



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
TRAVAUX PUBLICS
VOIE ET OUVRAGE D'ART

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Melle Halima Bennadji

Le : dimanche 24 juin 2018

ETUDE MICROMECHANIQUE ET MICROSTRUCTURALE PAR IMAGERIE AUX RAYONS-X D'UN SABLE SOUS FORT CHARGEMENT ŒDOMETRIQUE

Jury :

Dr.	FIEA Sadok	MCB	Université de Biskra	Encadrant
Pr.	GUETTALA Abdelhamid	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	HOUHOU Nabil	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2017 - 2018

Remerciement

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de génie civil (LRGC), Université de Biskra, Algérie. Je souhaite vivement remercier les personnes qui ont contribué à accomplir avec succès l'ensemble de mes tâches.

Je remercie très chaleureusement mon encadrant Dr. SADOK FEIA pour m'avoir accordé une grande disponibilité, ses encouragements et sa confiance. Son expérience, sa rigueur scientifique, sa pédagogie ont constitué un soutien indispensable à la réalisation de cette étude.

Je remercie sincèrement mon Co-encadrant SEYF EDDINE MESSOUD pour m'avoir suivi dans le cheminement de mon étude, et pour son aide aux expériences réalisées au sein du laboratoire « mécanique de sol » université de biskra.

J'adresse mes remerciements les plus vifs à Dr. Abdelali DADDA pour toutes ses informations utilisées dans le work-shoop qui m'ont aidé et qui ont contribué à réaliser mon modeste travail dans une atmosphère amical.

Et, enfin, j'adresse toute ma gratitude à ma chère famille, et très particulièrement mes parents pour leurs encouragements et soutiens permanents.



Halima

Dédicace

C'est avec beaucoup d'estime que nous dédions ce travail à mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui nous ont donné un magnifique modèle de courage et de persévérance.

*Nous espérons qu'ils trouvent dans ce travail tous nos remerciements de tout notre cœur. À notre mère et notre père **ABD ELAZIZ** que Dieu les protège.*

Je dédie ce travail à :

Mes frères " Mohamed Serrou & Seif eddine "

Mes sœurs « Ghania, Hadjer, Ibtissem, Djihed, Chaima »

A « Mohamed louai & Koussai abd elaziz »

A mes amis « Salma, Besma, Oum elkheir, Abdallah, chouaib, smail)

A tous les familles Bennadji

Merci a tous

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Table des Matières.....	I
Liste des Figures.....	IV
Liste des Tableaux.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1-1 INTRODUCTION.....	6
1-2 Fracturation des grains et évolution de la microstructure.....	7
1-2-1 Généralité sur le mécanisme d'écrasement des grains.....	7
1-3 Mécanisme d'endommagement des grains d'un matériau granulaire sous haute pression.....	8
1-4 Effets de l'endommagement des grains sur le comportement des sols granulaires.....	10
1-4-1 Evolution de la granulométrie.....	10
1-4-2 Evolution de la perméabilité du sable sous sollicitation mécanique.....	12
1-4-3 Changement de la morphologie des grains	15
1-4-4 Evolution de la taille des pores	16
1-5 Imagerie 3D des matériaux granulaire par les rayons-x	17
1-6 Principe d'imagerie 3D par rayons-X.....	17
1-6-1 Tomographie aux rayons-X.....	18
1-6-2 Acquisition d'images 3D	18
1.6.3 Traitement d'images 3D	19
1.7 Mesure des propriétés des contacts par la tomographie aux rayons-X.....	20
1.8 Propriétés de contact.....	20
1.8.1 Contact entre deux particules.....	21
Conclusion	23
2. CHAPITRE II. ÉTUDE EXPÉRIMENTAUX	24
2.1. Introduction.....	26
2.2 Description de matériau étudié.....	26
2.3 Dispositifs expérimentaux.....	28
2.3.1 Dispositif œdométrique à haute pression.....	28

TABLE DES MATIERES

2.3.2 Dispositif de tamisage	30
2.3.3 Dispositif de mesure de perméabilité	30
2.4 Procédure d'essai	31
2.4.1 Préparation l'indice de vide minimum et maximum.....	31
2.4.1.1 Indice de vide minimum e_{min}	31
2.4.1.2 Indice de vide maximum e_{max}	32
2.4.2 Préparation des éprouvettes.....	32
2.4.3 Procédure d'essai Oedométrique.....	34
2.4.4 Mesure la permèabilité.....	34
2.4.5 La granulométrie.....	35
2.5 Analyse d'images 3D.....	36
2.5.1 Caractérisation des propriétés de contact dans le sable carbonaté utilisant la micro- tomographie 3D par rayons-X.....	36
2.6 Échantillon et acquisition d'images.....	37
2.7 Traitements d'images 3D.....	38
2.7.1 Identification de deux phases (solide, vide).....	38
2.7.2 Séparation et étiquetage des grains.....	38
2.7.3 Identification et étiquetage de chaque contact.....	38
2.8 Propriétés microstructurale.....	41
2.9 Conclusion.....	41
CHAPITRE III. RÉSULTAT ET DUSCUSSION	42
3.1 Introduction.....	44
3.2 Programme d'essais.....	44
3.3 Résultats expérimentaux.....	45
3.3.1 Evolution de la courbe granulométrique.....	45
3.3.2 Evolution de la perméabilité.....	46
3.4 Discussion.....	47
3.4.1 Influence du coefficient d'uniformité sur l'évolution de la taille d'accès aux pores.....	47
3.4.2 Evolution de la perméabilité celle de la taille médiane d'accès aux pores.....	48
3.5 Résultat et discussion de traitement d'image 3D.....	49
3.5.1 Evolution de la Nombre de coordination.....	49
3.5.2 Evolution La granulométrie.....	50
3.6 Conclusion.....	52

TABLE DES MATIERES

CONCLUSION GENERALE.....	54
REFERENCE.....	57

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

N°	FIGURE	Page
	CHAPITRE I	
1-1	Modes de fracture d'un grain (Guyon et Troadec, 1994)	7
1.2	courbe contrainte-déformation pour le sable d'Hostun (HN34) et le sable carbonaté (Dadda et al. 2015).	8
1.3	Réponse macroscopique des tests oedométriques (Karatza et al., 2017)	9
1.4	Étendue de la rupture du test OCS1 (section agrandie à partir d'images XCT). (Karatza et al., 2017)	10
1.5	L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte a) Sable d'Hostun, b) Sable carbonaté .Dadda et al (2015)	11
1.6	Les étapes de l'écrasement et durcissement du système granulaire (Russell et al., 2013)	11
1.7	Mesures antérieures de l'écrasement (Hardin et al., 1985)	12
1.8	Perméabilité des sables en fonction de la contrainte appliquée. (Dadda et al., 2015)	13
1.9	Processus de diminution de la perméabilité à la contrainte axiale (Chen et al., 2018)	14
1.10	Processus formé de pores isolés dans l'échantillon sous les contraintes axiales accrues (Chen et al., 2018)	14
1.11	a) écrasement en fonction du chargement appliqué, b) la perméabilité normalisée en fonction de contrainte appliquée (Vardoulakis et al., 1993).	15
1.12	Coupelle en acier (Zheng et Tannant 2016)	15
1.13	Analyse granulométrique	15
1.14	Forme des grains de quartz après l'essai d'écrasement (Zheng et Tannant 2016)	16
1.15	Evolution de la distribution des tailles des pores de sable carbonaté en fonction de contrainte appliquée.(Dadda et al., (2015)	16
1.16	Acquisition d'images 3D (karatza et al., 2017).	18
1.17	Illustration schématique de l'acquisition et de la reconstruction d'images tomographiques par rayons-X (MA et al, 2017)	19

LISTE DES FIGURES

1.18	Etapes de processus d'identification des particules. (Ando 2013).	19
1.19	caractérisation des contacts inter-granulaire de CT à rayons X (Imperial College – March 2018)	21
1.20	Surface de contact entre deux grains (Dadda 2017)	21
1.21	Contact entre deux grains (Dadda 2017)	21
1.22	Contact entre deux particules de voxel (Druckrey et al., 2015)	22
CHAPITRE II		
2	Vue au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté avant écrêtage.	26
2.1	Sable étudié en laboratoire de mécanique des sols Biskra, Algérie.	27
2.2	Granulométrie initiale du sable étudié	27
2.3	Essai principale (essai oedométrique)	29
2.4	Présentation du bâti oedométrique à haute pression	29
2.5	Série des tamis utilisé pendant les essais granulométrique	30
2.6	Présentation de dispositif de mesure de perméabilité	31
2.7	Préparation l'indice de densité minimum (e_{min})	32
2.8	Préparation l'indice de vide maximum (e_{max})	32
2.9	Préparation d'un échantillon de sable carbonaté ayant des tailles des grains à 1.6mm	33
2.10	Mesure de perméabilité	35
2.11	Eprouvettes de sable carbonaté après des essais oedométriques sous différents niveaux	36
2.12	Acquisition d'images 3D de sable carbonaté par la tomographie de laboratoire Navier de l'école des Ponts Paris Tech.	37
2.13	Exemple de trois types de connectivité des voxels (Druckrey et al. 2015)	39
2.14	Différentes étapes du traitement d'images	40

CHAPITRE III		
3	Evolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte appliquée	45
3.1	Evolution de coefficient d'uniformité en fonction la contrainte appliqué	46
3.2	Evolution de la perméabilité au cours de chargement.	46
3.3	Influence du coefficient d'uniformité sur les rapports de la taille des grains sur la taille d'accès des pores.	48
3.4	l'évolution de la perméabilité du milieu et celle de la taille médiane d'accès aux pores, estimée par la loi proposée par Della et Feia (2017) , au cours de chargement	49
3.5	Distribution de nombre de coordination sous quatre niveaux de chargement	50
3.6	Evolution de la granulométrie	51

LISTE DES TABLEAUX

N°	TABLEAU	PAGE
	CHAPITRE II	
1.1	Caractéristiques de sable étudié	27
	CHAPITRE III	
3.1	Programme d'essais	44

Introduction Générale

Les sols granulaires sont présents dans plusieurs types d'ouvrages dans le domaine du génie civil et l'ingénierie pétrolière où le phénomène d'endommagement des grains peut se produire dans les réservoirs pétroliers lors de l'injection de l'eau de production à forte pression, sous les pieux des grands ouvrages et dans les bases des barrages de grande hauteur. Sous l'action de ces contacts. Les force de contact inter-granulaire peuvent dépasser la résistance à l'écrasement des grains et provoquer la rupture d'une fraction des particules, ce phénomène est appelé «endommagement des grains ou grain breakage». L'étude du comportement hydromécanique de ces matériaux est donc fondamentale afin de développer et d'appliquer les méthodes de conception d'ouvrages géotechniques couramment utilisées à ce jour, comme les calculs des fondations des bâtiments, la stabilité des pentes et la construction des remblais et des digues. D'autres domaines peuvent aussi être concernés par la mécanique des matériaux granulaires, tels que la fabrication de matériaux de construction, les technologies des poudres dans les industries pharmaceutique ou agro-alimentaire, ou encore le traitement des agrégats de roche dans les activités minières.

Le phénomène d'endommagement des grains génère plusieurs changements sur le comportement des sols granulaires tels que les caractéristiques hydriques et mécaniques. Ce phénomène a été étudié par des nombreux chercheurs qui ont réalisé des travaux expérimentaux (Dadda et al (2015) ; Marion perez (2013) ; Biarez et Hicher (1994) ; Novello et Johnston (1989), théoriques (Einav(2007) , Einav et Nguyen (2009)) et numériques (Druchrey et al.,(2015) ; Salhi (2016) ; karatza et al (2017) ; Ando (2013)) sur différents matériaux granulaires.(Ovale et al., (2013) ont réalisé une série d'essais de compression triaxial et d'essais oedométriques sur un sable de nature schisteuse afin d'étudier l'effet du temps lors d'écrasement de grains . (Dadda et al (2015)) ont effectuée des essais oedométrique à haute pression sur deux sable d'Hostun et un sable carbonaté sont associés par des analyse granulométrique, des mesures de perméabilité à différent niveau de chargement et évaluation de la distribution de la taille des pores. Marion Perez 2013, il a réalisé des essais oedométriques sur Deux matériaux ont été testés: des argiles Champlain provenant de la localité de La chenaie et des mélanges sable-bentonite. Salhi (2016) il a réalisée des essais oedométriques a forte pression sur sable d'Hostun, Sable carbonaté et sable de Fontainebleau, est des analyses granulométrique a partir des images micro-tomographie 3D a rayon X tels que la porosité, la surface spécifique à partir méthode (VER) sous différentes niveaux de chargement.

La tomographie par rayon X est une méthode très utiles pour étudié l'évolution des propriétés microstructurales et micromécaniques sur les matériaux granulaires. (Druckrey et al(2016) ; karatza et al,(2017) ; Alshibli et al, (2015) ; Ando,(2013)ont effectuée la tomographie aux rayon X pour analyse et traitement d'images 3D. (Zheng et Tannant (2016), ont réalisé des essais de compression 1-D sur des grains de quartz de forme ronds (Grains de sable de la formation de Jordan) suivis par des analyses granulométriques, et afin d'étudie la technique de traitement des images pour étudier l'effet de l'endommagement des grains sur la morphologie des particules.

Le phénomène d'endommagement des grains implique une réduction de la taille des grains et un étalement de la courbe granulométrique, ce qui génère un arrangement plus dense. Ce phénomène peut conduire à la production d'une quantité significative de particules fines. La présence de ces particules et la compaction du matériau modifie le comportement mécanique et la perméabilité.

Plusieurs facteurs influençant le phénomène d'endommagement des grains tels que : la granulométrie, en plus état des contraintes appliquées, en suite la minéralogie la cristallographie des grains, la forme des grains, le temps d'application de la charge, et la teneur en eau...etc. Dans ce contexte nous essayons à répondre à la question suivante :

✚ Quel est l'effet de ce phénomène sur l'évolution des propriétés microstructurales et micromécaniques des matériaux granulaires ?

Afin de répondre à ces questions un programme expérimental a été réalisé sur un type de sable« **sable carbonaté ayant une taille des grains supérieure à 1.6 mm**». Des essais œdométriques à haute pression suivis par des analyses granulométriques et des mesures de perméabilité ont été réalisés.

Ce rapport comporte trois chapitres : après cette introduction générale, le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. Le deuxième chapitre concerne la présentation des dispositifs d'essais et des techniques expérimentales, ainsi qu'à une description du sable étudié. Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux ainsi que les résultats du traitement d'images 3D obtenues par la micro-tomographie aux rayons X et analyse numérique. Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats de l'étude.

Chapitre I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1-Introduction

Dans la littérature, les travaux publiés sur le phénomène d'endommagement des grains est extrêmement riche dans plusieurs domaines à savoir les domaines de génie civil, pétrolier, hydraulique, etc. les recherches sur les phénomènes d'endommagement des grains se sont pour suivis par plusieurs travaux, ont peut citer ceux de [Dadda et al., 2015](#) et [Karatza et al., 2017](#).

Il existe de nombreuses situations dans lesquelles les sols granulaires sont soumis à de fortes contraintes, comme par exemple à l'extrémité des pieux ou dans les fondations des barrages de grande hauteur, dans les réservoirs pétrolières lors de l'injection de l'eau de production à fortes pression... etc. Ces niveaux de contrainte peuvent engendrer la rupture des grains. L'endommagement des grains dans ces matériaux granulaires sous fortes contraintes peut engendrer plusieurs changements dans leur comportement mécanique.

La rupture dans les matériaux granulaires a été étudiée par de nombreux chercheurs, qui ont réalisé des travaux expérimentaux ([Nakata et al., 2001](#); [Ovale 2013](#) ; [Dadda et al. 2015](#)), théoriques ([Einav2007a-b](#) ; [Einav et Nguyen 2009](#) ; [Russel et al. 2013](#)), et numériques ([Cil et Alshibli 2012](#) ; [Cil et Alshibli 2014](#) ; [Druckrey et Alshibli 2016](#) ; [karatza et al.,2017](#)). Dans ces recherches la rupture des grains a été étudiée sur différents matériaux et par des différentes méthodes.

Dans ce chapitre, nous présentons une recherche bibliographique des principaux travaux publiés sur le phénomène d'endommagement des grains dans les matériaux granulaires sous sollicitation mécanique, et l'effet de ce phénomène sur le comportement des sols granulaires, et les résultats des la perméabilité, la granulométrie, la taille des pores, et la morphologie ainsi que les travaux sur le traitement d'images 3D obtenues par la tomographie pour étudier les propriétés microstructurales et les propriétés de contact (nombre de contact et l'orientation, et le nombre de coordination) sur les matériaux granulaire.

1.2-Fracturation des grains et évolution de la microstructure**1.2.1-Généralité sur le mécanisme d'endommagement des grains**

L'endommagement des grains dans un assemblage granulaire est à mettre en regard de la distribution des forces de contact sur les grains. Si ces forces dépassent une valeur limite, la particule s'écrase. En raison de l'hétérogénéité dans la forme et la taille des grains, la distribution de l'intensité des forces sur les grains peut être complexe. Ainsi, le taux de rupture des grains dépend du rapport entre la résistance des particules individuelles et la contrainte macro-mécanique ; si ce rapport est faible, la rupture des grains est augmentée (Ortega 2013). D'après Guyon et Troadec (1994), dans un assemblage granulaire, on distingue trois modes de rupture (**Error! Reference source not found.**).

- **Fracture** : cassure du grain en plus petits grains de taille similaire (disons 25 à 50% de la taille des grains d'origine).
- **Attrition** : un grain se brise en un fragment principal d'une taille légèrement plus petite que le grain initial, et plusieurs fragments plus petits, produits généralement par la rupture des aspérités.
- **Abrasion** : génération de fines dues au frottement entre les grains.

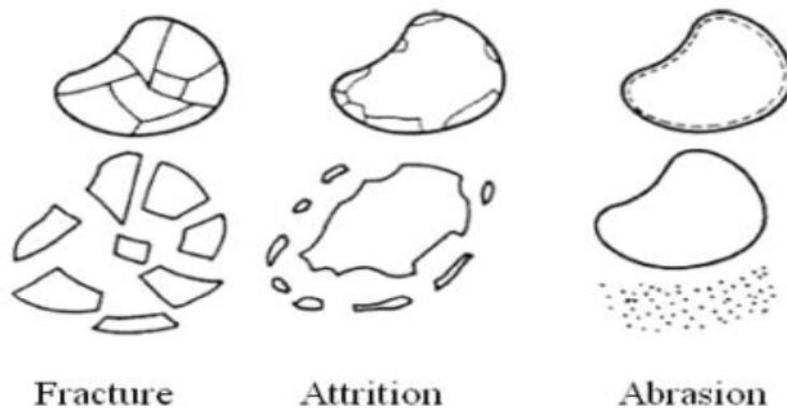


Figure 1.1: Modes de fracture d'un grain (Guyon et Troadec, 1994)

Les études des mécanismes de l'endommagement des grains et ces influences sur les propriétés du transport des matériaux et les propriétés mécaniques ont été commencées depuis longtemps pour résoudre les problèmes pratiques en génie civil tels que les barrages en terres, les fondations profondes, et dans les réservoirs pétroliers où le sol est soumis à des sollicitations plus élevées que celles couramment rencontrées dans la mécanique des sols habituelle.

