cohésion.

- La porosité *n* est le rapport du volume des vides *Vv* sur les volume total.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

- L'indice des vides e représente le rapport du volume des vides Vv sur le volume occupé par les grains Vs

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n}$$

Pour un matériau granulaire, il existe une infinité d'état de mise en place présentant la même porosité. La porosité n'est qu'une caractéristique moyenne de la masse granulaire. Il importe de mettre en évidence l'importance de la distribution de la porosité à travers la masse. En effet, à même porosité moyenne, le milieu granulaire a un comportement différent si elle est équirepartie dans la masse ou il y a formation de grappes, de voûtes susceptibles de donner à la structure un squelette offrant une meilleure réaction aux efforts sollicitants.

Une grandeur utilisée pour chiffrer cette caractéristique est la densité relative D_r :

$$D_r(\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} * 100$$

où *e* est l'indice des vides du marériau, e_{max} et e_{min} sont les indices des vides limites correspondant à l'état le plus lâche et le plus dense respectivement.

Densité relative, D _r	Qualificatif
(%)	
0-15	Très lâche
15-35	Lâche
35-65	Moyenne
65-85	Dense
85-100	Très dense

Tab A.1: Tableau Qualificatif de la densité, d'après Lambe et Whitman (1969),

2.2 Limites de porosités:

Elles peuvent être définies par l'état de compactage de l'échantillon. Le compactage maximum correspond à l'occupation maximale de l'espace sans altération des particules proprement dites. Le compactage minimum correspond à l'occupation minimum de l'espace, tels que:

- *porosité <u>minimum</u>*: est l'arrangement du matériau à l'état le plus compact sans altération des grains ni de la distribution granulométrique.

- *porosité <u>maximum</u>*: est l'arrangement du matériau à l'état le plus lâche possible sans augmentation de l'adhésion entre les particules et sans création de cavités.

2.3 Mesure de la porosité:

Divers études ont été menées pour déterminer les porosités limites des matériaux granulaires. Les résultats trouvés divergent d'un auteur à un autre, ainsi que le mode opératoire. Le choix de la méthode de détermination de ces paramètres reste un facteur critique.

2.3.1 Mesure de nmax:

- méthode dite "Flowing": déversement rapide du matériau à travers un large goulot.
- dépot par un tamis ou une passoire
- déversement à l'entonnoir avec une hauteur de chute négligeable.

2.3.2 Mesure de nmin:

- vibration sous chargement statique
- compactage dynamique par damage
- mise en place par sédimentation

La relation liant les limites de porosités est linéaire, elle dépend du choix des essais. Dejageer (1991), en utilisant la méthode flowing pour n_{max} et la vibration sous chargement statique pour n_{min} , trouve que :

$$(n_{\max} - n_{\min})_{moy} = 9.4\% = cons^{\prime e}$$

On peut remarquer que les résultats trouvés ne tiennent pas compte de l'angularité des grains, la porosité ne dépend pas du diamètre du grains ou du moins rien ne prouve le contraire. Un autre résultats est donné par Biarez *et al* (1989) qui considèrent cette différence en fonction du coefficient d'uniformité du matériau, tels que:

$$I_e = e_{max} - e_{min} = 0.64 [e_{max} + 0.37 Log(C_u / 32)]$$



fig. A.5: Etat limite de compacité d'un matéria granulaire fonction de Cu et de la forme des grains (Biarez et *al*, 1989).

A.3 Conclusion

La description d'une particule, à l'exception de la sphère, fait appel à plusieurs paramètres. Les techniques de projections favorisent un plan par rapport aux autres existants (plan de stabilité).

La porosité est à l'image des caractéristiques morphométriques des grains. Une même porosité peut prendre des significations différentes suivant les matériaux considérés. Elle peut correspondre à un *maximum* de compacité pour un matériau angulaire uniforme et à un *minimum* pour un matériau rond uniforme.

Aussi, l'angularité peut être caractérisée par la différence entre les indices des vides. La porosité est une fonction croissante de l'angularité

La porosité *maximum* n_{max} est essentiellement fonction de la forme des grains et du coefficient d'uniformité Cu. Dans ce cas n_{max} peut être un bon paramètre de forme (De Jageer 1991).

Annexe B:

Milieu continu - milieu discontinu

B.1 : Milieux continus équivalents

- 1.1 Introduction:
- 1.2 Hypothèse de continuité
- 1.3 Milieux formés de grains
- 1.4 Passage du milieu discret au milieu continu
- 1.5 Conclusion

B.2 : Propriétés de matériaux granulaires

- 2.1 Introduction
- 2.2 Mécanismes gouvernants les milieux granulaires
- 2.3 Phénomène de dilatance
- 2.4 Anisotropie

B.3 Caractérisation des Matériaux granulaires

- 3.1 Introduction
- 3.2 Caractéristiques physiques
- 3.3 Caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires
 - 3.4: Influence de la morphométrie des grains sur l'angle de frottement
 - 3.5 Relation contrainte-dilatance
- **B.4** Conclusion

B.1 Milieux continus équivalents

1.1 Introduction

Pour satisfaire les exigences de l'analyse mathématique de l'espace continu et les points matériels des corps réels, l'hypothèse d'une distribution continue dans le domaine de l'espace considéré du matériau est nécessaire. Les méthodes probabilistes qui considèrent la contrainte résultante en un point comme étant une variable aléatoire dont la distribution est le reflet de la composition du système physique, nient la possibilité d'analyser les corps réels d'une manière rationnelle. La considération du concept du milieu continu (*continum*) assure l'unicité de la contrainte résultante en un point d'un système soumis à un effort F. Le passage vers un milieu équivalent ainsi défini nécessite l'introduction des propriétés du matériau considéré. La notion de continuité est d'autant plus vraie que les dimensions du milieu considéré sont grandes.

1.2 Hypothèse de continuité

Un milieu continu est un milieu dans lequel les propriétés physiques varient d'une façon continue d'un point à un autre. En particulier, la distribution de la masse est supposée continue (Mandel, 1974). Un élément de volume dV renferme une masse $dm = \rho dV$ avec ρ masse volumique, fonction des coordonnées. Nous savons bien que la matière est discontinue à l'échelle moléculaire, souvent même à une échelle beaucoup plus grande (échelle des cristaux d'un métal, des grains d'une roche). Mais nous nous plaçons à une échelle telle qu'un élément de volume, assez petit pour être traité mathématiquement comme un infiniment petit, contienne cependant un très grand nombre de molécules ou de cristaux ou de grains. A cette échelle, la matière apparaît comme un milieu continu, sauf éventuellement le long de certaines surfaces (surfaces de discontinuités).

