

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière : Travaux Public

Spécialité : Voies Ouvrage d'art

Thème

L'endommagement des grains sous fortes contraintes œdométriques : effet de l'endommagement sur le fluage des matériaux granulaires

Nom et Prénom de l'étudiant :
Mr. Benterki Yacine

Encadrant : Dr. Sadok FEIA
Co-Encadrant : Mr. Seyf Eddine MESSIOUD

Promotion Juillet 2019

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 que Dieu les protège.

Je dédie ce travail à :

Mes frères «fodile Sofiane & Farouk »

Mes sœurs «Sara ,khaoula et Ferdousse »

Ma fiancée «Mona Drid »

Mon cousin«Nani elkhayer»

A mes amis «Walid, Mahfod ,Nacereddine Brahime Abdellah Abderamhmane khmici »

A tous les familles Benterki et Nani

Merci à tous

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 Mon professeur : HIMA BELGACEM qui m'a appris au primaire et les principes de la lecture, de l'écriture et de l'arithmétique

Je remercie le responsable du laboratoire Mécanique de sol: **Rahwa** pour son aide et ses conseils tout au long de la phase de stage

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

Résumé & Abstract

Résumé

La rupture des grains d'un matériau granulaire peut entraîner des modifications importantes de sa microstructure, ce qui modifiera son comportement macroscopique. Dans ce travail, des essais œdométriques de fluage à haute pression ont été effectués sur un sable carbonaté ayant des tailles des grains supérieures à 1.6 mm. Les essais ont été réalisés pour différentes durées de chargement et pour différentes valeurs d'indices de densité et pour différents états de saturation. Ces essais suivis par des analyses granulométriques. Des mesures de perméabilité au fil du temps ont été effectuées. L'effet de quelques paramètres a été étudié tels que ; l'intensité de chargement, la saturation, la densité, et la durée de chargement. Les résultats expérimentaux montrent que le taux de rupture des grains augmente avec l'augmentation la durée de chargement et l'intensité de chargement. Une production de fines un peu plus grande a été constatée pour l'éprouvette de faible densité. La production des particules fines est plus grande pour l'éprouvette saturée. La perméabilité est diminuée au fil du temps (Fluage). Dans le cadre de ce travail nous proposons une loi empirique qui relie la perméabilité avec le temps d'application de la charge. Cette loi simple permet de prédire l'évolution de la perméabilité en connaissant le temps d'application de la charge sans avoir besoin de réaliser des essais au laboratoire

Mots clés : Matériau granulaire, Essai œdométrique, Rupture des particules, Fluage

ملخص

يمكن أن يؤدي كسر حبيبات المادة الحبيبية إلى تغييرات كبيرة في البنية المجهرية ، مما سيؤدي إلى تعديل سلوكها. في هذا العمل ، أجريت اختبارات قياس عالية الضغط على الرمال الكربونية ذات حجم حبوب أكبر من 1.6 مم. تم إجراء الاختبارات لأوقات تحميل مختلفة و للقيم المختلفة لمؤشرات الكثافة و لحالات التشبع المختلفة. هذه الاختبارات تليها تحليلات الحبيبية. تم إجراء قياسات النفاذية مع مرور الوقت. وقد تم دراسة تأثير بعض المعلمات مثل ؛ شدة التحميل ، التشبع ، الكثافة ، ووقت التحميل. تظهر النتائج التجريبية أن معدل انكسار الحبوب يزداد بزيادة وقت التحميل وكثافة التحميل. تم العثور على كمية أكبر قليلاً من الغرامات للعينة ذات الكثافة المنخفضة. إنتاج الجزيئات الدقيقة أكبر للعينة المشبعة. انخفضت النفاذية مع مرور الوقت. كجزء من هذا العمل ، نقترح قانوناً تجريبياً يربط النفاذية بوقت تحميل التطبيق. يمكن هذا القانون البسيط من التنبؤ بتطور النفاذية من خلال معرفة وقت تطبيق الحمل دون الحاجة لإجراء اختبارات في المختبر

الكلمات المفتاحية : المواد الحبيبية ، اختبارات قياس عالية الضغط ، كسر الجسيمات ، التشوه

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre 1. Etude Bibliographique</i>	3
1.1 Introduction	3
1.2 Fracturation des grains et évolution de la microstructure	3
1.3 Mécanisme de l'endommagement des grains d'un matériau granulaire sous haute pression.....	4
1.4 Effet de l'endommagement des grains sur le comportement des sols granulaires	6
1.4.1 Evolution de la granulométrie.....	6
1.4.2 Evolution de la perméabilité.....	7
1.4.3 Evolution de la taille des pores.....	9
1.5 Les rayons-X pour l'imagerie des matériaux granulaires en trois dimensions.....	9
1.5.1 Principe de l'imagerie 3D par les rayons-X dans les matériaux granulaires.....	10
1.5.2 Mesure des propriétés des contacts par la tomographie aux rayons-X.....	12
1.6 Effet du temps (Fluage).....	14
1.7 Conclusion.....	17
<i>Chapitre 2. Méthodes et Matériau</i>	18
2.1 Introduction.....	18
2.2 Matériau et Méthodes	18
2.2.1 Matériau.....	18
2.2.2 Dispositifs expérimentaux.....	21
2.2.2.1 Dispositif œdométrique à haute pression	21
2.2.2.2 Dispositif de tamisage.....	22
2.2.2.3 Dispositif de mesure de perméabilité.....	24
2.2.3 Programme expérimental et procédures d'essais.....	25
2.3 Conclusion.....	28
<i>Chapitre 3. Résultats et Discussions</i>	29
3.1 Introduction.....	29
3.2 Résultats expérimentaux.....	29
3.2.1 Réponse mécanique.....	29
3.2.2 Evolution de la courbe granulométrique.....	30
3.2.3 Effet de saturation.....	31
3.2.4 Effet de l'indice de densité.....	33
3.2.5 Effet de la durée de chargement (Fluage)	34
3.2.6 Evolution de la perméabilité avec le temps (Fluage).....	36
3.3 Conclusion.....	37
<i>Conclusions & Perspectives</i>	38
Références	40

Liste des Figures

Chapitre 1. Etude Bibliographique

Figure 1.1 : Modes de fracture d'un grain (Guyon et Troadec, 1994)	4
Figure 1.2 : Courbe contrainte-déformation pour le sable d'Hostun (HN34) et le sable carbonaté (Dadda et al. 2015).....	4
Figure 1.3 : Réponse macroscopique des tests œdométriques (Karatza et al. 2017).....	5
Figure 1.4 : Étendue de la rupture du test OCS1 (section agrandie à partir d'images XCT). ((Karatza et al. 2017).....	6
Figure 1.5 : L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte a) Sable d'Hostun, b) Sable carbonaté .Dadda et al (2015)	7
Figure 1.6 : Les étapes de l'écrasement et durcissement du système granulaire (Russell et al. 2013)	7
Figure 1.7 : Processus de diminution de la perméabilité à la contrainte axiale (Chen et al., 2018)..	8
Figure 1.8 : Processus formé de pores isolés dans l'échantillon sous les contraintes axiales accrues (Chen et al., 2018).....	8
Figure 1.9 : Evolution de la distribution des tailles des pores de sable carbonaté en fonction de la contrainte appliquée. Dadda et al (2015).....	9
Figure 1.10 : Acquisition d'images 3D (karatza et al., 2017).....	10
Figure 1.11 : Illustration schématique de l'acquisition et de la reconstruction d'images tomographiques par rayons-X (MA et al, 2017)	11
Figure 1.12 : Etapes du traitement d'images 3D et d'identification des particules (Ando 2013). ...	12
Figure 1.13 : Caractérisation des contacts inter-granulaire de CT à rayons X (Imperial College – March 2018).....	13
Figure 1.14 : Surface de contact entre deux grains (Dadda 2018)	13
Figure 1.15 : Illustration de voxels de contact entre deux particules (Druckrey et al. 2015).....	13
Figure 1.16 : Schéma des forces de contact initiales et effets de la rupture des grains, (b) Test de Fluage (Creep) (Lade et al., 2010)	14
Figure 1.17 : Charge axiale et évolution du déplacement en fonction du temps lors du chargement par fluage (Ando et al. 2019)	15
Figure 1.18 : Présentation 3D d'un large scan de vue de tout l'échantillon. Les positions marquées A et B sur le balayage initial sont suivies dans le temps, 10 minutes séparant le début de chaque balayage (Ando et al. 2019)	16

Chapitre 2. Méthodes et Matériau

Figure 2.1 : Vue au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté avant écrêtage (Messioud et al. 2018).....	18
Figure 2.2 : Granulométrie initiale du sable étudié – Intensité de chargement.....	19
Figure 2.3 : Granulométrie initiale du sable étudié – Fluage	19
Figure 2.4 : Etapes de mesure de l'indice des vides minimum (e_{min})	20
Figure 2.5 : Etapes de mesure de l'indice des vides maximum (e_{max}).....	20
Figure 2.6 : Essai principale (essai œdométrique).	21
Figure 2.7 : Présentation du bâti œdométrique à haute pression.....	22

Figure 2.8 : Série des tamis utilisé pendant les essais granulométriques	23
Figure 2.9 : Schéma du dispositif de perméabilité.....	24
Figure 2.10 : Présentation de dispositif de mesure de perméabilité (Laboratoire).....	25
Figure 2.11 : Préparation d'un échantillon œdométrique de sable carbonaté écrêté à 1.6mm : a) Placé le papier filtre dans la cellule œdométrique, b) Mise en place du sable, c) Mise en place de la pierre poreuse et le piston de chargement d) Mise en place de la cellule sur le bâti œdométrique.	27

Chapitre 3. Résultats et Discussions

Figure 3.1 : Courbe contrainte-déformation du sable carbonaté.....	29
Figure 3.2 : Evolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte appliquée.	30
Figure 3.3 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm – intensité de chargement	30
Figure 3.4 : Courbe temps-déplacement – effet de saturation.....	31
Figure 3.5 : Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – effet de saturation.....	32
Figure 3.6 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm – effet de saturation	32
Figure 3.7 : Courbe temps-déplacement – effet de la densité	33
Figure 3.8 : Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – effet de la densité	34
Figure 3.9 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm – effet de la densité.....	34
Figure 3.10 : Courbe temps-déplacement – effet de la durée de chargement	35
Figure 3.11 : Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – effet de la durée de chargement	35
Figure 3.12 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm – effet de la durée de chargement	36
Figure 3.13 : Evolution de la perméabilité du sable carbonaté en fonction du temps (Fluage)	37

Introduction Générale

Introduction générale

Les particules sont très abondantes dans la nature, comme dans les sables et les argiles, et elles constituent également 75% des matières utilisées dans l'industrie (par exemple, minerais, produits pharmaceutiques formulés, colorants, poudres détergentes). Lorsqu'une charge est appliquée à un assemblage de particules de sol, la réponse du géomatériau à l'échelle macro provient de changements intervenant à l'échelle des particules. De plus, la plupart des phénomènes naturels, tels que les glissements de terrain, proviennent d'une région localisée où la granulométrie subit d'importants changements. En cas de rupture des particules, la forme et la taille des particules constituant la masse sont modifiées ; cela induit des changements dans le réseau de contacts à travers lequel les charges appliquées sont transmises (Karatza 2018). En conséquence, les changements à l'échelle micro peuvent affecter de manière significative le comportement mécanique d'un géomatériau à une échelle macro. Il n'est donc pas surprenant que les mécanismes à l'origine de la rupture des particules fassent l'objet d'un intense intérêt de recherche dans plusieurs domaines, notamment la géomécanique.

La rupture de particules dans les matériaux granulaires est importante pour de nombreuses infrastructures géotechniques, telles que les pieux offshore (Randolph, 1988), les grands barrages (Sowers et al. 1965) et le ballast de chemin de fer (Indraratna et al., 1998). Dans un assemblage granulaire, une particule se cassera en quelques morceaux lorsque sa contrainte interne atteindra la résistance à la rupture par particule. À la micro-échelle, la rupture des particules modifie les conditions de contact entre particules et les matériaux, conduisant à une redistribution locale des contraintes. À l'échelle macro, la fragmentation des particules modifie la compressibilité du sol (Pestana et Whittle, 1995), la résistance au cisaillement (Marsal, 1967), la dilatance (Yamamuro et Lade, 1996) et la perméabilité (Lade et al., 1996 ; Feia et al., 2016).

Plusieurs facteurs influençant le phénomène de la rupture des grains tels que ; la granulométrie, état des contraintes appliquées, la minéralogie et cristallographie des grains, la forme des grains, teneur en eau, le temps d'application de la charge (**Fluage**)...etc. Dans le cadre de ce travail nous allons essayer à répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'effet de ce phénomène sur le fluage des matériaux granulaires ?

Afin de répondre à cette question un programme expérimental a été réalisé sur un sable carbonaté de taille des grains supérieurs à 1.6 mm. Des essais œdométriques de fluage à haute

pression ont été réalisés et associés à des analyses granulométriques. Et des mesures de perméabilité ont été effectuées au cours du temps (Fluage).

Ce rapport comporte trois chapitres : le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le phénomène de la rupture des grains dans un matériau granulaire. Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation du sable étudié, la présentation des dispositifs expérimentaux et les procédures des essais. Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et leurs interprétations. Finalement, nous présentons les principales conclusions de ce travail et les perspectives pour des futures études de la rupture des particules.

Chapitre 1. Etude Bibliographique

1.1 Introduction

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 et hydrique.

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 (Einav 2007a-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 cette partie, nous présentons une recherche bibliographique des principaux travaux publiés sur le phénomène d'endommagement dans les matériaux granulaires sous sollicitation mécanique, et l'effet de ce phénomène sur le comportement des sols granulaires. Et nous présentons l'effet de fluage sur le phénomène de la rupture des particules.