1.3- Mécanisme d'endommagement des grains d'un matériau granulaire sous haute pression

Le phénomène d'endommagement des grains génère plusieurs changements sur le comportement des sols granulaires. Une explication de ce phénomène a été présentée par [Dadda et al., \(2015\)](#). Voir la Figure 1.2. qui ont effectué des essais œdométriques à haute pression sur deux sables (sable carbonaté et sable d'Hostun HN 34) à différents niveaux de chargement.

La Figure 1.2 montre une comparaison entre la relation contrainte-déformation pour le sable carbonaté et de celui d'Hostun. Le changement de la pente des courbes contrainte-déformation correspond au début d'écrasement des grains.

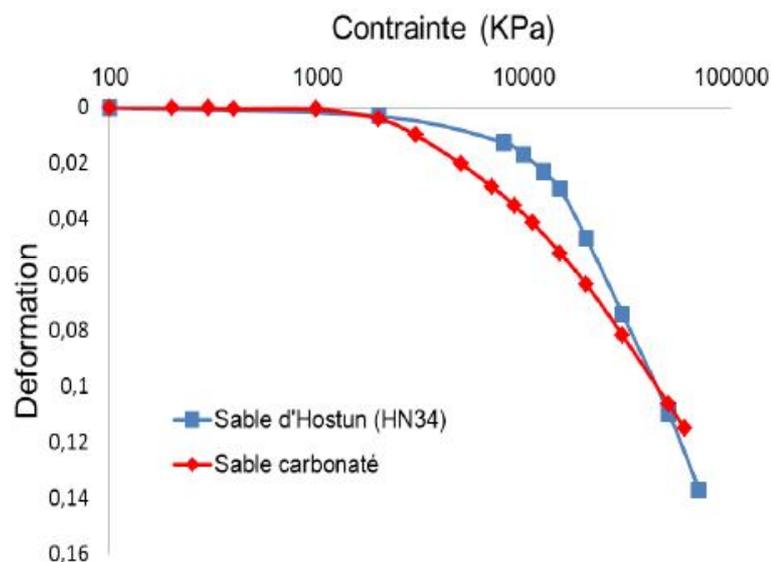


Figure 1.2 : Courbe contrainte-déformation pour le sable d'Hostun (HN34) et le sable carbonaté ([Dadda et al. 2015](#)).

Dans cette étude, la courbe de contrainte-déformation est divisée en deux parties, la première partie est la phase plastique c'est-à-dire le mécanisme est réarrangement des grains (l'effondrement des pores), Le changement de la pente de la courbe ici est le début de l'écrasement. La deuxième partie est la phase où les deux mécanismes se superposent (l'écrasement des grains et l'effondrement des pores) sous forte contrainte.

Le phénomène d'endommagement des grains est généralement accompagné par une déformation plastique (qui est l'écrasement des grains et/ou réarrangement des grains).

La rupture des grains peut modifier de façon significative la propriété microstructurale telle que (la taille et la forme des grains ainsi que la taille des pores), et les propriétés de contact d'un matériau granulaire. [karatza et al., \(2017\)](#) ; ont effectué des essais oedométriques sur des échantillons « zéolites » pour étudier le phénomène d'endommagement des grains à partir de la méthode des éléments discrets (DEM) pour modéliser numériquement la rupture . Une explication de ce phénomène a été présentée (la Figure 1.3).

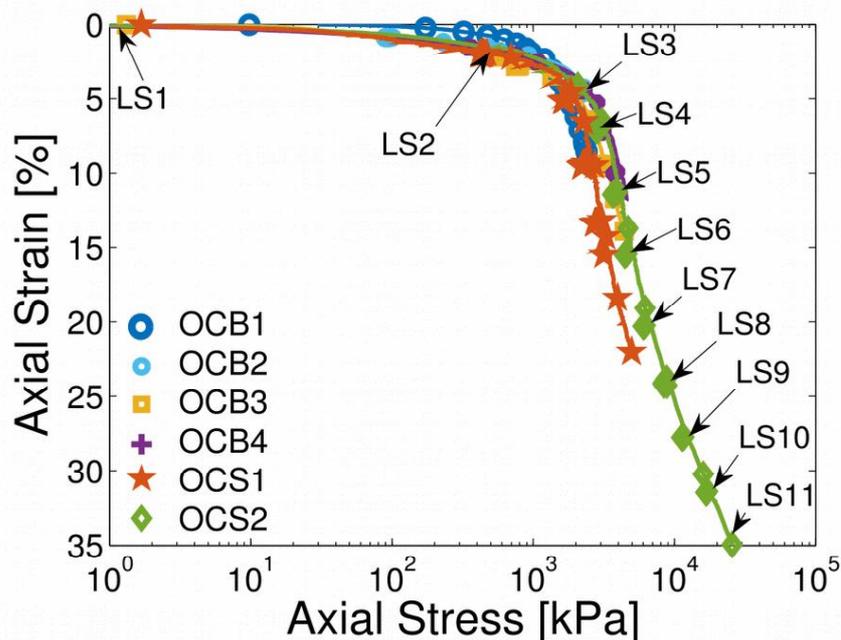


Figure 1.3 : Réponse macroscopique des tests oedométriques. ([Karatza et al., 2017](#))

La réponse macroscopique des tests oedométriques montre une déformation plastique, ou on observe deux phases de comportement et un point de changement de la courbe (point de début de l'endommagement) résultant d'une compression : augmentation des particules fines avec l'augmentation de contrainte appliquée due au réarrangement des grains sous fortes contraintes.

La Figure 1.4 montre l'évolution de la rupture lors du test d'un matériau granulaire ([karatza et al., 2017](#)). Ces résultats montrent une réduction significative de la taille des pores avec l'augmentation de la contrainte appliquée.

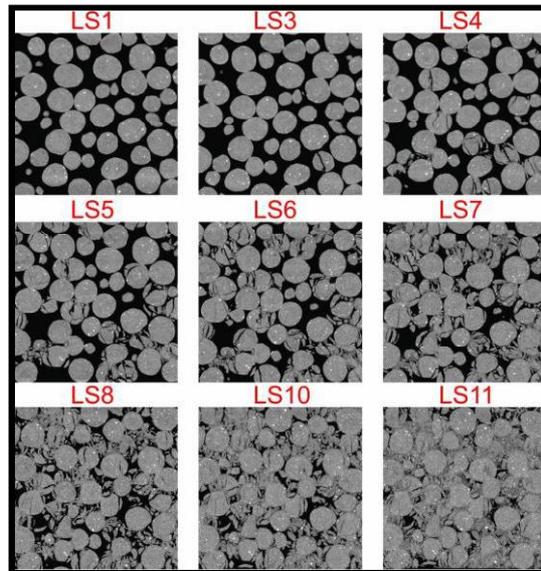


Figure 1.4: Étendue de la rupture du test OCS1 (section agrandie à partir d'images XCT).
(Karatza et al., 2017)

L'écrasement des grains apparaît quand les contraintes imposées aux grains qui composent le sol dépassent leur propre résistance. La compression s'effectue tout d'abord avec un réarrangement, ensuite l'écrasement des grains se produit en commençant par les plus gros et les plus fragiles. La rupture des grains génère une évolution de la granulométrie du matériau.

1.4- Effets de l'endommagement des grains sur le comportement des sols granulaires

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur le phénomène d'endommagement des grains, qui ont étudié son effet sur le comportement des sols granulaires sous fortes contraintes.

1.4.1- Evolution de la granulométrie

L'étude de l'écrasement des grains est principalement basée sur l'évolution de la courbe granulométrique en fonction de chargement appliqué.

[Dadda et al., \(2015\)](#), à réalisés des essais oedométriques sous différentes contraintes et suivis par des analyses granulométriques afin d'explorer la production des particules fines après chargement. La [Figure 1.5](#) présente l'évolution de la courbe granulométrique pour différents niveaux de chargement pour le sable d'Hostun ; le sable carbonaté (ce sont des sables des référence utilisés couramment dans les laboratoires de recherche de mécanique des sols en France). L'évolution de la granulométrie en fonction de la contrainte appliquée est assez remarquable. Cette évolution se ralenti à partir d'une certaine valeur de contrainte. La courbe granulométrique correspondant à cette valeur est appelée, selon [Einav \(2007a\)](#), « courbe granulométrique ultime ».

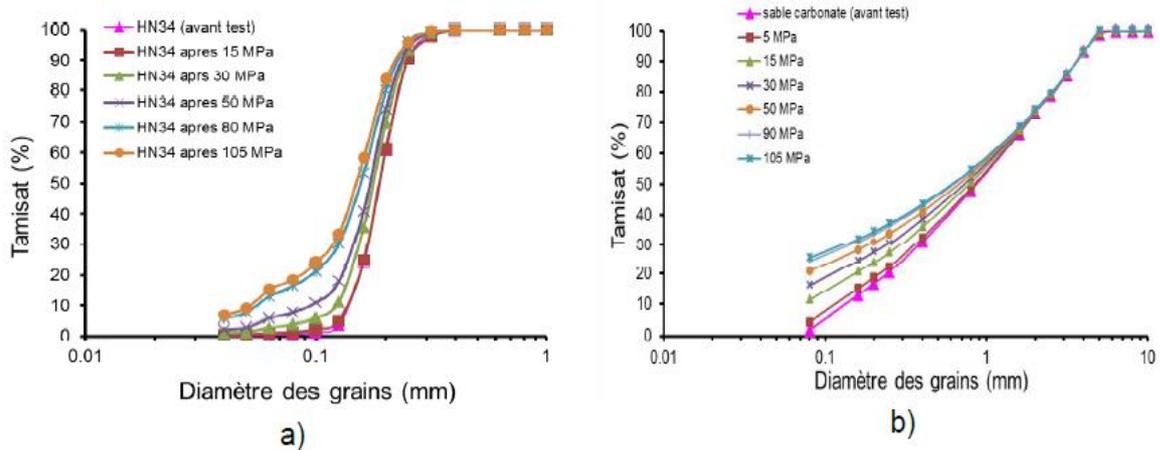


Figure 1.5 : L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte a) *Sable d'Hostun*, b) *Sable carbonaté*. [Dadda et al \(2015\)](#)

Donc, l'évolution des courbes granulaires dues aux fines créées pendant l'enrasement qui est très remarquable, c'est l'augmentation importante des petits grains avec l'augmentation du nombre de contacts. L'illustration physique de la courbe granulométrique ultime est l'existence d'une équilibre géométrique ou le système granulaire augmente le nombre de contacts entre les particules jusqu'à avoir un réseau de contact stable ([Hardin, 1985](#)). Dans ce cas, il y aura une diminution de la concentration des contraintes sur certaines particules et par la suite une résistance supplémentaire contre l'écrasement pour la totalité du système est acquise. Ce mécanisme est schématisé par [Russell et al., \(2013\)](#) sur la Figure 1.6.

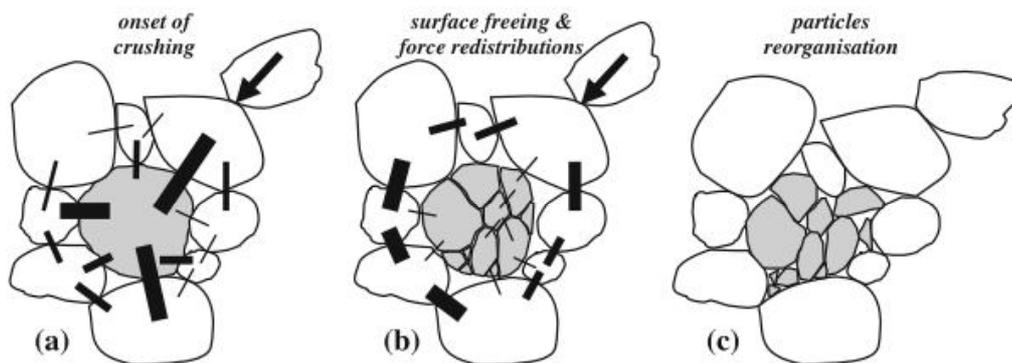


Figure 1.6 : Les étapes de l'écrasement et durcissement du système granulaire ([Russell et al., 2013](#))

Après ces travaux l'évaluation et la définition des paramètres pour quantifier et exprimer l'écrasement est une fatalité. Pour cela plusieurs méthodes sont proposées pour représenter l'écrasement avec ces évolutions en fonction du chargement, il y a des chercheurs qui sont

utilisé l'évolution de la courbe granulométrique comme un critère afin estimer l'écrasement ,ou ils sont utilisé l'augmentation de pourcentage des passants dans une taille (tamis) précis comme [Leslie \(1963\)](#) a utilisé le pourcentage des passants dans un tamis pour laquelle le matériau d'origine était maintenu à 100%, après en (1975) a utilisé l'augmentation en pourcentage des passants dans un tamis pour laquelle le matériau d'origine était maintenu à 90%. Dans l'autre part la mesure de l'écrasement proposé par [Marsal \(1965\)](#) tombe en la catégorie de l'augmentation de pourcentage passant a une taille de tamis unique mais si il y a une augmentation dans plusieurs tamis de diamètre différent, l'écrasement c'est la somme de toutes ces tamis.

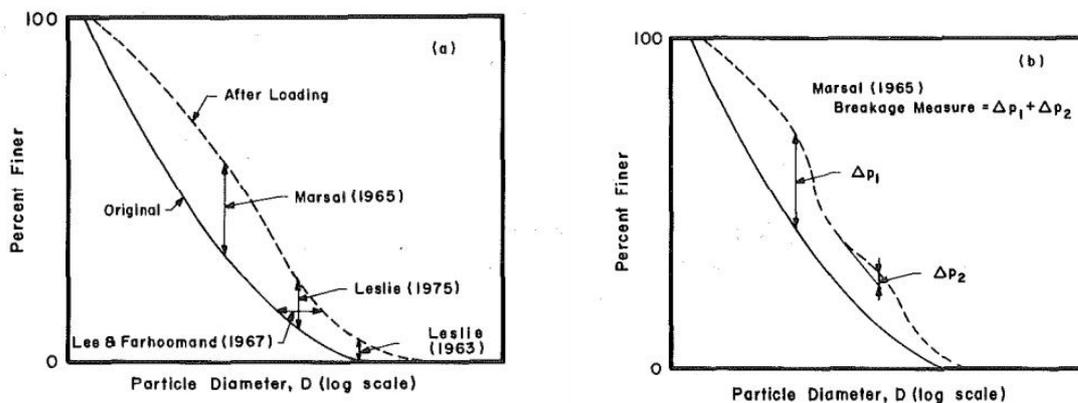


Figure 1.7 : Mesures antérieures de l'écrasement ([Hardin et al., 1985](#))

1.4.2- Evolution de la perméabilité du sable sous sollicitation mécanique

L'écoulement des fluides dans un milieu poreux est influencés par plusieurs paramètres tels que : propriétés du milieu poreux (porosité, perméabilité, taille et forme des grains, taille et forme des pores) et l'état de contrainte qui lui est appliqué.

Dans la littérature, il existe plusieurs auteurs qui se sont intéressés par cette thématique. Ces études sont souvent menées sur des matériaux cohérents; grés de Berea, [Louis et al. 2005](#), grès de Vosges, [Zhu et Wong, 1997](#), calcaire d'Estailades, [Ghabezloo et al. 2008](#), argile de Boom, [Coll 2005](#) (cité par [Monfared 2011](#)), roche de Fontainebleau, [Sulem et Ouffroukh 2006](#). Les dispositifs utilisés par ces auteurs sont généralement l'appareil triaxial afin de mettre le matériau testé sous chargement et mesurer les déformations correspondantes. Les études du comportement hydromécanique des matériaux non consolidés sont relativement rares étant donné la difficulté de préparation des éprouvettes représentant les cas in-situ ([Almisned et al. 2011](#)). Nous citons ici quelques études qui ont été réalisées sur des matériaux granulaires ; [Olson et al \(2009\)](#) ont testé un sable d'Ottawa (grains grossiers et ronds) dans un

appareil triaxial à faible confinement, [Touhidi-Bagnini \(1998\)](#) a réalisé des essais triaxiaux suivi par des mesures de perméabilité sur un sable bitumineux. [Nguyen \(2012\)](#) a réalisé des essais œdométrique et triaxiaux à différents chemins de contraintes sur des billets de verre et le sable de la Durance, [Crawford et al. \(2008\)](#) ont mesuré l'évolution de la perméabilité d'une éprouvette de sable d'Ottawa sous chargement, [Scott et al. \(1994\)](#) ont suivi l'évolution de la perméabilité des éprouvettes du sable bitumineux subirent à des chargements isotrope et anisotrope.

[Dadda et al., \(2015\)](#) ont étudié l'évolution de la perméabilité pour le sable HN34 et le sable carbonaté, des mesures de perméabilité ont été réalisées dans chaque palier de chargement. Les résultats de ces mesures sont présentés sur la [Figure 1.8](#). On observe une diminution considérable de la perméabilité pour les deux types de sable. Cette diminution est due à l'effondrement des pores et à la production des particules fines qui peuvent jouer un rôle de colmatant lors de la circulation d'eau. La diminution de la perméabilité est plus importante pour le sable carbonaté, ce qui est compatible avec le seuil d'écrasement plus faible observé pour ce sable.

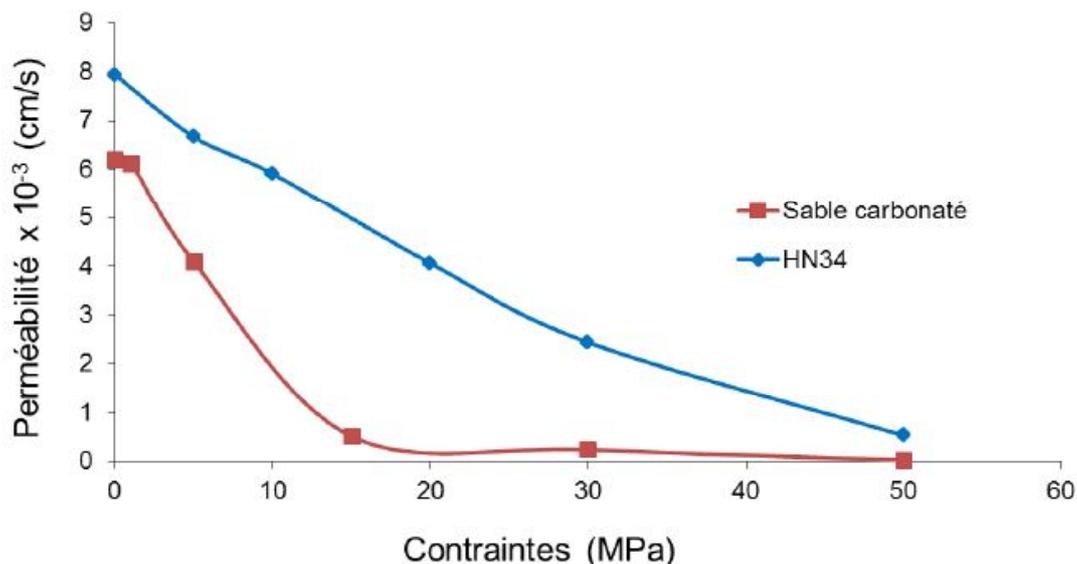


Figure.1.8. Perméabilité des sables en fonction de la contrainte appliquée. ([Dadda et al., 2015](#))

[Chen et al. \(2018\)](#) ont étudié l'évolution de la perméabilité sur des échantillons de sable de grès (sandstone) à différents niveaux de chargement (0, 2, 4, 8, 12, et 16 MPa), et pour différentes valeurs de porosité. Et ils ont utilisé la tomographie aux rayons-X afin d'étudier l'évolution de la structure des pores en fonction de chargement. La [Figure 1.9](#) présente l'évolution de la perméabilité du sable de grès en fonction de la contrainte appliquée.