1.2.1 Notion de contraintes et de déformation:

On considère un élément de surface dS autour du point P (dS \rightarrow 0). Il est soumis à l'action d'un grand nombre de forces particulaires dont l'action globale se réduit à une force

 $d\vec{F}$ appliquée en P et proportionnelle à dS (fig. B.1). Le vecteur contrainte au point P est définie par:



Fig. B.1: Contraintes dans un matériau

La projection de ce vecteur sur les axes principaux permet de déduire les contraintes normale et tangentielle (σ et τ respectivement), tels que:

 $\sigma = \vec{T} \cdot \vec{n} \qquad \text{et} \quad \tau = \vec{T} - \sigma \cdot \vec{n} \tag{B.2a \& b}$

L'état de contrainte est défini par l'ensemble des contraintes s'exerçant sur les facette du cube centré autour du point P. L'ensemble peut être représenté par un tenseur appelé tenseur de contrainte ou tenseur de Cauchy.

La déformation correspond à un changement de la géométrie du matériau due aux variations de positions des particules provoquées par l'augmentation des contraintes. La notion de déformation est purement géométrique. L'état de déformation est défini par l'ensemble des dilatations et des distorsions autour d'un point. Cet ensemble peut être représenté par un tenseur de déformation.

1.2.2 Equation Rhéologique:

Tout système mécanique obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamiques responsables des mouvements et les grandeurs cinématiques décrivant le mouvement. Il existe donc, dans le cas de la Rhéologie, une relation entre la déformation et la contrainte tels que:

$$\sigma = f(\varepsilon)$$
 ou $\varepsilon = f(\sigma)$ (B.3a)

Cette relation dépend de la nature et des propriétés du matériau. Elle dépend aussi de la température et de la pression. Elle s'écrira, dans le cas général:

$$\sigma = f(\varepsilon, T, P) \tag{B.3b}$$

où f représente la fonctionnelle définie telle que l'on obtienne la meilleure correspondance avec les résultats expérimentaux.

1.3 Milieux formés de grains

1.3.1 Introduction:

La mécanique des milieux formés de grains considère la réponse, à une sollicitation extérieure déterminée, de chaque grains ou de particule du système étudié.

Un milieu formé de grains est composé d'un ensemble de particules discrètes, de formes de dimensions et d'orientation diverses. La description complète des conditions physiques nécessite l'établissement de la liste de toutes les valeurs possibles des forces avec la fréquence correspondant à chaque valeur (Harr, 1981).



Fig B.2: Répartition des forces dans un matériau formé de grains.

Pour déterminer l'intensité des forces F_A et F_B symétriques par rapport au point d'application de la force F et à une même profondeur Z (fig.B.2), il est nécessaire de connaître le mode de transmission de la force F au point considéré. En tenant compte de la variation de la forme, des dimensions et de l'orientation des particules, il y a peu de chance pour que les deux forces soient égales quand la position de F varie. Ceci est d'autant plus vrai que l'une de ces force soit appliquée à un vide interstitiel (force nulle).

Pour la description complète de l'arrangement des grains, la connaissance des coordonnées de tous les grains ainsi que le système de forces qui leur est appliqué est nécessaire. Une telle description n'est envisageable que pour l'état initial d'un empilement régulier de sphères ou de cylindres. Pour un milieu granulaire réel, on est limité à une description statistique de la structure qui est caractérisée par la fréquence de distribution des points de contact et le nombre moyen de contacts par particule (coordinance), exprimé en fonction de l'état de l'échantillon (Field 1963, Oda & Konishi 1974). Ce nombre est déterminé facilement pour des sphères du même diamètre. Il devient aléatoire quand la dimension de chaque particule varie ou dans le cas où la forme des particules s'écarte de la forme sphérique. Leur répartition spatiale évolue au cours du chargement et dépend de la granulométrie (Biarez 1962, Cambou 1979). Elle joue le rôle de lien structural entre contraintes et déformations (Chapuis 1976). La déformation se produit par un glissement qui n'a lieu qu'en quelques points de contact. Ces points de contact disparaissent et d'autres sont créés, tandis que la plupart des point est conservée.

A l'échelle du milieu discontinu, chaque particule du matériau est un milieu déformable présentant une certaine géométrie et soumis à un système de forces quelconque (interne ou externe). La déformation globale d'un élément de ce matériau représente la somme des déformations des particules contenues dans cet élément, sous l'effet du système de forces et de la mobilité des particules.

1.3.2 Structure des matériaux granulaire:

La structure géométrique des matériaux granulaires est la maille solide obtenue, dans un volume donné, par mise en contact de particules de nature et de forme différentes. Globalement, elle est caractérisée par la distribution granulométrique et le volume des vides par rapport au volume total. Elle peut aussi être définie soit en déterminant la position de chaque particule, soit en joignant les centre de masse de chaque particule à toutes les particules qui lui sont en contact. Cette dernière définie des polygones qui permettent d'une part d'évaluer l'ensemble des vides interstitiels et de suivre leur évolution et d'autre part de localiser les défauts de la structure (Satake 1993). Des résultats analogues peuvent être obtenus par la téssélation de Voronoï ou la représentation de dodds.

Sous le poids des couches supérieures, le nombre de particules (rouleaux) actives participant à la transmission des efforts augmente en fonction de la profondeur (fig.B.3). Ce mode de transmission des efforts crée des voûtes de charge. Les petits diamètres participent moins à ces chaînons de contraintes. Ainsi, Abriak (1991) a pu observer que 35 % des rouleaux de diamètre 2 mm sont inactifs, 11 % et 18 % pour les rouleaux de 3 mm et 4 mm

respectivement. Les petit rouleaux, quand ils sont actifs, prennent entièrement part à la distribution des forces.

Lors du cisaillement, l'expression des résultats sous forme de variation de porosité ou d'indice des vides suppose une équirépartition des variations de volume dans toute la masse de l'échantillon. Cette répartition n'est pas uniforme, il y a localisation (Desrues 1984, Vardoulakis & *al* 1982, Hammad 1991, De Jaeger 1991).



Fig. B.3: Distribution des forces en fonction de la profondeur

1.3.3 Répartition des efforts:

Les forces à l'échelle du grain s'appliquent aux points de contact. Leur transmission dans un milieu granulaire est un phénomène essentiellement discontinu, du type discret. A partir d'essais sur un matériau photo-élastique, Weber (1966) a montré que la distribution des forces de contact n'est pas uniforme dans la structure. Il existe des "chaînons de contraintes" composés de particules très sollicitées (Dantu 1957, de Josselin de Jong *et al* 1969, Schlosser 1974). Ces chaînons de contraintes sont évolutifs en fonction des chemins de contrainte et s'orientent, en général, dans la direction de la contrainte principale majeure.

