

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 Hydraulique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de :

Doctorat LMD en Génie Civil

Spécialité : Géomécanique et Ouvrages en Interaction

Intitulé

**Investigation Expérimental et Numérique sur l'Endommagement des
Grains d'un Sable soumis à des Fortes Contraintes : Effet de Fluage**

Présenté par :

MESSIOUD Seyf Eddine

Soutenue publiquement le : 24/06/2025

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
MELLAS Mekki	Professeur	Président	Université de Biskra
MABROUKI Abdelhak	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
FEIA Sadok	MCA	Co-rapporteur	Université de Biskra
BENMEDDOUR Djamel	Professeur	Examineur	Université de Biskra
MESSAST Salah	Professeur	Examineur	Université de Skikda
MANSOURI Mouloud	MCA	Examineur	Université de Sétif 1

Remerciement

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire de Recherche en Génie Civil (LRGC) de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université Mohamed Khider de Biskra.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à **Dieu** le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui m'a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur **Abdelhak Mabrouki**, pour son encadrement précieux et son soutien constant tout au long de mes études doctorales. Ses conseils avisés, sa disponibilité et ses encouragements ont joué un rôle déterminant dans l'aboutissement de cette recherche.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à mon co-directeur de thèse, Monsieur le Docteur **Sadok Feia**, pour sa rigueur scientifique, son expertise et sa patience tout au long de la réalisation de ce travail. Son accompagnement attentif a été un atout inestimable pour la réussite de cette thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur **Abdelali Dadda**, Docteur à l'École de génie civil de l'Université du Shandong (Chine) et mon co-encadrant, pour sa précieuse contribution à ce travail. Sa présence, son expérience et sa rigueur ont grandement enrichi cette recherche.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères et chaleureux au Professeur **Mekki Mellas**, ancien doyen de la Faculté des Sciences et Technologies à l'Université de Mohamed Khider Biskra, pour son approbation et le financement qu'il a accordés avec enthousiasme, générosité et encouragement. Son soutien a été déterminant dans le développement de l'oedomètre à haute pression au sein de notre laboratoire (LRGC).

Je remercie également chaleureusement **Marine Lemaire**, technicienne supérieure à l'École des Ponts et Chaussées ParisTech, au sein du laboratoire Navier, équipe Géotechnique CERMES, pour l'installation du système d'acquisition de l'oedomètre à haute pression dans notre laboratoire.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur **Mekki MELLAS** de l'Université Mohamed Khider de Biskra pour avoir généreusement accepté de présider la soutenance de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer cette thèse. Je leur suis profondément reconnaissant pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrés à examiner mon travail, ainsi que pour leurs observations et suggestions enrichissantes.

BENMEDDOUR Djamel Professeur de l'Université de Biskra.

MESSAST Salah Professeur de l'Université de Skikda.

MANSOURI Mouloud Docteur de l'Université de Sétif 1.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse. Leur soutien, sous différentes formes, m'a été d'une grande aide tout au long de ce parcours.

Seyf Eddine

Résumé

Les matériaux granulaires, qu'ils soient d'origine naturelle (tels que les sables et les graviers) ou artificielle (comme le ballast et les enrochements), trouvent des applications variées dans des domaines tels que l'ingénierie civile, l'industrie pharmaceutique et l'exploitation minière. Lorsqu'ils sont soumis à une charge externe, leur réponse macroscopique est le reflet de modifications qui se produisent à l'échelle microscopique au niveau des particules. Des phénomènes tels que les glissements de terrain, qui résultent de ruptures au niveau des particules, illustrent l'influence significative de ces changements microscopiques sur le comportement global des matériaux granulaires. Cette observation justifie l'intérêt croissant pour l'étude des mécanismes de rupture des particules, un domaine clé de recherche en géomécanique.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'impact du phénomène de rupture des grains sur l'évolution des propriétés microstructurales, telles que la porosité, la surface spécifique et la distribution de la taille des pores. Cette étude s'intéresse également à l'évolution des propriétés micro-mécaniques de contact, notamment le nombre de coordination et la surface de contact entre les particules.

Dans ce cadre, des essais oedométriques à haute pression ont été réalisés sur un sable carbonaté soumis à différents niveaux de contrainte. Ces essais ont été suivis d'analyses granulométriques et de mesures de perméabilité pour chaque niveau de contrainte appliqué.

La tomographie aux rayons X a été utilisée dans cette étude pour obtenir des images tridimensionnelles (3D) d'échantillons de sable carbonaté, un matériau granulaire, soumis à des essais oedométriques sous haute pression. Quatre acquisitions par tomographie aux rayons X ont été réalisées sur le même échantillon à différents niveaux de contrainte appliquée, correspondant à 0, 2,5, 5 et 10 MPa.

Les résultats de l'analyse des images 3D obtenues par tomographie aux rayons X révèlent une diminution de la porosité et de la taille moyenne des pores, ainsi qu'une augmentation de la surface spécifique. Par ailleurs, l'accroissement de la charge entraîne une augmentation de la surface de contact due à la fragmentation des particules, atteignant une hausse de 14,18 % sous une contrainte de 10 MPa. Le nombre de coordination est influencé par le mode de rupture des particules et la taille et la fragilité des grains : les particules plus grosses présentent un nombre de coordinations élevé, contrairement aux fragments plus petits. Pour les grains intacts, ce nombre augmente avec la charge appliquée. Cette évolution, combinée à une

surface de contact accrue, contribue à renforcer la résistance de l'échantillon face aux contraintes de cisaillement et de compression. Les résultats obtenus ont permis d'établir une relation empirique entre l'indice de vide et la surface spécifique (SSA). Cette relation peut être exploitée pour relier les propriétés microstructurales (surface spécifique) aux caractéristiques macroscopiques (indice de vide), ou inversement.

Mots clés. Rupture de particules ; Matériaux granulaires ; Micro-tomographie à rayons X ; Propriétés microstructurales ; Propriétés de contact.

Abstract

Granular materials, originating from either natural sources (such as sand and gravel) or artificial ones (such as ballast and riprap), are widely used in various fields, including civil engineering, the pharmaceutical industry, and mining. When subjected to external loading, their macroscopic response reflects changes occurring at the microscopic scale, particularly at the level of individual particles. Phenomena such as landslides, which result from particle-scale breakage, clearly illustrate the significant influence of these microscopic changes on the overall behavior of granular materials. This observation underscores the growing interest in investigating particle breakage mechanisms, a key area of research in geomechanics.

The objective of this doctoral research is to investigate the impact of grain breakage on the evolution of microstructural properties, such as porosity, specific surface area, and pore size distribution. This study also focuses on the evolution of micromechanical contact properties, particularly coordination number and interparticle contact surface area.

In this context, high-pressure oedometer tests were conducted on a carbonate sand subjected to various stress levels. These tests were followed by grain size distribution analyses and permeability measurements at each applied stress level.

In this study, X-ray tomography was utilized to acquire three-dimensional (3D) images of carbonate sand samples, a granular material, subjected to high-pressure oedometer testing. Four X-ray tomography acquisitions were carried out on the same sample at increasing stress levels of 0, 2.5, 5, and 10 MPa.

The results of the analysis of the 3D images obtained by X-ray tomography reveal a decrease in porosity and average pore size, as well as an increase in specific surface area. Furthermore, the increase in load leads to an increase in the contact surface area due to particle breakage, reaching an increase of 14.18% under a stress of 10 MPa. The coordination number is influenced by the particle fracture mode and the grain size and brittleness: larger particles have a high coordination number, unlike smaller fragments. For intact grains, this number increases with the applied load. This evolution, combined with an increased contact surface area, contributes to strengthening the resistance of the sample to shear and compressive stresses. The results obtained allowed to establish an empirical relationship between the void ratio and the specific surface area (SSA). This relationship can be used to relate microstructural properties (specific surface area) to macroscopic characteristics (void ratio), or vice versa.