Et la Figure 1.10 montre des images tomographiques à rayons-X en niveaux de gris à différents niveaux de chargement. Ces résultats montrent que la perméabilité est diminuée avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Cette diminution est due à l'effondrement des pores et à la production des particules fines (endommagement des grains) qui colmatent les pores (Figure 1.10).

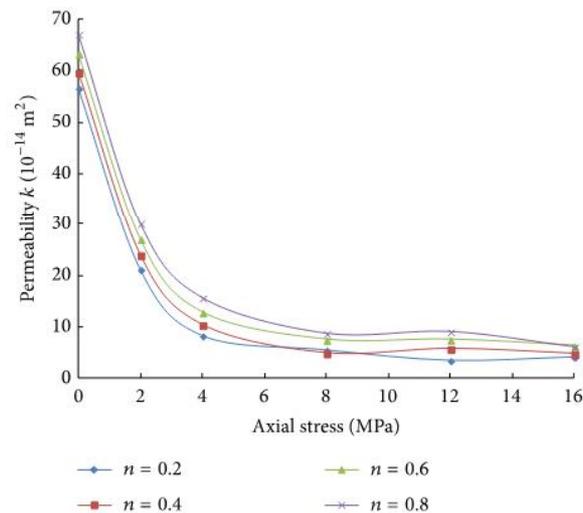


Figure 1.9 : Processus de diminution de la perméabilité à la contrainte axiale (Chen et al., 2018)

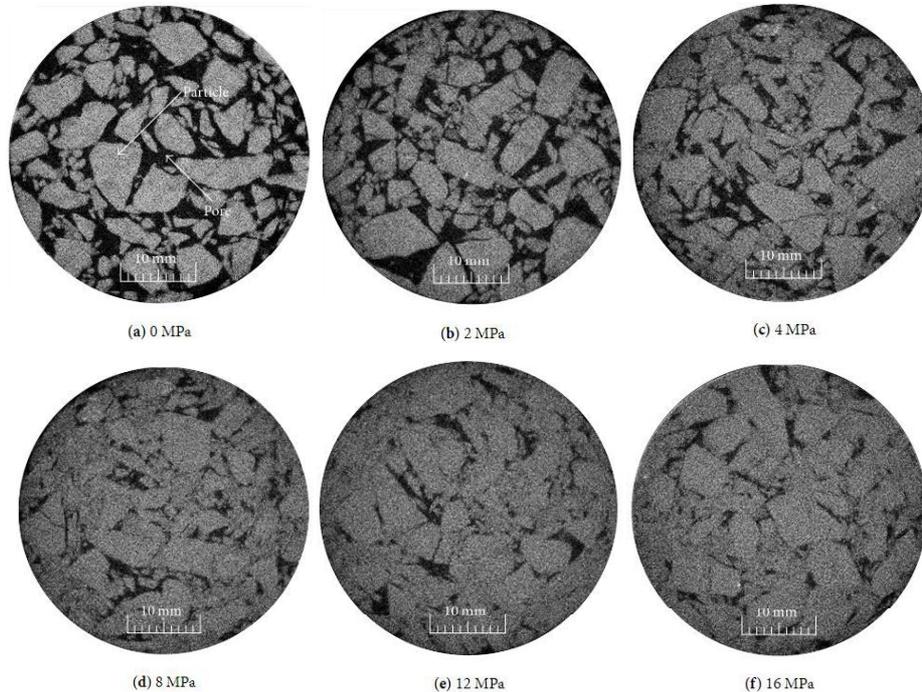


Figure 1.10 : Processus formé de pores isolés dans l'échantillon sous les contraintes axiales accrues (Chen et al., 2018)

Parmi les domaines les plus touchés par le problème de la diminution de la perméabilité à cause de l'écrasement sont les barrages et les puits pétroliers en phase de production.

Vardoulakis et al., (1993) a étudié le phénomène de réduction de perméabilité due à l'écrasement des grains autour d'un puits de perforation, où il a utilisé un assemblage des billes de verre sous un chargement isotrope pour étudier seulement l'effet d'écrasement sur la mesure de perméabilité, ce mesure montre une forte influence de l'écrasement sur la perméabilité comme la figure suivante montre :

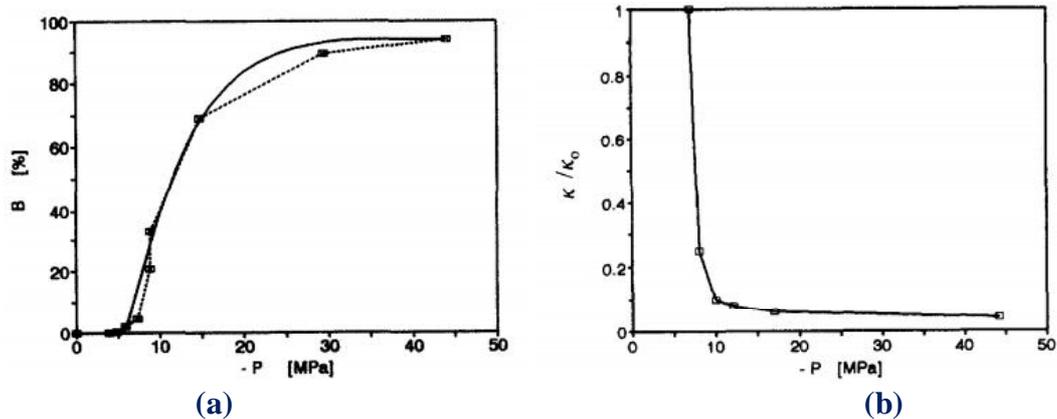


Figure 1.11 : a) écrasement en fonction du chargement appliqué, b) la perméabilité normalisée en fonction de contrainte appliquée (Vardoulakis et al., 1993).

1.4.3 - Changement de la morphologie des grains

Pour le changement de la morphologie des grains. Zheng et Tannant (2016), ont réalisé des essais de compression 1-D sur des grains de quartz de forme ronde (extrait de la Formation de Jordan), à l'aide d'une coupelle en acier (Figure1.12). L'appareil relié a un capteur piézoélectrique pour la surveillance des émissions acoustiques créées par l'écrasement des grains. Les essais suivis par des analyses granulométriques (Figure1.13). La technique de traitement des images a été utilisée pour étudier la morphologie des grains.

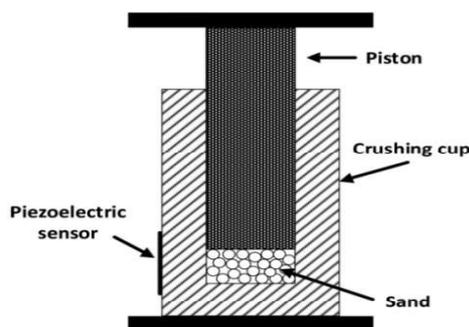


Figure1.12 : Coupelle en acier (Zheng et Tannant 2016)



Figure 1.13: Analyse granulométrique

La Figure 1.14 présente la forme des grains de quartz de différentes tailles après l'essai de l'écrasement. Ces résultats montrent que les grains écrasés apparaissent sous forme allongée et angulaire.

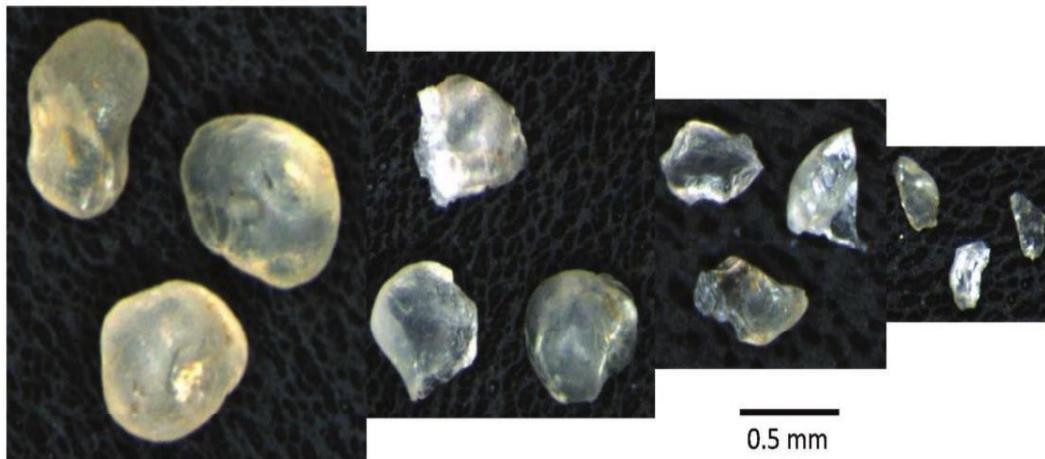


Figure 1.14 : Forme des grains de quartz après l'essai d'écrasement (Zheng et Tannant 2016)

1.4.4- Evolution de la taille des pores

Le chargement d'un sable sous forte contrainte provoque une évolution au niveau de la microstructure (taille des pores).

Pour mieux voir l'effet de l'écrasement sur la distribution de taille des pores, ils ont abordé les mesures tensiométriques de sable carbonaté, ayant un seuil d'écrasement faible, pour éviter de charger la pierre céramique par des fortes contraintes. Pour des contraintes supérieures à 10MPa, ils ont trouvé que les échantillons de sable carbonaté donnent la possibilité d'utiliser la porosimétrie au mercure. La Figure 1.15 suivante montre quelques résultats sur la distribution des tailles des pores en fonction des contraintes de chargement

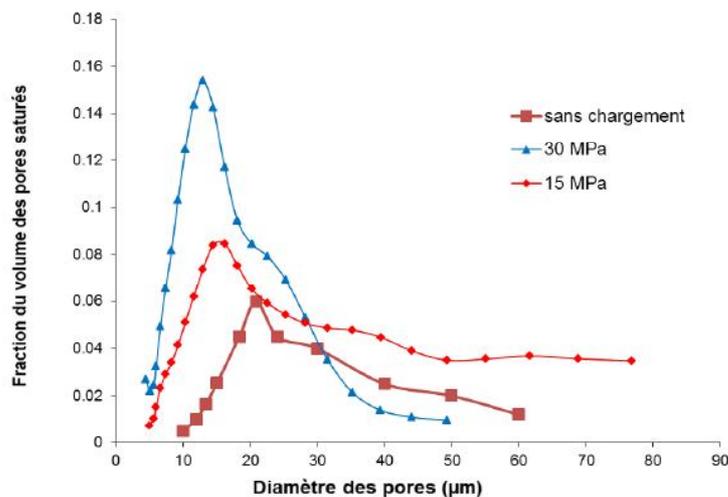


Figure 1.15 : Evolution de la distribution des tailles des pores de sable carbonaté en fonction de contrainte appliquée. (Dadda et al., (2015))

On observe clairement une translation de la taille médiane des pores due aux deux phénomènes étudiés précédemment (effondrement des pores et l'écrasement des grains). Un échantillon sans chargement a une taille médiane des pores de l'ordre de 21 μm . Avec différents chargements successifs, cette valeur est réduite à 14.5 μm sous 15 MPa et ensuite à 12 μm sous 30MPa de contrainte axiale.

1.5- Imagerie 3D des matériaux granulaire par les rayons-x

Les matériaux granulaires sont composés de particules discrètes qui interagissent les unes avec les autres d'une manière complexe. Alors l'étude de l'évolution des propriétés microstructurales à l'échelle du grain (micro) par les appareils de laboratoire ne permet pas de mesurer ces propriétés microstructurales à l'échelle micro.

L'imagerie par les rayons-X est un outil révolutionnaire en géo mécanique expérimentale. Les rayons-X sont particulièrement adaptés à l'étude des géomatériaux car ils sont une technique de mesure non destructive, ce qui permet d'imaginer différentes configurations. De plus, les rayons-X sont sensibles à la densité atomique, ce qui est particulièrement utile pour les milieux granulaires car cela permet de distinguer facilement les phases poreuses et solides.

Des recherches approfondies ont été publiées pour quantifier les caractéristiques des particules telles que la morphologie, la taille des particules, la forme et l'orientation, et les caractéristiques micromécaniques tels que le nombre de coordination, la surface de contact et l'orientation de contact à l'aide d'images 3D obtenus par la tomographie aux rayons-X ([Al-Raoush 2007](#) ; [Bloom 2009](#) ; [Ando 2013](#) ; [Alshibli et al. 2014](#) ; [Druckrey et Alshibli 2014](#) ; [Druckrey et al. 2015](#) ; [Mahbub et Haque 2016](#)).

1.6-Principe d'imagerie 3D par rayons-x

De nos jours, la micro-tomographie par rayons X représente l'une des techniques les plus efficaces pour explorer les propriétés microstructurales 3D d'un milieu poreux de manière qualitative et quantitative. La précision des résultats dépend de la résolution et du contraste des objets dans les images 3D. Différentes études ont été réalisées pour suivre les caractéristiques de contact lors d'essais in situ utilisant des observations par rayons-X ([Druckrey et al., 2016](#); [Ando, 2013](#)). a effectué des tests triaxiaux in situ sur du sable et a extrait l'évolution des paramètres de contact pour différents niveaux de contraintes triaxiales en séparant de deux manières différentes les grains dans les images 3D et en calculant l'évolution de la surface de contact zone et le numéro de coordination.

1.6.1-Tomographie aux rayons-X

La tomographie aux rayons-X a été développée dans les études en géo-matériaux pour analyser les propriétés microstructurales et les propriétés de contact tel que (la porosité, nombre de coordination, la surface de contact, la surface spécifique, la granulométrie et l'orientation du contact)

Très brièvement, la tomographie est une méthode très efficace de reconstruction d'un champ 3D de coefficient d'atténuation des rayons-X à l'intérieur d'un objet à partir d'une série de projections différentes (radiographies) de l'objet. Les différentes projections sont en général acquises par une rotation relative du système d'acquisition d'objets et d'images.

1.6.2- Acquisition d'images 3D

La tomographie par rayons-X est une technique d'imagerie non destructive pour étudier les géo-matériaux et visualiser la structure interne des matériaux. Elle permet d'obtenir une description en 3 dimensions (3D) des structures internes d'un objet à partir d'une série de radiographies à 2 dimensions (2D). Une radiographie est une image 2D en niveaux de gris de l'atténuation du faisceau de rayons X par les différents matériaux granulaire composant l'objet.

Lors de l'acquisition d'un scan de tomographie, un échantillon de matériaux granulaire à est placé sur un plateau tournant, entre une source de rayons-X et un détecteur. L'échantillon tourne, le détecteur mesure le degré d'atténuation créant des radiographies 2D en niveau de gris.

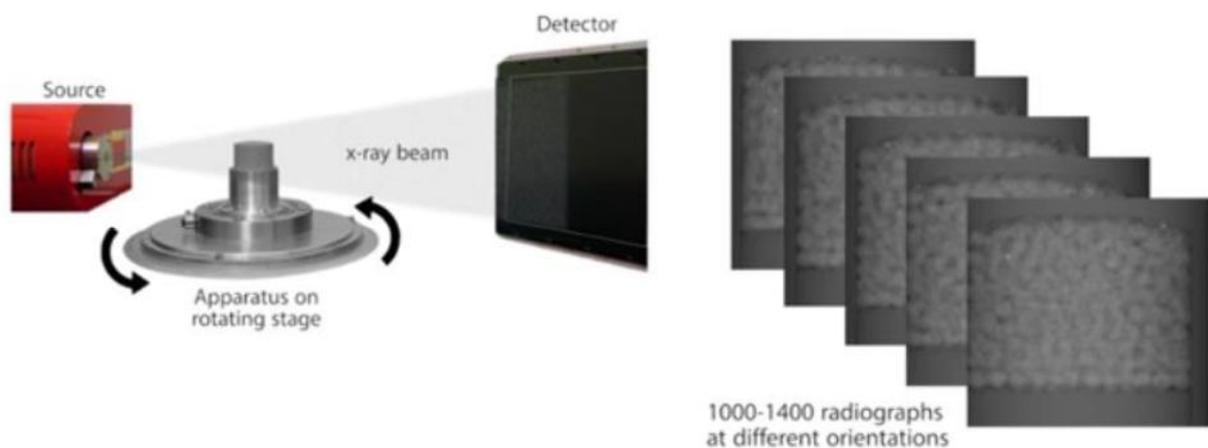


Figure 1.16 : Acquisition d'images 3D (karatza et al., 2017).

Après les radiographies 2D individuelles sont reconstruite pour produire l'image en 3D.

Figure 1.17

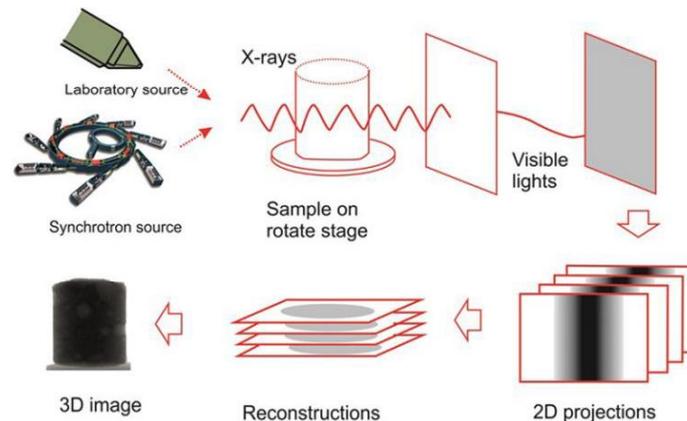


Figure 1.17 : Illustration schématique de l'acquisition et de la reconstruction d'images tomographiques par rayons-X (MA et al, 2017)

1.6.3- Traitement d'images 3D

Les études (Dadda (2017) ; Ando (2013) ; Karatza et al., 2017 ; Druckrey et al., 2015 ; Alshibli et al., 2014) ont montré Des méthodes quantitatives d'imagerie 3D ont été développées pour calculer les propriétés microstructurales (porosité et surface spécifique) et les propriétés de contact (surface de contact, nombre de coordination, type de contacts, orientation des contacts, etc...) sur différent échantillons des matériaux granulaire.

la Figures 1.16 montre le travail de Ando(2013) ont distingué 3 étapes principales de processus d'identification des particules.

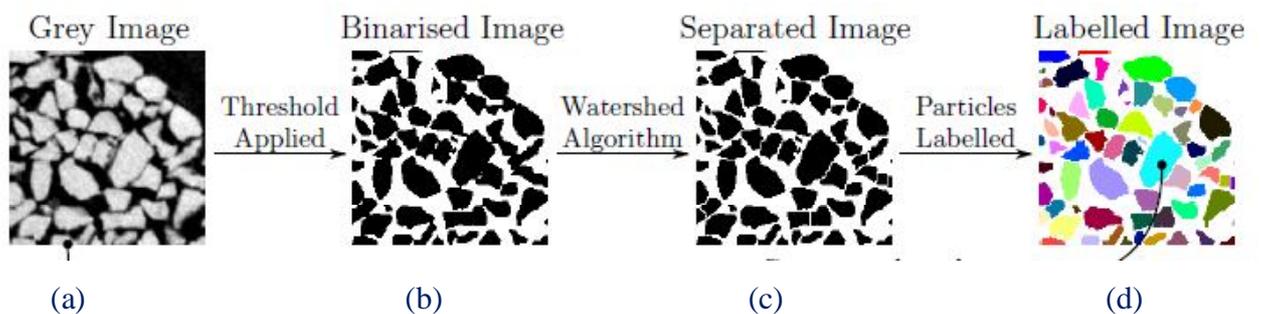


Figure 1.18 : Etapes de processus d'identification des particules. (Ando 2013).