1.2 Fracturation des grains et évolution de la microstructure

1.2.1 Généralité sur les mécanismes de la rupture des grains

La rupture 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 Trodec (1994), dans un assemblage granulaire, on distingue trois modes de rupture (Figure 1.1);

- **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.

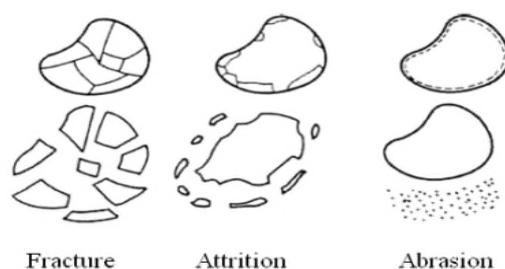


Figure 1.1 : Modes de fracture d'un grain (Guyon et Troadec, 1994)

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

Le phénomène de l'endommagement des grains conduit à plusieurs changements du comportement des sols granulaires. Une explication des effets de l'endommagement des grains a été présentée par Dadda et al., (2015), 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.

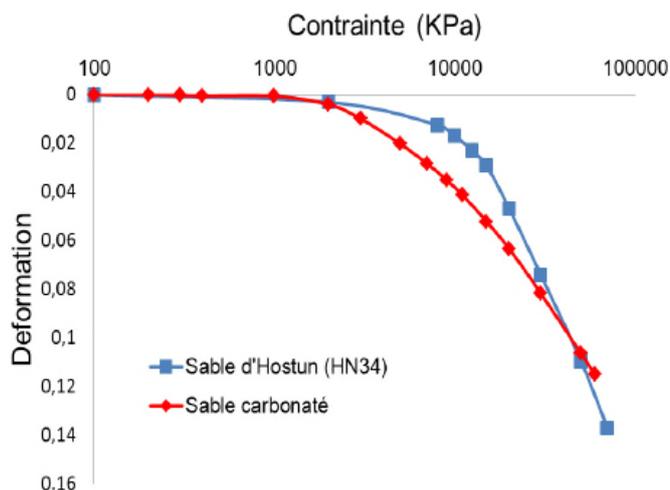


Figure 1.2 : Courbe contrainte-déformation pour le sable d'Hostun (HN34) et le sable carbonaté (Dadda et al. 2015).

La courbe de contrainte-déformation est divisée en deux parties, la première partie est la phase plastique c'est-à-dire le réarrangement des grains (effondrement des pores), le changement de la pente de la courbe est le début de la rupture des grains.

La deuxième partie de la courbe contient deux mécanismes qui sont l'écrasement des grains et/ou le réarrangement des particules.

Une explication bien détaillée dans les travaux de Karatza et al., (2017) sur la rupture des particules d'un matériaux granulaire. Dans cette étude des essais œdométriques sur des échantillons de sable de « Zéolites » ont été effectués pour étudier le phénomène d'endommagement des grains, suivis par des scans tomographiques à différents niveaux de chargement afin de suivre la rupture des particules. La Figure 1.3 montre la réponse contrainte déformation de ces essais. Et la Figure 1.4 montre des images tomographiques à rayons-X à différents niveaux de chargement.

Ces résultats montrent bien que :

- Le début de la rupture des grains correspond au changement de la pente des courbes contrainte-déformation ;
- La première partie (phase plastique) de la courbe de contrainte-déformation accompagnée par effondrement des pores ;
- La deuxième partie contient deux mécanismes qui sont la rupture des grains et le réarrangement des particules.

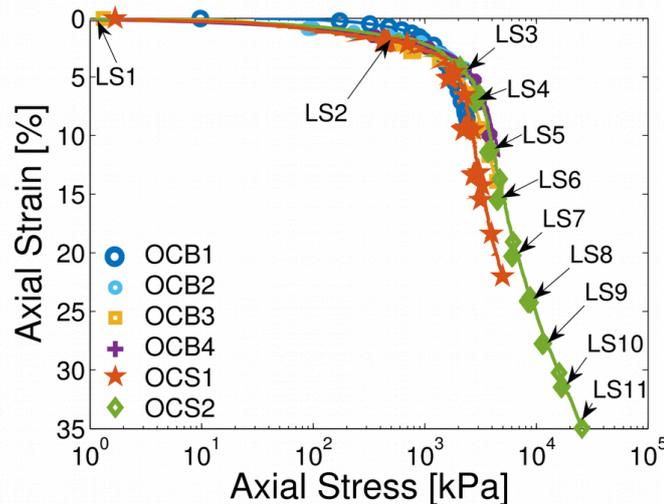


Figure 1.3 : Réponse macroscopique des tests œdométriques (Karatza et al. 2017)

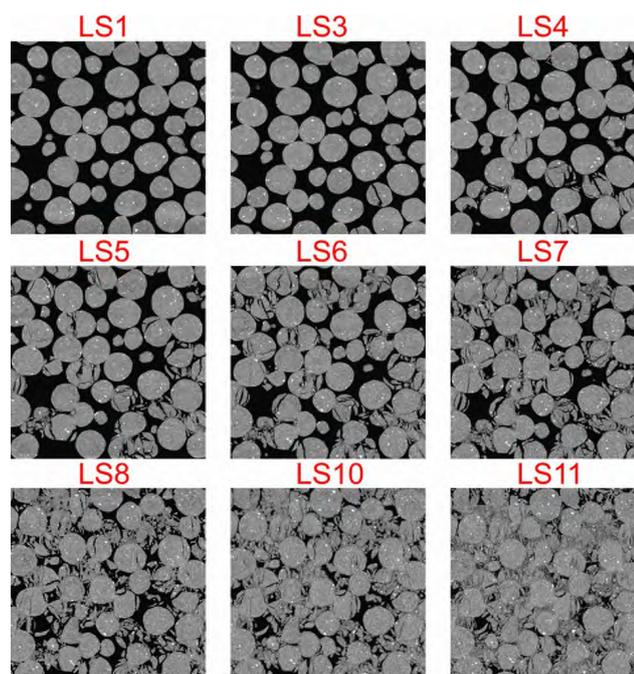


Figure 1.4 : Étendue de la rupture du test OCS1 (section agrandie à partir d'images XCT). ((Karatza et al. 2017).

1.3 Effet de l'endommagement des grains sur le comportement des sols granulaires

Le phénomène d'endommagement des grains génère plusieurs changements sur les propriétés microstructurales, ce qui va changer les caractéristiques hydromécaniques du sable tel que la perméabilité et l'angle de frottement...etc.

1.3.1 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.

La Figure 1.5 présente l'évolution de la courbe granulométrique pour différents niveaux de chargement pour le sable d'Hostun ; le sable carbonaté (Dadda et al. 2015). L'évolution de la granulométrie en fonction de contrainte appliquée est assez remarquable. Cette évolution se ralentit à partir d'une certaine valeur de contrainte. La courbe granulométrique correspondant à cette valeur est appelée, selon Einav (2007a), « courbe granulométrique ultime ».

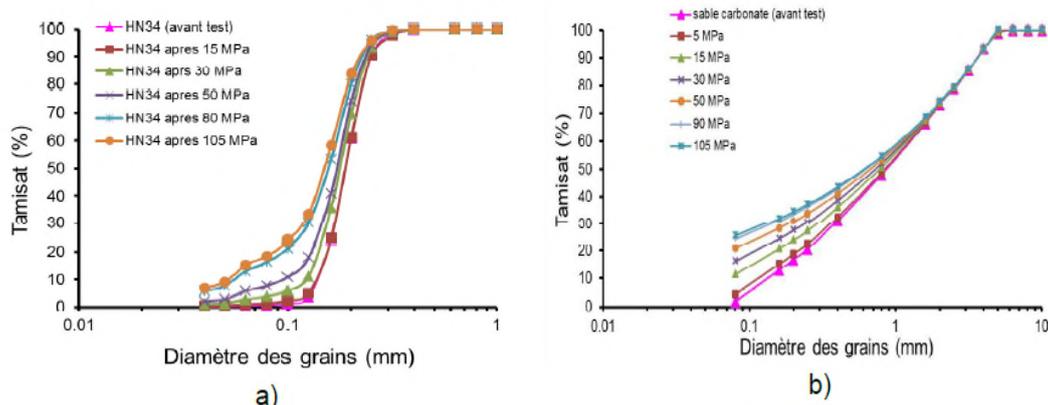


Figure 1.5 : L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte a) Sable d'Hostun, b) Sable carbonaté .Dadda et al (2015)

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) (Figure 1.6).

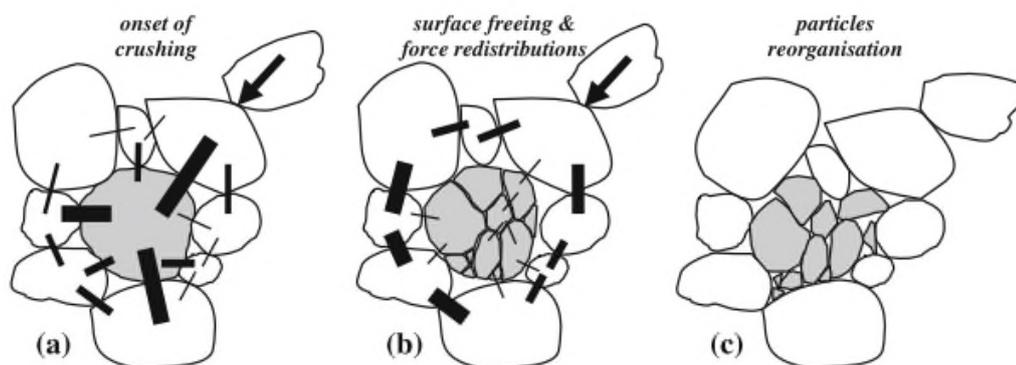


Figure 1.6 : Les étapes de l'écrasement et durcissement du système granulaire (Russell et al. 2013)

1.3.2 Evolution de la perméabilité

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 1.7 présente l'évolution de la perméabilité du sable de grès en fonction de la contrainte appliquée.

La Figure 1.8 montre des images tomographiques à rayons-X ayant des niveaux de gris à différents niveaux de chargement. Ces résultats (Figure 1.7) 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 1.8).

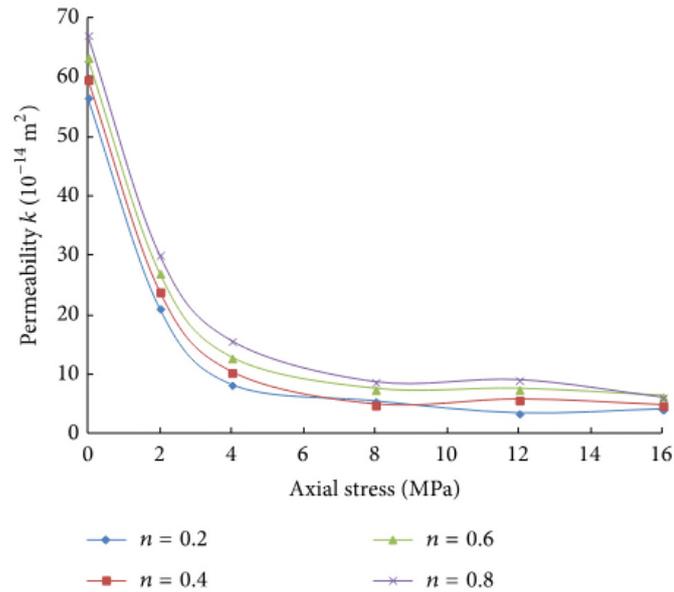


Figure 1.7 : Processus de diminution de la perméabilité à la contrainte axiale (Chen et al., 2018)

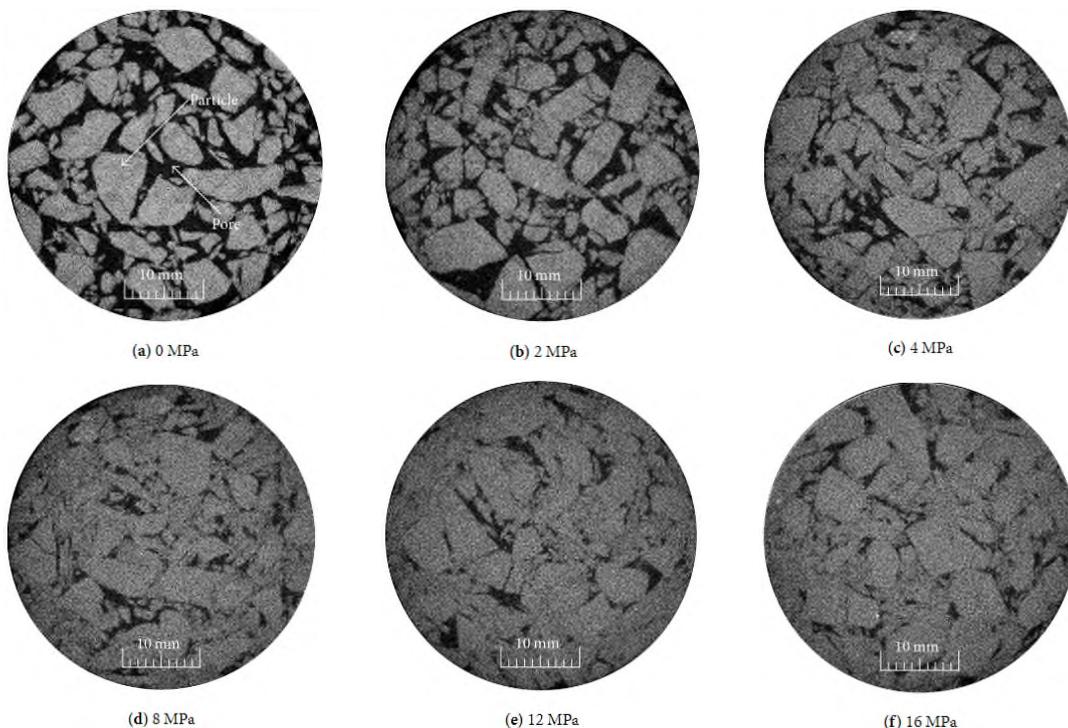


Figure 1.8 : Processus formé de pores isolés dans l'échantillon sous les contraintes axiales accrues (Chen et al., 2018)

1.3.4 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). Dadda et al., (2015) ont étudié l'effet de l'endommagement des grains sur la distribution de taille des pores. Ils ont effectué des mesures tensiométriques sur le sable carbonaté à différents niveaux de chargement. La Figure 1.9 montre les résultats de la distribution des tailles des pores en fonction des contraintes appliquées de sable carbonaté. Ce résultat montre qu'une translation de la taille médiane des pores avec l'augmentation de la charge. Cette translation est due à l'effondrement des pores et l'écrasement des grains.