Keywords. Particle breakage; Granular materials; X-ray micro-tomography; Microstructural properties; Contact properties.

ملخص

المواد الحبيبية، سواء كانت من أصل طبيعي (مثل الرمل والحصى) أو اصطناعية (مثل الصخور)، توجد في مجالات و تطبيقات متنوعة مثل الهندسة المدنية وصناعة الأدوية والتعدين. عندما تتعرض لحمل خارجي، فإن استجابتها العيانية هي انعكاس للتغيرات التي تحدث على المستوى المجهرى على مستوى الجسيمات. وتوضح الظواهر مثل الانهيارات الأرضية، التي تنتج عن تمزقات على مستوى الجسيمات، التأثير الكبير لهذه التغيرات المجهرية على السلوك العام للمواد الحبيبية. ويبرر هذا الملاحظة الاهتمام المتزايد بدراسة آليات كسر الجسيمات، وهو مجال بحثي رئيسي في مجال الجيوميكانيكا.

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير ظاهرة تكسر الحبيبات على تطور الخصائص البنيوية الدقيقة، مثل المسامية والمساحة السطحية النوعية وتوزيع حجم المسام. وتركز هذه الدراسة أيضًا على تطور خصائص الاتصال الدقيقة، وخاصة رقم التنسيق و مساحة سطح الاتصال بين الجسيمات.

وفي هذا السياق، تم إجراء اختبارات قياس الضغط العالي على الرمل الكربوني المعرض لمستويات إجهاد مختلفة. وقد تم إتباع هذه الاختبارات من خلال إجراء تحليلات حبيبية وقياسات نفاذية لكل مستوى إجهاد مطبق.

تم استخدام التصوير المقطعي بالأشعة السينية في هذه الدراسة للحصول على صور ثلاثية الأبعاد (3D) لعينات رمل الكربونات، وهي مادة حبيبية، خضعت لاختبار قياس الضغط العالي. تم إجراء أربعة عمليات التقاط للتصوير المقطعي بالأشعة السينية على نفس العينة عند مستويات مختلفة من الإجهاد المطبق، والتي تتوافق مع 0 و 2.5 و 5 و 10 ميغا باسكال.

وتكشف نتائج تحليل الصور ثلاثية الأبعاد التي تم الحصول عليها بواسطة التصوير المقطعي بالأشعة السينية عن انخفاض في المسامية ومتوسط حجم المسام، بالإضافة إلى زيادة في مساحة السطح المحددة. علاوة على ذلك، فإن زيادة الحمل تؤدي إلى زيادة في سطح التلامس بسبب تجزئة الجسيمات، حيث تصل إلى زيادة قدرها 14.18% تحت ضغط 10 ميغا باسكال. يتأثر رقم التنسيق بطريقة كسر الجسيمات وحجم وهشاشة الحبوب: تتمتع الجسيمات الأكبر برقم تنسيق مرتفع، في حين أن الشظايا الأصغر لا تتمتع بهذا الرقم. بالنسبة للحبوب السليمة، يزداد هذا العدد مع الحمل المطبق. يساعد هذا التطوير، إلى جانب زيادة سطح التلامس، على تعزيز مقاومة العينة لضغوط القص والضغط. وقد أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها تطوير علاقة تجريبية بين مؤشر الفراغ ومساحة السطح النوعية (SSA). يمكن استغلال هذه العلاقة لربط الخصائص الدقيقة (المساحة السطحية المحددة) بالخصائص العيانية (نسبة الفراغ)، أو العكس.

الكلمات المفتاحية: كسر الجسيمات؛ المواد الحبيبية؛ التصوير المقطعي بالأشعة السينية؛ الخصائص الدقيقة للبنية؛ خصائص الاتصال.

Sommaire

Remerciment	I
Résumé	II
Abstract	IV
Liste des Figures	X
Liste des Tableaux	XIV
Liste des Symboles	XV
Introduction Générale	1
Chapitre 1. Synthèse Bibliographique sur la Rupture des Particules dans les Matériaux Granulaires	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 Rupture de particules sur un grain individuel.....	8
1.3 Rupture des particules sous l'effet de la Compression Unidimensionnelle	10
1.4 Mesure de la Rupture des Grains (Taux de Rupture).....	17
1.5 Modes de Rupture des Particules	21
1.6 Analyse du processus de rupture des particules dans un matériau granulaire soumis à une pression élevée	23
1.7 Paramètres affectant la rupture des particules	26
1.7.1 Influence de la composition minérale.....	26
1.7.2 Influence de la morphologie des particules	29
1.7.3 Influence de la distribution granulométrique initiale	29
1.7.4 Influence de la densité initiale	31
1.7.5 Effet de Saturation (Teneur en Eau)	32
1.8 Influence de la Rupture des Particules sur le Comportement des Matériaux Granulaires .	35
1.8.1 Distribution de la taille des particules	36
1.8.2 Changement de la perméabilité	37
1.8.3 Distribution de la taille des pores	39
1.9 Influence de la durée de chargement (Flauge) sur la rupture des particules	40
1.10 Conclusion	44
Chapitre 2. Imagerie 3D par Tomographie aux Rayons-X en Géomécanique	45
2.1 Introduction.....	45
2.2 Histoire des rayons-X.....	46
2.3 Acquisition des images 3D par la Tomographie aux rayons-X	47
2.4 Tomographie aux rayons-X en Géomécanique.....	52

2.5 Conclusion.....	58
Chapitre 3. Caractéristiques des Matériaux et Méthodes d'Analyse Expérimentale.....	59
3.1 Introduction.....	59
3.2 Caractéristiques du Matériau et Méthodes Expérimentales.....	60
3.2.1 Description du Matériau (Sable Carbonaté)	60
3.2.2 Méthodes de caractérisation du matériau étudié.....	61
3.2.2.1 Détermination des indices des vides minimum et maximum	61
3.2.2.2 Analyse granulométrique par tamisage.....	63
3.2.3 Dispositif oedométrique à haute pression.....	64
3.2.4 Mesure de la perméabilité.....	67
3.2.5 Méthodes de Test et Plan Expérimental	68
3.3 Acquisition d'images tridimensionnelles 3D	70
3.4 Traitement et analyse d'images.....	73
3.4.1 Segmentation – Binarisation.....	73
3.4.2 Identification des grains et détection de contact.....	73
3.5 Calcul des propriétés microstructurales	76
3.5.1 Porosité	76
3.5.2 Surface spécifique (SSA).....	76
3.5.3 Distribution de la taille des pores	77
3.5.4 Calcul des propriétés de contact	77
3.6 Conclusion.....	78
Chapitre 4. Présentation et Analyse des Résultats Expérimentaux et des Données d'Analyse d'Images 3D.....	81
4.1 Introduction.....	81
4.2 Analyse des Résultats Expérimentaux.....	82
4.2.1 Courbe Contrainte-Déformation - Réponse Mécanique	82
4.2.2 Distribution de la Taille des Particules	84
4.2.3 Analyse des variations de la Perméabilité	85
4.3 Résultats des essais de fluage	87
4.3.1 Influence de la saturation de l'échantillon.....	87
4.3.2 Influence de la densité initiale	89
4.3.3 Influence de la durée d'application de la charge - Fluage.....	91
4.3.4 Analyse temporelle de la Perméabilité - Impact du Fluage.....	94
4.4 Résultats de l'analyse d'images 3D	95