Les images 3D doivent être traitées pour transformer l'image en niveaux de gris (Figure 1.18.a) en une image binaire segmenté par seuillage (threshold) (Figure 1.18.b) et éventuellement en une image séparé par algorithme watershed pour supprimer tout les voxel en contact (Figure 1.18.c) où chaque grains est individuellement identifiée et étiquetée (image étiquetage) (Figure 1.18.d).

Donc, Les principales étapes de traitement d'images sont :

- **Binarisation (Segmentation par seuillage)**

Est le processus utilisé pour transformer une image en échelle de gris en une image binaire - celle dans laquelle il n'y a que deux valeurs (généralement grain et vide) c'est-à-dire la séparation entre la phase solide et la phase vide. Ceci est souvent obtenu en utilisant une valeur de seuil de gris, au-dessus et en dessous de laquelle les deux phases sont assignées.

- **Segmentation (Séparation des grains)**

La segmentation signifie littéralement séparer, mais dans le traitement d'images, il est utilisé de deux façons liées mais différentes. Il est parfois utilisé pour signifier "binarise" (où les différentes phases présentes dans l'image sont séparées les unes des autres). La segmentation est utilisée dans un sens plus physique pour signifier la séparation des objets les uns des autres dans l'image. A cette fin, un algorithme de type "Watershed" est généralement utilisé.

- **Étiquetage des particules (Labelling)**

Cette étape permet d'obtenir une image 3D dans laquelle tous les voxels de chaque particule ont une étiquette unique (un entier positif) qui leur est assignée.

1.7- Mesure des propriétés des contacts par la tomographie aux rayons-X

Les études précédentes ([Ando 2013](#) ; [Alshibli et al. 2014](#) ; [Druckrey et al. 2015](#) ; [Dadda et al. 2015](#) ; [Karatza et al. 2017](#)) ont montré que les changements, en terme mécanique et hydrique d'un assemblage granulaire sous sollicitation mécanique sont liés aux modifications de leurs propriétés microstructurales, qui sont :

- Les propriétés des grains tels que : la taille, la surface, la morphologie des grains, l'emplacement et l'orientation des particules ;
- Et les propriétés de contact.

La tomographie aux rayons-X est largement utilisée dans la littérature pour mesurer ces caractéristiques.

1.8-Propriétés de contact

Les contacts entre les grains sont les points auxquels les forces sont transmises dans un assemblage granulaire. Donc l'étude de l'évolution des propriétés de contact tels que ; nombre de coordination, orientation de contact ([Figure 1.19](#)) et la surface de contact ([Figure 1.20](#)), contact entre les grains ([Figure 1.21](#)) est nécessaire afin d'explorer les changements microstructurales dans un assemblage granulaire. Les contacts sont définis comme la somme totale de tous les points (Voxels) auxquels deux particules se touchent.

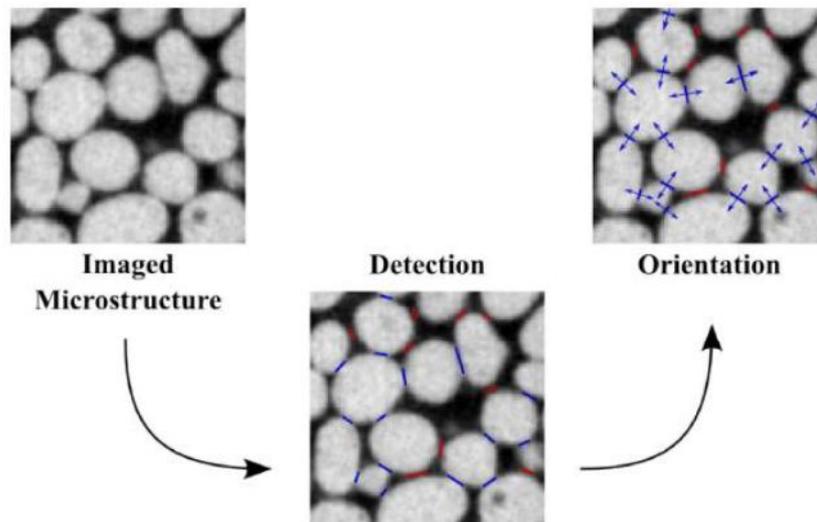


Figure 1.19 : Caractérisation des contacts inter-granulaire de CT à rayons X ([ImperialCollege–March 2018](#))

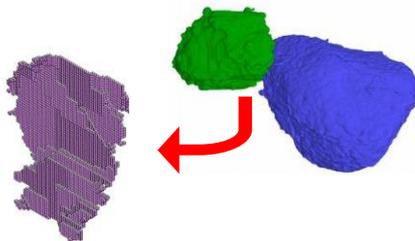


Figure 1.20 : Surface de contact entre deux grains
(Dadda 2017)

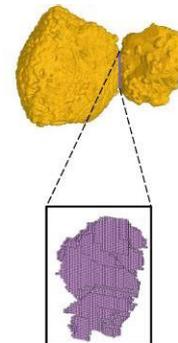


Figure 1.21 : Contact entre deux grains
(Dadda 2017)

1.8.1- Contact entre deux particules

La définition du contact entre deux particules consiste à identifier les faces, les coins et / ou les bords de voxels partageant une face, un coin et / ou un bord mutuel avec une particule voisine et à calculer l'emplacement et les directions de ce contact. La Figure 1.22.b montre un exemple de contact (représenté en rouge) entre deux particules de voxel. L'emplacement du contact a été calculé en ajoutant les emplacements de voxels

dans chaque direction (x, y, z) et en les divisant par la «surface» totale de contact, similaire au calcul des centroïdes de particules.

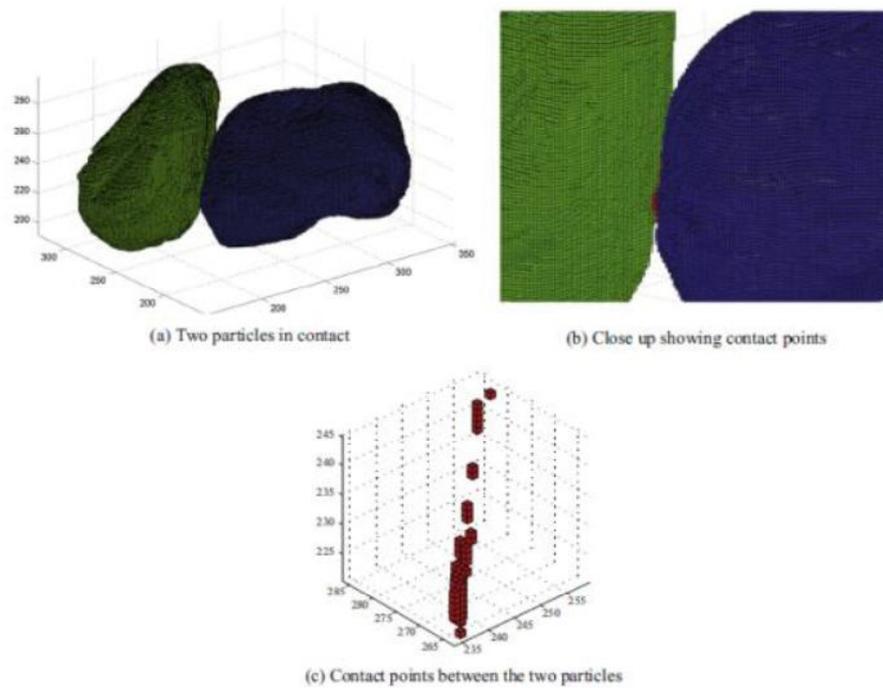


Figure 1.22 : Contact entre deux particules de voxel (Druckrey et al., 2015)

Le contact entre deux particules n'est pas toujours une seule surface continue. La rugosité de la surface de la particule ou la morphologie complexe pourrait conduire à plusieurs points de contact, en particulier dans les matériaux granulaires très anguleux ou rugueux. Considérant que les contacts de particules peuvent ne pas être continus, les voxels de contact ne se trouvent pas dans un plan comme le montre la Figure 1.22c.

1.9- Conclusion

Le phénomène d'endommagement des grains se produit dans le réservoir pétrolier, sous les basses de barrages et sous les pieux pour les propriétés micromécaniques et microstructurales.

Dans ce chapitre, Tout d'abord, on a abordé la généralité sur le mécanisme de l'écrasement des grains, ce mécanisme dépend des caractéristiques mécaniques et hydriques (taille, forme des grains, la minéralogie ...etc). Ensuite, l'évolution granulométrique en fonction de la charge pour étudier le phénomène d'endommagement des grains et la création des particules fines dans un sable influencent sur les propriétés mécaniques, la perméabilité et la microstructure du matériau qui effectue des essais œdométriques sur différents matériaux granulaires. Ainsi l'effet de l'endommagement des grains sur le comportement des sols granulaires.

L'identification des particules par le traitement d'images 3D, a été détaillée et renforcée par une synthèse des dispositifs expérimentaux, et les résultats associés trouvés dans la littérature.

Chapitre II

ÉTUDE EXPÉRIMENTAUX

2.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord une description de matériau étudié, puis les essais utilisés pour la caractérisation de ce matériau. Ensuite, nous présentons les dispositifs expérimentaux utilisés, Nous décrivons aussi brièvement les procédures expérimentales des essais réalisés dans le cadre de ce travail et les raisons d'utilisation de chaque méthode et essai.

L'évaluation des caractéristiques microstructurales de sable carbonaté à partir les images 3D tels que la granulométrie et nombre de coordination et la distribution de taille médiane des pores est nécessaire, pour exploiter l'évolution de ces caractéristique par l'endommagement des grains sous fort chargement.

2.2- Description de matériau étudié

Le matériau utilisé dans cette étude : est le sable carbonaté ayant des tailles des grains supérieurs à 1.6mm. Ce sable est dérivé principalement à partir de matériaux de carbonate tels que les coraux, les coquilles de mollusques, algues, sa composition chimique est de 98% calcite, il est très fragile en compression par rapport au sable siliceux. La Figure 2 présente une Vue au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté avant écrêtage. La Figure 2.1 Présente le sable carbonaté ayant une taille des grains supérieurs à 1.6 mm dans laboratoire de mécanique des sols Biskra, Algérie. La courbe granulométrique de ce sable est présentée sur la Figure 2.2. Les caractéristiques du sable étudié sont présentées dans le Tableau 1.1

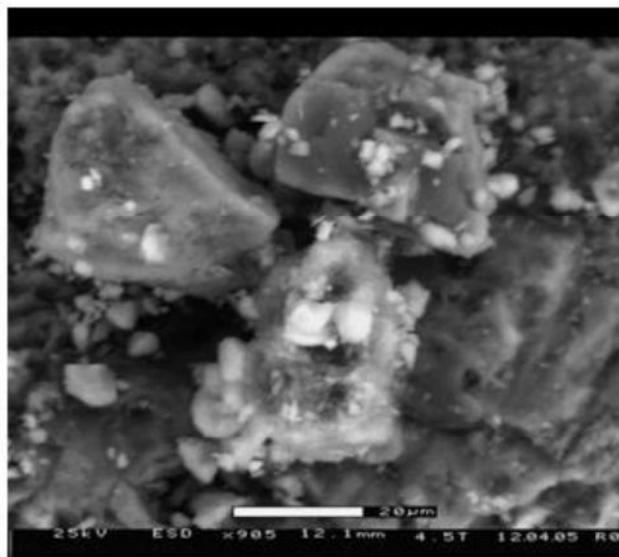


Figure 2.1 : Vue au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté avant écrêtage (Dadda et al. 2015)

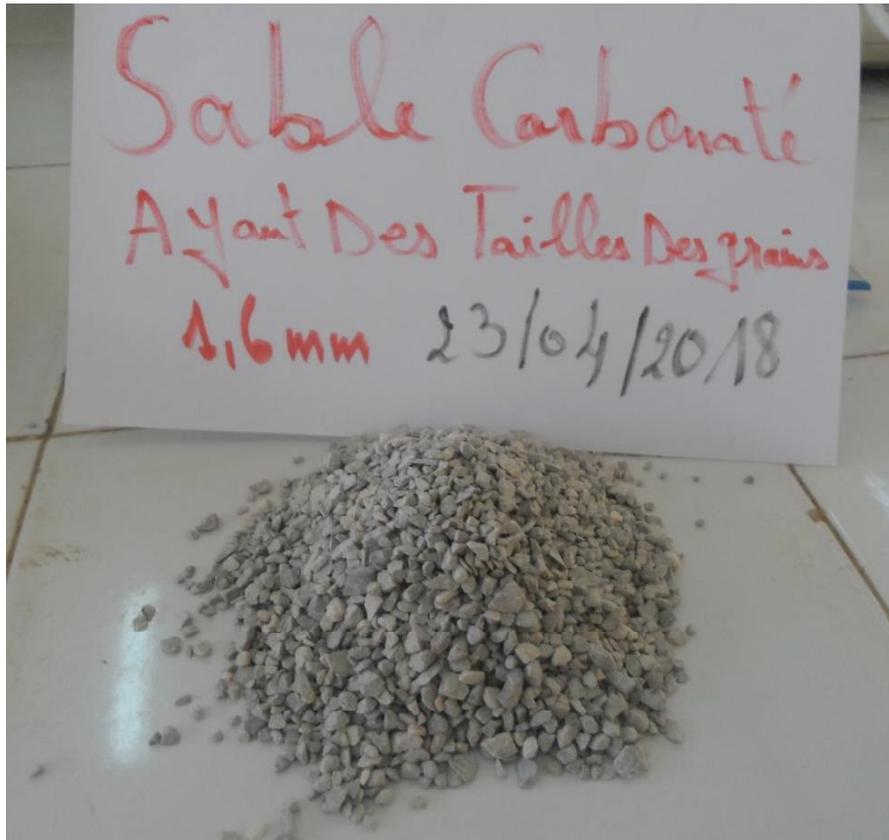


Figure 2.1 : Sable étudié en laboratoire de mécanique des sols Biskra, Algérie.

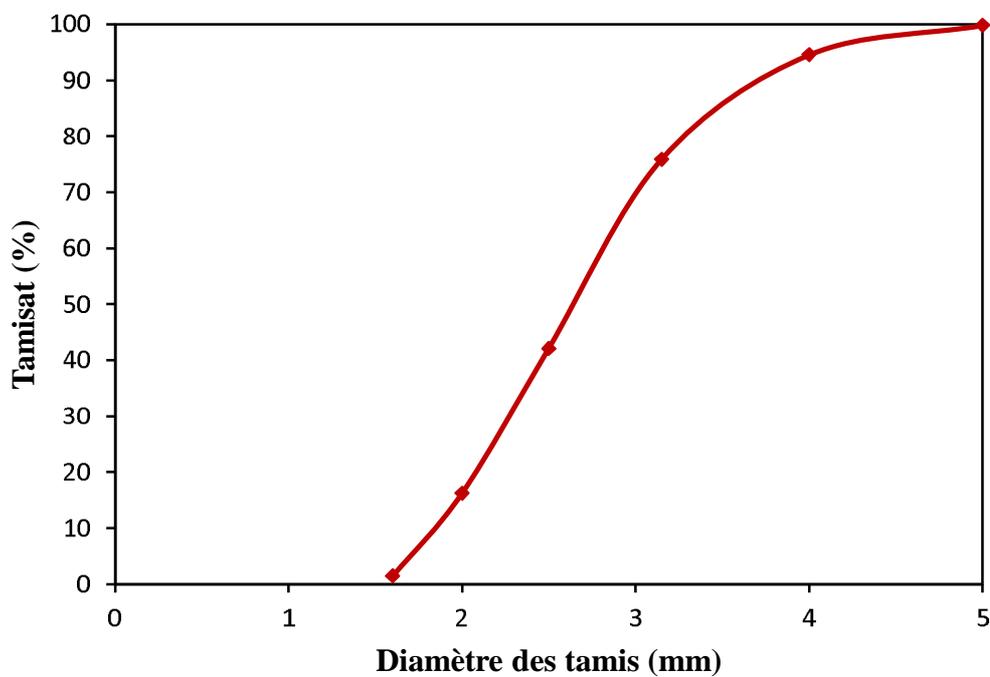


Figure.2.2 : Granulométrie initiale du sable étudié

Tableau 1.1: Caractéristiques de sable étudié

Matériau	D ₅₀ (mm)	C _u	e _{min}	e _{max}	P _s (g/cm ³)
Sable carbonaté	2.64	1.53	0.52	0,84	2.65

2.3- Dispositifs expérimentaux



2.3.1- Dispositif œdométrique à haute pression

Dans ce travail les essais ont été réalisés dans un œdomètre à haute pression à double bras de levier. Cet œdomètre permet d’atteindre une contrainte maximale de 113 MPa. Ce bâti a été développé au sein de laboratoire Navier de l’école des Ponts Paris Tech (Marcial et al., 2002) Figure 2.3. Le plan de ce bâti a été redessiné et amélioré dans le cadre de la thèse de Messioud en 2017 et il a été ensuite construit par un constructeur local pour l’université de Biskra.

Les essais sont réalisés sur une cellule œdométrique de 6.3 mm de diamètre et de 2 mm de hauteur. La déformation axiale est mesurée par un capteur de déplacement électronique installé en haut du bâti et relié à un système d’acquisition. La Figure 2.4 montre le dispositif œdométrique utilisé.

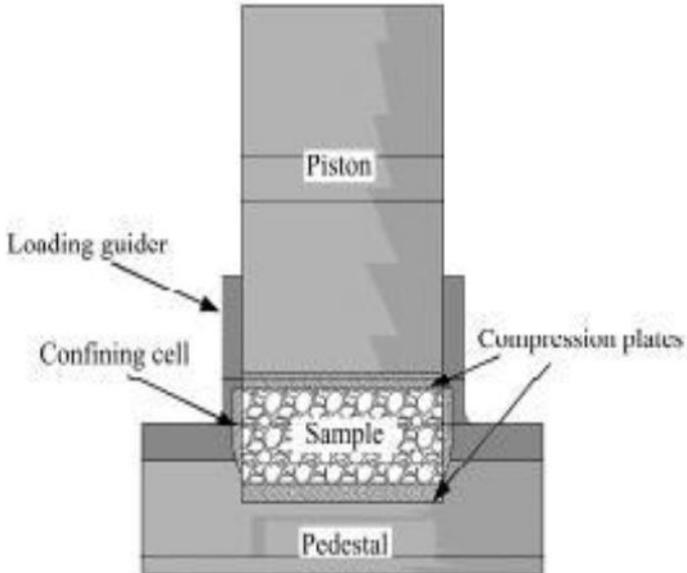


Figure 2.3: Essai principale (essai œdométrique).