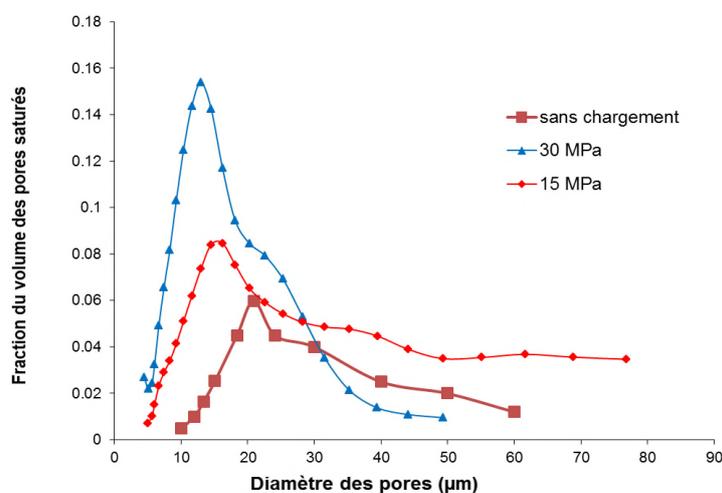


Figure 1.9 : Evolution de la distribution des tailles des pores de sable carbonaté en fonction de la contrainte appliquée. Dadda et al (2015)

1.4 Les rayons-X pour l'imagerie des matériaux granulaires en trois dimensions

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 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, ce qui est particulièrement utile pour les milieux granulaires car cela permet de distinguer facilement les phases poreuses et solides.

Des travaux récents ont été publiés qui avait pour but de quantifier les caractéristiques des particules telles que : la morphologie, la taille des particules, leurs formes et leurs orientations. Ces études ont également montré la cinématique de la rupture des grains, 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 ; Karatza et al. 2017; Karatza et al. 2018 ; Ando et al. 2019).

1.4.1 Principe de l'imagerie 3D par les rayons-X dans les matériaux granulaires

➤ Acquisition d'images 3D

Le principe de la tomographie à rayons-X est de placer un échantillon d'un matériau granulaire sur un appareil tournant entre la source de rayons-X et le détecteur (Figure 1.10).

L'échantillon tourne autour d'un axe spécifique et le détecteur mesure le degré d'atténuation, créant des radiographies 2D (projections) en niveaux de gris.

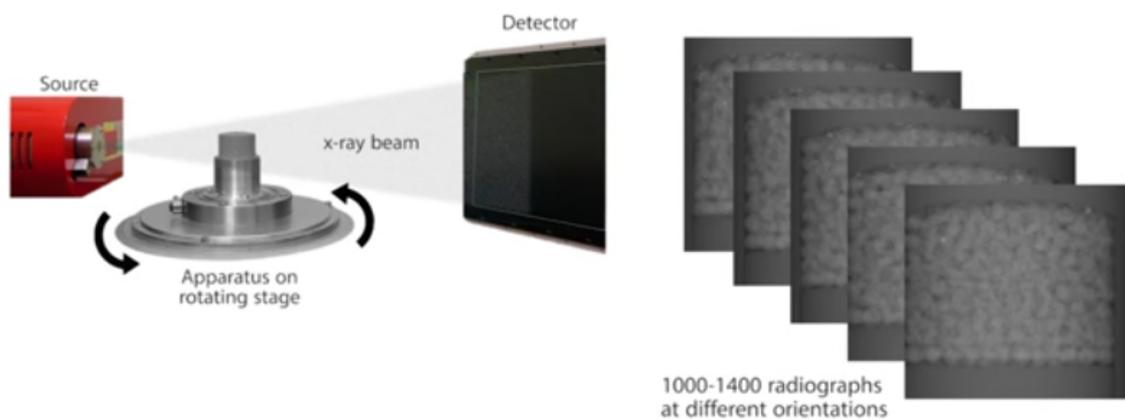


Figure 1.10 : Acquisition d'images 3D (karatza et al., 2017)

Ensuite les images de radiographies 2D individuelles sont reconstruites pour produire une image 3D (Figure 1.11).

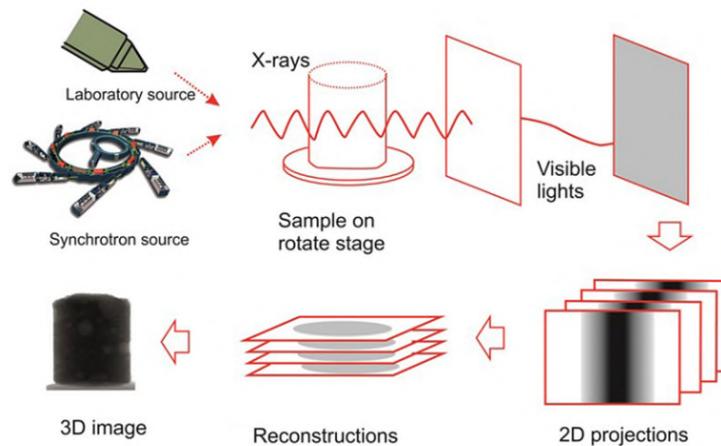


Figure 1.11 : Illustration schématique de l'acquisition et de la reconstruction d'images tomographiques par rayons-X (MA et al, 2017)

➤ **Traitement d'images 3D**

Pour calculer les caractéristiques des particules et les caractéristiques micromécaniques, les images 3D en niveau de gris obtenues par la tomographie aux rayons-X doivent être passées par plusieurs étapes de traitement, afin de les rendre exploitable pour le calcul numérique. 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.

La Figure 1.12 montre les principales étapes de traitement d'images 3D obtenues par la tomographie aux rayons-X

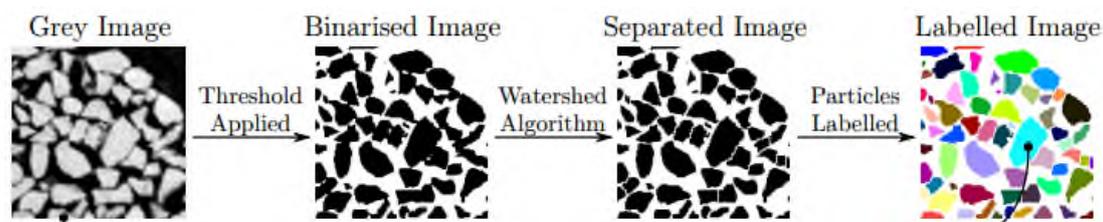


Figure 1.12 : Etapes du traitement d'images 3D et d'identification des particules (Ando 2013).

1.4.2 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 ; Karatza et al. 2018 ; Ando et al. 2019) 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.

- **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 1.13) et la surface de contact (Figure 1.14) 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 1.15).

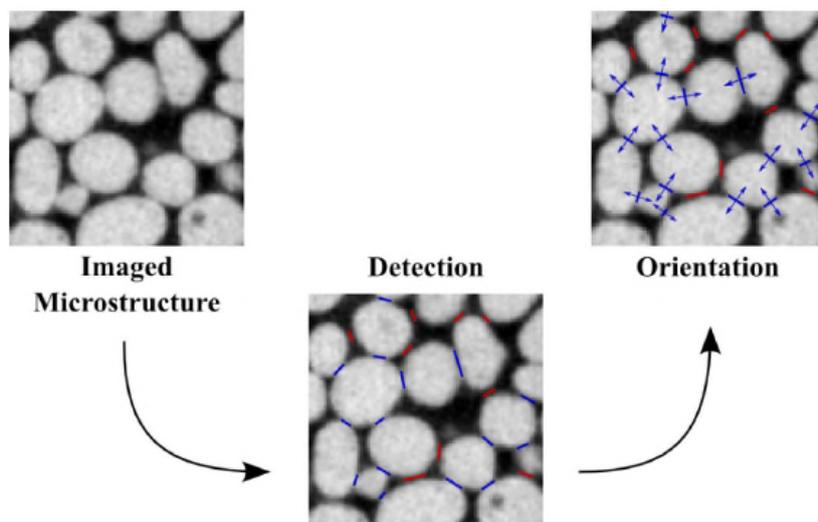


Figure 1.13 : Caractérisation des contacts inter-granulaire de CT à rayons X (Imperial College – March 2018)

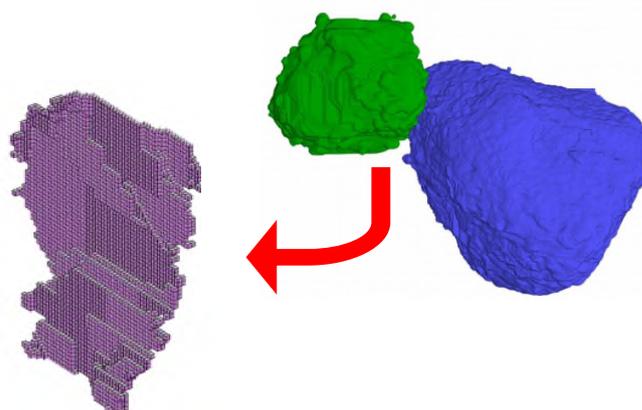


Figure 1.14 : Surface de contact entre deux grains (Dadda 2017)

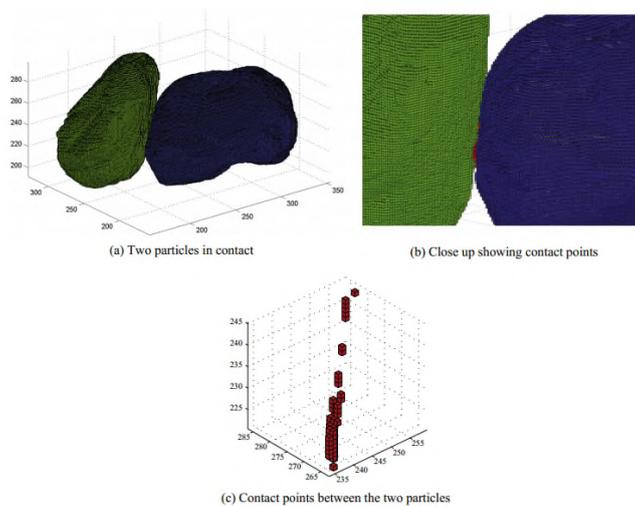


Figure 1.15 : Illustration de voxels de contact entre deux particules (Druckrey et al. 2015)

1.5 Effet du temps (Fluage)

Plusieurs travaux se sont intéressés aux effets du temps dus à la rupture des grains (Leung et al., 1996 ; Takei et al., 2001 ; McDowell et Khan 2003 ; Wang et al., 2011 ; Lade et al., 2010 ; Karimpour et Lade 2013; Ando et al. 2019). Takei et al., (2001) ont effectué des essais œdométriques sur quatre matériaux écrasables (barres de craie, barres de talc, perles de verre et particules de quartz). Dans cette étude ils ont montré que le comportement dépendant du temps sous la compression uni-axiale provient principalement d'un cycle répétitif de l'écrasement des grains, de réarrangement des particules et de redistribution des contraintes au niveau de contact inter-granulaire. Karimpour et Lade (2013) ont effectué un essai de fluage pour une durée de deux mois sur le sable de la plage de Virginie à l'aide de l'appareil triaxial, et ils ont constaté qu'il n'y a pas de fin de fluage. Selon Karimpour et Lade (2013), le fluage est dus à une fatigue statique ou à une fracture retardée par laquelle les grains s'écrasent et provoquent un réarrangement de la structure des grains. Lade et al.(2010) ont réalisé des essais triaxiaux sur un sable de récif corallien afin d'étudier les effets de fluage et de relaxation, ils ont mesuré une déformation qui augmente avec le temps. D'après les auteurs, cet effet serait dû à la rupture des grains différée dans le temps, qui produit un effondrement par redistribution des fragments cassés (voir Figure 1.16).