4.4.1 Propriétés microstructurales	95
4.4.1.1 Porosité	96
4.4.1.2 Surface spécifique (SSA)	97
4.4.1.3 Distribution de la taille des pores.....	99
4.4.2 Propriétés de contact.....	100
4.4.2.1 Nombre de coordination	100
4.4.2.2 Surface de contact	106
4.4.2.3 Réseau de contact.....	108
4.5 Conclusion.....	111
Conclusion Générale et Perspectives.....	113
Conclusion Générale.....	113
Perspectives	115
Références Bibliographiques.....	116

Liste des Figures

Chapitre 1. Synthèse Bibliographique sur la Rupture des Particules dans les Matériaux Granulaires	7
Figure 1.1. Essai de compression sur un grain individuel (Lee, 1992).	9
Figure 1.2. Résistance moyenne à la traction en fonction de la taille des particules (Lee, 1992).	10
Figure 1.3. Appareillage de compression 1D et courbe de compressibilité du sable de quartz (Yamamuro et al., 1996).....	13
Figure 1.4. Résultats de compression 1D (Nakata et al., 2001a).....	15
Figure 1.5. Résultats de compression 1D (Nakata et al., 2001b).....	17
Figure 1.6. Définitions des indices de rupture des particules (Yu, 2019).....	18
Figure 1.7. Définition du taux de rupture des particules (Hardin, 1985).....	19
Figure 1.8. Taux de rupture des particules (Einav, 2007a).....	20
Figure 1.9. Indice de rupture des particules (Marsal, 1973).....	21
Figure 1.10. Types de rupture d'une particule (Guyon et Trodec, 1994).	22
Figure 1.11. Types de ruptures des particules (Unland, 2007).	23
Figure 1.12. Comparaison des courbes contrainte-déformation pour le sable d'Hostun (HN34) et le sable carbonate (Dadda et al., 2015).	24
Figure 1.13. Courbe Contrainte-Déformation pour le sable de Zéolites (Karatza et al. 2017).....	25
Figure 1.14. Images 2D du sable de Zéolites obtenues par tomographie à rayons-X (essais oedométriques) (Karatza et al. 2017).	25
Figure 1.15. Force de rupture des particules lors d'un essai de compression pour des matériaux présentant diverses minéralogies (Billam, 1971).	26
Figure 1.16. Effet de la composition minéralogique sur la rupture des particules (Lo et Roy, 1973)..	27
Figure 1.17. Taux de rupture des particules en fonction de leur résistance à la rupture (σ_{fp}) (Ovalle, 2013).....	28
Figure 1.18. Résistance à la rupture des agrégats rocheux (Ovalle, 2013).....	28
Figure 1.19. Comparaison de l'écrasement du sable grossier angulaire et subarrondi – Effet de l'angularité (Lee et Farhoomand, 1967).....	29
Figure 1.20. Effet du coefficient d'uniformité sur le taux de rupture des particules lors d'un essai triaxial (Ovalle, 2013).	30
Figure 1.21. Contrainte de référence de Rupture en fonction du rapport de vide initial: Influence de la densité initiale sur la rupture des particules (Hardin, 1985).....	31
Figure 1.22. Résultats des essais triaxiaux sur des échantillons secs et humides du matériau utilisé pour le barrage (enrochement), $\sigma_3 = 3 \text{ kg/cm}^2$ (Nobari et Duncan, 1972).....	33
Figure 1.23. Comportement mécanique d'un sable granitique sous essais triaxiaux - Comparaison des états sec et saturé (Influence de Saturation) (Lee et Coop, 1995).	34
Figure 1.24. Effet de saturation sur la l'écrasement des grains (Dadda et al., 2015).	35

Figure 1.25. Influence de la rupture des particules sur la Distribution granulométrique, (a) Sable d'Hostun, (b) Sable Carbonaté (Dadda et al., 2015).	36
Figure 1.26. Processus de rupture des particules et de consolidation du système granulaire (Russell et al., 2013).....	37
Figure 1.27. Réduction de la perméabilité sous l'effet de la contrainte axiale (Chen et al. 2018).....	38
Figure 1.28. Images 2D obtenues par tomographie aux rayons X montrant la formation de pores isolés dans l'échantillon sous contraintes axiales accrues, résultant de la rupture des particules (Chen et al. 2018).....	38
Figure 1.29. Influence de la rupture des particules sur l'évolution de la distribution des tailles des pores - Sable carbonaté (Dadda et al. 2015).....	39
Figure 1.30. (a) Illustration des forces de contact initiales et des effets induits par la rupture des particules, (b) Expérimentation de fluage (Creep) - (Lade et al. 2010).	40
Figure 1.31. Relation entre la charge axiale et le déplacement au cours du temps sous l'effet du Fluage (Andò et al. 2019).....	41
Figure 1.32. Influence de Fluage - Vue 3D d'un scan complet de l'échantillon, avec suivi temporel des positions A et B sur l'image initiale. Chaque balayage est séparé par un intervalle de 10 minutes (Andò et al. 2019).....	43
Chapitre 2. Imagerie 3D par Tomographie aux Rayons-X en Géomécanique	45
Figure 2.1. Première radiographie de l'histoire, réalisée par Wilhelm Röntgen à l'aide des rayons X. La main de la femme de Röntgen.....	47
Figure 2.2. Exemples de radiographies obtenue par un scan à rayons-X ; a) Particules de sable zéolite dans l'oedomètre ; b) Échantillon de billes de verre pour essai triaxial. (Karatza 2018).	48
Figure 2.3. Schéma d'un système d'acquisition des images 3D par la Micro-Tomographie aux rayons-X (Behnsen et al. 2023).....	48
Figure 2.4. Description schématique de l'acquisition d'images 3D par tomographie aux rayons-X d'un matériau granulaire et du traitement des images (Karatza 2018).	51
Figure 2.5. Visualisation du processus de fracture du LBS-1 (particule d'un sable) à partir de trois scans : (a–c) tranches 2D parallèles à la direction de chargement ; (d–f) images 3D étiquetées en vue de dessus ; (g–i) sections des images segmentées de seuillage en vue de dessus. (Zhao et al. 2015)...	53
Figure 2.6. Exemples de mécanismes de fracture de particules individuelles lors d'une compression 1D : (a) et (b) dans les images SMT ; (c) dans le modèle DEM (Cil et Alshibli 2014).	54
Figure 2.7. Configuration et résultats de l'essai : (a) reconstruction 3D de l'échantillon ; (b–d) tranches verticales augmentant les étapes de chargement. Trois particules survivant tout au long de la compression sont identifiées. (Guida et al. 2018).	55
Figure 2.8. Détermination de la rupture totale de l'échantillon entier et de la bande de cisaillement et b) Image 3D des grains dans la bande de cisaillement de l'essai TXC1. (Karatza 2018).....	56
Figure 2.9. Vue 3D d'un scan complet de l'échantillon, avec suivi temporel des positions A et B sur l'image initiale. Chaque balayage est séparé par un intervalle de 10 minutes (Andò et al. 2019).....	57
Chapitre 3. Caractéristiques des Matériaux et Méthodes d'Analyse Expérimentale	59
Figure 3.1. (a) Image obtenue par Microscope électronique à Balayage (MEB), (b) Observation par Micro-tomographie à rayons-X - Sable Carbonaté.....	60
Figure 3.2. Distribution granulométrique du sable étudié (Sable Carbonaté).	61