1.4 Passage du milieu discret au milieu continu

Le passage du milieu réel au milieu fictif continu s'effectue par l'intermédiaire d'hypothèses statistiques. Ainsi, les contraintes représentent la moyenne des forces élémentaires et les déformations la moyenne des déplacements relatifs des éléments matériels. Ces composantes peuvent être obtenues en traçant une ligne droite à travers l'empilement et en divisant la résultante des forces transmises par le matériau à travers cette ligne, par la longueur de celle-ci (De Josselin de Jong *et al* 1969, Gourves *et al* 1980, Abriak & *al* 1993). La valeur de la composante obtenue dépend de la longueur de la ligne à travers les particules et oscille autour d'une valeur moyenne. Les discontinuités deviennent de plus en plus négligeables par rapport à la taille des facettes utilisées. Le tenseur de contrainte ne peut être introduit, si les oscillations sont trop fortes. de Josselin de Jong & *al* (1969) définissent un volume élémentaire représentatif, où la caractérisation de la transmission des forces par un tenseur de contrainte moyen est possible, comme étant le plus petit volume qui contient des lignes à composantes raisonnablement constantes. Les travaux de Cambou (1979), Gourves & *al* (1980) et Abriak (1991) ont mis en évidence la dimension de ces lignes. Les valeurs limites enregistrées correspondant aux dimensions des lignes sur les dimensions de la plus grande des particules sont de 10 pour une plaque unidimensionnelle (longueur) et de 5 pour une plaque bidimensionnelle (surface) (fig. B.4).



Fig. B.4: La statistique des contraintes fonction de la longueur de continuité.

Ainsi, on peut définir un état de contrainte homogène, dans un milieu représentatif, en utilisant le théorème de la divergence et les conditions d'équilibres. Dans ce cas, le tenseur de contrainte peut s'écrire:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{v} \int_{v} \sigma_{ij} dv = \frac{1}{v} \int_{v} \sigma_{ik} x_{j,k} dv = \frac{1}{v} \int_{s} \sigma_{ik} x_{j} n_{k} ds = \frac{1}{v} \int_{s} t_{i} x_{j} ds$$
(B.4)

Où v, s, x_j , n_k et t_i représentent le volume de la cellule, la surface (contour du volume, coordonnée d'un point sur s, normale à s en x_j et la traction à s en x_j respectivement.

Pour un système de forces de contact discrètes, l'intégrale de l'équation (B1.4) est remplacé par la sommation des forces de contact établie par Weber (1966).

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\nu} \sum_{m=1}^{N} x_i^m T_j^m \tag{B.5}$$

où N, x_i^m et T_j^m représentent le nombre total de contact, la position du vecteur pour le m<u>ème</u> contact et la force de contact respectivement.

Cette relation peut être obtenue en utilisant le théorème des travaux virtuels (Cambou & Sidoroff 1985, Chang 1989) ou en considérant l'équilibre (Drescher & de Josselin de Yong 1972).

1.5 Conclusion

La continuité est définie à une échelle tels que le grain perd sa singularité et dévient un élément très petit devant les échelles de longueurs caractéristiques du dispositif (largeur, diamètre, hauteur...). La longueur de continuité est donc un scalaire fonction de la dimension des particules. Il est à noter que ces deux paramètres sont des constantes du matériau.

Par ailleurs, l'action est mise sur la dualité existante entre le micro-comportement (échelle du grain), défini par les paramètres liés aux grains et à leur interaction et le macro-comportement décrit par des paramètres fonction de l'échelle et de la longueur de continuité.

2 Propriétés des matériaux granulaires

2.1 Introduction:

Les matériaux granulaires sont composés de particules discrètes de différentes formes, arrangées de façon stochastiques. Ils n'ont pour interactions que la pesanteur et les forces de contact.

Cette définition ne tient pas compte des matériaux cohérents soumis aux forces de Vander Wals ou de Newton, des matériaux contenant des fines pouvant développés des adhésions capillaires ou des interactions électrochimiques (Song, 1989). Le plus souvent, ces matériaux sont assimilés à un milieu continu dont le modèle s'est avéré satisfaisant pour la résolution de nombreux problèmes, mais ne correspondant pas au comportement réel du milieu granulaire. Leur comportement diffère des solides à matrice rigide car ils peuvent s'écouler facilement et diffère des liquides par l'existence d'un talus naturel au repos.

Soumis à une sollicitation extérieure, les particules d'une masse granulaire développent un comportement qui leur est propre.

2.2 Mécanismes gouvernants les milieux granulaires

La réponse d'un milieu granulaire à une sollicitation donnée dépend de la structure du milieu (granulométrie, forme et arrangement des grains...).



Fig. B.5 Contact de deux particule de forme quelconque

Le comportement de ces matériaux est caractérisé, en dehors des zones de très fortes contraintes où se produisent des cassures des grains (Wilkins 1970), essentiellement par une réponse non linéaire et non réversible des déformations. Ceci résulte: (i)- des déformations propres des grains à leur point de contact, (ii)- du réenchevêtrement (glissements et rotations) produisant une modification de la structure (fig. B.5).

Ces mécanismes sont basés sur les lois du contact élémentaire et la non pénétration des grains. Certains phénomènes propres aux matériaux granulaires trouvent une explication par la seule considération des déformations aux points de contact.

2.2.1 Elasticité non linéaire:

Le calcul de Hertz montre que le comportement élastique non linéaire d'un ensemble de sphères formées de matériau élastique linéaire provient de la modification de la surface de contact entre les sphères (Biarez *et al*, 1990).



Fig. B.6: Contact de Hertz

Deux sphères égales comprimées sous l'action d'une force normale N sont en contact suivant un cercle de rayon a. Le rapprochement de leurs centres est d, tels que:

$$d^{\frac{3}{2}} = \frac{3}{4}N\sqrt{\frac{2}{R}}\left(2.\frac{(1-\upsilon)}{E}\right) \quad \text{et} \qquad a^{3} = \left(\frac{3}{4}\frac{(1-\upsilon^{2})}{E}N.R\right)$$
(B.6)

Où R, v et E sont le rayon de la sphère, le coefficient de poisson et le module de Young du matériau constituant la sphère respectivement.

2.2.2 Déformations irréversibles:

Les déformations irréversibles sont dues aux glissements relatifs aux points de contact engendrés par la composante tangentielle de la force de contact. La figure B.7 montre la répartition des contraintes tangentielles, suivant la théorie de Mindlin, sur un cercle de contact de deux sphères égales soumises à une force normale N, puis à une force tangentielle T.



Fig. B.7: Glissement au point de contact: Théorie de Mindlin

Il se produit un anneau de glissement (fig. B.6), sur le pourtour du cercle de contact, qui explique que le déplacement relatif δ des sphères soit en partie irréversible et dépende de l'histoire du chargement. Dans le cas où N est constant et T croissant, l'expression du déplacement δ , sur le cercle de contact, est donnée par:

$$\delta = \frac{3(2-\nu)}{8\mu.a} N.tg\varphi_{\mu} \left[1 - \left(\frac{T}{N.tg\varphi_{\mu}}\right)^{\frac{2}{3}} \right]$$
(B.7)

où ϕ_{μ} est le frottement de contact.