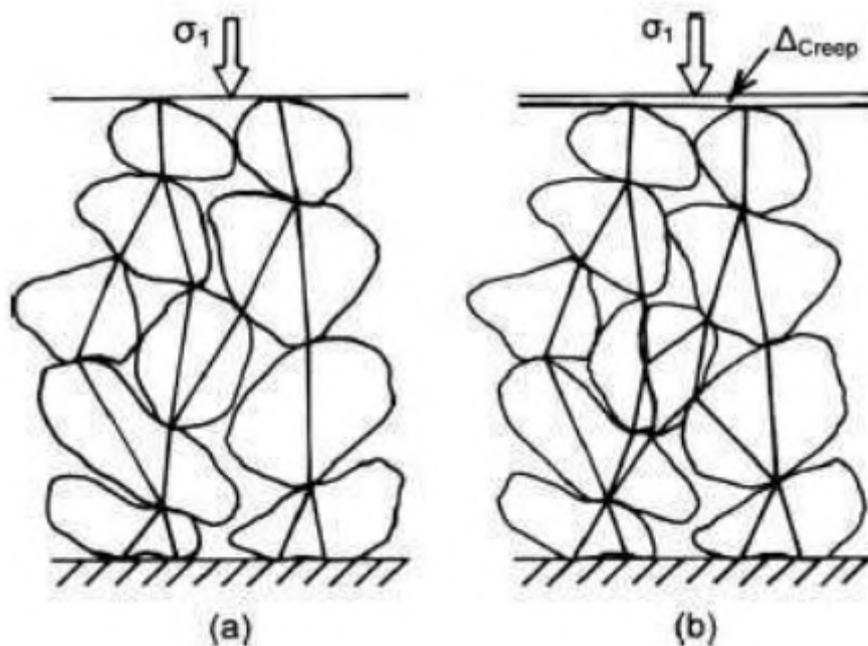


Figure 1.16 : Schéma des forces de contact initiales et effets de la rupture des grains, (b) Test de Fluage (Creep) (Lade et al., 2010)

Ando et al., 2019 ont effectué un essai de fluage de 2 heures dans du sable sec dans des conditions oedométriques sous une charge axiale de 2,5 MPa, à l'aide d'une tomographie à haute vitesse par rayons-X à double résolution (6,5 μm et 0,65 μm). Ils ont montré que les petits déplacements (Figure 1.17) mesurés à la limite de l'échantillon et dans les tomographies globales du volume total de l'échantillon sont dans certains cas le résultat d'une fracturation prononcée du grain de quelques particules.

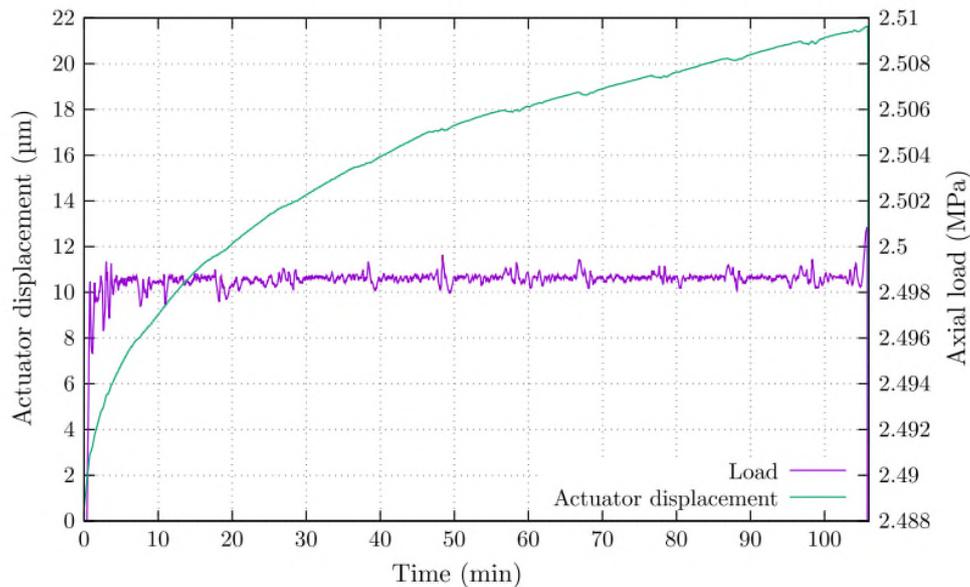


Figure 1.17 : Charge axiale et évolution du déplacement en fonction du temps lors du chargement par fluage (Ando et al. 2019)

De plus, Ando et al., 2019 ont effectué un balayage local à haute résolution sur un volume relativement petit (1,3 mm de hauteur et 1,3 mm de diamètre). Ce volume est situé au centre de l'échantillon (Figure 1.18). La figure résume les analyses à l'échelle des grains, où deux mécanismes de rupture du grain locaux sont mis en évidence avec les cercles bleus A et B. La série chronologique, avec un intervalle de 10 min de ces deux volumes d'intérêt, est tracée au bas de la Figure 1.18.

Une nette ouverture de fissure est déjà constatée dans la région A après 20 min. Par la suite, une autre fissure dans un grain proche qui est directement en-dessous à l'emplacement B est observée. Cette nouvelle fissure commence environ 10 minutes après la fissure de A. Les deux grains se fissurent de manière interne à travers le gros du grain. Contrairement à la fissure B, la fissure A présentait déjà une discontinuité notable au début de la série chronologique. Une autre observation est que la fissure A se propage beaucoup plus

rapidement, essentiellement dans les 10 minutes, que la fissure B qui prend environ 20 minutes pour progresser complètement. Ce dernier indique peut-être que la fissure A est la réactivation d'une fissure existante, alors que la fissure B est fraîche. On postule que la fissure B est déclenchée par les réarrangements des chaînes de force dans l'assemblage après la fissuration de A.

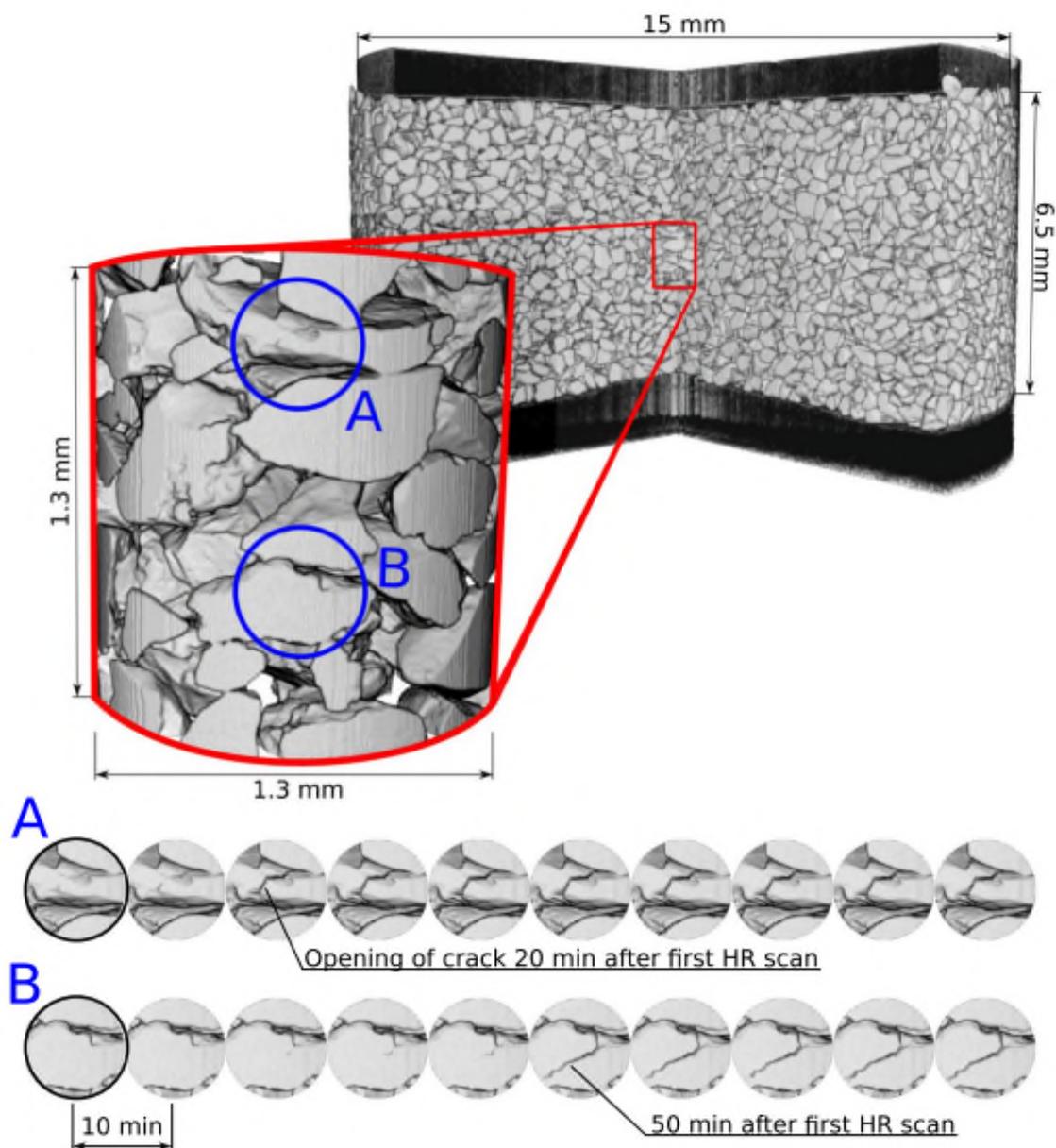


Figure 1.18 : Présentation 3D d'un large scan de vue de tout l'échantillon. Les positions marquées A et B sur le balayage initial sont suivies dans le temps, 10 minutes séparant le début de chaque balayage (Ando et al. 2019)

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, tout d'abord, on a abordé la généralité sur le mécanisme de l'endommagement des grains d'un matériau granulaire sous fortes contraintes, ce mécanisme dépend des caractéristiques du matériau tels que : taille, forme des grains, la minéralogie...etc. Ensuite, l'effet du phénomène de l'endommagement des grains sur les caractéristiques des sols granulaires tels que : l'évolution de granulométrie, l'évolution de la perméabilité et l'évolution de la taille des pores ont été présentés. Nous avons également abordé l'imagerie 3D des matériaux granulaires par les rayons-X. le principe de cette méthode, et l'utilisation de l'imagerie 3D pour mesurer les propriétés microstructurales ont été présentés. L'effet de fluage sur la rupture des matériaux granulaires a été également présenté.

Chapitre 2. Méthodes et Matériau

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord une description du matériau étudié (sable carbonaté). Ensuite, nous décrivons les dispositifs expérimentaux utilisés tels que le dispositif œdométrique à haute pression et le dispositif de mesure de la perméabilité. Et nous décrivons également de façon détaillée le programme expérimental des essais de fluage réalisés sur des échantillons œdométriques de sable carbonaté écrêté à 1.6 mm.

2.2 Matériau et Méthodes

2.2.1 Matériau

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 2.1 présente une Vue au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté avant écrêtage. La courbe granulométrique de ce sable est présentée sur la Figure 2.2 et la Figure 2.3.

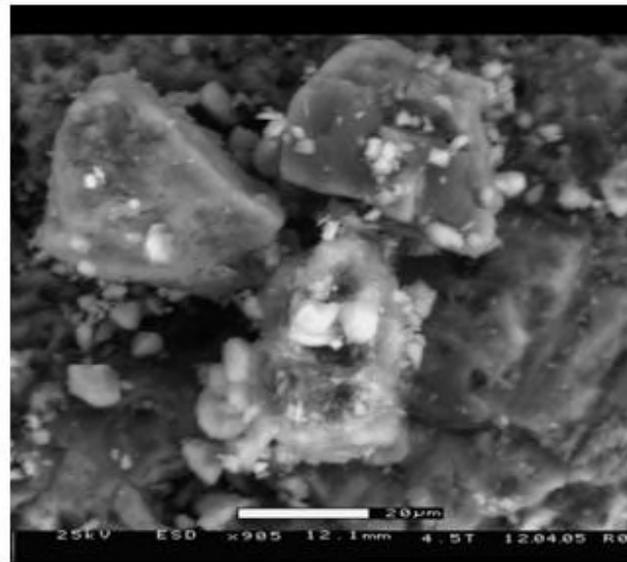


Figure 2.1 : Vue au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté avant écrêtage (Messioud et al. 2018).

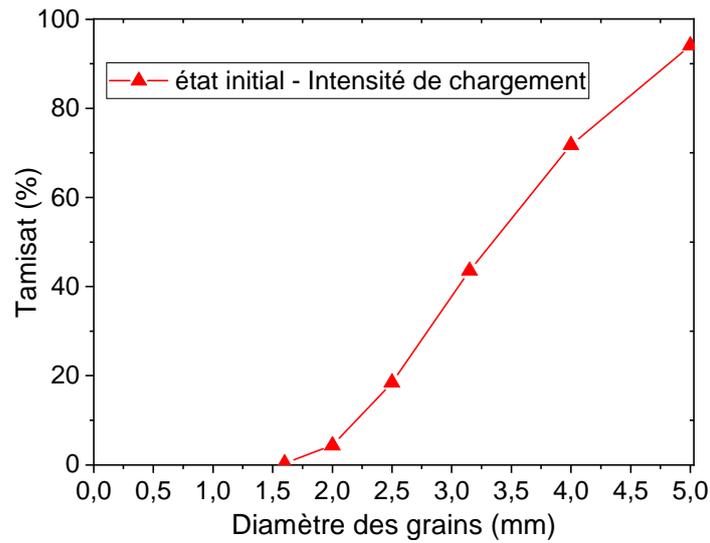


Figure 2.2 : Granulométrie initiale du sable étudié – Intensité de chargement

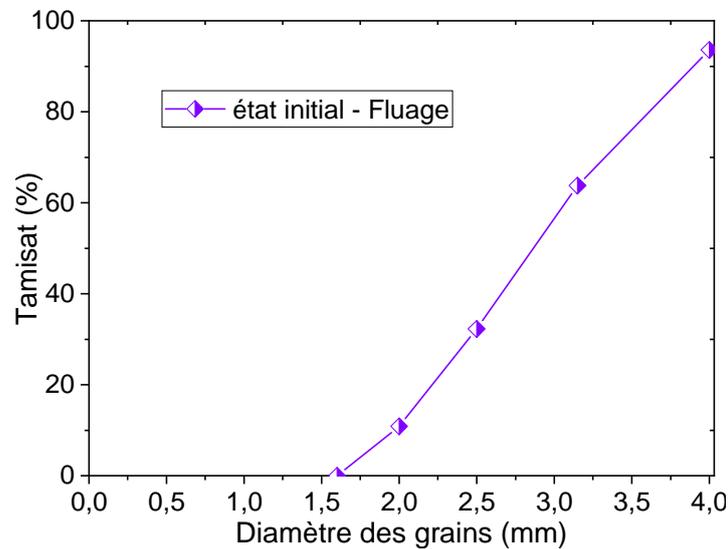


Figure 2.3 : Granulométrie initiale du sable étudié – Fluage

➤ **Mesure de l'indice des vides minimum (e_{min})**

Nous placés le sable carbonaté par couches successives dans un moule d'un diamètre 10.3cm et 11.8cm hauteur à l'aide d'une cuillère et on secoue le moule avec un petit marteau sur quatre quarts (Figure 2.4). Nous répétons le processus jusqu'à ce que le moule soit rempli au maximal, ensuite, nous pesons l'échantillon.