Figure 3.3. Processus détaillé de détermination de l'indice des vides minimum (<i>emin</i>).	62
Figure 3.4. Processus détaillé de détermination de l'indice des vides maximum (<i>emax</i>).....	63
Figure 3.5. Série des tamis utilisé pour l'analyse granulométrique.	64
Figure 3.6. (a) Schéma du dispositif oedométrique à haute pression développé dans notre laboratoire de recherche en génie civil (LRGC) pour cette étude ; (b) Dispositif oedométrique à haute pression du laboratoire Navier, Paris, France ; (c) Dispositif oedométrique à haute pression développé dans notre laboratoire (LRGC), Université Mohamed Khider de Biskra.	66
Figure 3.7. Représentation schématique du dispositif expérimental de mesure de la perméabilité.	68
Figure 3.8. Étapes de préparation d'un échantillon œdométrique de sable carbonaté à grains supérieurs à 1,6 mm: (a) Positionnement du papier filtre, (b) Ajout du sable, (c) Installation de la pierre poreuse et du piston, (d) Montage de la cellule sur le Bâti œdométrique.....	70
Figure 3.9. Cellule œdométrique en plexiglas conçue pour les observations par micro-tomographie à rayons-X.....	71
Figure 3.10. Le scanner à rayons-X utilisé dans le laboratoire Navier (Paris, France).	72
Figure 3.11. Étapes du traitement et de l'analyse des images 3D obtenues par tomographie aux rayons-X.....	75
Chapitre 4. Présentation et Analyse des Résultats Expérimentaux et des Données d'Analyse d'Images 3D	81
Figure 4.1. Courbe contrainte-déformation du sable carbonaté.	82
Figure 4.2. Images 2D obtenues par micro-tomographie à rayons X à différents niveaux de chargement.	84
Figure 4.3. Évolution de la courbe de distribution granulométrique en fonction du niveau de contrainte.....	85
Figure 4.4. Variation de la Perméabilité en fonction de la contrainte appliquée.....	86
Figure 4.5. Observation par microtomographie à rayons X de sable carbonaté, en 0 et 10 MPa.....	87
Figure 4.6. Courbe temps-déplacement - Effet de saturation.	88
Figure 4.7. Variation de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final - Influence de la saturation.	88
Figure 4.8. Pourcentage de particules inférieures à 1,6 mm - Influence de la saturation.	89
Figure 4.9. Courbe temps-déplacement - Effet de la densité.....	90
Figure 4.10. Variation de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final - Influence de la densité.....	90
Figure 4.11. Pourcentage de particules inférieures à 1,6 mm - Influence de la densité.	91
Figure 4.12. Courbe temps-déplacement - Effet du temps de chargement (Fluage).	92
Figure 4.13. Variation de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – Influence du Fluage.	93
Figure 4.14. Pourcentage de particules fines inférieures à 1,6 mm – Influence du Fluage.	93
Figure 4.15. Variation de la perméabilité du sable carbonaté au fil du temps - Impact de Fluage.....	94
Figure 4.16. Calcul de la porosité et de la surface spécifique SSA de l'échantillon non chargé (0 MPa).	96

Figure 4.17. Evolution de la porosité en fonction de la contrainte appliquée.	97
Figure 4.18. Evolution de la surface spécifique (SSA) au cours des étapes de chargement.	98
Figure 4.19. Évolution du taux de vide en fonction de la surface spécifique.....	99
Figure 4.20. Distribution de la taille des pores pour les différents niveaux de contrainte.....	100
Figure 4.21. Distribution du nombre de coordination.	101
Figure 4.22. Évolution du nombre de coordination moyen en fonction de la contrainte appliquée... ..	102
Figure 4.23. Évolution du nombre de coordination d'une particule intacte en fonction de la contrainte appliquée.	105
Figure 4.24. Évolution du nombre de coordination d'une particule divisée en trois parties à 10 MPa en fonction de la contrainte appliquée.....	106
Figure 4.25. Distribution de la surface de contact.....	107
Figure 4.26. Évolution de la surface de contact moyenne en fonction de la contrainte appliquée.....	108
Figure 4.27. Évolution du réseau de contact en fonction de la contrainte appliquée.	110

Liste des Tableaux

Chapitre 3. Caractéristiques des Matériaux et Méthodes d'Analyse Expérimentale	59
Tableau 3.1. Caractéristiques du sable étudié (sable carbonaté).	61
Tableau 3.2. Description détaillée des propriétés des essais réalisés.	69

Liste des Symboles

Grandeurs	Dimensions	Définitions
σ	$M.L^{-1}.T^{-2}$	Contrainte
C_c	-	Indice de compression
ρ_s	$M.L^{-3}$	Masse volumique des grains solide
ρ_d	$M.L^{-3}$	Masse volumique sèche
e	-	Indice des vides
e_{min}	-	Taux de vide pour l'état le plus dense possible
e_{max}	-	Taux de vide pour l'état le plus lâche possible
C_u	-	Coefficient d'uniformité
I_D	-	Indice de densité
D_{50}	L	Diamètre moyen des grains
K	$L.T^{-1}$	Perméabilité
V	L^3	Volume d'eau
L	L	Hauteur de la cellule oedométrique
ΔH	L	Charge constante
S	L^2	Surface de la cellule oedométrique
t	T	Temps
SSA	L^{-1}	Surface spécifique
Pixel	L	Plus petite unité d'une image numérique (2D)
Voxel	L^3	Élément d'une image en 3D (Cube - Pixel en 3D)

Introduction Générale

Les matériaux granulaires sont présents dans de nombreuses applications d'ingénierie. Ils peuvent être d'origine naturelle, comme les sables et graviers des zones fluviales, ou artificielle, comme le ballast des voies ferrées et les enrochements des barrages. D'autres domaines peuvent également s'intéresser à la mécanique des matériaux granulaires (fabrication de matériaux de construction, de béton, de poudre dans les industries pharmaceutiques, ou encore traitement des agrégats rocheux dans les activités minières). Lorsqu'une charge est appliquée sur les particules d'un matériau granulaire, la réponse macroscopique de ce matériau découle des modifications se produisant à l'échelle microscopique (au niveau des particules). Par ailleurs, de nombreux phénomènes naturels, comme les glissements de terrain, prennent naissance dans des zones localisées où des changements significatifs surviennent à l'échelle des particules. En cas de rupture de particules, la forme et la taille de celles-ci sont altérées, ce qui entraîne des modifications dans le réseau de contacts par lequel les charges appliquées sont transmises. Ces transformations à l'échelle microscopique peuvent ainsi influencer de manière notable le comportement mécanique global du matériau granulaire. Cette interaction complexe entre les échelles micro et macro explique l'intérêt croissant pour l'étude des mécanismes conduisant à la rupture des particules, un sujet de recherche particulièrement actif dans des domaines tels que la géomécanique.

En géotechnique, il existe de nombreuses situations dans lesquelles les particules des matériaux granulaires sont écrasées, comme sous les barrages (Sowers et al., 1965; Alonso et al., 2005), dans le ballast ferroviaire (Indraratna et al., 1998), sous les pieux (Leung et al., 1996 ; Zhang et al., 2013 ; Altuhafi et al., 2017) ou dans les réservoirs pétroliers lors de l'injection d'eau en haute pression (Feia et al., 2016 ; Feia et al., 2017). La rupture des particules génère plusieurs changements microstructuraux dans le milieu granulaire tels que la distribution granulométrique, la porosité, la morphologie des particules et les contacts interparticulaires (Karatza et al., 2018 ; Karatza et al., 2019). Cela conduit à des changements significatifs dans les propriétés mécaniques et physiques telles que la perméabilité, les propriétés élastiques, l'angle de frottement et l'angle de dilatation (Lade et al., 1996 ; Dadda et al., 2015 ; Feia et al., 2016 ; Chen et al., 2018).