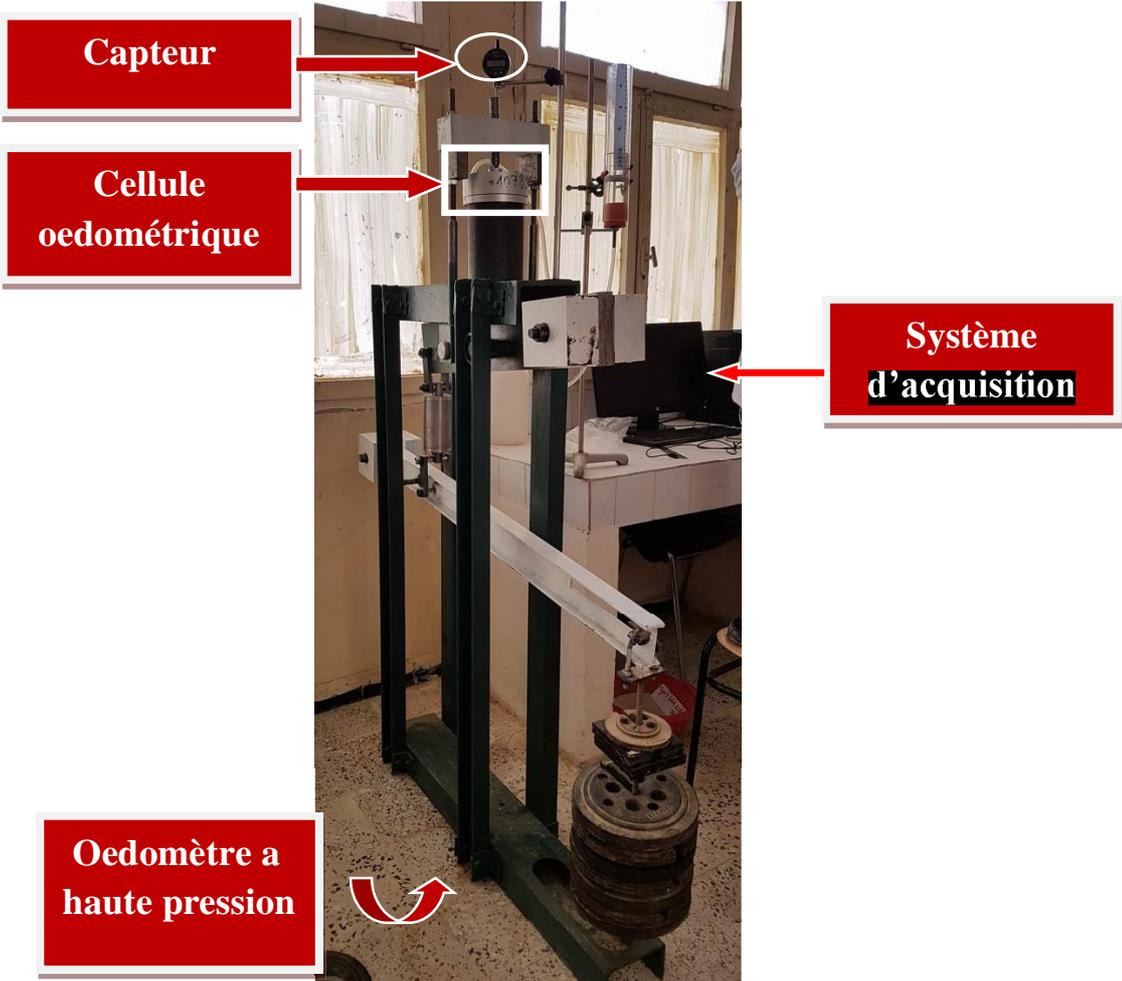


Figure 2.4 : Présentation du bâti œdométrique à haute pression

2.3.2- Dispositif de tamisage

En emboîte les tamis utilisés les uns sur les autres dans un ordre croissant de bas en haut en commençant par un récipient à fond plein (pour recueillir les éléments fins) et le dessus on met un couvercle pour éviter la dispersion des poussières (voir Figure.2.5). On procède au tamisage en versant le matériau sec. On récupérera un refus (partie qui reste sur le premier tamis) et un tamisât (partie qui reste passe à travers le tamis) et une partie du tamisât sera retenue et une autre partie passera et ainsi de suite jusqu'au dernier tamis qui laissera passer les éléments inférieurs à 0.08 mm. Si le tamisage est manuel on secoue les différents tamis pour faire passer la partie à diamètre inférieur à celui du tamis.

Pour l'analyse granulométrique avant le chargement (initiale), La Figure 2.5 présente la série des tamis utilisés.



Figure 2.5: Série des tamis utilisés pendant les essais granulométriques

2.3.3- Dispositif de mesure de perméabilité

Pour les mesures de perméabilité, un tube de Mariotte, permettant d'avoir une charge constante, est branché au système de drainage de la cellule œdométrique. Une pierre poreuse est placée sur la partie supérieure de l'éprouvette afin de faciliter la sortie de l'eau. Les mesures de volume d'eau entrant dans l'éprouvette sont effectuées dans chaque intervalle de temps à l'aide d'un tube gradué (Figure 2.6).

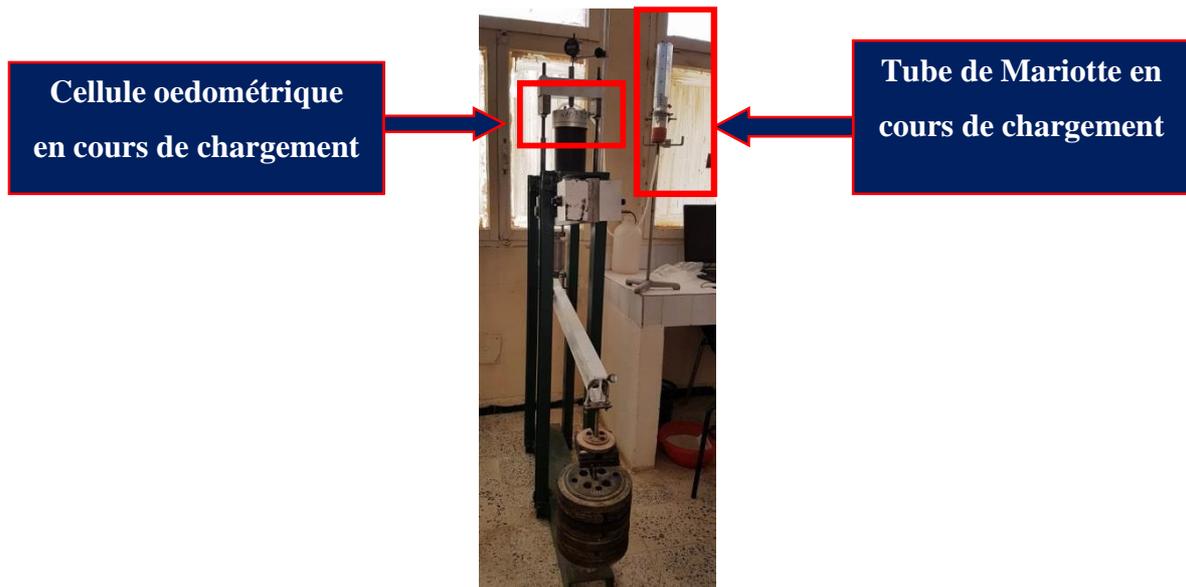


Figure 2.6 : Présentation de dispositif de mesure de perméabilité

Les essais réalisés dans le cadre de ce travail sont des essais œdométriques à haute pression suivis par une mesure de perméabilité dans chaque palier de chargement. Une analyse granulométrique de l'éprouvette après chargement est réalisée afin d'obtenir l'évolution de la granulométrie initiale dans chaque palier de contrainte. Pour certains essais et avant l'analyse granulométrique, nous avons essayé d'obtenir des indices de densité proche de 0,8.

2.4- Procédure d'essai

2.4.1- Préparation l'indice de vide minimum et maximum

2.4.1.1- Indice de vide minimum e_{min}

Le sable carbonaté a été placé en couches successive dans Le mole d'un diamètre 10.3cm et 11.8cm hauteur à l'aide d'un entonnoir en pipière avec une cuillère et on secoue le moule avec un petit marteau, Nous répétons le processus jusqu'à ce que le moule soit rempli et avec une règle nous enlevons la quantité excédentaire sur le moule, Nous pesons l'échantillon dans la balance et extrayons la valeur (e_{min}) à travers la relation 1. La Figure 2.7 présenté la préparation de l'indice de densité minimum.

e_{min} : Taux de vide pour l'état le plus lâche possible.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \dots\dots\dots (2-1)$$

Avec :

$$\rho_d = \frac{m}{v} \dots\dots\dots (2-2)$$



Figure 2.7 : Préparation l'indice de densité minimum (e_{min}), **a)** mise en place le sable dans le mole pour former une couche, **b)** vibration avec un petit marteau, **c)** Enlever le sable en excès.

2.4.1.2- Indice de vide maximum e_{max}

Nous prenons l'entonnoir en papier et le mettons au fond du moule. On remplit l'échantillon de sable carbonaté dans l'entonnoir, puis on soulève lentement l'entonnoir en contrôlant que l'entonnoir est encore plein d'échantillon jusqu'à la fin de l'expérience. Mesurer et extraire la valeur maximale (e_{max}) par la relation (1). La Figure 2.8 montre l'étape de préparation l'indice de vide maximum. Avec: e_{max} : Taux de vide pour l'état le plus dense possible.

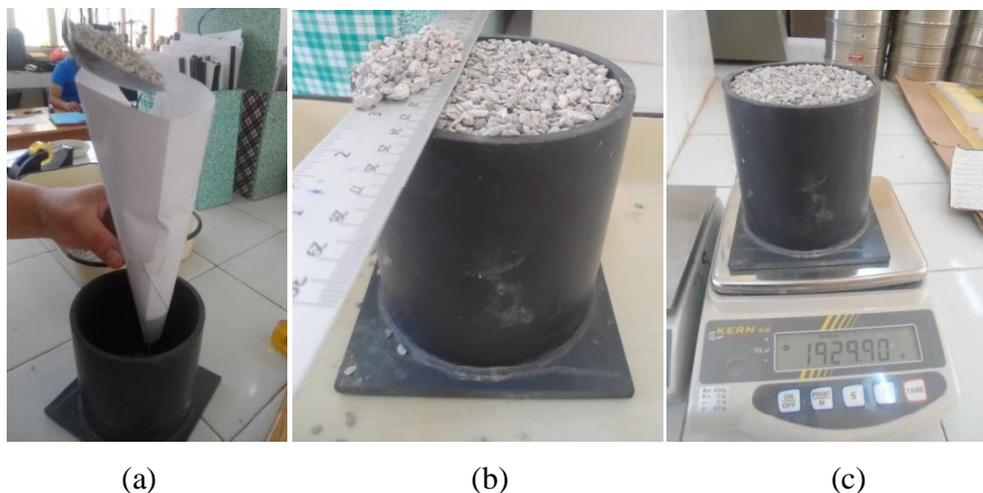


Figure2.8 : Préparation l'indice de vide maximum

a) Mise en place le sable dans l'entonnoir, b) Enlever le sable en excès, c) Mise en place l'échantillon dans le balance.

2.4.2- Préparation des éprouvettes

Il existe différentes techniques de fabrication des éprouvettes de sable en laboratoire, ces techniques peuvent être classées en deux catégories (Butterfield et Andrawes, 1970) :

- ❖ Les méthodes où la densité est ajustée après la déposition, pour des éprouvettes denses.
- ❖ Les méthodes où la densité est contrôlée pendant la déposition, pour n'importe quelle densité.

La méthode utilisée dans ce travail se trouve dans la première classe où on met en place le sable par couche. Les éprouvettes obtenues par cette méthode sont fortement anisotropes et la densité n'est pas uniforme dans la direction verticale, mais pour éviter l'endommagement de sable on a évité le maximum le compactage dynamique et on a essayé seulement de vibrer notre échantillon. La Figure 2.9 montre les principales étapes pour la préparation d'éprouvette pour l'essai oedométrique.

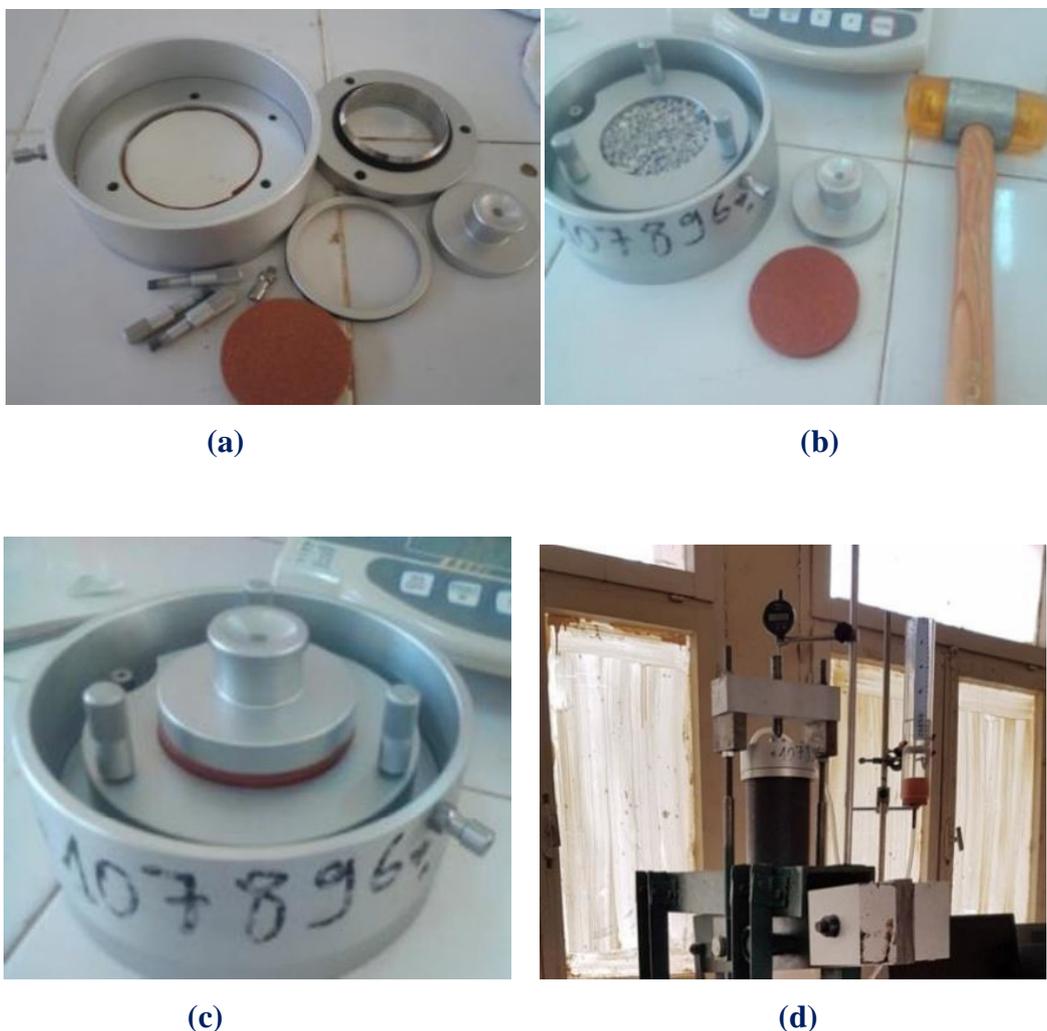


Figure 2.9 : Préparation d'un échantillon de sable carbonaté ayant des tailles des grains à 1.6mm, **a)** placé le papier filtre dans la cellule œdométrique, **b)** mise en place du sable ($M_{\text{sable}}=104.30\text{g}$), **c)** mise en place de la pierre poreuse et le pistou pour fermé la cellule. **d)** mise en place de la cellule sur le bâti œdométrique.

Dans cette étude. La méthode de préparation des éprouvette en premier classe on été utilisés. Le papier filtre est placé dans la cellule œdométrique pour éviter l'entrée des particules fins dans la pierre poreuse, on met en place le sable carbonaté ayant des tailles des grains supérieurs à 1.6 mm sec par couches successives dans la cellule œdométrique avec une masse de 104.30 g. Et on a essayé de vibrer notre échantillon. La pierre poreuse et le pistou a été placé pour fermé la cellule œdométrique. La cellule œdométrique a été placée sur le bâti œdométrique. Un nombre constant d'où e_{min} et e_{max} sont le minimum et le maximum de vide, respectivement.

2.4.3- Procédure d'essai Oedométrique :

L'essai œdométrique a été réalisé dans laboratoire de mécanique des sols, où les procédures étaient les suivantes :

Après la préparation de l'échantillon On placé la cellule œdométrique sur l'appareil (œdomètre), et on mettre en contact le chapeau de l'œdomètre avec le piston de chargement. Ensuite, on applique la charge, et on note les mesures de déplacement sur le comparateur au cours de temps jusqu'à 10 minutes.

2.4.4- Mesure la permèabilité

L'expérience de la permeabilité se fait directement après l'expérience Oedométrique. Un tube de mariotte gradué est connecté sur la cellule oedometrique après une saturation de l'éprouvette à l'eau. Une mesure de la durée de circulation d'eau est réalisée tout les 2 cm de hateur de tube. En connaissant le diamètre de tube on pourrait calcuer le débit entrant par la relation de l'équation (2-3). Le schéma présenté dans la Figure 2-10 montre les signcification des paramètres de l'équation (2-3).

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi(R-r)^2 \Delta l}{\Delta t} \dots\dots\dots (2-3)$$

Une perte de charge constante Dh provoque l'écoulement de l'eau à travers l'échantillon de sol. On mesure le débit d'eau q en recueillant un volume d'eau V en un temps t . Connaissant la longueur de l'échantillon L et la surface S à travers laquelle l'eau s'écoule.