À travers la relation 1 nous pouvons calculer la valeur minimale de l'indice des vides.

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



Figure 2.4 : Etapes de mesure de l'indice des vides minimum (e_{min})

➤ **Mesure de l'indice des vides maximum (e_{max})**

Pour le cas plus lâche de notre sable, 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'essai (Figure 2.5), enfin nous pesons l'échantillon.

Grâce à la relation (1), nous pouvons mesurer et extraire la valeur maximale de l'indice des vides.



Figure 2.5 : Etapes de mesure de l'indice des vides maximum (e_{max})

Les caractéristiques du sable étudié sont présentées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques du sable étudié

Matériau	$D_{50}(mm)$	C_u	e_{min}	e_{max}	$\rho_s(g/cm^3)$
Sable carbonaté	2.85	1.54	0.62	0.93	2.65

2.2.2 Dispositifs expérimentaux

2.2.2.1 Dispositif œdométrique à haute pression

Dans ce travail les essais ont été réalisés à l'aide d'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 ParisTech (Marcial et al., 2002) Figure 2.6. Le plan de ce bâti a été redessiné et amélioré dans le cadre de la thèse de Messiod 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 5 cm de diamètre et de 3 cm de hauteur. La déformation axiale est mesurée par un capteur de déplacement électronique installé en haut du bâti. La Figure 2.7 montre le dispositif œdométrique utilisé.

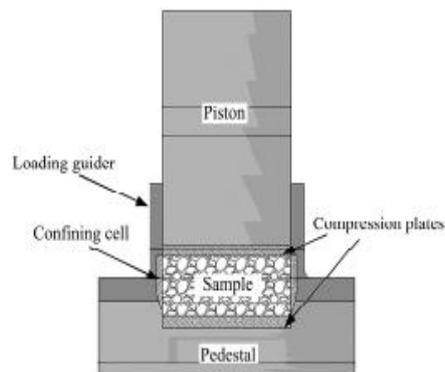


Figure 2.6 : Essai principale (essai œdométrique).

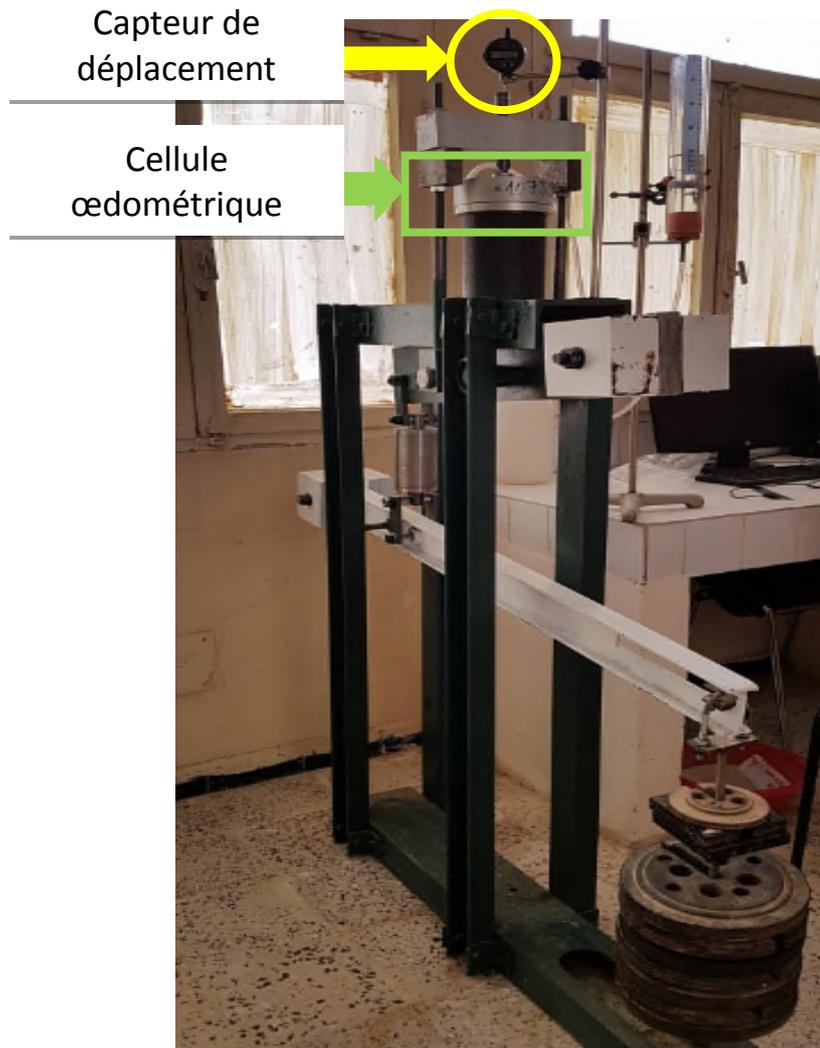


Figure 2.7 : Présentation du bâti œdométrique à haute pression

2.2.2.2 Dispositif de tamisage

En emboîte les tamis utilisée 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 fin) et le dessus on met un couvercle pour éviter la dispersion des poussières (voir Figure 2.8). 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.



Figure 2.8 : Série des tamis utilisé pendant les essais granulométriques

2.2.2.3 Dispositif de mesure de perméabilité

Pour les mesures de perméabilité, un tube de Mariotte, permettant d'avoir une charge constante (ΔH), 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 2.9). La Figure 2.10 montre le dispositif de mesure de perméabilité utilisé (Laboratoire).

Une mesure de la durée de circulation d'eau est réalisée tous les 3 cm de hauteur du tube. Ensuite la perméabilité est calculée par la loi de Darcy (équation 2) :

$$K = \frac{V.L}{\Delta H.S.t} \quad (2)$$

K : perméabilité (cm/s) ;

L : hauteur de la cellule œdométrique (cm) ;

ΔH : perte de charge (cm) ;

S : section de la cellule œdométrique (cm²) ;

t : temps (seconde).

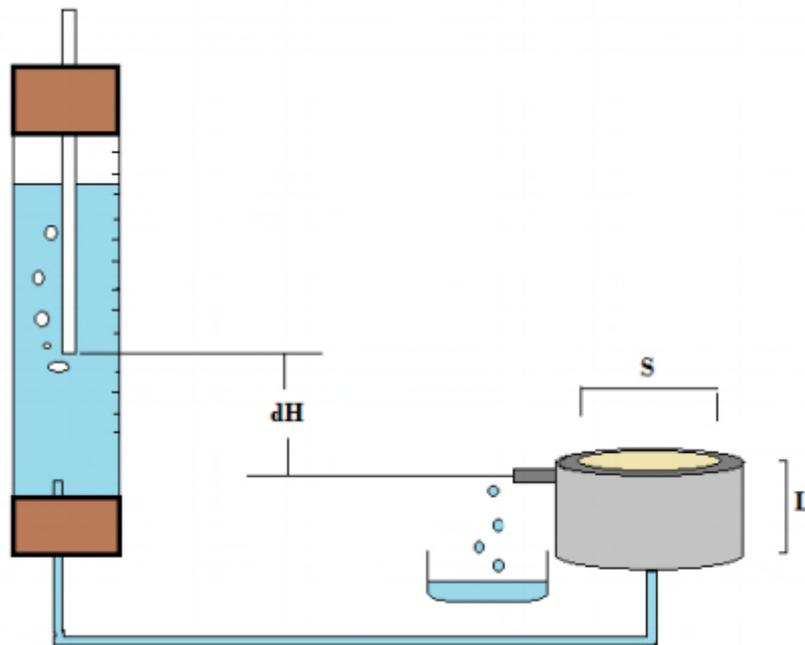


Figure 2.9 : Schéma du dispositif de perméabilité

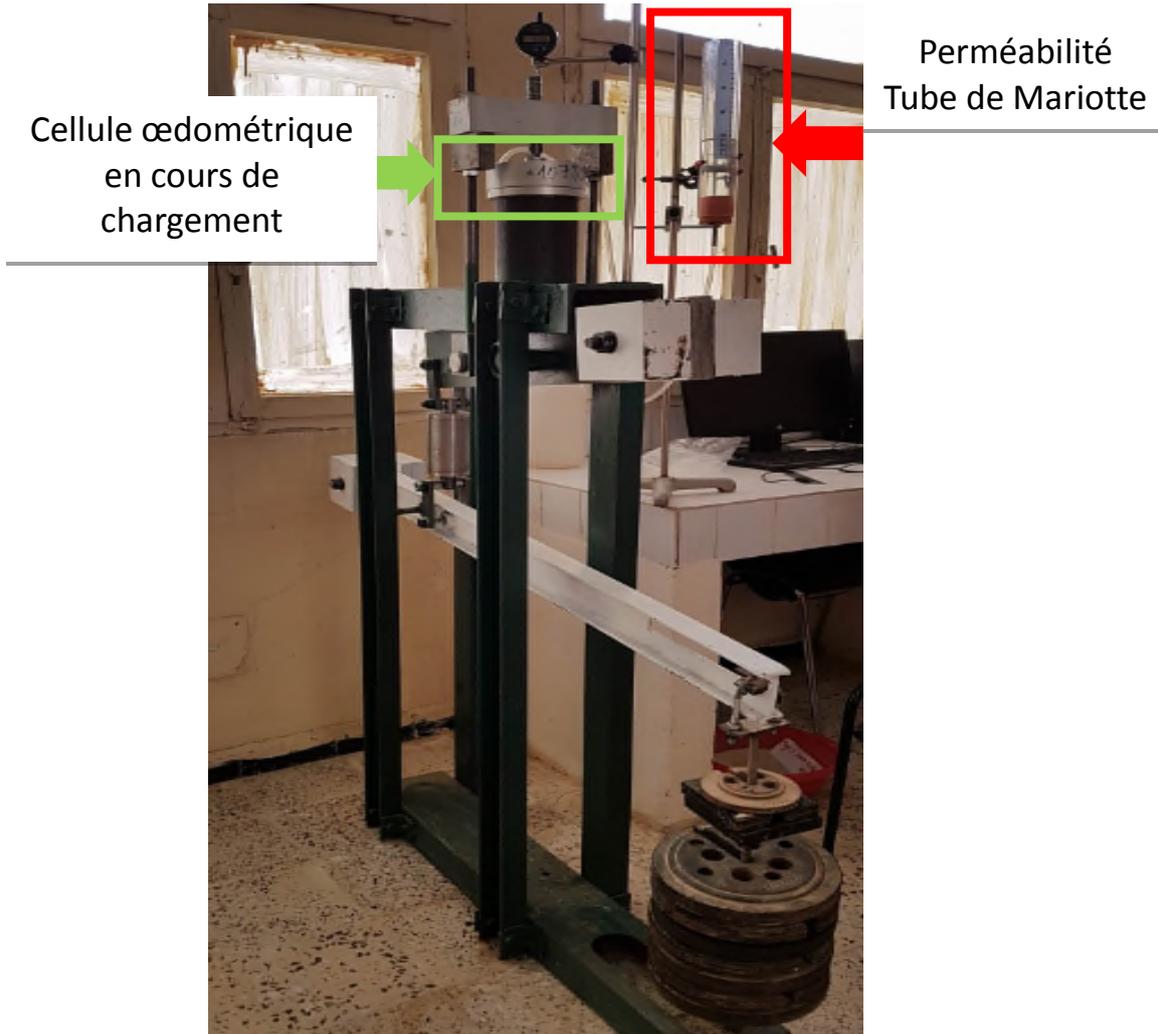


Figure 2.10 : Présentation de dispositif de mesure de perméabilité (Laboratoire)

2.2.3 Programme expérimental et procédures d'essais

Dans ce travail des essais œdométriques à haute pression ont été effectués sur des échantillons secs de sable carbonaté écrêté à 1.6 mm, à différents niveaux de chargement (0, 5 et 10 MPa). Et des essais œdométriques de **fluage** à haute pression ont été effectués sur des échantillons secs et saturés de sable carbonaté écrêté à 1.6 mm pour différents durée de chargement et pour différents indice de densité sous une charge constante de 10 MPa. Une analyse granulométrique de l'éprouvette après chargement est réalisée afin d'obtenir l'évolution de la granulométrie initiale dans chaque palier de contrainte. Et des mesures de perméabilité ont été effectuées pendant le temps (Fluage). Les caractéristiques des essais réalisés sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques des essais réalisés

Essai	Etat de saturation	I_D	Contrainte (MPa)	Durée
T1	Sèche	0.9	5	/
T2	Sèche	0.9	10	/
T3	Sèche	0.9	10	1 heure
T4	Sèche	0.9	10	24 heures
T5	Saturée	0.9	10	1 heure
T6	Sèche	0.6	10	1 heure
T7	Sèche	0.4	10	1 heure

Pour la préparation de nos échantillons, nous avons essayé d'obtenir des indices de densité proche de 0.9, 0.6 et 0.4. On met en place le sable par couche avec une vérification de la densité obtenue. Et on a essayé de vibrer notre échantillon avec un léger compactage.