En géotechnique, l'étude des changements microstructuraux des matériaux granulaires sous chargement est donc fondamentale pour comprendre et améliorer les méthodes de conception géotechnique, telles que les calculs de fondations de bâtiments, la stabilité des pentes, la

construction de remblais et de digues. Le phénomène de rupture dans les matériaux granulaires a été étudié dans des essais mécaniques en laboratoire tels que : des essais de contrainte triaxiale élevée (Nakata et al., 1999 ; Feia et al., 2016), des essais de cisaillement annulaire (Coop et al., 2004) et des essais de compression unidimensionnelle (1D) (Nakata et al., 2001a ; Ovalle 2013 ; Dadda et al., 2015). Des études expérimentales approfondies portant sur l'échelle macroscopique ont été réalisées, mettant l'accent sur les phénomènes de rupture et leur dépendance vis-à-vis de l'échelle microscopique, ainsi que des conditions aux limites et de chargement (Colliat-Dangus et al. 1988 ; Nakata et al. 2001a). Nakata et al. (1999) ont réalisé une étude statistique sur l'écrasement de particules individuelles marquées, insérées dans un échantillon soumis à une compression œdométrique. Ils ont observé des différences significatives dans les modes de rupture des particules. Nakata et al. (2001b) ont montré que la résistance des particules individuelles augmente lorsque leur taille diminue. En générale, ces études ont utilisé l'évolution de la distribution granulométrique comme indicateur expérimental pour détecter et quantifier la rupture des grains au cours des expériences. Einav (2007a), (2007b) a trouvé une distribution granulométrique résiduelle, au-delà de cette situation, le matériau peut être considéré comme stable et il n'y a plus de rupture à l'intérieur de l'échantillon. Ce phénomène est synchronisé avec une stabilité géométrique du réseau de forces de contact au sein de l'échantillon. Le nombre de coordination augmente à mesure que des fragments résultent de la rupture des particules, conduisant à une diminution de la contrainte appliquée (Russell et Einav 2013). McDowell (2002) interprète également ce phénomène comme une transformation du matériau le rendant plus rigide. Les particules plus grosses bénéficient d'une protection efficace de leurs voisines plus petites, réduisant ainsi les contraintes de traction induites dans les particules plus grosses. Dans le même temps, les particules plus petites atteignent la limite de fragmentation, minimisant le risque de rupture des grains et conférant au matériau une plus grande résistance à la rupture.

Différents modèles théoriques ont été proposés pour étudier l'effet de la rupture des grains sur le comportement mécanique des matériaux granulaires (Hardin 1985 ; Einav 2007a ; Einav 2007b ; Ma et al., 2014 ; Zhang et al., 2014 ; Nguyen et al., 2015 ; Xiao et al., 2017 ; Wang et al., 2020). Hardin (1985) a introduit le concept de rupture relative, défini comme le rapport entre la rupture totale d'un échantillon et le potentiel de rupture d'une particule d'un diamètre donné. Ce paramètre, déterminé à partir des courbes de granulométrie initiale et finale tronquées à une valeur constante, est indépendant de la distribution granulométrique lorsqu'elle est la seule variable. Einav (2007a, b) a enrichi ce concept en l'intégrant comme

variable interne dans des modèles constitutifs, en introduisant une distribution granulométrique ultime. En général, ces études ont utilisé des développements analytiques pour prédire l'évolution des paramètres mécaniques et microstructuraux sur la base d'études expérimentales. Néanmoins, ces modèles ne fournissent pas une compréhension approfondie du côté microstructural pour relier ses propriétés microstructurales aux propriétés mécaniques effectives. De plus, la plupart des études théoriques négligent de tenir compte de l'évolution de la forme des particules induite par la rupture.

Des modèles de méthode des éléments discrets (DEM) ont également été utilisés pour étudier le phénomène de rupture des grains (McDowell et Bono 2013 ; Cil et Alshibli 2014 ; Laufer 2015 ; Xu et al., 2017 ; Zhou et al., 2017 ; Zhou et al., 2019 ; Shi et al., 2020 ; Kuang et al., 2022 ; Shi et al., 2022 ; Seyyedani et al., 2023). McDowell et de Bono (2013) ont utilisé le DEM pour analyser l'écrasement des particules sphériques sous compression oedométrique. Ils ont montré que, pour des échantillons initialement uniformément gradués, le taux d'apparition de la limite d'élasticité (liée à la rupture des particules) dépend de la distribution des résistances des particules individuelles. En particulier, ils ont observé que cette limite est proportionnelle à la résistance au cisaillement octaédrique moyenne des particules. En général, les modèles de méthode des éléments discrets (DEM) sont capables de prédire le comportement et l'évolution d'un matériau granulaire soumis à des chargements en se basant sur des lois micromécaniques à l'échelle des grains, mais ils ont encore besoin de certaines propriétés microstructurales issues d'expériences réelles pour améliorer leurs résultats. De plus, la DEM utilise des particules numériques idéalisées, qui ne représentent pas vraiment les distributions granulométriques réelles, ni le réseau de contact réel ou la forme des particules.

Des études récentes ont utilisé la méthode de microtomographie à rayons-X 3D et la méthode des éléments discrets (DEM) pour étudier la rupture des particules dans un assemblage granulaire (Cil et Alshibli 2014 ; Cil et Alshibli 2015 ; Karatza et al., 2017 ; Wang et al., 2019). Cil et Alshibli (2014) ont étudié la fracture du sable sous compression 1D, en analysant l'impact du rapport d'élançement dans un sable meuble à granulométrie uniforme. À l'aide d'images 3D, ils ont évalué les propriétés des grains (nombre, position, déformation) et comparé les résultats à un modèle de DEM. Ils ont constaté que les particules étaient plus susceptibles de se fracturer lorsque les grains voisins restaient intacts. Cil et Alshibli (2015), ils ont approfondi cette recherche en examinant l'effet de l'assemblage des agglomérats et de la distribution granulométrique des sous-particules sphériques sur la fracture des grains de sable, en utilisant des techniques similaires. Par ailleurs, Wang et al. (2019) ont réalisé une

expérience de compression oedométrique sur un assemblage granulaire sec de zéolite, capturant des images 3D via tomographie à rayons X à différents stades de déformation. Leur modèle DEM a parfaitement simulé les résultats expérimentaux, notamment la rupture axiale dominante, où seuls quelques fragments traversaient le plan de rupture après une fracturation supplémentaire.

L'utilisation de la tomographie 3D à rayons-X a ouvert une nouvelle voie pour comprendre les phénomènes à micro-échelle dans différents matériaux (Andò et al., 2013 ; Dadda et al., 2017 ; Dadda et al., 2018). La microtomographie à rayons X a été utilisée pour étudier la déformation, la cinématique, la morphologie des particules, le contact interparticulaire et l'évolution de la rupture des particules d'un matériau granulaire (Hasan et Alshibli 2010 ; Fonseca et al., 2012 ; Andò 2013 ; Alikarami et al., 2014 ; Cil et Alshibli 2014 ; Zhao et al., 2015 ; Druckrey et al., 2016 ; Wiebicke et al., 2017 ; Karatza et al., 2017 ; Guida et al., 2018 ; Karatza et al., 2018). En général, ces études ont montré que les propriétés mécaniques et physiques effectives d'un matériau granulaire sous fortes contraintes sont directement liées au changement des propriétés microstructurales (taille des pores, nombre de coordination et orientation du contact, etc.). Mahbub et Haque (2016) ont utilisé la tomographie à rayons X 3D haute résolution in situ lors d'essais de compression unidimensionnelle à haute pression sur du sable. Ils ont étudié l'évolution des propriétés microstructurales telles que la distribution du volume des pores et des particules, la distribution spatiale des rapports de vides. Karatza et al. (2018) ont effectué des essais triaxiaux in situ sur du sable pour suivre les changements de porosité et de distribution granulométrique. Guida et al. (2018) ont effectué des essais de compression unidimensionnels sur un sable artificiel pour suivre les particules en 3D.