La perméabilité du milieu peut être calculée à l'aide de la loi de Darcy de l'équation (2-4).

$$k = \frac{V.L}{\Delta h.s.t} \dots\dots\dots (2-4)$$

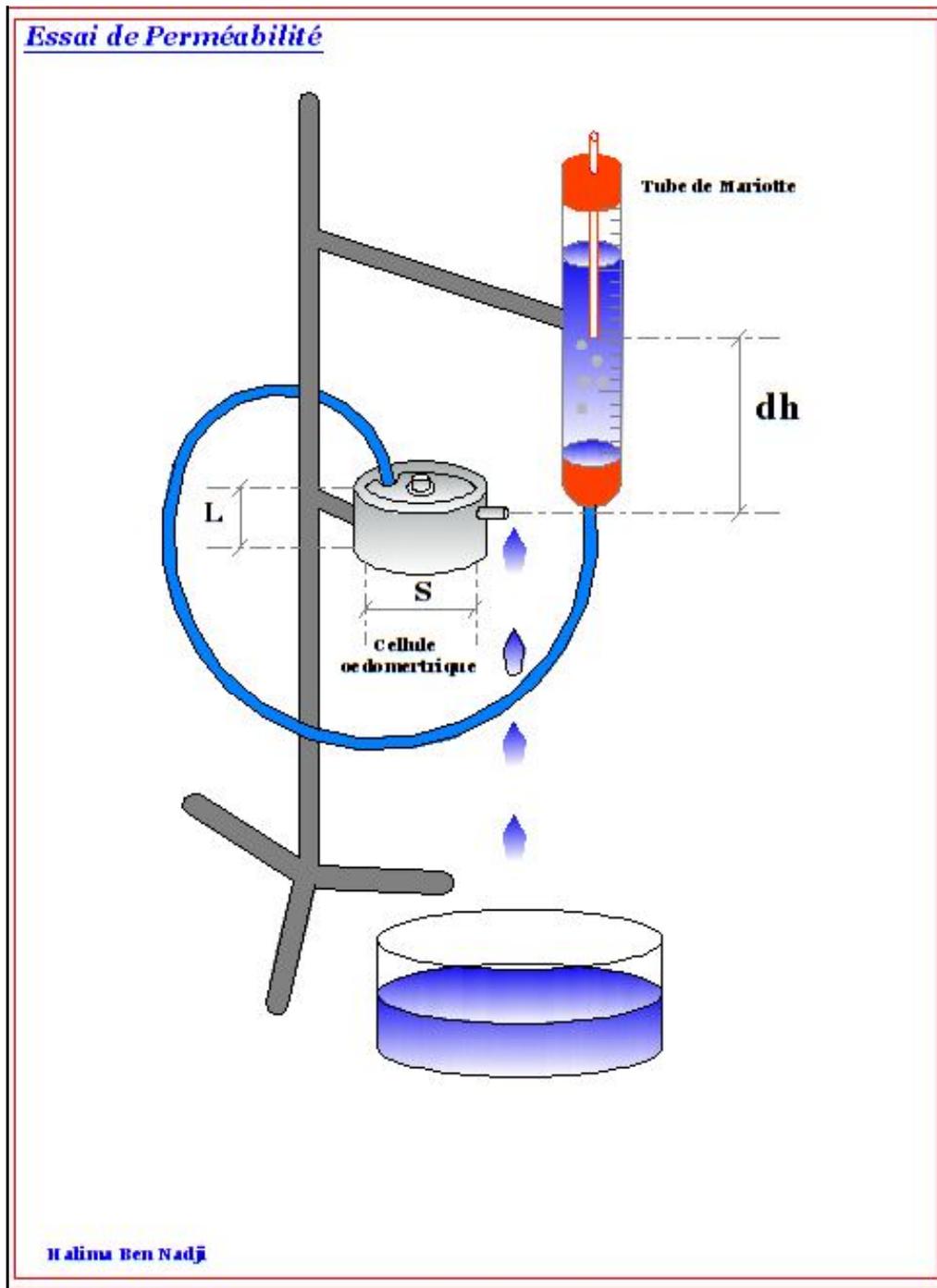


Figure2.10 : Mesure de perméabilité

2.4.5- La granulométrie

Après la mesure de la perméabilité, on met l'éprouvettes dans l'étuve pour sécher. La Figure 2.12 présenté l'éprouvettes secs sous différents niveaux de chargement après l'étuve.



Figure 2.12 : Eprouvettes de sable carbonaté après des essais oedométriques sous différents niveaux

Pour l'analyse granulométrique après le chargement, on a utilisé la série de tamis suivante en (mm):

0.063, 0.08, 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, 0.315, 0.40, 0.50, 0.63, 0.8, 1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.15, 4, 5.

2.5 Analyse d'images 3D

Dans cette partie de travail nous présentons les techniques utilisées pour évaluer l'évolution des propriétés microstructurales (granulométrie) et propriété de contact (nombre de coordination) de notre éprouvette en fonction de niveau de chargement.

2.5.1 Caractérisation des propriétés de contact dans le sable carbonaté utilisant la micro-tomographie 3D par rayons-X

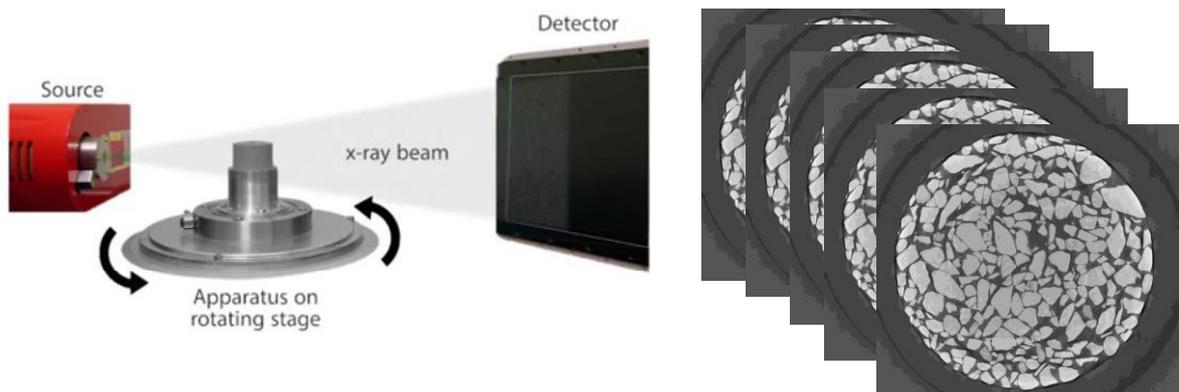
La mesure en plein champ fournie par les rayons-X est un outil révolutionnaire en géomécanique expérimentale. Les rayons-X sont particulièrement adaptés à l'étude des géomatériaux car ils sont une technique de mesure non destructive, ce qui permet d'imaginer différentes configurations. De plus, les rayons-X sont sensibles à la densité atomique (corrélée à la masse volumique), ce qui est particulièrement utile pour les milieux granulaires car cela permet de distinguer facilement les phases poreuses et solides.

le traitement d'images est l'ensemble des méthodes et techniques opérant sur celles-ci, dans le but de rendre cette opération possible, plus simple, plus efficace et plus agréable, d'améliorer l'aspect visuel de l'image et d'en extraire des informations jugées pertinentes.

Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un code Matlab ® afin de l'utiliser pour avoir l'évolution du nombre de coordination et granulométrie en fonction des contraintes appliquées.

2.6 Échantillon et acquisition d'images

Pour l'acquisition d'images 3D par micro-tomographie à rayons-X (Figure 2.13), une éprouvette de sable carbonaté est placée sur un plateau rotatif entre la source de rayons-X et le détecteur. En utilisant une cellule oedométrique en plexiglass, destinée principalement pour la microtomographie à rayons-X. Dans le présent travail, les images 3D de cette éprouvette de sable ont été obtenues en utilisant la tomographie de laboratoire Navier de l'école des Ponts Paris Tech par synchrotron à rayons X avec une résolution de $(34\mu\text{m}) / \text{voxel}$ sur 4 niveaux de chargement (0, 2.5, 5 et 10 MPa). L'éprouvette est mise en rotation pas à pas, en prenant une image de projection à chaque position angulaire. Afin d'exploiter qualitativement et quantitativement le changement microstructural de cet échantillon de sable sous différents chargements.



1000-1600 radiographies

Figure 2.13: Acquisition d'images 3D de sable carbonaté par la tomographie de laboratoire Navier de l'école des Ponts Paris Tech.

Les images récupérées par les scans tomographie aux rayons-X doivent être passés par plusieurs étapes de traitement. Dans ce travail, chaque propriété a été calculée sur un volume élémentaire représentatif (VER) de taille $(1000 \times 1000 \times 1000 \text{ pixels})$.

2.7 Traitements d'images 3D

Pour calculer les propriétés microstructurales, les images 3D doivent être traitées afin de :

(1) identifier les deux phases (grains, vide) ; (2) séparer et étiqueter les grains, qui constituent le (sable + vide) ; et (3) étiqueter les grains.

2.7.1 Identification de deux phases (solide, vide)

Après reconstruction, les images 3D en niveaux de gris représentent une carte 3D proportionnelle à la densité de chaque phase dans l'échantillon analysé. Afin de calculer les grandeurs microstructurales, les images 3D en niveaux de gris (Figure 2.15 - A1) ont été traitées pour séparer les grains. Dans le cas présent, les phases vide et solide (grains + vide) étaient facilement séparées par un simple seuillage. La segmentation par seuillage a été utilisée pour créer une image binaire assignant une valeur de voxel pour le sable (ayant une atténuation des rayons X plus élevée) et pour le vide (généralement l'air, qui a une atténuation plus faible). Dans cette étape la segmentation par seuillage a été utilisée (Otsu 1979).

2.7.2 Séparation et étiquetage des grains

La deuxième étape de ce traitement d'image consiste en la séparation des grains, qui constituent la phase (grains + vide). Cette opération a été réalisée sur des images 3D binarisées de sable carbonaté, c'est-à-dire en supposant que les phases de grain et de vide ont le même niveau de gris (Figure 2.15 - A2). La séparation des particules est obtenue en utilisant un algorithme de Watershed algorithm 3D. Cet algorithme permet de supprimer les voxels de contact entre les grains. Ensuite l'identification des particules a été réalisée avec Matlab pour détecter tous les grains dans les images 3D, c'est-à-dire tous les voxels de chaque particule ont une étiquette unique (un entier positif).

2.7.3 Identification et étiquetage de chaque contact

Afin d'identifier et d'étiqueter chaque contact, un code Matlab® a été développée. Toutes les surfaces des contacts (image binaire contact) sont calculées en soustrayant l'image A2 et l'image A4 (Figure 2.15). Ensuite, le code Matlab® permet de marquer tous les contacts entre grains en suivant une méthode similaire à celle développée par Ando (2013). Cette méthode consiste à balayer les 26 (Figure 2.14) voxels voisins de chaque voxel des surfaces de contact (image binaire contact), et à déterminer le niveau de couleur minimum et maximum de ces voxels voisins dans l'image des grains étiquetés (image A4). Tous les voxels ayant les mêmes niveaux de couleur minimum et maximum sont alors supposés constituer une surface de contact entre les deux grains étiquetés respectivement avec le minimum et le maximum de

niveaux de couleur. Si les niveaux de couleur maximum et minimum sont égaux, ce qui peut se produire en raison d'artefacts induits par le processus de séparation des grains (voxel d'une surface de contact à l'intérieur d'un grain par exemple), le voxel est supprimé. L'image étiqueté contact correspond à l'image binaire contact après l'étiquetage de tous les contacts.

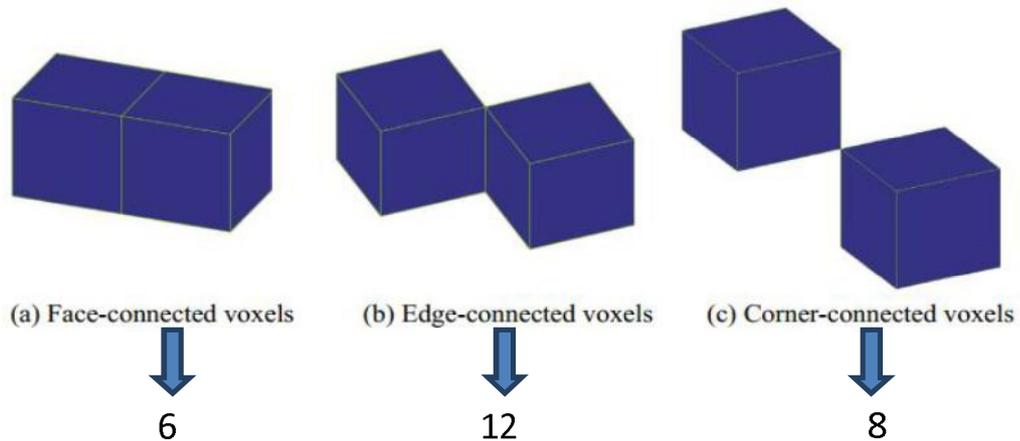


Figure 2.14 : Exemple de trois types de connectivité des voxels (Druckrey et al. 2015)

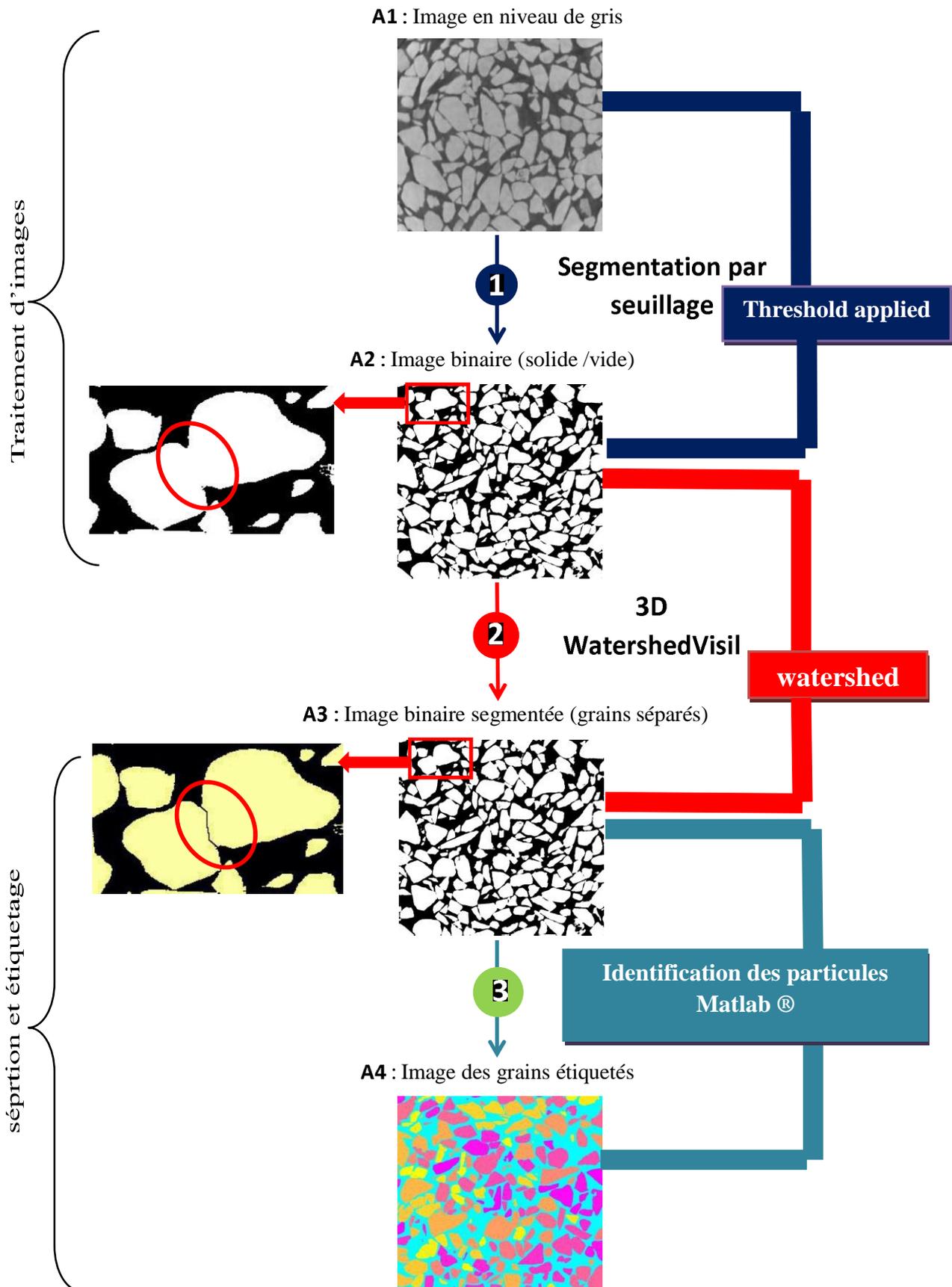


Figure 2.15 : Différentes étapes du traitement d'images

2.8 Propriétés microstructurale

Le nombre de coordination et la granulométrie de contact inter-granulaire présente un paramètre clé sur la stabilisation des courbes granulométrique vers une granulométrie ultime d'un matériau granulaire. Dans le cadre de ce travail nous allons essayer d'exploiter l'évolution de nombre de contact (nombre de coordination) et la granulométrie à partir des images micro-tomographiques 3D, obtenues sous différents chargements œdométriques de sable carbonaté ayant une taille des grains supérieure à 1.6 mm, en utilisant des outils morphologiques de traitement d'image pour séparer d'abord les grains en 3D (2.14.A3). Par la suite, le développement d'un code basé sur une méthode probabiliste pour déterminer le nombre de grains et la granulométrie.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude expérimentale a été réalisée pour explorer le phénomène d'endommagement des grains sur la microstructure et la perméabilité des sables étudiées. Des essais œdométriques à haute pression sont réalisés sur une cellule œdométrique sur des éprouvettes saturées de sable carbonaté ayant des tailles des grains supérieur à 1.6 mm dans laboratoire de mécanique des sols , Biskra. Ces essais suivie par l'analyse granulométrie avant et après de chargement et mesures de la perméabilité, et une compagnie de scan a été réalisé au tomographe de laboratoire Navier école de paris tech sous une résolution de 34µm, sur 4 niveau de chargement (0 MPa, 2.5 MPa, 5 MPa et 10 MPa) ont été réalisés. La technique d'imagerie 3D est efficace pour estimer le nombre de coordination et la granulométrie du matériau granulaire. Développement d'un code **MATLAB®** est donc nécessaire pour calcul numérique des propriétés microstructurales (la granulométrie) et propriétés de contact (nombre de coordination), à différents niveaux de chargement pendant Analyse d'images.

Chapitre III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord un résultat expérimentaux de matériau étudié et les discussions expérimentaux utilisés. Ensuite, nous allons essayer d'exploiter l'évolution de nombre de contact (nombre de coordination) et la granulométrie à partir des images micro-tomographiques 3D, obtenues sous différents chargements œdométriques (0MPa, 2.5MPa, 5MPa, 10MPa) sur un sable carbonaté ayant une taille des grains supérieure à 1.6 mm, en utilisant des outils morphologiques de traitement d'image pour séparer les grains en 3D. Par la suite, le développement d'un code basé sur une méthode probabiliste pour déterminer le nombre de grains et de contacts existants est envisageable. Et nous présentons les résultats obtenus par l'analyse d'images 3D par l tomographie aux rayons-X tels que : le nombre de coordination et l'analyse granulométrique.

De ce fait, le traitement d'images est l'ensemble des méthodes et techniques opérant sur celles-ci, dans le but de rendre cette opération possible, plus simple, plus efficace et plus agréable, d'améliorer l'aspect visuel de l'image et d'en extraire des informations jugées pertinentes.

3.2 Programme d'essais

Les caractéristiques du programme d'essai sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Programme d'essais

Contrainte (MPa)	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u (D ₆₀ /D ₁₀)	D _p (mm)	k (cm/s)
0	2,64	1,84	2,82	1,53	0,86	0.009
2,5	2,5	1,62	2,72	1,67	0,77	0.005
5	2,5	1,36	2,72	2	0,69	0.004
10	1,96	0,64	2,2	3,43	0,37	0.003

Avec :

*D*₅₀ : diamètre moyen des grains (mm)

*D*₁₀ : diamètre dix des grains (mm)

*D*₆₀ : diamètre soixante des grains (mm)

*C*_u : coefficient d'uniformité= le rapport de D₆₀/D₁₀

*D*_p : Taille médiane des pores (mm)

k : Perméabilité (cm/s)

3.3-Résultats expérimentaux

3.3.1- Evolution de la courbe granulométrique

Les essais œdométrique réalisés à différents niveaux de contraintes ont été suivis par des analyses granulométriques afin d'explorer la production des particules fines après chargement. La Figure 3 présente l'évolution de la courbe granulométrique pour différents niveaux de chargement (0MPa, 2.5MPa, 5MPa, 10MPa) pour le sable carbonaté. L'évolution de la granulométrie en fonction de contrainte appliquée est assez remarquable.