Dans ce travail on a utilisé deux cellules œdométrique un de 5 cm de diamètre et 3 cm de hauteur, et l'autre de 6.3 cm de diamètre et 2 cm de hauteur (pour mesure la perméabilité).

Après la préparation de l'échantillon On met la cellule œdométrique sur l'appareil (œdomètre), et on met en contact le chapeau de l'odomètre avec le piston de chargement. Ensuite, on applique la charge (masse), et on note les mesures de déplacement sur le comparateur au cours du temps.

La Figure 2.11 montre les principales étapes pour la préparation de l'éprouvette pour l'essai œdométrique.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2.11 : Préparation d'un échantillon œdométrique de sable carbonaté écrêté à 1.6mm :
a) Placé le papier filtre dans la cellule œdométrique, **b)** Mise en place du sable, **c)** Mise en place de la pierre poreuse et le piston de chargement **d)** Mise en place de la cellule sur le bâti œdométrique.

2.3 Conclusion

Le présent chapitre présente les caractéristiques du matériau étudié (sable carbonaté), ainsi que les techniques et les procédures expérimentales adoptées dans cette étude. Des essais œdométriques à haute pression ont été effectués sur des échantillons secs de sable carbonaté écrêté à 1.6 mm, à différents niveau de chargement (0, 2.5 et 10 MPa), et des essais œdométriques de fluage à haute pression ont été réalisés sur des échantillons secs et saturés sous une charge constante (10 MPa), pour différents durée de chargement et pour différentes valeurs de densité. Une analyse granulométrique de l'éprouvette après chargement est réalisée afin d'obtenir l'évolution de la granulométrie initiale. Des mesures de perméabilité ont été effectués pendant le temps afin d'explorer l'effet de fluage sur la perméabilité d'un matériau granulaire.

Dans le prochain chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur le dispositif œdométrique à haute pression, et le dispositif de perméabilité, ainsi que l'analyse et les interprétations de ces résultats.

Chapitre 3. Résultats et Discussions

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur le dispositif œdométrique à haute pression, et le dispositif de perméabilité, ainsi que l'analyse et les interprétations de ces résultats. Tout d'abord nous présentons la réponse mécanique de sable carbonaté à partir de courbe de compressibilité pour déterminer la contrainte de rupture pour ce sable. A partir des résultats expérimentaux nous présentons également l'effet de quelques paramètres tels que : l'intensité de chargement, la saturation de l'éprouvette, la densité initiale de l'échantillon, la durée de chargement (fluage) et l'évolution de la perméabilité au cours du temps.

3.2 Résultats expérimentaux

3.2.1 Réponse mécanique

La Figure 3.1 présente la courbe de compressibilité du sable étudié. Selon Biarez et Hicher (1994), Novello et Johnston (1989), le changement de la pente de cette courbe peut être attribué au phénomène d'écrasement des grains. Ainsi, le seuil d'écrasement est évalué suivant la méthode de détermination de la contrainte de pré-consolidation dans la mécanique des sols. Le seuil d'écrasement de sable carbonaté est d'environ 3 MPa. Cette différence montre que le sable carbonaté est moins résistant à l'écrasement. Cela est dû à la nature minéralogique du sable.

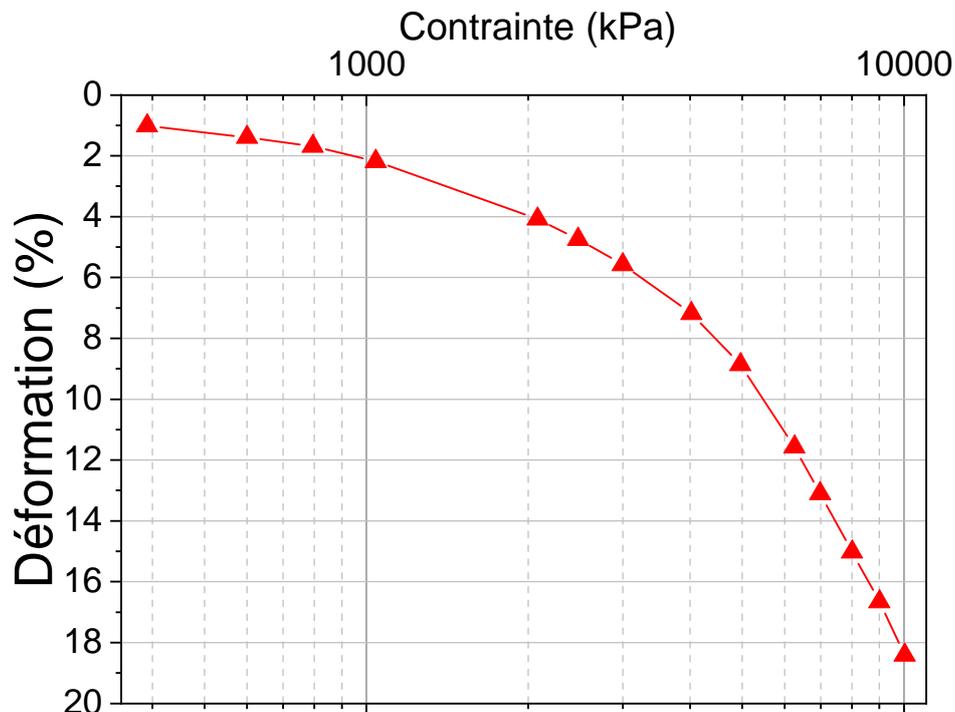


Figure 3.1 : Courbe contrainte-déformation du sable carbonaté

3.2.2 Evolution de la courbe granulométrique

Les essais œdométriques 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 3.2 présente l'évolution de la courbe granulométrique pour différents niveaux de chargement (0, 5, et 10 MPa) pour le sable carbonaté. L'évolution de la granulométrie en fonction de contrainte appliquée est assez remarquable. Ces résultats montrent que la production des particules fines augmente avec l'augmentation de la charge. Ceci peut être remarqué en présentant le pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm sur la Figure 3.3.

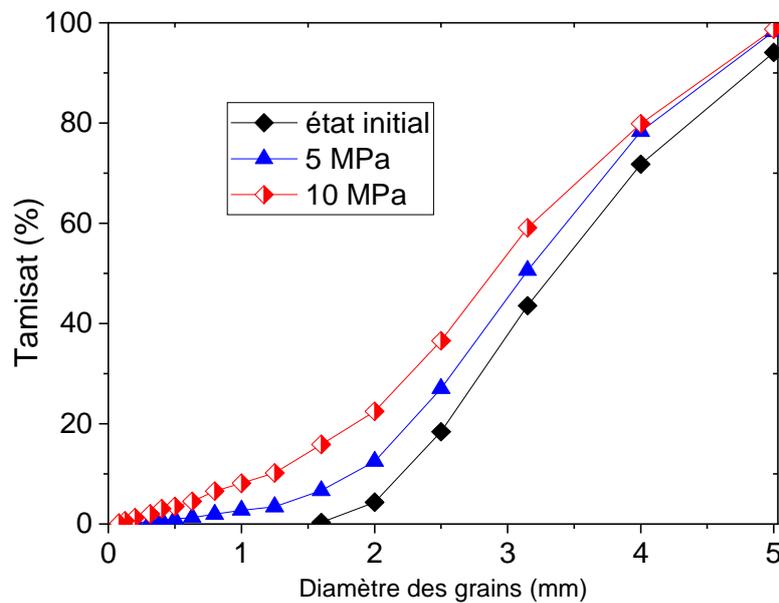


Figure 3.2 : Evolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte appliquée.

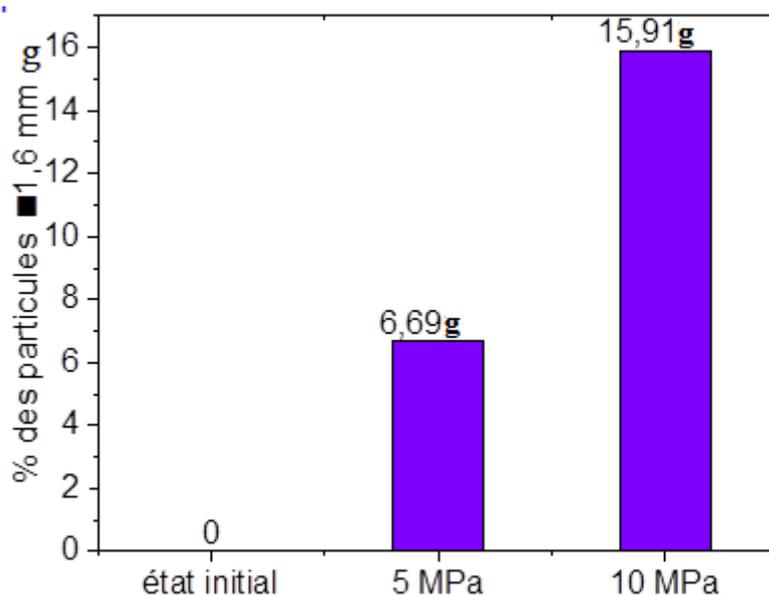


Figure 3.3 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm

3.2.3 Effet de saturation

Pour étudier l'influence de saturation de l'éprouvette, deux essais ont été effectués. Un essai a été réalisé sur une éprouvette sèche et un essai est effectué sur une éprouvette saturée. La charge appliquée lors de ces essais est de 10 MPa, maintenue pendant une heure. L'évolution du déplacement en fonction du temps de ces deux essais est présentée dans la Figure 3.4. On constate un déplacement plus significatif dans l'éprouvette saturée par rapport à l'éprouvette sèche. Cela peut être interprété par une production des fines et/ou un important réarrangement des grains dans l'essai réalisé sur une éprouvette saturée.

Les résultats de l'analyse granulométrique de ces deux essais sont présentés sur la Figure 3.5. Ces résultats montrent que le taux d'écrasement des grains est légèrement plus grand pour l'éprouvette saturée. La production des particules inférieures à 1.6 mm est plus importante pour l'éprouvette saturée (Figure 3.6).

Selon Ovalle (2013), l'eau génère une diminution de la résistance des particules et par conséquent le taux de rupture pourrait augmenter. Cela est dû à la pression interstitielle, notamment la capillarité à l'intérieur des microfissures, qui affecte les contraintes effectives et donc la contrainte nécessaire pour propager les fissures aux seins des grains.

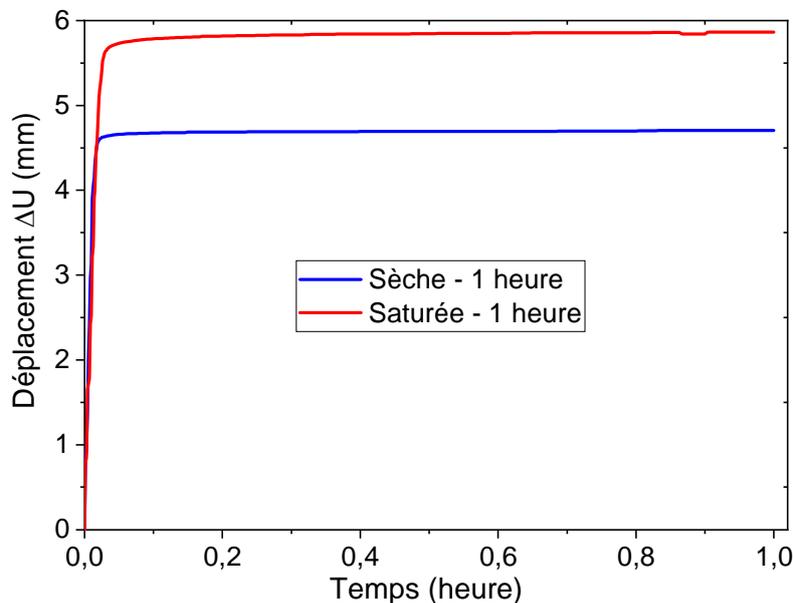


Figure 3.4 : Courbe temps-déplacement – effet de saturation

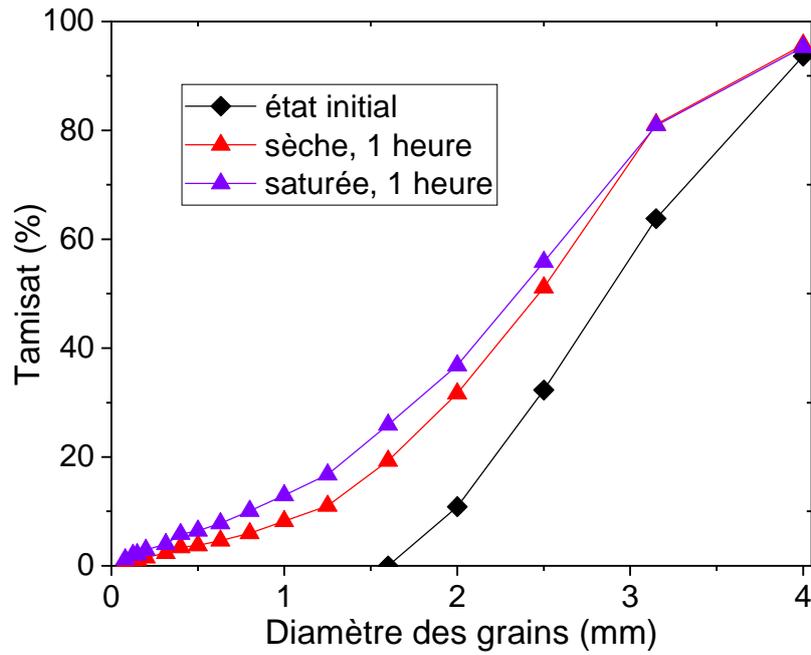


Figure 3.5 : Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – effet de saturation