La zone de glissement augmente avec T pour recouvrir toute la surface de contact lorsque T=N.tg. ϕ_{μ}

La loi de comportement surfacique au point de contact dépend de la régularité géométrique des grains, du comportement du matériau constitutif et éventuellement de la

présence de fluide interstitiel susceptible de modifier les liaisons locales. Cette réalité restreint l'approche micromécanique (à l'échelle du grain) actuelle à des particules de forme globalement convexes ou à des matériaux modèles dont les géométries sont bien définies (billes de verres (Biarez 1962, Rowe 1962, 1969, Cambou 1979), matériaux de Schneebeli (Dantu 1957, Biarez 1962, Weber 1966, Gourves & al 1980, Matsuoka 1974, Oda 1982, Abriak 1991, Ganiou 1994,...).

2.3 Phénomène de dilatance

La configuration du squelette, du point de vue macroscopique, conduit à constater l'enchevêtrement des grains. Leur mobilité crée un désenchevêtrement de la configuration initiale de la structure qui se manifeste donc par des déplacements relatifs des particules dus aux glissements des grains les uns sur les autres. Ceci se traduit par des frottements aux points de contacts. Il est, en effet, le phénomène physique majeur qui régit le comportement d'un milieu formé de grains au cours du cisaillement. Lorsqu'il y a obstruction, les deux phénomènes (enchevêtrement - désenchevêtrement) se superposent. Les déplacements de certains grains dus au glissement ont pour effet de dévier de leur trajectoires normales les grains voisins. Il y a rupture de contact qui contribue à l'augmentation de volume. Cette caractéristique représente le phénomène de dilatance, introduite pour la première fois par Reynolds en 1885. Du point de vue microscopique, les grains glissent les uns sur les autres sans pratiquement pas de variation de volume. L'exemple le plus simple que l'on peut citer est la dilatance d'un groupe de particules sphériques passant d'une position tetrahédrale à une position cubique.



Fig B.8: Arrangements limites des matériaux granulaires monodisperse.

Quantitativement, ce phénomène intervient de façon non négligeable dans le bilan énergétique et est susceptible d'expliquer des effets d'échelle dans les milieux granulaires denses (Rowe 1962, Habib 1974).

2.4 Anisotropie

Les phénomènes de réenchevêtrement entraînent toujours une anisotropie de la structure (Biarez 1962). Les études photo-élastiques sur les empilements granulaires montrent que le milieu a tendance à se réarranger de manière à offrir le plus de résistance à la sollicitation qui lui est imposée (Dantu 1957). Ainsi, l'anisotropie inhérente est liée au mode d'empilement et de sédimentation des particules et l'anisotropie de constitution est induite par le processus de déformation non élastique lié à la sollicitation (Biarez *et al* 1963, Oda *et al* 1974).

La structure peut donc être caractérisée par un degré d'anisotropie. Biarez *et al* (1963) définissent un coefficient d'anisotropie A obtenu en considérant pour une direction donnée, le nombre de plans de contact dont l'orientation est comprise entre (θ +/- $\delta\theta$). Les mesures continues des variations de la distribution des normales aux points de contact permettent de suivre l'évolution de la structure à l'échelle locale. Les changements d'orientation des normales aux points de contact montrent un gain de contact dans la direction de la contrainte principale majeure alors que l'on constate une diminution du nombre de contact dans la direction de la contrainte principale mineure.

B.3 Caractérisation des Matériaux granulaires

3.1 Introduction

Les caractéristiques et le comportement des matériaux granulaires sont décrits par les paramètres qui le composent et le contrôlent. Ainsi, les paramètres intrinsèques interviennent, pour une part, dans le comportement indépendamment de l'état de mise en place. L'autre part est décrite par la configuration de la structure. Leur déformation est le résultat d'un processus en grande partie non réversible constitué de mouvements relatifs (rotations et glissement), de réarrangement de la masse et de déformations des grains aux points de contact. Leur interaction mutuelle dépend de l'état de leur surface et de sa nature, de leur résistance individuelle à l'écrasement, de la forme et de leur répartition dans la masse constituant le matériau. Ces paramètres sont généralement regroupés en deux catégories:

- Paramètres rhéologiques qui désignent les propriétés mécaniques de la matière.

- Paramètres physiques qui désignent les formes sous lesquelles elle se présente.

Depuis une vingtaine d'années, Biarez a introduit la notion de passage des paramètres discontinus aux paramètres continus, par corrélations basées sur une logique de relation entre les paramètres provenant des différentes sources respectivement (Biarez & *al*, 1990).

3.2 Caractéristiques physiques

La caractérisation de la minéralogie par la détermination du pourcentage des constituant du matériau est un paramètre directement lié à son comportement mécanique. Par contre les données morphométriques déterminent les libertés de mouvement des grains entre eux dans la masse granulaire. De ces caractéristiques dépendent la structure, la maniabilité, la stabilité, etc...

La description, à l'échelle continue, de l'arrangement des grains est approchée par les indices des vides *maximum* et *minimum* (Annexe A). Ils sont caractéristiques des propriétés mécaniques des grains. D'autre part, ils intègrent les conditions aux limites géométriques (forme, surface), mécanique (nombre de points de contact, étalement granulométrique) et les aptitudes aux mouvements relatifs des grains, glissement (état de surface, frottement intergranulaire), rotation (forme des grains, dimensions relatives) et la rupture des grains. La densité relative exprimée en fonction des indices des vides *maximum* et *minimum* rend

compte de l'état du matériau sans pour autant épuiser à elle seule les rôles de la nature et de l'assemblage des grains.

3.3 Caractéristiques mécaniques

3.3.1 Introduction

Pour une valeur donnée de la force N, la force de cisaillement T nécessaire pour déclencher le glissement par rotation et soulèvement des particules le long de leur plan de rupture dépend du nombre de points de contact. Pour rompre l'équilibre d'un arrangement lâche de particules, la force de cisaillement nécessaire est beaucoup plus faible que dans le cas d'un arrangement dense. Il y a moins de point de contacts entre particules le long du plan de glissement, dans le premier cas (fig. B.9) (Harr, 1981). La résistance au cisaillement des matériaux granulaires peut être représentée par un seul paramètre qui est le frottement. Dans le cas où l'on néglige l'influence de la dégradation des grains, il peut être séparé principalement en 3 composantes (Rowe 1962): *(i)*- résistance liée au frottement de glissement, *(ii)*- résistance liée au réarrangement des grains et *(iii)*- résistance liée à la dilatance. L'interprétation et la part de chacune de ces composantes du frottement reste une question ouverte.