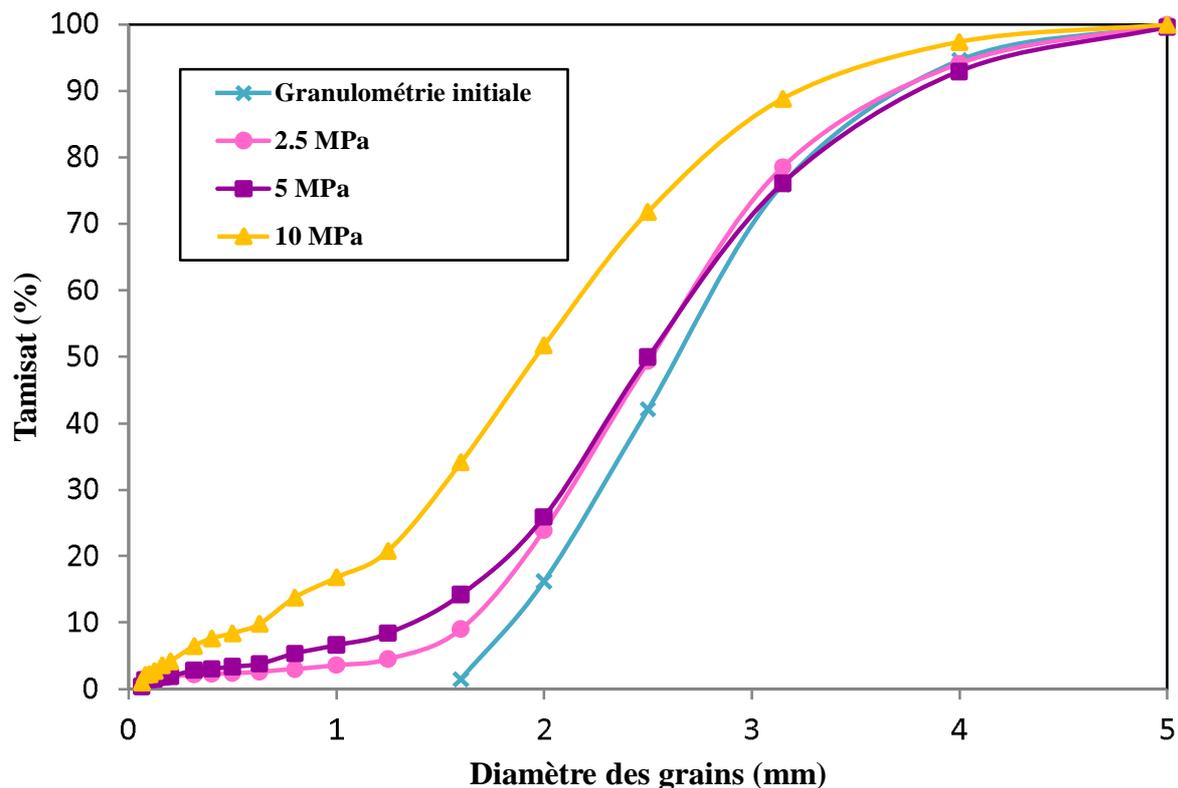


Figure 3 : Evolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte appliquée

Cette analyse montre que la production des particules fines dans le phénomène d'endommagement des grains augmente avec l'augmentation de chargement. Ceci peut être remarqué en présentant l'évolution du coefficient d'uniformité, présentée sur la Figure 3.1. Cette Figure montre que le coefficient d'uniformité augmentent avec l'augmentation de la contrainte appliquée dans le système granulaire. L'illustration physique de cette courbe est le système granulaire augmente le nombre de contacts entre les particules.

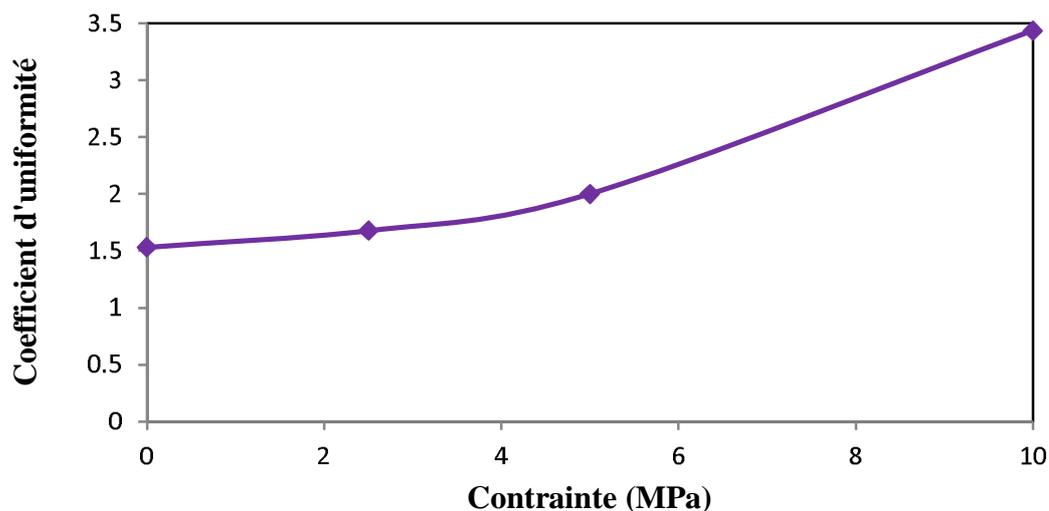


Figure 3.1 : Evolution de coefficient d'uniformité en fonction la contrainte appliqué

3.3.2- Evolution de la perméabilité

Afin d'étudier l'évolution de la perméabilité pour le sable carbonaté de la taille des grains supérieure à 1.6 mm, des mesures de perméabilité ont été réalisées dans chaque palier de chargement (0 MPa, 2.5 MPa, 5 MPa, 10 MPa). Les résultats de ces mesures sont présentés sur la Figures 3.2. On observe une diminution significative de la perméabilité de sable carbonaté avec l'augmentation de chargement. Cette diminution est due à l'effondrement des pores et à la production des particules fines qui peuvent jouer un rôle de colmatant lors de la circulation d'eau.

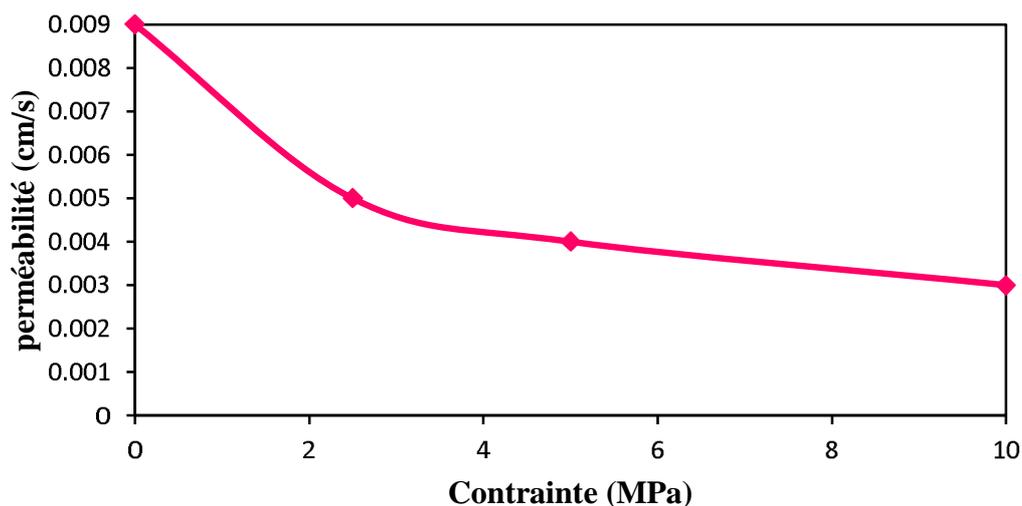


Figure 3.2: Evolution de la perméabilité au cours de chargement.

Cette évolution de la perméabilité pourrait être devisée en deux parties ; une première avec une pente relativement importante comprise entre 0 à 2,5 MPa et une deuxième avec une pente moins importante comprise entre 2,5 MPa à 10 MPa. On en déduit donc que la diminution de la perméabilité qui est due seulement à l’effondrement poral (de 0 à 2.5 MPa qui correspond au seuil de début d’endommagement selon (Dadda et al. 2015) est plus significative à celle qui est due à l’endommagement des grains.

3.4- Discussion

Della et Feia (2017) ont développé une loi empirique reliant la taille médiane des pores à la taille médiane des grains et le coefficient d’uniformité. Cette loi a été trouvée à partir de corrélation de plusieurs données expérimentales sur une série d’essais tensiometrique (équation 3-1). L’essai tensiometrique permet d’évaluer la distribution de la taille des pores à partir de la courbe de séchage des courbes de rétention d’eau (Feia et al. 2014).

Loi :

$$\frac{D_{g50}}{D_{p50}} = 1.18C_U + 1.24 \dots\dots\dots (\text{Équation3- 1})$$

Où :

- D_{g50} : est la taille moyenne des grains.
- D_{p50} : est la taille médiane des pores.
- C_U : est le coefficient d’uniformité.

3.4.1- Influence du coefficient d’uniformité sur l’évolution de la taille d’accès aux pores

La Figure 3.3 montre la variation des rapports de la taille des grains sur la taille d'accès des pores avec le coefficient d'uniformité. Les données de cette courbe sont obtenues à partir de Feia et al., (2014) et l’étude actuelle. Le rapport de la taille des grains sur la taille médiane des pores augmente avec le coefficient d'uniformité croissant et peut être ajusté par la relation (Équation 1).

Cette loi a été utilisée dans le cadre de ce travail afin d’estimer la taille médiane des pores des matériaux granulaires. La taille médiane des pores est importante pour plusieurs applications. Dans l’industrie pétrolière, lors de l’opération de réinjection de l’eau produite, il est important d’évaluer le rapport entre la taille moyenne des particules et la taille médiane des pores du milieu pour lequel un colmatage peut se produire (Barkman et Davidson, 1972 ; Feia et al., 2015).

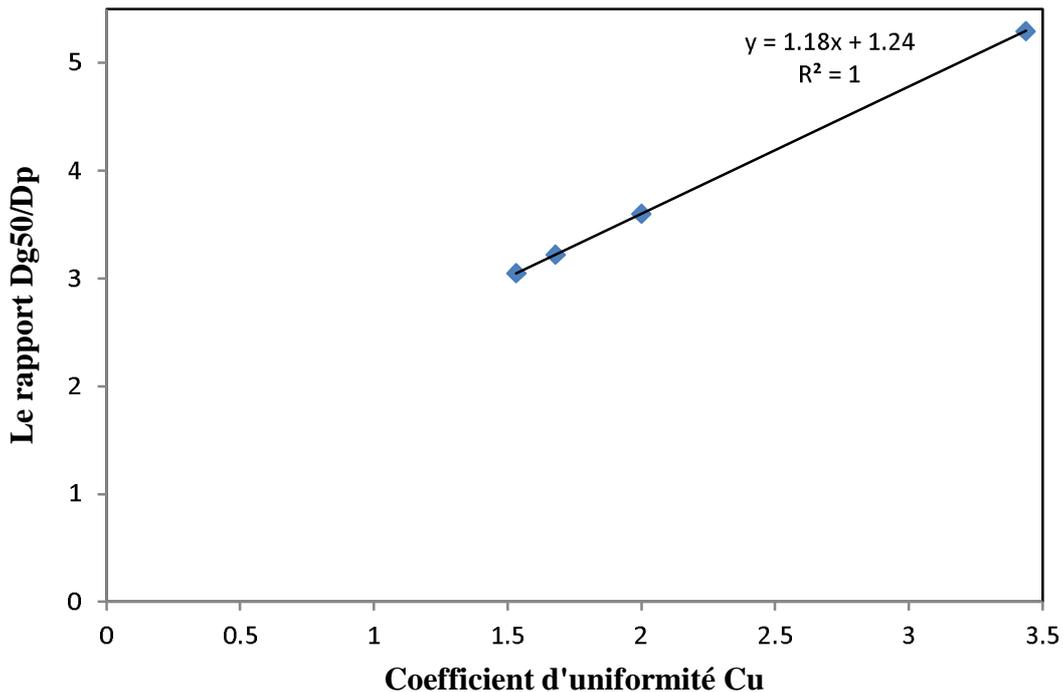


Figure 3.3 : Influence du coefficient d'uniformité sur les rapports de la taille des grains sur la taille d'accès des pores.

3.4.2- Evolution de la perméabilité celle de la taille médiane d'accès aux pores

L'écoulement dans un sol qui caractérisée par sa perméabilité est gouvernée par la porosité ainsi par sa distribution de la taille d'accès aux pores. [Satnatamarina et al. \(2017\)](#) ont montré que la perméabilité d'un sol est plus sensible à la variation de la taille d'accès aux pores qu'à la variation de la porosité. La Figure 3.4 présente l'évolution de la perméabilité du milieu et celle de la taille médiane d'accès aux pores, estimée par la loi proposée par [Della et Feia \(2017\)](#), en fonction de la contrainte appliquée. L'évolution de la perméabilité montre au départ une diminution significative suivie par une diminution progressive durant le chargement. La diminution significative pourrait être attribuée à la fermeture des accès aux pores lors du premier chargement ce qui est montré sur l'évolution de la taille d'accès aux pores.

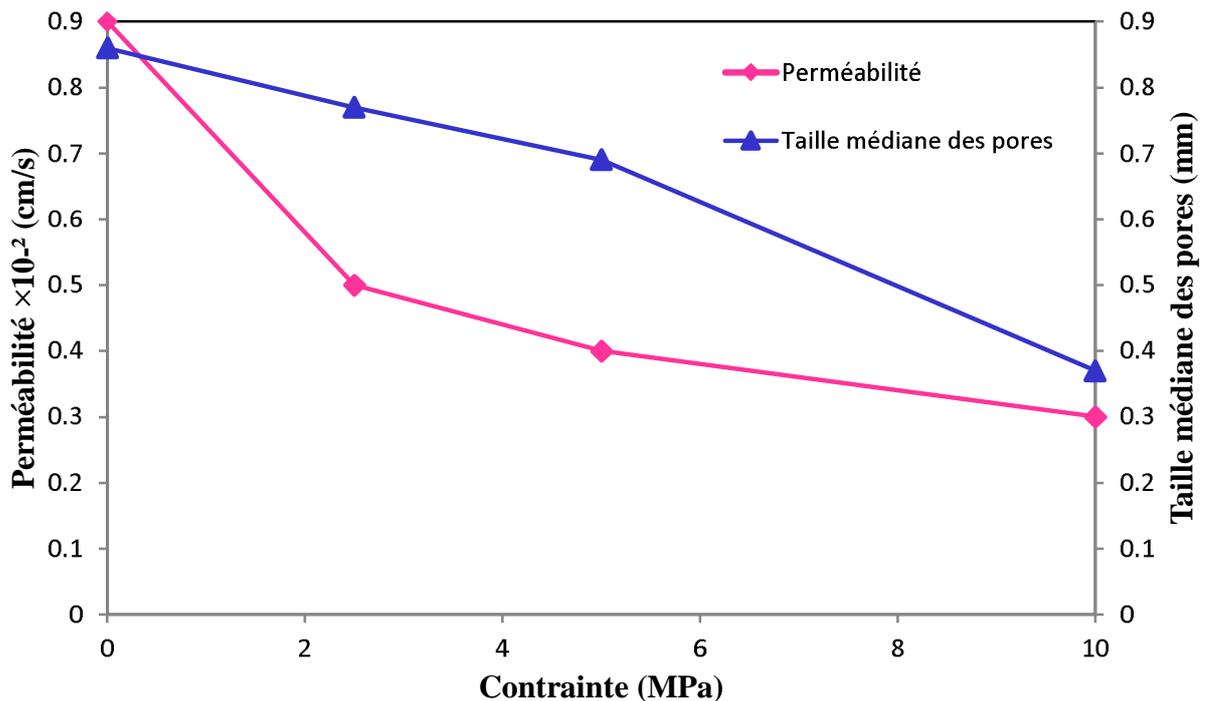


Figure 3.4 : l'évolution de la perméabilité du milieu et celle de la taille médiane d'accès aux pores, estimée par la loi proposée par [Della et Feia \(2017\)](#) , au cours de chargement.

3.5-Résultat et discussion de traitement d'image 3D

3.5.1-Evolution de la Nombre de coordination

Après l'identification et l'étiquetage de chaque grain et chaque contact, une liste de tous les grains étiquetés avec leur contact est construite. A partir de cette liste le nombre de coordination de chaque grain a été calculé. La Figure 3.5 la distribution de nombre de coordination pour chaque niveau de chargement (0, 2.5, 5 et 10 MPa).

Ces résultats montrent que le nombre de coordination augmente avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Cela due à l'augmentation des fragments (nouveaux particules), qui conduit à l'augmentation du nombre de contact.

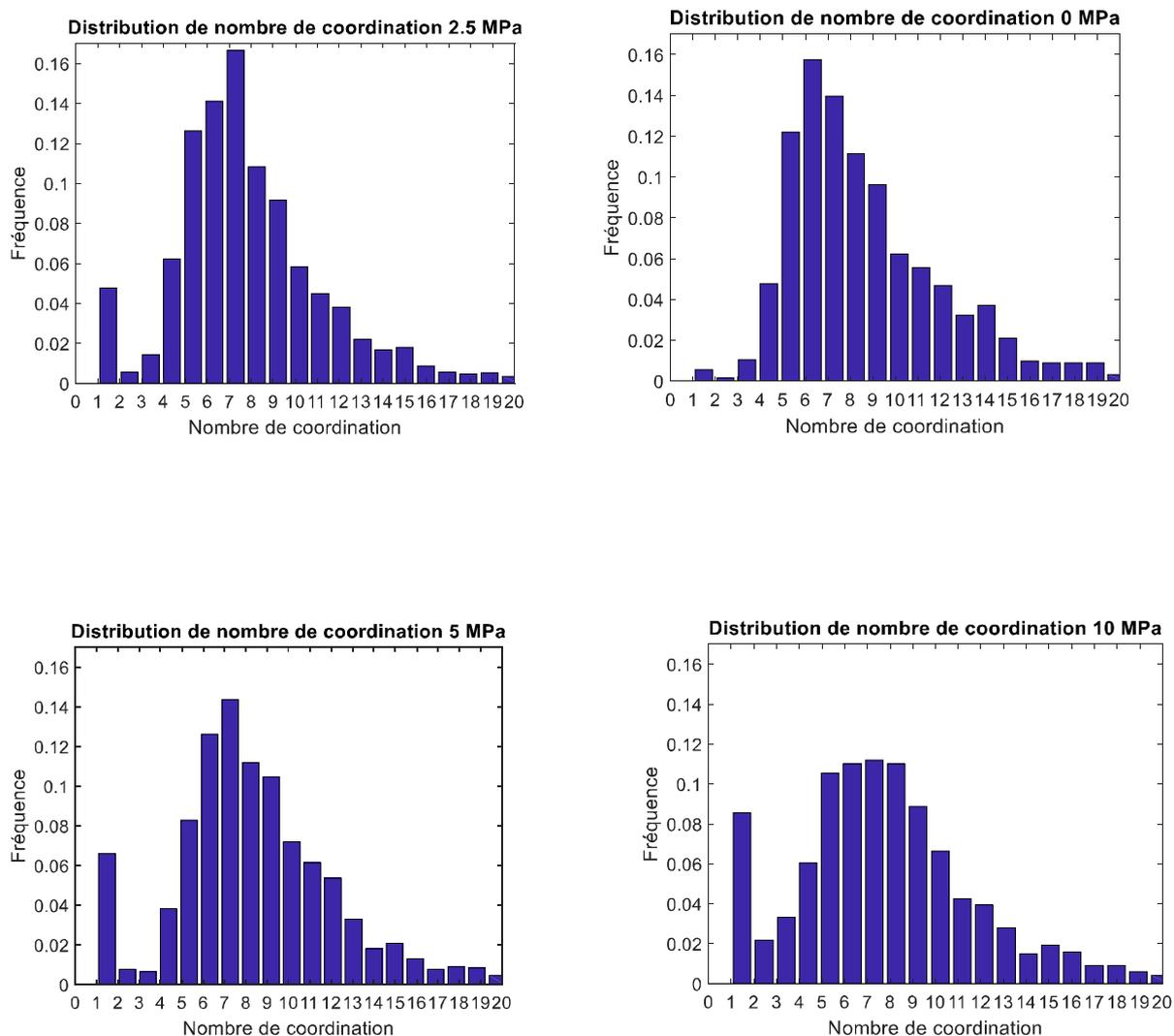


Figure 3.5: Distribution de nombre de coordination sous quatre niveaux de chargement

3.5.2 -Evolution La granulométrie

Pour déterminer l'évolution de la courbe granulométrique à partir des images 3D, un code dans **Matlab®** permet de calculer le volume de chaque grain (voxel), les diamètres principaux, et le diamètre équivalent. Dans ce travail le volume et le diamètre court de chaque grain ont été calculés. Ensuite les valeurs des diamètres courts des grains sont comparées avec les diamètres des tamis. Les résultats de ce calcul sont présentées sur la **Figure 3.6** pour le niveau de charge **10 MPa**. Ces résultats montrent que les résultats obtenus par l'analyse d'images 3D sont en bonne accord avec les résultats expérimentaux, mais on remarque que la production des particules fines est plus importante pour les résultats expérimentaux. Cela peut être due à la segmentation ou la résolution ($34 \text{ } \mu\text{m}/\text{voxel}$).