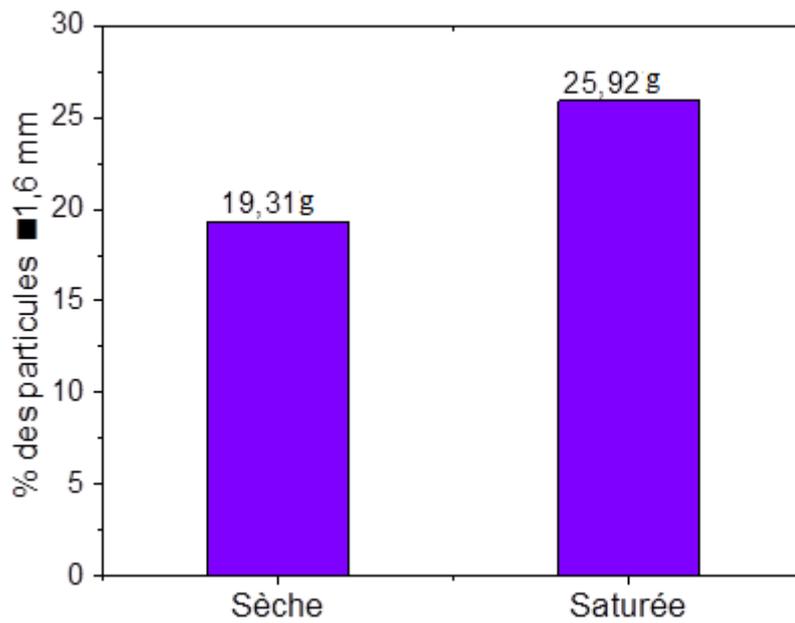


Figure 3.6 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm – effet de saturation

3.2.4 Effet de l'indice de densité

Pour étudier l'influence de l'indice de densité de l'éprouvette, trois essais ont été effectués sur des éprouvettes de différentes valeurs de l'indice de densité (0.9, 0.6 et 0.4). La charge appliquée lors de ces essais est de 10 MPa, maintenue pendant une heure. L'évolution du déplacement en fonction du temps de ces trois essais est présentée dans la Figure 3.7. On constate un déplacement plus significatif dans l'éprouvette de faible indice de densité (0.4). Cela peut être interpréter par un important réarrangement des grains, ceci est dû à la présence d'un grand pourcentage des vides.

Les résultats de l'analyse granulométrique de ces trois essais sont présentés sur la Figure 3.8. Ces résultats montrent que le taux d'écrasement des grains est légèrement plus grand pour l'éprouvette de faible indice de densité (0.4). La production des particules inférieures à 1.6 mm est légèrement plus grande pour l'éprouvette de faible indice de densité (0.4) (Figure 3.9). Cela peut être expliqué par la concentration de la contrainte, où l'échantillon de faible densité possède un nombre petit des grains (c'est-à-dire un nombre petit de contacts) par contre l'échantillon dense possède un grand nombre de grains entraînant une augmentation du nombre de contacts entre les particules, ce qui conduit à la diminution de la concentration de la contrainte appliquée. Pour cette raison, la possibilité de rupture des particules augmente pour l'échantillon de faible densité.

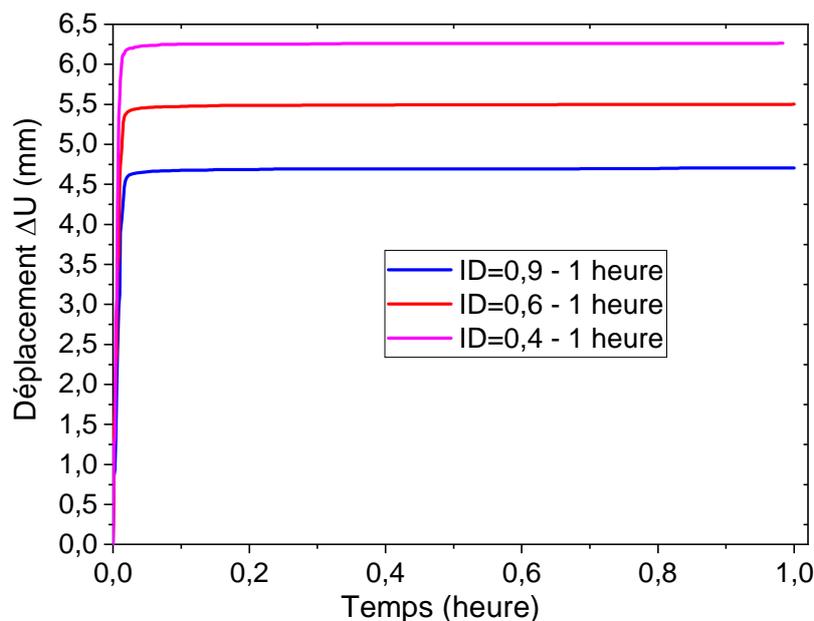


Figure 3.7 : Courbe temps-déplacement – effet de la densité

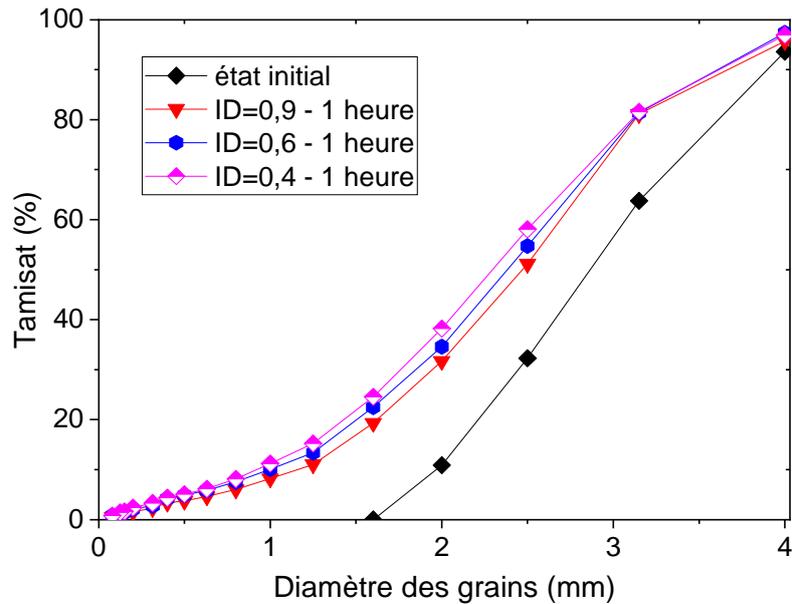


Figure 3.8 : Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – effet de la densité

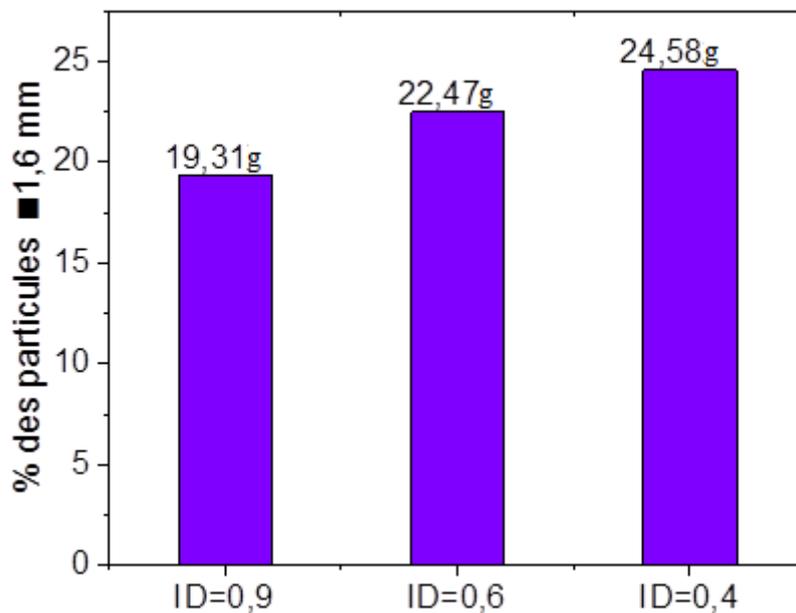


Figure 3.9 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1,6 mm – effet de la densité

3.2.5 Effet de la durée de chargement (Fluage)

La durée de chargement (**fluage**) est l'un des paramètres les plus importants pour étudier le phénomène de la rupture des grains d'un matériau granulaire soumis à des contraintes élevées. Un essai a été réalisé pour une durée relativement longue (24 heures) sur une éprouvette sèche, sous une contrainte de 10 MPa, et un autre essai a été réalisé pour une durée d'une heure. L'évolution du déplacement en fonction du temps est présentée dans la Figure 3.10. Il est à noter que, le déplacement continu à évoluer avec le temps et ne stabilise pas sur l'essai

réalisé sur une durée de 24 heures ce qui montre un effet clair de fluage. Les éprouvettes ont été réalisées au même indice de densité ($I_D = 0,90$). La différence de déplacement ($<1\text{mm}$) observée sur les deux courbes pourrait être expliquée par l'intervalle d'erreur due à la répétabilité des essais.

L'évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final pour les deux essais est présentée sur la Figure 3.11. On observe, à l'état final, une production de particules fines (inexistantes sur le matériau initial). Cette production est légèrement plus importante pour l'essai réalisé sur une durée de 24 heures. Les résultats montrent également que la production des particules fines inférieures à 1.6 mm est légèrement plus grande pour l'essai de 24 heures (Figure 3.12). A l'issue de ces résultats on observe que l'effet du temps (au moins sur l'intervalle du temps étudié) n'a pas une influence significative sur l'endommagement des grains. Cet effet pourrait être important pour une intervalle de temps plus importante.

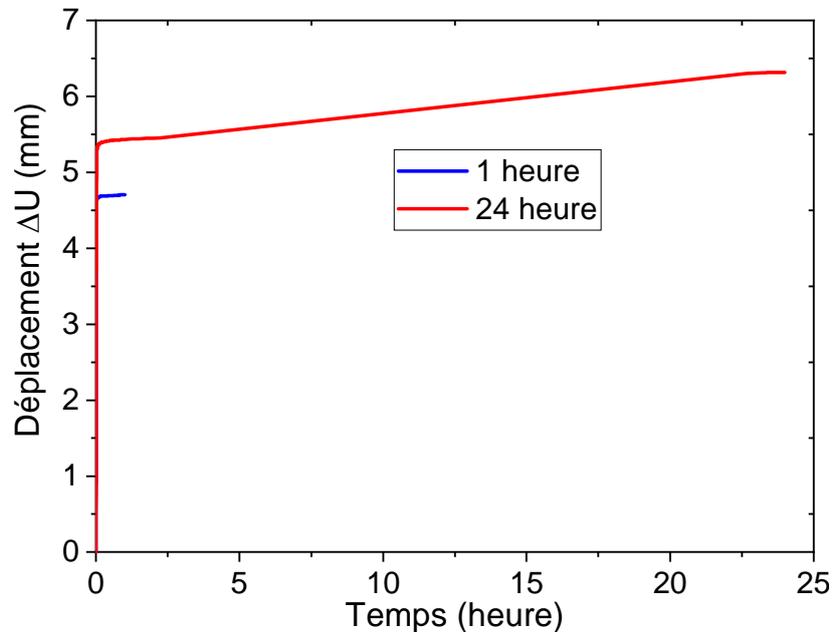


Figure 3.10 : Courbe temps-déplacement – effet de la durée de chargement

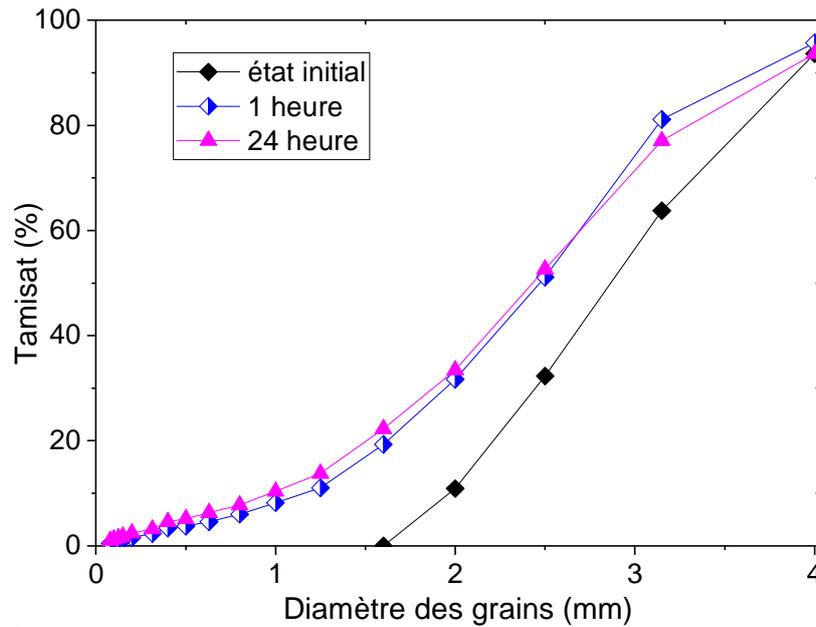


Figure 3.11 : Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – effet de la durée de chargement