La rupture des particules dans les matériaux granulaires a été étudiée à la fois par des méthodes numériques, théoriques et expérimentales, comme mentionné précédemment. Les modèles théoriques ont utilisé des développements analytiques pour prédire l'évolution des paramètres mécaniques et microstructuraux, sur la base d'études expérimentales. Cependant, ces modèles ne permettent pas d'obtenir une compréhension approfondie des mécanismes microstructuraux, et ils ne parviennent pas à établir un lien direct entre les propriétés microstructurales et les propriétés mécaniques effectives. De plus, la plupart des travaux théoriques omettent de prendre en compte l'évolution de la forme des particules induite par la rupture des particules.

Les modèles numériques simulant l'interaction entre particules individuelles, tels que le DEM (Discrete Element Method), nécessitent des données expérimentales précises sur la rupture des grains à l'échelle des particules. Ces données permettent d'améliorer la compréhension des mécanismes sous-jacents conduisant à la rupture des particules et d'en affiner la modélisation.

Cependant, une limitation majeure de ces modèles réside dans l'impossibilité d'observer directement les processus en action. Par conséquent, les conclusions concernant les phénomènes à l'échelle microscopique sont généralement déduites à partir de mesures indirectes. En ce qui concerne spécifiquement la rupture des particules, les données disponibles se limitent souvent à des observations globales, obtenues par des techniques telles que le tamisage mécanique avant et après les essais, ou à partir de la réponse globale de l'échantillon en termes de chargement et de déformation. Ces observations incluent également des analyses visuelles de la surface externe de l'échantillon testé.

Toutefois, en raison de la nature non homogène des processus de rupture des grains, il est crucial de recueillir des informations quantitatives en trois dimensions (3D). Cette exigence représente un enjeu fondamental et constitue la principale motivation de ce travail.

➤ **Les principaux objectifs de ce travail sont :**

- Étudier l'effet de la rupture des particules dans un matériau granulaire sur l'évolution de la distribution granulométrique et de la perméabilité.
- Analyser l'effet du fluage sur l'évolution de la rupture des particules dans un matériau granulaire.
- Clarifier, à l'aide d'images 3D obtenues par la tomographie aux rayons-X, de manière quantitative et qualitative, l'impact de la rupture des particules sur les propriétés microstructurales du matériau granulaire.
- Explorer des méthodes basées sur les images 3D obtenues par la tomographie aux rayons-X pour analyser l'effet de la rupture des particules sur les propriétés de contact, notamment les propriétés micro-mécaniques.

Dans ce contexte, des essais oedométriques ont été effectués sur des échantillons secs de sable carbonaté soumis à divers niveaux de contrainte, suivis d'une analyse granulométrique. La perméabilité a été mesurée sur un échantillon similaire, sous les mêmes charges. Des essais à haute pression ont aussi été réalisés pour étudier le fluage du sable carbonaté à différents temps de chargement. Parallèlement, des observations par Tomographie aux rayons-X ont

permis de capturer des images 3D des échantillons à différents niveaux de contrainte. Ces images ont été analysées pour examiner l'impact de la rupture des particules sur les propriétés microstructurales et de contact du sable. La validité des images 3D a d'abord été vérifiée par le calcul de la porosité et de la surface spécifique. L'évolution des propriétés de contact, telles que le nombre de coordination et la surface de contact, a été analysée à partir du volume élémentaire représentatif (VER). Enfin, la distribution des tailles de pores a été déterminée à l'aide du logiciel GeoDict pour chaque niveau de contrainte.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres.

- **Le premier chapitre** est consacré à une étude bibliographique portant sur les mécanismes de rupture des grains dans un milieu granulaire et leurs conséquences sur la variation de la réponse du système granulaire. Nous y abordons également les principaux facteurs influençant ce phénomène.
- **Le deuxième chapitre** présente la tomographie aux rayons X, en expliquant le principe de cette technique permettant d'obtenir des images en 3D, ainsi que les principales étapes du traitement des images. Il aborde également l'utilisation de la tomographie aux rayons X en géomécanique, notamment dans l'analyse des matériaux granulaires.
- **Le troisième chapitre** décrit en détail les caractéristiques des matériaux étudiés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée. Nous présentons la technique d'acquisition des images 3D par tomographie aux rayons-X, ainsi que la méthode d'analyse appliquée à ces images.
- **Le quatrième chapitre** est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux. Il inclut également les résultats de l'analyse des images 3D obtenues par tomographie aux rayons-X, accompagnés d'une discussion approfondie.
- **Enfin**, ce manuscrit se conclut par une conclusion générale qui synthétise les principaux enseignements de cette étude et propose des perspectives pour les travaux futurs.

Chapitre 1. Synthèse Bibliographique sur la Rupture des Particules dans les Matériaux Granulaires

1.1 Introduction

Les particules de sol étaient considérées comme incompressibles et inécrasables dans la mécanique classique des sols. Cependant, lorsqu'une contrainte excessive est appliquée, dépassant la résistance des particules, celles-ci se rupturent. Lors des premiers développements de la mécanique des sols, [Terzaghi \(1925\)](#) et [Casagrande \(1932\)](#) ont mis en évidence l'impact crucial de la structure du sol sur sa résistance. Ils ont introduit le concept de microstructure du sol, qui englobe la disposition des particules, la distribution des vides, la rupture des particules et l'état de connexion entre celles-ci. La granulométrie naturelle du sol, en tant que caractéristique structurelle d'un matériau granulaire, joue un rôle déterminant dans son comportement. La rupture des particules, phénomène courant sous haute pression, modifie la granulométrie du sol, et ce changement doit être étudié plus en détail, notamment pour évaluer son influence sur le comportement du sol, tant au niveau macroscopique (échelle globale) que microscopique (échelle des particules – micro), dans le domaine de l'ingénierie géotechnique.

Dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, la rupture des particules est un phénomène fréquent dans les sols granulaires. Ce processus modifie la microstructure du sol et impacte de manière significative son comportement, par exemple, la rupture de particules entourant la pointe du pieu ([Yasufuku et Hyde 1995](#) ; [Leung et al. 1996](#) ; [Mao et Towhata 2015](#) ; [Mao et al. 2018](#)), la rupture de particules dans le barrage en enrochements ([Xiao et al. 2016a](#) ; [Xiao et al. 2016b](#) ; [Xiao et Liu 2017](#)), la rupture de particules dans la zone d'un glissement de terrain ([Wang et al. 2002](#) ; [Igwe et al. 2007](#)). La rupture des particules a été identifiée comme ayant un impact majeur sur le comportement du sol (ou généralement un matériau granulaire), comme le confirment de nombreuses études précédentes (par exemple, [Hardin 1985](#) ; [Lade et al. 1996](#) ; [McDowell et al. 1996](#) ; [Ueng et Chen 2000](#) ; [Hyodo et al. 2002](#) ; [Salim et Indraratna 2004](#) ; [Yao et al. 2008](#) ; [Donohue et al. 2009](#) ; [Kikumoto et al. 2010](#) ; [Xiao et al. 2016b](#) ; [Yu et Su 2016](#) ; [Yu 2017a](#) ; [Yu 2018b](#) ; [Yu 2019](#) ; [Karatza et al. 2019](#)).