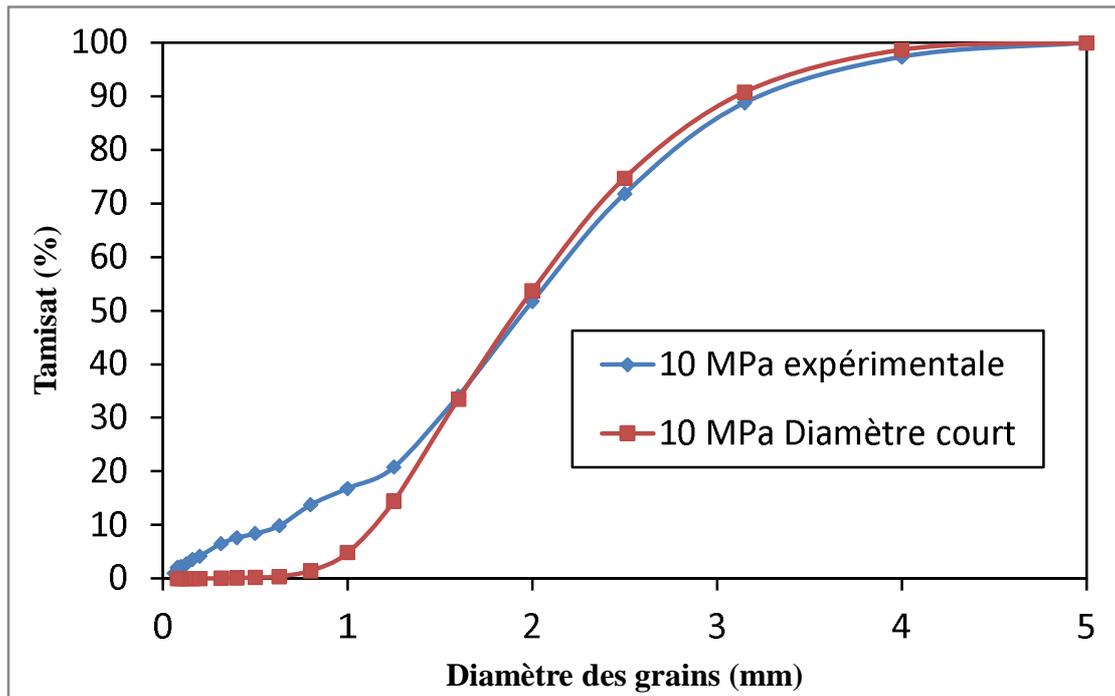


Figure 3.6 : Evolution de la courbe granulométrique 10 MPa –Comparaison résultat expérimental avec résultat d’imagerie 3D.

3.6- Conclusion

Dans ce chapitre, des essais œdométriques à haute pression ont été réalisés sur des éprouvettes de sable carbonaté ayant une taille des grains supérieurs à 1.6 mm à différents niveaux de chargement. Ces essais sont suivis par des analyses granulométriques des éprouvettes après chargement, et par des mesures de perméabilité dans chaque niveau de contrainte. Des scans tomographiques à rayons-X ont été également réalisés à différents niveaux de chargement.

Les résultats expérimentaux montrent que la production des particules fines augmente avec l'intensité de chargement. La perméabilité est diminuée avec l'augmentation de la contrainte appliquée, cette diminution due à l'effondrement des pores et l'endommagement des grains. Les résultats obtenus par l'analyse d'images 3D montrent que le nombre de coordination augmente avec l'augmentation de la contrainte appliquée.

Conclusion Générale

Le travail de ce projet de fin d'étude consiste à étudier le phénomène d'endommagement des grains par imagerie aux rayons-X d'un sable sous fort chargement oedométrique et la création des particules fines de notre sable sur les propriétés mécaniques, la perméabilité et la microstructurale (granulométrie, nombre de coordination) d'un matériau granulaire. Des essais oedométriques à haute pression ont été réalisés sur des éprouvettes saturées de sable carbonaté ayant une taille des grains supérieurs à 1.6mm, à différents niveaux de chargement. Ces essais ont été suivis par des analyses granulométriques de l'éprouvette avant et après chargement. La perméabilité du matériau a été mesurée sous différents niveaux de chargement. Une estimation de la distribution de la taille médiane des pores a été effectuée à l'aide d'une relation empirique proposée par [Della et Feia \(2017\)](#). L'évolution des propriétés microstructurales (granulométrie) et propriété de contact (nombre de coordination) de notre éprouvette en fonction de niveau de chargement ont été évaluées en utilisant des techniques de traitement d'images 3D obtenues par des scans à la micro-tomographie au rayons-X.

L'étude d'endommagement des grains est principalement basée sur l'évolution de la courbe granulométrique en fonction de chargement appliqué. Les résultats expérimentaux ont montré une augmentation de la courbe granulométrique avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Il en résulte une diminution significative de la perméabilité de matériau étudié sous différents niveaux de palier. Cette diminution est due à l'effondrement des pores et à la production des particules fines qui peuvent jouer un rôle de colmatant lors de la circulation d'eau. Les résultats expérimentaux montrent également une augmentation de rapport de la taille des grains sur la taille médiane des pores avec le coefficient d'uniformité. L'évolution de la perméabilité du milieu et celle de la taille médiane d'accès aux pores, estimée par la loi proposée par [Della et Feia \(2017\)](#), en fonction de la contrainte appliquée montre au départ une diminution significative suivie par une diminution progressive durant le chargement. La diminution significative pourrait être attribuée à la fermeture des accès aux pores lors du premier chargement ce qui est montré sur l'évolution de la taille d'accès aux pores.

L'analyse d'images 3D par Matlab montre une augmentation du nombre de coordination avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Cela est dû à l'augmentation des fragments (nouvelles particules), qui conduit à l'augmentation du nombre de contact. Les résultats de la granulométrie obtenus par l'analyse d'images 3D sont en bonne accord avec les résultats expérimentaux, mais on remarque que la production des particules fines est plus importante

CONCLUSION GENERALE

pour les résultats expérimentaux. Cela peut être dû à la segmentation ou la résolution (34 *um/voxel*).

References

1. Almisned, O. A., Somerville, J. and Smart, B.G.D (2011). Difficulties in Laboratory Characterization of Weak Sandstone, American Rock Mechanics Association Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, June 26–29, 2011.
2. Al-Raoush R. Microstructure characterization of granular materials. *Phys A: Stat Mech Appl* 2007;377:545–58.
3. Alshibli K, Druckrey A, Al-Raoush R, Weiskittel T, Lavrik N. Quantifying morphology of sands using 3D imaging. *J Mater Civ Eng* 2014:04014275.
4. Alshibli, k., M.ASCE1; Andrew M. Druckrey, A.M.ASCE2; R. Al-Raoush; T. Weiskitte; N. Lavrik 2014 American Society of Civil Engineers DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001246).
5. Andò, E. (2013). Experimental investigation of micro-structural changes in deforming granular media using x-ray tomography. Ph.D. thesis, Université de Grenoble.
6. Biarez, J., Hicher, P., 1994. Elementary Mechanics of Soil Behaviour. A.A. Balkema, Rotterdam.
7. Bloom M, Russell M, Kustau A, Mandayam S, Sukumaran B. An X-ray computed tomography technique for the measurement of packing density in granular particles. In: Instrumentation and measurement technology conference, 2009.
8. Bloom, M., Russell, M., Kustau, A., Mandayam, S., and Sukumaran, B. (2009). “An X-ray computed tomography technique for the measurement of packing density in granular particles.” Proc., Instrumentation and Measurement Technology Conf. I2MTC '09, IEEE, Piscataway, NJ, 74–79.
9. Cil, M.B. and Alshibli, K.A. (2014). 3D evolution of sand fracture under 1D compression. *Géotechnique*, 64(5):351-364.
10. Coll. C., Endommagement des roches argileuses et perméabilité induite au voisinage d'ouvrages souterrains. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble II2005, 257pp.
11. Dadda, A (2017): Étude mécanique et microstructurale des sols bio-cimentés : application aux ouvrages hydrauliques en terre. Matériaux Mécanique Énergétiques Environnement Procédés Production. UNIVERSITE GRENOBLE.
12. Dadda, A., S. Feia, S. Ghabzeloo, J. Sulem (2015). Fracturation des grains et l'évolution de la micro-structure d'un sable sous fortes contraintes. Congrès Algérien de Mécanique (CAM), El Oued 25-27 Octobre 2015.

13. Della, N., & Feia, S. (2017). Experimental investigation on the effect of the mode of deposition on the pore-access size distribution of sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 0(0), 1–9. <https://doi.org/10.1080/17486025.2017.1324177>
14. Druckrey A, Alshibli K. 3D behavior of sand particles using X-ray synchrotron microtomography. In: Geo-congress 2014 technical papers; 2014. p. 2814–21.
15. Druckrey, A., k. Alshibli, R. Al-Raoush (2016). 3D characterization of sand particle-to-particle contact and morphology. *Computers and Geotechnics* ,74 (2016) 26–35.
16. Einav, I. (2007a). Breakage mechanics—Part I: Theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6), 1274–1297.
17. Einav, I. (2007b). Breakage mechanics part II: modelling granular materials. *Jour. Of Mech and Phys of Solids*, 55(6):1298-1320.
18. Einav, I., Nguyen, G.D.: Cataclastic and ultra-cataclastic shear using breakage mechanics. In: Hatzor, Y., Sulem, J., Vardoulakis, I. (eds.) *Batsheva Seminar on Meso-Scale Shear Physics in Earthquake and Landslide Mechanics*, chap. 8, pp. 77–87. CRC Press, London (2009).
19. Ghabezloo S, Sulem J, Guerdon S, Martineau F, Saint-Marc J. Poro mechanical behaviour of hardened cement paste under isotropic loading. *Cement Concrete Res*2008;38(12):1424–37.GRENOBLE ALPES.
20. Guyon E., Troadec J.-P. (1994): *Du sac de billes au tas de sable*. Editions Odile JACOB Sciences, Paris.
21. Hardin, B. B. O., & Asce, F. (1985). CRUSHING OF SOIL PARTICLES. *Geotechnical Engineering Journal*, III(10), 1177–1192.
22. M. Monfared, P.Delage, J.Sulem n, M. Mohajerani ,A.M. Tang ,E. De Laure, A new hollow cylinder triaxial cell to study the behavior of geo-materials with low permeability. *Université Paris-Est, Ecole desPontsParisTech,6 8Av.BlaisePascal,Cite´ Descartes, ChampssurMarne,77455Marne-la-Valle´e Cedex2,France* *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48 (2011) 637–649
23. Mahbub, A. A., &Haque, A. (2016). X-ray computed tomography imaging of the microstructure of sand particles subjected to high pressure one-dimensional compression. *Materials*, 9(11), 1-17. [890]. DOI: [10.3390/ma9110890](https://doi.org/10.3390/ma9110890).
24. Marion, P., 2013, INTERPRÉTATION ET MODÉLISATION NUMÉRIQUE D’ESSAIS OEDOMÉTRIQUES ET DE PERMÉABILITÉ À NIVEAU VARIABLE RÉALISÉS SUR DES ARGILES CHAMPLAIN, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL.

25. Marsal, R.J., Moreno, E., Nunez, A., Moreno, R. (1965): Research on the behaviour of granular materials and rockfill samples. Research report, Comision Federal de Electricidad de Mexico.
26. Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Kato, Y., Murata, H., 2001. Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression. *Soils and Foundations* 41 (1), 69–82.
27. Novello, E.A., Johnston, I.W., 1989. Normally consolidated behaviour of geotechnical materials. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics*, Rio de Janeiro, vol. 3. pp. 2095–2100.
28. Olson JE, Yaich E, Holder J (2009) Permeability changes due to shear dilatancy in uncemented sands. *Proceedings of US Rock Mechanics/Geomechanics Symp.* 28th June–1st July, Asheville, NC, US.
29. ORTEGA, C. O. (2013). CONTRIBUTION A L ' ETUDE DE LA RUPTURE DES GRAINS DANS LES MATERIAUX GRANULAIRES. Ecole Centrale de Nantes. 10–45
30. Ovalle, O.C. (2013). CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RUPTURE DES GRAINS DANS LES MATERIAUX GRANULAIRES. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes, France.
31. Russell, A. R., & Einav, I. (2013). Energy dissipation from particulate systems undergoing a single particle crushing event, *c*, 299–314.
32. Santamrina, j.c., Ren, x. w.,, 2017, “The hydraulic conductivity of sediments: A pore size perspective. *Engineering geology*.
33. Scott J, Proskin S, Adhikary D (1994) Volume and permeability changes associated with steam stimulation in an oil sands reservoir. *J Can Pet Technol*. doi: [10.2118/94-07-06](https://doi.org/10.2118/94-07-06).
34. Sulem J, Ouffroukh H. Hydromechanical behaviour of Fontainebleau sand- stone. *Rock Mech Rock Eng* 2006;39(3):185–213.
35. Vardoulakis, I., & Ouadfel, H. (1993). Permeability Reduction due to Grain Crushing around a Perforation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 30(7), 1223–1229.
36. Yanlong Chen, Bangyong Yu, Kai Zhang, et al. Permeability Evolution and Particle Size Distribution of Saturated Crushed Sandstone under Compression. *Geofluids*.2018, Vol.2018, p.1.

37. Z.Karatzas, E. Andò, S.-A.Papanicolopoulos, G. Viggiani & J. Y. Ooi, (2017). Evolution of particle breakage studied using x-ray tomography and the discrete element method. Proc. of Powders & Grains - Montpellier – France.
38. Zheng.W., & Tannant, D. (2016). Frac sand crushing characteristics and morphology changes under high compressive stress and implications for sand pack permeability. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0045>.
39. Zhu W, Wong T. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: permeability evolution. *J Geophys Res* 1997;102:3027–41.
40. Ma L., Fauchille A.-L., Doney P.J., Pilz F.F., Courtois L., Taylor K.G. & Lee P.D. 2017. Correlative multi-scale imaging of shales: a review and future perspectives. In: Rutter E.H., Mecklenburgh J. & Taylor K.G. (eds) *Geomechanical and Petrophysical Properties of Mudrocks*. Geological Society, London, Special Publications, 454. First published online May 2, 2017, [Current Links for doi: 10.1144/SP454.11](https://doi.org/10.1144/SP454.11) .
41. Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1) :62–66.

Résumé

Les sols granulaires sont présents dans de nombreux types d'ouvrages dans le domaine du génie civil et géo-mécanique. Ils sont susceptibles d'être écrasés dans plusieurs situations. L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier l'évolution du comportement mécanique et hydraulique d'un sable soumis à une forte contrainte, à partir des essais oedométriques à haute pression sur le sable carbonaté ayant une taille des grains supérieurs à 1.6 mm. Ces essais oedométriques sont associés par des analyses granulométriques avant et après chargement et des mesures de perméabilité à différents paliers de chargement. Des scans tomographie à rayons-X ont été également réalisés sous différents niveaux de chargement (0 ; 2.5 ; 5 et 10 MPa) sur d'éprouvettes de même sable. L'évolution du nombre de coordination et la granulométrie en fonction des contraintes appliquées peuvent être évaluée à partir des techniques de traitement d'images 3D aux rayons-X et avec analyse numérique par Matlab®.

Mots clé : charge oedométrique, écrasement, perméabilité, sable, tomographe aux rayons-X

Abstract

Granular soils are present in many types of projects in civil engineering and geo-mechanics. They are likely to be crushed in several situations. The objective of this research internship is to explore the evolution of the mechanical and hydraulic behavior subjected to a strong constraint, from high pressure oedometric tests on carbonate sand with a grain size greater than 1.6 mm. These oedometric tests are associated by granulometric analyses before and after loading and permeability measurements at different levels of loading. X-ray tomography scans were also performed at different loading levels (0, 2.5, 5 and 10 MPa) on the same specimen loaded under different loads. The evolution of the coordination number and the particle size as a function of the applied stresses can be evaluated from 3D X-ray image processing techniques and with numeric analysis by Matlab®.

Keyword: oedometric load, crushing, permeability, sand, X-ray tomography

المخلص

التربة الحبيبية موجودة في أنواع كثيرة من الأعمال في مجال الهندسة المدنية والجيوميكانيكية. من المحتمل أن يتم سحقهم في عدة مواقف. الهدف من هذا البحث هو دراسة تطور السلوك الميكانيكي والهيدروليكي للرمال المعرض لضغوط عالية، من اختبارات الأودومتريّة عند الضغط العالي على الرمال الكربونية ذات حجم الحبوب أكبر من 1.6 مم. وترتبط هذه الاختبارات oedometer مع حجم يحلل قبل وبعد القياسات التحميل والنفاذية في مستويات الحمل المختلفة. تم إجراء فحوصات التصوير الشعاعي بالأشعة السينية أيضًا عند مستويات تحميل مختلفة (0 ، و 2.5 ، و 5 ، و 10 ميغا باسكال) على عينات من نفس الرمل. يمكن تقييم تطور عدد التنسيق وحجم الجسيمات كدالة للقيود المطبقة من تقنيات معالجة الصور بالأشعة السينية ثلاثية الأبعاد والتحليل الرقمي من قبل Matlab®.

الكلمات المفتاحية: تحميل أودومتريك، السحق، النفاذية، الرمل، التصوير المقطعي بالأشعة السينية.