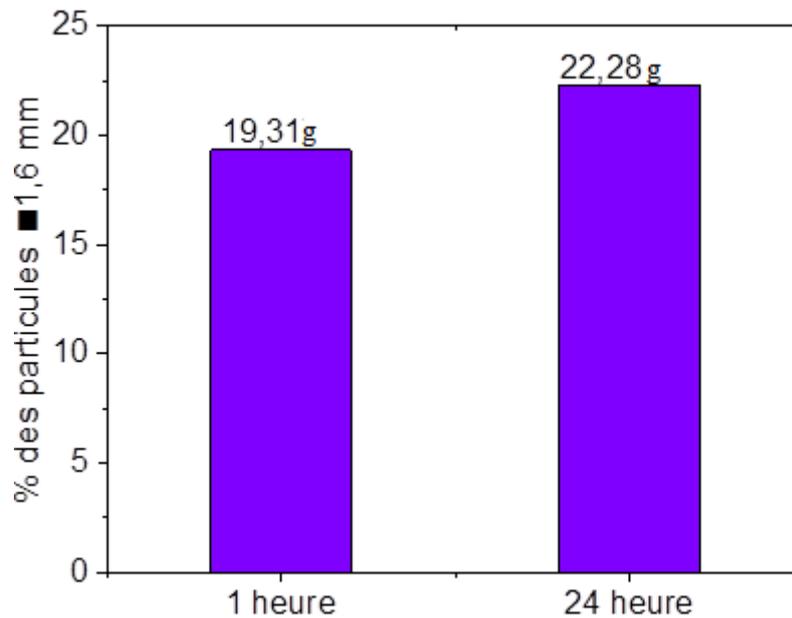


Figure 3.12 : Pourcentage des particules fines inférieures à 1.6 mm – effet de la durée de chargement

3.2.6 Evolution de la perméabilité avec le temps (Fluage)

Afin d'étudier l'effet de la rupture des particules sur l'évolution de la perméabilité au cours du temps du sable carbonaté, des mesures de perméabilité ont été réalisées sur une éprouvette de 0.9 de densité sous une charge constante de 10 MPa, pour différents intervalles de temps. Les résultats de ces mesures sont présentés sur la Figure 3.13. On observe une diminution significative de la perméabilité de sable carbonaté au fil du temps. Cette diminution est due à

l'effondrement des pores et à la production des particules fines au cours du temps qui peuvent jouer un rôle de colmatant lors de la circulation d'eau.

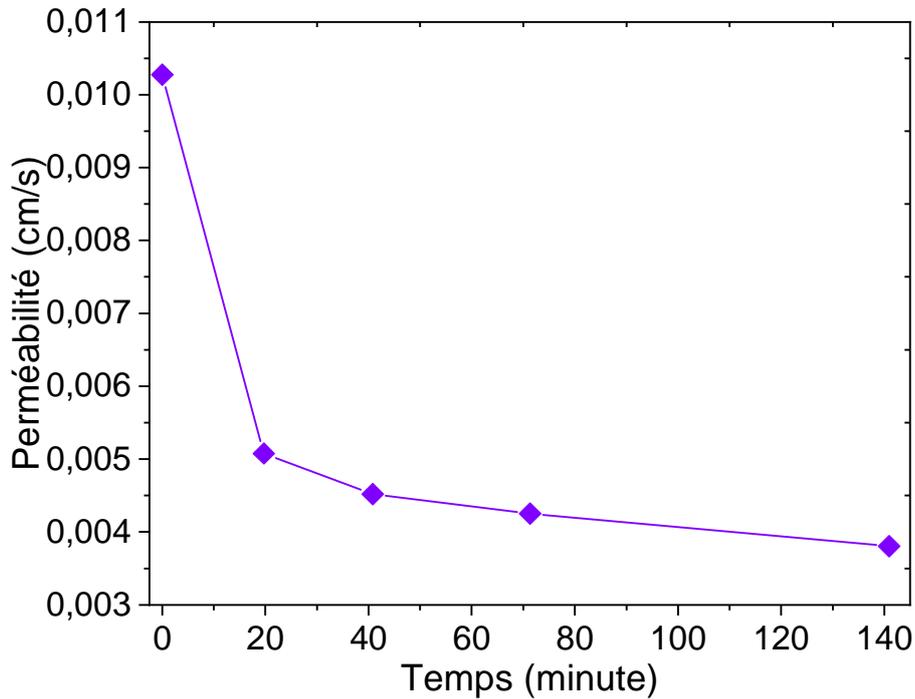


Figure 3.13 : Evolution de la perméabilité du sable carbonaté en fonction du temps (Fluage)

Nous aimerions obtenir un modèle (une loi empirique) qui permettrait de relier ces deux paramètres sans avoir besoin de réaliser des tests au laboratoire. Pour ce faire nous avons adopté une procédure de calcul à l'aide des options disponible sur Excel. L'évolution de la perméabilité en fonction du temps peut suivre la fonction mathématique suivante :

$$f(x) = \frac{a}{x+b} \dots\dots\dots (3.1)$$

Par identification avec nos paramètres qu'on souhaiterait relier l'équation 3-1 devient sous la forme suivante :

$$k(t) = \frac{a}{t+b} \dots\dots\dots (3.2)$$

Telle que k est la perméabilité ; t est le temps en seconde ; a et b sont les paramètres du modèle. À l'aide de la méthode du moindre carré et un solveur disponible sur Excel, en

minimisant l'erreur entre la valeur de k , nous pourrions déterminer l'expression des paramètres a et b qui exprimées dans les équations (1) et (2)

$$\begin{cases} a=0.41 \\ b=42.82 \end{cases}$$

L'expression de perméabilité k en fonction du temps t devient donc l'équation (3) :

$$k(t) = \frac{0.41}{t+42.82} \dots\dots\dots (3.3)$$

3.3 Conclusion

Une étude expérimentale a été effectuée afin d'étudier l'effet de la rupture des grains des matériaux granulaires soumis à des fortes contraintes. Des essais œdométriques de fluage à haute pression ont été réalisés sur des éprouvettes sèches et saturées de sable carbonaté de taille des grains supérieurs à 1.6 mm pour différentes valeurs de densité et pour différentes durée de chargement. Ces essais sont suivis par des analyses granulométriques des éprouvettes après chargement. Les effets de différents paramètres tels que : l'intensité de chargement, la durée de chargement, la saturation de l'éprouvette, la densité et l'évolution de la perméabilité au cours du temps (Fluage) ont été étudiés.

Les résultats expérimentaux montrent que la production des particules fines augmente avec la durée de chargement et l'intensité de chargement. Une production de fines un peu plus grande a été constatée pour l'éprouvette de faible densité (0.4) comparée à celle enregistrée pour des éprouvettes de haute densité (0.6 et 0.9). La production des particules fines est plus grande pour l'éprouvette saturée par rapport à l'éprouvette sèche. La perméabilité est diminuée au fil du temps (Fluage), cette diminution due à l'effondrement des pores et la production des fines qui colmatent les pores.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Ce travail a porté sur les mécanismes de la rupture des grains (Endommagement) d'un matériau granulaire soumis à une charge axiale constante (10 MPa) au cours du temps (Fluage). Des essais œdométriques de fluage à haute pression ont été effectués sur un sable carbonaté de taille des grains supérieurs à 1.6 mm. Les essais ont été réalisés pour différentes durées de chargement et pour différentes valeurs d'indice de densité (0.9, 0.6 et 0.4) et pour différents états de saturation. Ces essais ont été suivis par des analyses granulométriques afin d'explorer la production des fragments. Des mesures de perméabilité au fil du temps ont été effectuées. L'effet de certains paramètres a été étudié tels que ; l'intensité de chargement (5 et 10 MPa), la saturation, la densité, et la durée de chargement. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- Augmentation de la rupture des particules avec l'augmentation de la charge appliquée ;
- La rupture des particules et le déplacement augmentent avec le temps (Fluage). Cet effet peut être dû à la rupture des grains différée dans le temps, qui produit un effondrement par redistribution des fragments cassés pendant le temps ;
- Le déplacement et la rupture des particules sont plus importants pour l'éprouvette saturée. Cela est dû à la pression interstitielle, notamment la capillarité à l'intérieur des microfissures, qui affecte les contraintes effectives et donc la contrainte nécessaire pour propager les fissures aux seins des grains ;
- Le déplacement et la rupture des particules sont plus importants pour l'éprouvette la moins dense (0.4). Cela est dû au faible nombre de contacts, ce qui maintient la concentration de contrainte élevée par rapport à l'échantillon le plus dense contenant un grand nombre de contacts, ce qui réduit la concentration de contrainte appliquée ;
- Diminution de la perméabilité avec le temps à cause de : réarrangement des particules, et la production des particules fines qui colmatent les pores.

Perspectives

Les résultats de ce travail ouvrent des nouvelles possibilités de recherche afin d'approfondir la compréhension du phénomène de ruptures des grains. Des études plus approfondies de la rupture des grains sont ainsi souhaitables :

- Réalisation d'études sur d'autres matériaux avec différentes morphologies et différente composition minérale ;
- Utilisation d'autre chemin de contrainte (par exemple essai triaxial) et d'autres techniques ;
- Modélisation de phénomène de la rupture des grains.

Références Bibliographiques

Références

Al-Raoush R. Microstructure characterization of granular materials. *Phys A: Stat Mech Appl* 2007;377:545–58.

Andò, E., Dijkstra, J., Roubin, E., Dano, C., & Boller, E. (2019). A peek into the origin of creep in sand. *Granular Matter*, 21(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0863-5>

Andò, E. (2013). Experimental investigation of micro-structural changes in deforming granular media using x-ray tomography. Ph.D. thesis, Université de Grenoble.

Biarez, J., Hicher, P., 1994. Elementary Mechanics of Soil Behaviour. A.A. Balkema, Rotterdam

Dadda, A., Geindreau, C., Emeriault, F., du Roscoat, S. R., Filet, A. E. and Garandet, A. (2018). Characterization of contact properties in biocemented sand using 3D X-ray microtomography. *Acta Geotechnica*, <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0744-4>

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.

Druckrey, A.M. and Alshibli, K.A. (2015). 3D finite element modeling of sand particle fracture based on in situ X-ray synchrotron imaging. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(1): 105-116.

Cil, M.B. and Alshibli, K.A. (2012). 3D assessment of fracture of sand particles using discrete element method. *Géotechnique Letters*, 2(3): 161-166.

Cil, M.B. and Alshibli, K.A. (2014). 3D evolution of sand fracture under 1D compression. *Géotechnique*, 64(5):351-364.

Einav, I. (2007a). Breakage mechanics part I: theory. *Jour. of Mech and Phys of Solids*, 55(6):1274-1297.

Einav, I. (2007b). Breakage mechanics part II: modelling granular materials. *Jour. Of Mech*

and Phys of Solids, 55(6):1298-1320.

Feia, S., Sulem, J., Canou, J., Ghabezloo, S., Clain. X. (2016). Changes in permeability of sand during triaxial loading: effect of fine particles production. *Acta Geotechnica*, 11, 1–19.

Guyon E., Troadec J.-P. (1994): *Du sac de billes autas de sable*. Editions Odile JACOB Sciences, Paris.

Hardin, B. O. (1985). Crushing of soil particles. *J. Geotech. Engng* 111, No. 10, 1177–1192.

Indraratna, B., Ionescu, D., and Christie, H. 1998. Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests. *Journal of geotechnical and geoenvironmental Engineering*, 124(5): 439–449.

K.A. Alshibli, A.M. Druckrey, R.I. Al-Raoush, T. Weiskittel, N.V. Lavrik, Quantifying morphology of sands using 3D imaging, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (10) (2015), 04014275.

Karatza, Z., 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*

Karatza, Z., Andò, E., Papanicolopoulos, S. A., Ooi, J. & Viggiani, G. (2018). Evolution of deformation and breakage in sand studied using X-ray tomography. *Géotechnique* 68, No. 2, 107–117, <http://dx.doi.org/10.1680/jgeot.16.P.208>

Karimpour, H., Lade, P. V. (2013). Creep behavior in Virginia Beach sand. *Canadian Geotechnical Journal* (202), 1–61.

Lade, P.V., Yamamuro, J.A., and Bopp, P.A. 1996. Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4): 309–316.

Lade, P. V., Nam, J., & Liggió, C. D. (2010). Effects of Particle Crushing in Stress Drop Relaxation Experiments on Crushed Coral Sand. *Journal of Geotechnical and*

Geoenvironmental Engineering, 136(3), 500–509.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000212)

Leung C F, Lee F H, Yet N S. The role of particle breakage in pile creep in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33 (6): 888–898.

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

Marcial, D., Delage, P., Cui, YJ. (2002). On the high stress compression of bentonites. *Can Geotech J* 39, 1–9.

Marsal, R.J. 1967. Large-scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2): 27–43.

McDowell, G. R., & Khan, J. J. (2003). Creep of granular materials. *Granular Matter*, 5(3), 115–120. <https://doi.org/10.1007/s10035-003-0142-x>

Nguyen. G., Einav, I. (2009): The energetics of cataclasis based on breakage mechanics. *Pure Appl. Geophys.* 166,1693-1724.

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.

Seyf Eddine MESSIOUD, Mohammed KHOUAOUCI, Sadok FEIA, Radja ELANDALOUSSI, Abdelali DADDA . (2018). CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DES GRAINS D'UN SABLE SOUS HAUTE PRESSION. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018

Yukio Nataka, Masayuki Hydro, Adrian F.L.Hyde, Yoshinori Kato, H. M. (2001). Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression. *Soils and Foundations*, 41, 69–82.