La rupture des particules dans les matériaux granulaires a fait l'objet de nombreuses études menées par divers chercheurs, utilisant des approches expérimentales ([Nakata et al., 1999](#) ; [Nakata et al., 2001a](#) ; [Nakata et al., 2001b](#) ; [Ovalle, 2013](#) ; [Dadda et al., 2015](#)), théoriques ([Einav, 2007a-b](#) ; [Nguyen et Einav, 2009](#) ; [Russel et al., 2013](#)) et numériques ([Cil et Alshibli,](#)

2012 ; Cil et Alshibli, 2014 ; Druckrey et Alshibli, 2016 ; Karatza et al., 2017 ; Karatza et al., 2018 ; Andò et al., 2019). Ces travaux ont exploré la rupture des particules à travers une variété de matériaux et de méthodologies, offrant ainsi une vision approfondie des phénomènes associés.

Ce chapitre propose une revue bibliographique approfondie des études majeures consacrées à l'endommagement (la rupture des particules) des matériaux granulaires soumis à des sollicitations mécaniques, ainsi qu'à l'influence de ce phénomène sur le comportement des sols granulaires. Par ailleurs, il examine l'impact du fluage sur la rupture des particules, en mettant en lumière les mécanismes sous-jacents.

1.2 Rupture de particules sur un grain individuel

La rupture des particules de sol se produit lorsque celles-ci sont soumises à une contrainte effective. À mesure que cette contrainte effective augmente, des microfissures commencent à apparaître et à se développer progressivement à l'intérieur des particules. La rupture intervient lorsque ces microfissures se propagent à travers l'ensemble de la particule, menant ainsi à son échec structural.

Conformément au critère de Griffith (1920), une contrainte de traction se manifeste le long des bords des microfissures à l'intérieur de la particule de sol. Lorsque cette contrainte de traction atteint un seuil critique, elle provoque la propagation des fissures, conduisant finalement à la formation d'une fissure traversante dans la particule.

Ainsi, il est largement admis que la rupture d'une particule sphérique soumise à une compression résulte d'une rupture par traction. Jaeger (1967), ainsi que Shipway et Hutchings (1993a), ont démontré que la résistance à la traction des grains de roche peut être déterminée par un essai de compression diamétrale réalisé entre des plaques plates.

Pour un grain de diamètre d , soumis à une force F appliquée entre les plaques supérieure et inférieure, la contrainte de traction générée au sein du grain est définie par :

$$\sigma = \frac{F}{d^2} \quad (1.1)$$

Par ailleurs, Lee (1992) a également proposé une méthode pour déterminer la résistance à la traction des roches dans le cadre d'un essai brésilien, comme illustré dans la Figure 1.1. Dans cette étude, Lee (1992) a comprimé individuellement des grains de différentes origines, notamment du sable de Leighton Buzzard, du calcaire oolithique et du calcaire carbonifère.

Comme indiqué sur la Figure 1.1(a), et selon l'équation (1.1), la résistance à la traction d'un grain peut être définie par :

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d^2} \quad (1.2)$$

Où :

- σ_f représente la résistance à la traction du grain,
- F_f correspond à la force de rupture appliquée,
- d désigne le diamètre du grain.

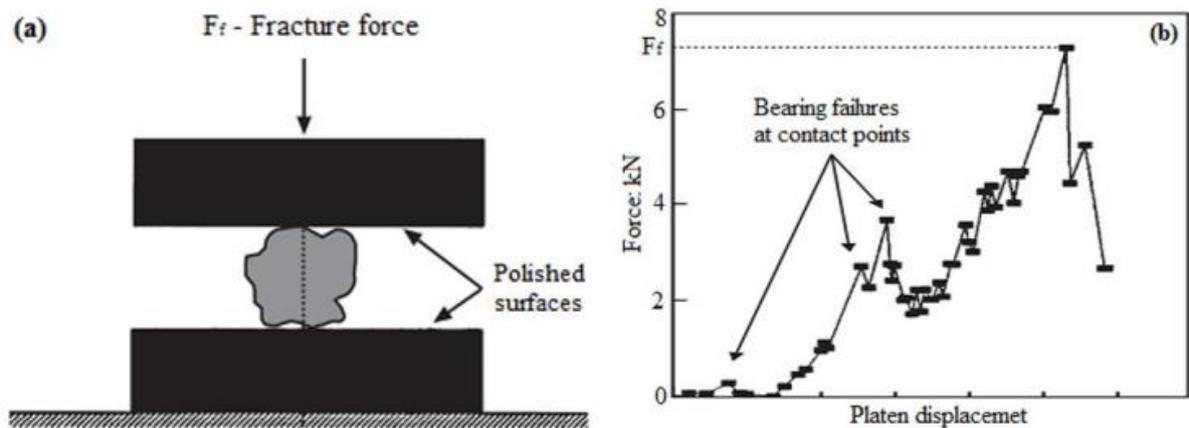


Figure 1.1. Essai de compression sur un grain individuel (Lee, 1992).

La figure 1.1(b) de l'étude réalisée par Lee (1992) illustre les résultats typiques d'un essai de charge sur une plaque en fonction de son déplacement. Ces résultats mettent en évidence plusieurs pics de force au cours du processus de chargement. Le premier pic, observé pour un faible déplacement de la plaque, est attribué à l'arrondissement des particules résultant de la fracturation des petits bords et coins.

Les autres pics de force, survenant avant la rupture complète d'un grain, peuvent être interprétés comme des défaillances locales dues au roulement aux points de contact. Une chute significative de la charge est ensuite observée, correspondant à la fracture complète d'un grain.

Il a également été démontré que la résistance à la traction de chaque grain n'est pas constante. Elle varie autour d'une valeur moyenne avec un écart-type, et cette résistance moyenne, notée

σ_f , dépend de la taille moyenne des particules (d). Cette relation est décrite par la figure 1.2 et peut être exprimée mathématiquement comme suit:

$$\sigma_f \propto d^b \quad (1.3)$$

Les valeurs typiques de l'exposant b sont données pour différents types de matériaux:

- $b = -0,357$ pour le sable de Leighton Buzzard,
- $b = -0,343$ pour le calcaire oolithique,
- $b = -0,420$ pour le calcaire carbonifère.

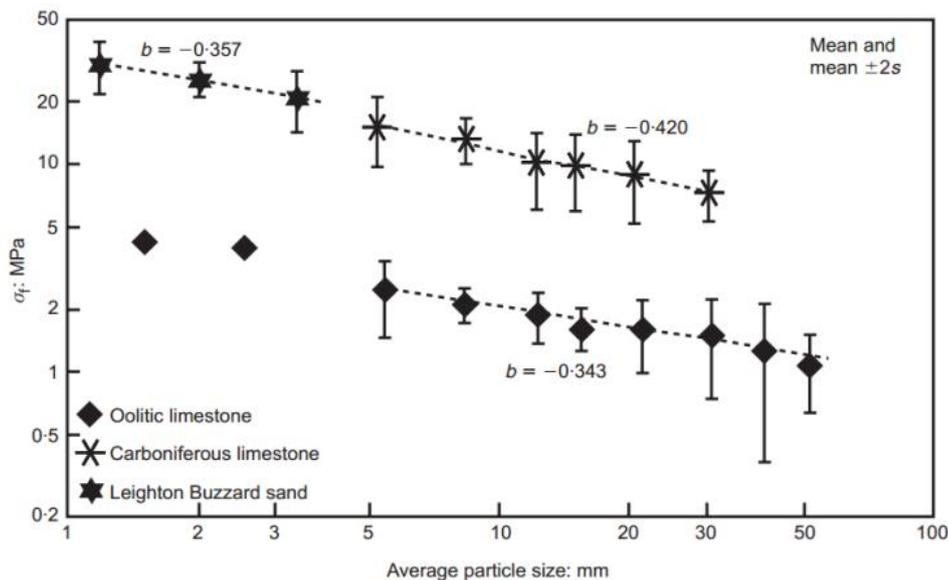


Figure 1.2. Résistance moyenne à la traction en fonction de la taille des particules (Lee, 1992).