Fig B.9: Cisaillement dans les matériaux granulaires

3.3.2 Définition du frottement:

Le frottement est un phénomène compliqué, même dans de simples conditions. Ceci est dû au nombre de paramètres qui interviennent simultanément. L'un des plus important qui contribue à la résistance par frottement est le degré de rugosité de la surface de contact. L'interpénétration des aspérités s'oppose au mouvement relatif des deux surfaces. Suivant le concept de Mohr-Coulomb, il représente la limite de l'état de contrainte du domaine stable d'un matériau avant l'apparition des déformations irréversibles tels que:



Fig. B.10: Condition de rupture de Mohr-Coulomb.

Où c et φ sont la cohésion et l'angle de frottement représenté par l'inclinaison de la droite par rapport à l'horizontale dans la représentation de Mohr. Dans le plan des contraintes principales, on obtient:

$$\sigma_{1} = \sigma_{3} t g^{2} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \cdot t g \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$
(B.9)

3.3.3 Mécanismes de frottement:

Pour les matériaux de coulomb, la relation entre la force normale verticale N et la force horizontale de frottement T peut s'écrire sous la forme :

$$T=\mu. N \tag{B.10}$$

Où μ représente le coefficient de frottement, considéré constant dans ce cas. Cependant, il peut être une fonction de la vitesse de sollicitation, au delà d'un certain seuil (Bowden & Tabor 1954, Valdes & Castelain 1995).

Par contre, le déplacement est fondamentalement différent (fig. B.11) (Drücker & *al* 1952, 1954). Dans le cas du frottement glissant, la surface sur laquelle s'exerce le frottement est définie par la séparation des blocs rigides. Le bloc glisse dans la direction de la force T. Le cas du cisaillement plan, où le matériau en vrac se déforme en un bloc unique sous l'effet des déplacements des grains entre eux, s'accompagne de variations de volume. Le déplacement

total fait un angle ϕ avec l'horizontal. Il correspond à l'angle limite des enveloppes du cercle de Mohr.



Fig. B.11: Frottement glissant et cisaillement plan d'un matériau de Coulomb.

La description et l'analyse des caractéristiques de déformation et de rupture à partir des courbes contraintes - déformations sont souvent comparées à certains comportements de références tels que :

(i)- L'état critique basé sur un état pour lequel le rapport des contraintes atteint une valeur constante alors que l'écoulement plastique se produit sans variation de volume indépendamment de l'état initial de l'échantillon et du chemin de contrainte. Il rejoint le concept de plasticité parfaite introduit par Biarez (1962). Par ailleurs, l'indice des vides critique est fonction de la contrainte moyenne (fig. B.12) (Roscoe *et al* 1958, Biarez *et al* 1990);

(ii)- l'état caractéristique (Luong 1978, 1980) défini au point d'inversion de sens des déformations volumiques entre les phases de contractance et de dilatance tels que la vitesse de déformation volumique soit nulle ($\dot{\epsilon}_v = 0$). Le niveau de contrainte atteint détermine le seuil de désenchevêtrement, caractérisant la capacité du matériau à s'écouler, indépendamment du trajet de chargement. La détermination des indices de désenchevêtrement et de coulabilité rend compte de l'état de confinement des matériaux et de leur capacité à se libérer (Luong 1989).



fig B.12: Influence du confinement sur l'indice des vides critique

3.4: Influence de la morphométrie des grains sur l'angle de frottement

La morphologie des grains conditionne leur possibilité d'empilement et d'enchevêtrement et le frottement assure la stabilité de l'assemblage. Les principales caractéristiques des matériaux granulaires sont représentées par l'état de surface, l'angularité, la forme et la granularité.

La quantification de ces paramètres morphométriques est aléatoire. On ne peut parler de dimensions d'une particule sans faire allusion à sa forme. La quantification de l'état de surface est inaccessible.

Les résultats recensés montrent que l'angle de frottement dépend de la forme des grains et de leur distribution. La diminution de la taille des grains augmente la résistance au cisaillement (figure B.13a & b) (Rowe 1962, Koerner 1970, Frossard 1978 et De jaeger 1991). L'angularité croît avec la diminution de la taille des grains (Frossard 1978, Favre 1980). Cette angularité se manifeste par une augmentation des indices des vides limites e_{max} et e_{min} (Cambou 1972). Par ailleurs, Kirkpatrick (1965), en étudiant l'effet de la taille et de la granulométrie sur la résistance au cisaillement, conclut que le frottement ϕ_{fv} déterminé au *minimum* du volume est indépendant de la forme et de la taille (fig. B.14). Il ne dépend que de l'état de surface et de la minéralogie.



NB: Les essais de Rowe (1962) et de De Jaeger (1991) sont réalisés en remplaçant la partie inférieure de la boite de Casagrande par un bloc de particules cimentées de même nature . fig.B.13 (a & b) : Influence de la distribution granulaire sur l'angle de frottement



Fig B.14 (a & b): Répartition du frottement dans un sable artificiel (Kirkpatrick 1965)

Les figures (B.15a & b) illustrent la variation de l'angle de frottement en fonction de la répartition des données morphométriques (Koerner 1970, Song 1989). L'augmentation du pourcentage de billes concassées réduit la sphéricité de l'échantillon et modifie la rugosité et l'état de surface. Ces variations induisent des enchevêtrements plus importants liés à la multiplication des irrégularités de surface (microtopologie) et augmentent le nombre de points de contact, assurant ainsi une plus grande stabilité qui se manifeste par une augmentation du frottement. Par ailleurs, les figures (B.16a & b) montrent l'augmentation de l'angle du talus naturel avec la dimension des grains et aussi avec l'augmentation du pourcentage d'angulaire dans le mélange.



fig B.15 (a & b) : Influence du pourcentage des billes de verre concassées et de la sphéricité sur l'angle de frottement interne



Fig. (B.16a & b): Influence de la dimension et du pourcentage d'angulaire sur l'angle du talus naturel (Azimi 1976).

L'angle du talus naturel obtenu par Azimi (1976) sur des billes d'acier croit faiblement pour le matériau rond avec la taille des grains. Par contre, pour le matériau anguleux, il augmente plus malgré le fait que l'augmentation de la taille diminue l'angularité du matériau, comme on l'a vu précédemment. Ce même résultat a été également obtenu par Favre (1980).

L'action de la combinaison des différents paramètres morphométriques, en plus des caractéristiques mécaniques propres à chaque constituant du matériau peut induire une grande variation de l'angle de frottement.

3.5 Relation contrainte-dilatance

Les matériaux granulaires soumis à un chargement déviatorique non nul se déforment le plus souvent avec variation de volume. Ces déformations représentent l'ensemble des déplacements aux points de contact. Dès les années soixante, les travaux de Newland *et al* (1957), Biarez (1962) et Rowe (1962) ont conduit à la formulation de la relation contraintedilatance. Ces travaux ont conduit à formuler certaines hypothèses qui sont devenues sujet de discussion, particulièrement le cas de la minimisation des rotations par rapport aux glissements (Horne 1965 & 1969, de Josselin de Yong 1972, Chapuis 1976, Procter 1974, Oda & *al* 1982,...). L'équilibre limite d'un empilement régulier de cylindre ($\delta = \varphi_{\mu}$) est défini par (Biarez 1962):

$$s_{1/\sigma_{2}} = tg(\theta \pm \alpha) \cdot tg(\phi_{\mu} \pm \alpha + \theta)$$
 (B.11)

Où 2α et θ représentent les angles que forment les directions des points de contact et les axes des contraintes principales (σ_1 , σ_2) respectivement. Par ailleurs, Rowe (1962) a établi pour le même empilement régulier de cylindres une équation équivalente :

$$\sigma_{1/\sigma_{2}} = tg\alpha_{R} \cdot tg(\phi_{\mu} + \beta_{R})$$
(B.12)

Où α et β représentent une propriété géométrique de l'assemblage régulier, l'angle du plan de contact au point de glissement par rapport à la direction principale des contraintes respectivement. Rowe (1962) considère le terme $tg\alpha$ égal au rapport du nombre de contacts par unité d'aire sur le plan principal majeur au nombre de contacts sur le plan mineur.

La comparaison des deux équations d'équilibres montre une analogie entre les différents paramètres définis par les auteurs, tels que:

$$\pm 2\alpha = \alpha_R + \beta_R$$
 ou $\alpha_R = \beta_R + 2.\theta$ (B.13)

L'angle β_r est lié à l'orientation des points de contact mettant en évidence la structure géométrique au niveau de la particule. L'angle θ caractérise la transmission de la contrainte par rapport à la géométrie de la structure. Les angles α et α_r ont le même sens dans le cas où $\alpha_r = \beta_r$, décrivant les empilements réguliers. α_r est donc une fonction de l'inclinaison des axes de contraintes principales et de l'orientation des plans de glissement des particules aux points de contact. Dans le cas d'un assemblage irrégulier, β_r est considéré équivalent à une valeur moyenne unique fonction des angles de contact et α_r dépend en plus de la répartition des contraintes. Le paramètre α répond à la définition dans le cas des matériaux à structure régulière et périodique. L'ambiguïté sur le sens (interprétation) qu'il peut prendre s'instaure dès que l'on s'écarte de ces formes où l'écart à la moyenne des plans de glissement aux points de contact est non nul. La difficulté de l'interprétation est due à la fonction de lien qu'il remplie entre les particules et leur organisation dans la masse granulaire.

B.4 Conclusion

Le comportement des matériaux granulaires est décrit par un ensemble de paramètres définis à différentes échelles. Les paramètres rhéologiques définis pour chaque grains ne sont pratiquement pas utilisés (Favre, 1980). La minéralogie et les données morphométriques constituent les paramètres physiques qui rendent compte des mécanismes qui peuvent se produire lors de la sollicitation du matériau. La considération d'un comportement global nécessite la définit à l'échelle du grain. Ce constat devient une nécessité dans le cas des écoulements où les particules, à la sortie des organes de stockage, ont tendance à s'individualiser et à induire un comportement fortement lié aux caractéristiques des grains.

La relation contrainte-dilatance qui représente une généralisation des différents états des matériaux granulaires doit son succès à la tentative de définition de paramètres de passage liants le micro comportement au macro comportement. Son ambiguïté est liée au manque d'informations recensées au niveau du grain, palier par des hypothèses simplificatrices.

Annexe C

Matériaux granulaires ensilés

C.1 Introduction

C.2 Efforts développés à l'intérieur de enceintes de stockage

- 2.1 Poussée due au gonflement
- 2.2 Poussée réelle
- 2.3 Poussée de détente

C.3 Formation de voûtes stables

- 3.1 Cas des matériaux cohérent:
- 3.2 Cas des matériaux non cohérents:

C.4 Types d'écoulements rencontrés

- 4.1 Ecoulement en masse
- 4.2 Ecoulement en cheminée
- 4.3 Ecoulement mixte

C.5 Approches développées

- 5.1 Approche mécanique
- 5.2 Approche statistique
- 5.3 Approche par simulation
- 5.4 Approches empiriques

C.6 Conclusion

C.1 Introduction

L'utilisation des matériaux granulaires se retrouve dans divers domaines tels que les industries chimiques, pharmaceutiques, métallurgiques ainsi que l'agro-alimentaire et le transport. Les fonctions de stockage et de dosage sont des parties importantes du processus de fabrication. L'écoulement de ces matériaux dépendra donc des dimensions géométriques des organes de stockage et de dosage, du comportement et des propriétés des matériaux à s'écouler sous la gravité. L'examen de leur propriétés à travers l'analyse des blocages obtenus par formation de voûtes montre l'analogie existante avec les sols.

C.2 Efforts développés à l'intérieur des enceintes de stockage

L'écoulement des matériaux granulaires à travers un orifice de vidange provoque une variation et une redistribution des contraintes à l'intérieur de l'enceinte de stockage due à la poussée. Ce même phénomène se rencontre aussi dans les sols lors de la réalisation des ouvrages souterrains.

Les causes de la poussée dans un matériau stocké ou dans un sol (cas des tunnels) peuvent être réparties de la façon suivante:

- Décompression dans le matériau (poussée de détente);
- Poids de la masse située au dessus de la partie considérée (poussée réelle);
- Gonflement d'origine chimique ou physique (poussée de gonflement);

La nature de la poussée rencontrée dépend de la nature du matériau et leur présence simultanément n'est pas exclus.

2.1 Poussée due au gonflement:

Les matériaux stockés sont de nature différente (chimique, pharmaceutique, agroalimentaire, etc...) et peuvent avoir des propriétés particulières (compressibilité, faible degré de fusion, sensibilité à l'humidité, etc...).

174

Ainsi l'humidité peut entraîner un gonflement et accroître leur compressibilité. A la vidange, ces matériaux se libèrent des pressions et peuvent créer des voûtes stables par enchevêtrement ou dues à la cohésion résultante de cette humidification (fig. C.1) (Luong, 1993).



Fig. C.1 :Formation de voûtes stables liés à la nature compressible du matériau (Luong 1993)



Fig. C.2 : Poussée réelle des matériaux confinés

2.2 Poussée réelle:

Elle correspond à la pression due à la masse du matériau située au dessus du volume considéré. Sa répartition n'est pas linéaire pour un matériau stocké, elle est fonction de la hauteur de charge et du frottement matériau-paroi (Deutsch & *al* 1969, Van Zanten & *al* 1977, Nielsen & *al* 1977, Khelil & *al* 1989 & 1990, Abriak 1991,...) (fig.C.2).

2.3 Poussée de détente:

Le comportement du matériau situé au dessus d'une excavation peut être comparé à celui d'un matériau stocké dans un silo muni à sa base d'une ouverture dont le couvercle peut se déplacer vers le bas.

Les conditions du processus de détente sont d'autant plus proche que le degré de cohésion du matériau est faible. Cette poussée est due à la dépression occasionnée par la chute libre au voisinage de l'ouverture. Si la dimension de l'orifice de vidange est insuffisante, l'écoulement est perturbé par la formation de voûtes stables.

Les caractéristiques de cette voûte sont les conséquences directes de la répartition des contraintes à l'intérieur de l'enceinte de stockage.

C.3 Formation de voûtes stables

L'effet de voûte se manifeste par un enchevêtrement aléatoire stable des grains entravant partiellement ou totalement l'écoulement du matériau sous l'effet de la gravité. Il peut être dû :

i- à la modification des propriétés mécaniques et physiques du matériau qui se traduit par un gain de cohésion pouvant former de véritables blocs de matière ou simplement par un enchevêtrement stable des grains.

ii- à un dimensionnement non adéquat de l'orifice de vidange.





Photo C.1 :Effet de voûte dans les matériaux bidimensionnels (P.V.C) non cohérents

3.1 Cas des matériaux cohérent:

Dans le cas des matériaux cohésifs, le problème de voûte pouvant développées une résistance en compression simple σ_c peut se ramener à l'analyse de l'équilibre d'un arc isostatique. La voûte présente deux surfaces libres à contrainte normales nulles, dans le cas de la non prise en compte du poids du matériau des zones situées au dessus.

Les études et les théories existantes ne traitent que le problème des voûtes de type "cohésif" dues au colmatages résultant de l'effet des forces de cohésion développées entre les grains.

En pratique, on se fixe une dimension minimale D_m de l'orifice de sortie en fonction de la taille maximale d_{max} des grains, tels que:

$$D_m \ge 5d_{\max} \tag{C.1}$$

Jenike (1961) considère l'hypothèse que le matériau situé au dessus d'une voûte stable tend à la déstabiliser. L'effort de frottement à la paroi et la résistance de la voûte σ_c tendent à la maintenir stable. La dimension critique de l'orifice de vidange ainsi obtenu est:

$$D_{m} = (1+m)\frac{\sigma_{c}}{\rho g}$$
(C.2)

$$m = 0 \quad si \ écoulement \ plan$$

$$m = 1 \quad si \ écoulement \ à \ symétrie \ axiale$$

D'autres auteurs, en considérant un massif de grande profondeur, supposent que la contrainte dans une région juste au dessus de la voûte dépend de la hauteur du massif.

Richmond (1963) exprime la dimension critique de l'orifice de vidange par:

$$D_{m} = 2(1+m)\frac{c}{\rho g} \left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right)$$
(C.3)

Lenczner (1966) considère le cas d'une voûte circulaire. Il introduit l'effet de l'angle de frottement du matériau φ et de la paroi θ_p , tels que:

$$D_m = \frac{\sigma_c}{\rho g} \left(\frac{\sin \theta_p}{\theta_p} \right)^{1-m} \left(1 + \cos \theta_p \right)^m \left(2tg\phi \sin \theta_p + \cos \theta_p \right)$$
(C.4)

3.2 Cas des matériaux non cohérents:

Nous sommes confrontés, dans ce cas, à la non existence de théories élaborées pour l'étude des voûtes du type géométrique dues à l'enchevêtrement des grains.

Les caractéristiques essentielles de l'effet de voûte peuvent être mises en évidence sur la figure C.3 qui représente une couche de sable sec, sans cohésion, placée sur une plate-forme munie d'une trappe (*ab*). L'épaisseur h de la couche de sable est égale à plusieurs fois la largeur de la trappe (Szechy 1970).

Tant que la trappe est maintenue dans sa position initiale, elle est soumise à une charge γ H par unité de surface. Dès sa libération, la pression s'exerçant sur elle est réduite à une faible fraction de sa valeur initiale alors que la pression sur les régions avoisinantes augmente.

La chute du prisme de sable situé à l'aplomb de la trappe est empêchée par les contraintes de cisaillement qui se développent sur ses parois (Terzaghi & *al* 1965). si le sable présente des traces de cohésion, la trappe peut être enlevée entièrement sans qu'il y ait le moindre effondrement.

A mesure qu'augmente l'ouverture, la répartition des contraintes se rétablie sans toute fois s'approcher de la pression s'exerçant initialement sur le couvercle.

La forme des voûtes et les pressions ainsi générées sont fonction de la nature des matériaux stockés. Elles dépendent fortement, de même que lors de l'écoulement, du

coefficient λ des pressions latérales sur les pressions verticales considéré (Terzaghi *et al* 1952, Khelil 1989).

Dans le cas de nos essais réalisés sur le matériau bidimensionnel, les blocages sont dus essentiellement à l'ouverture du silo dont la dimension *minimum* est fonction du pouvoir de désenchevêtrement du matériau. La variation du frottement intergranulaire des rouleaux par collage de grains de silice (de 13° à 23°) induit une translation de la limite de formation de voûte donnée par le rapport diamètre du plus gros grain sur le diamètre de l'ouverture (fig. C.4).



Fig. C.3 : Variation des pressions en fonction de l'ouverture de la trappe (Szechy 1970)



Fig. C.4 : Limite de stabilité des voûtes en fonction du frottement
C.4 Types d'écoulements rencontrés

L'instabilité des voûtes conduit à constater l'écoulement du matériau. Différents types d'écoulements sont rencontrés suivant la géométrie du silo, le matériau constituant les parois et la nature du matériau ensilé :

4.1 Ecoulement en masse:

Cet écoulement apparaît généralement dans les silos munis de trémies assez lisses et suffisamment inclinées. Dès le début de la vidange, toute la matière ensilée descend régulièrement et on observe un mouvement de l'ensemble de la matière. Il se caractérise par une vitesse régulière et relativement faible. Le débit est régulier et se fait sur toute la section.

4.2 Ecoulement en cheminée:

Ce type d'écoulement apparaît essentiellement dans les silos à fonds plat ou avec trémies à faibles pentes. La cheminée est souvent de forme conique avec un diamètre inférieur ou approximativement égal à la dimension de l'orifice de vidange. De sérieux problèmes apparaissent pour les matériaux, susceptibles de développer des forces cohésives, qui présentent de mauvaises propriétés d'écoulement. Avec le tassement la matière augmente de résistance et reste immobile quand la zone active dans la cheminée est complètement évacuée formant ainsi une sorte de tuyau.

L'écoulement en cheminée est souvent mal défini, la matière entourant la cheminée est instable et dans ces conditions, elle provoque un écoulement pulsatoire entraînant une sollicitation dynamique aléatoire de la structure.

4.3 Ecoulement mixte:

Ce troisième type d'écoulement est intermédiaire entre l'écoulement en masse et l'écoulement en cheminée. La partie basse fonctionne en écoulement en cheminée, définissant une zone morte autour des parois et la partie haute fonctionne en écoulement en masse.

C.5 Approches développées

On rencontre dans la littérature plusieurs approches traitants le comportement des matériaux granulaires en écoulement (fig. C.5). Leur nombre et la diversité des méthodes et des domaines concernés ne fait que mettre en évidence la complexité d'un tel milieu. Elles sont rassemblées et réparties en axes pouvant chacune fournir un support théorique.



Fig. C.5: Approches d'analyse du comportement des matériaux granulaires ensilés.

5.1 Approche mécanique

Cette approche représente l'essentiel des travaux recensés. Deux tendances sont à considérer:

- Mécanique des milieux continus:

Le milieu granulaire est assimilé à un matériau continu équivalent. L'une des caractéristique fondamentale de cette approche est de considérer que le matériau est régi par l'état de charge. Il peut évoluer alors de deux façons:

- Tel un sol caractérisé par :

(i)- des effets d'inertie négligeables,
(ii)- un mécanisme microscopique (échelle du grain) basé essentiellement sur le frottement entre les surfaces de contact des grains,
(iii)- un état d'efforts internes indépendant de la vitesse de sollicitation.

Ce type d'écoulement peut être considéré comme étant quasi-statique pouvant être simulé, le plus souvent, par les modèles empruntés à la mécanique des sols (élastoplastique, élastique-parfaitement plastique, viscoplastique, etc...) (Häussler & Eibl 1984, Aribert & Ragneau 1989, Michalowski 1989 & 1990, Bishara *et al* 1977, Ragneau & Aribert 1992, Jenike 1987, etc...).

- Tel un liquide caractérisé par :

(i)- des effets d'inertie importants,

(ii)- un mécanisme microscopique d'écoulement complexe alliant frottement de contact et collisions intergranulaires, générant des transferts de moments
(iii)- un état d'efforts internes dépendant de la vitesse de sollicitation (Bagnold 1954, Savage & al 1980).

Ces écoulements peuvent être assimilés à un écoulement de fluide malgré la différence de leur comportement intrinsèque respectif (Ahmadi 1983, Haff 1983, Jenkins & Savage 1983, Weisse 1991, Ma & *al* 1988, Runesson & Nilson 1986, Savage 1979, Richard & Brown 1965).

- Approche cinématique:

Cette approche est caractérisée par l'hypothèse que l'écoulement ne serait pas gouverné par le champ de contrainte (ou état de charge) mais simplement par des effets purement cinématiques, selon le processus suivant: "Sous le seul effet de leur poids propre, les particules d'une couche donnée glissent vers le bas pour occuper les places laissées libre, suite au départ descendant des particules de la couche adjacente inférieure et ainsi de suite, etc...

Processus pouvant être probabiliste ou déterministe.

a- Approche stochastique:

Elle considère que l'écoulement a lieu suivant un processus de hasard (Litwiniszyn, 1963). Il définit des cages virtuelles de hauteur 'n' et de largeur '2m' où sont confinées les particules. Quand la particule A quitte sa cage, elle est remplacée soit par B ou par C, suivant une probabilité p ou q respectivement. Cette probabilité est gouvernée par:

$$E\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial p}{\partial y} = D\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$
où $D = m^2/2n$
(C.5)

Cette équation de diffusion rend compte du processus de vidange qui consiste à remplir le silo de vide par diffusion progressive.

Mullins (1972), en considérant un processus de migration ascendant des vides, retrouve la même équation de Litwiniszyn (1963) dans le cas où p=q=1/2 et E=0.

b- approche non stochastique:

L'écoulement est considéré suivant un processus bien déterminé. Elle ne concerne que les écoulements permanent ou pseudo-permanent

L'approche de Nedderman et Tüzun (1979), dans le même ordre d'idée que Litwiniszyn, se distingue par son aspect déterministe. Ils considèrent trois particules A, B et C, si les particules B et C de la couche inférieure ont des vitesses descendantes différentes, la particule supérieure aura tendance à se déplacer vers la particule la plus partante pour occuper la place vacante. L'équation obtenue est:

$$\frac{\partial V}{\partial y} = B \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \tag{C.6}$$

La composante horizontale est:

$$U = -B\frac{\partial V}{\partial x} \tag{C.7}$$

V étant la vitesse verticale

B est une composante expérimentale dépendant uniquement du diamètre 'd' des particules. Ce modèle donne des résultats intéressants au voisinage de l'orifice, en bas du massif, par rapport aux autres théories.

5.2 Approche statistique:

Le comportement du milieu granulaire est régi par un grand nombre de paramètres à aspect plus ou moins aléatoire, suivant la complexité de la nature discrète des particules et la situation d'écoulement. Elle permet :

- (i)- la formulation de lois à la base de paramètres prépondérants, à travers l'étude des distributions des différentes variables et leur interdépendance.
- (ii) -la réduction de l'expérimentation dont les moyens dans le domaine des écoulements granulaires réels restent insuffisants.

5.3 Approche par simulation:

Les paramètres liés aux milieux granulaires réels se prêtent difficilement à la mesure, particulièrement les efforts internes, d'où la naissance de modèles de simulation basés sur des assemblages granulaires géométriquement plus simples (sphères, disques...). Ils sont de type analytique, physique (détermination directe des forces de contact) ou numérique (éléments distincts type P.F.C. (Lorig & al 1995)). Le développement de l'outil informatique a permis, par ailleurs, de concevoir des calculs par modèles "automates" et d'appliquer des théorie telles celles développées pour les gaz à l'écoulement des matériaux granulaires.

5.4 Approches empiriques:

Elles consistent en des études paramétriques à la base de campagnes d'essais réalisés sur modèles réduits (Mc Cabe 1974, Beveloo & *al* 1961, Harmens 1963, Kotchanova 1970). Elles sont basées sur des observations expérimentales de matériaux de différentes natures. Des

corrélations empiriques peuvent être ainsi établies et comparées à des formulations et approches déjà existantes (Sid *et al* 1995).

C.6 Conclusion

L'écoulement des matériaux granulaires présente un comportement très complexe. L'ensemble des approches considérées montre une certaine cohérence dans les résultats obtenus, sans pour autant englober la totalité du phénomène observé.