1.3 Rupture des particules sous l'effet de la Compression Unidimensionnelle

La majorité des recherches en mécanique des sols se sont historiquement focalisées sur le comportement des sols sous faible contrainte. Cependant, avec l'évolution des projets géotechniques modernes, les sols sont désormais soumis à des pressions de plus en plus élevées. Il devient donc essentiel de comprendre leur comportement dans ces conditions extrêmes, car cela revêt une importance fondamentale en géotechnique.

Parmi les phénomènes clés, la compression unidimensionnelle occupe une place centrale. Cette dernière, caractérisée par une contrainte verticale (déformation verticale), correspond au processus de consolidation K_0 . Comprendre ce mécanisme est crucial pour analyser et prévoir le comportement des sols soumis à des charges verticales importantes.

De nombreuses définitions du coefficient de pression latérale des terres au repos K_0 ont été proposées. Étant donné l'importance du mouvement latéral des murs de soutènement dans les sables et les argiles, [Terzaghi \(1920\)](#) a défini la contrainte verticale totale par rapport à la contrainte horizontale, laquelle a été exprimée par le coefficient K_0 , comme indiqué ci-dessous:

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (1.4)$$

Où σ_h et σ_v désignent respectivement la contrainte horizontale totale du sol et la contrainte verticale totale du sol.

[Jaky \(1948\)](#) a formulé une relation semi-empirique largement reconnue, établissant un lien entre le coefficient de pression des terres à K_0 et l'angle effectif de frottement interne selon le critère de Mohr-Coulomb. Cette relation a été développée pour mieux comprendre la pression exercée par les terres sur les pieux dans les matériaux granulaires:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (1.5)$$

Où φ' est l'angle effectif de frottement interne selon la loi de Mohr-Coulomb.

[Bishop \(1958\)](#) a défini K_0 comme le rapport entre la contrainte effective latérale et la contrainte effective verticale dans un sol consolidé confiné, sans déformation latérale. Dans ce contexte, il n'y a pas de contrainte de cisaillement sur le plan principal, comme illustré ci-dessous :

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (1.6)$$

Où σ'_h et σ'_v désignent respectivement la contrainte horizontale effective du sol et la contrainte verticale effective du sol.

Les incréments de contrainte effectifs ont été utilisés pour éliminer l'impact de l'historique des contraintes sur le comportement du sol, comme défini par [Andrawes et El-Sohby \(1973\)](#) dans l'expression suivante:

$$K_0 = \frac{\Delta\sigma'_h}{\Delta\sigma'_v} \quad (1.7)$$

Où $\Delta\sigma'_h$ et $\Delta\sigma'_v$ sont les incréments de la contrainte effective du sol horizontalement et verticalement respectivement.

Dans la littérature, plusieurs études ont mené des essais de compression unidimensionnelle à haute pression sur différents matériaux afin d'étudier l'effet de la rupture des particules sur le comportement des sols (par exemple, Terzaghi, 1925 ; Terzaghi et Peck, 1948 ; Roberts et De Souza, 1958 ; Hendron, 1963 ; Hagerty et al., 1993 ; Pestana et Whittle, 1995 ; Yamamuro et al., 1996 ; Robert, 1996 ; McDowell et al., 1996 ; Nakata et al., 1999a, 1999b, 2001, 2001a, 2001b ; Altuhafi et Coop, 2011).

Terzaghi (1925) a observé, à partir des essais de compression, que l'écrasement des particules de sable naturel n'était pas significatif à de telles contraintes (8.5 MPa) et que des pressions plus élevées étaient peu probables. Cependant, dans leurs travaux, Terzaghi et Peck (1948) ont mené des essais de compression unidimensionnelle sous haute pression sur du sable et du mica de sable. Ils ont constaté que, bien que le déplacement suivait la courbe typique de tassement de l'argile consolidée, l'écrasement des grains devenait notable sous des pressions élevées.

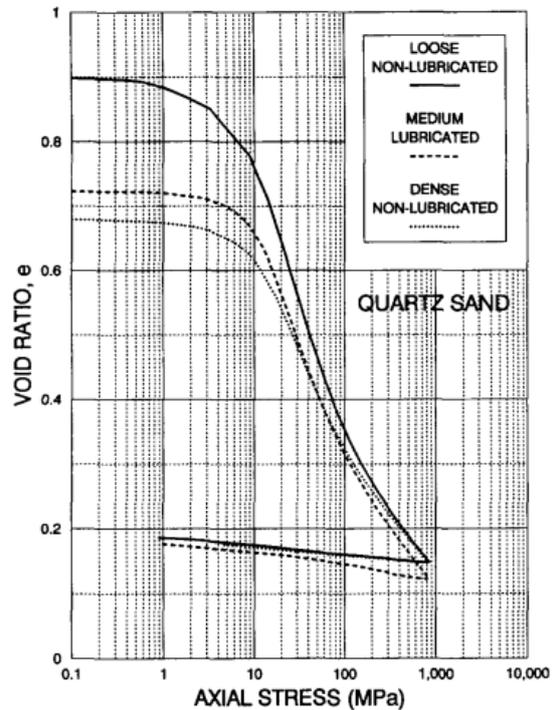
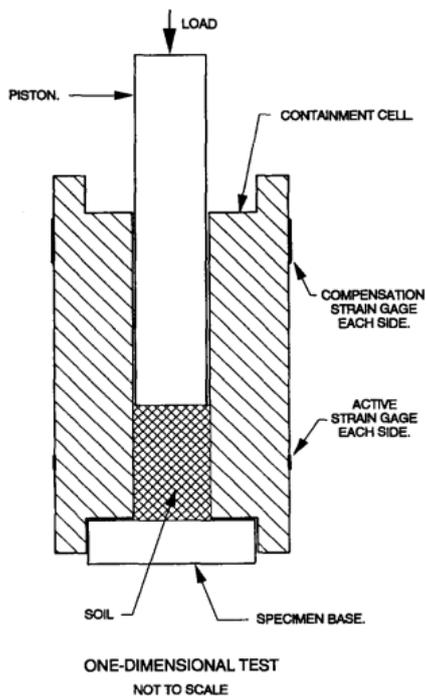
Roberts et De Souza (1958) ont réalisé des essais de compression unidimensionnelle à haute pression sur du sable et du quartz. Ils ont observé qu'une déformation plus marquée se produisait après avoir atteint une pression critique, principalement en raison de la rupture des particules.

Hagerty et al. (1993) ont mené des essais de compression unidimensionnelle à haute pression sur du sable d'Ottawa, du laitier granulaire (Granulated Slag) et du verre de chaux sodée. L'objectif était d'étudier l'impact de différents facteurs sur l'écrasement des particules, notamment le rapport des vides initiaux, la taille des particules, l'angularité des particules et la composition du matériau. Les résultats ont montré que le comportement de compression peut être divisé en trois phases distinctes: une contraction du volume des particules à faibles contraintes; une compression plus intense lorsque les particules s'écrasent et se réorganisent de manière significative sous des contraintes plus élevées; et, sous des contraintes très élevées, une augmentation substantielle du nombre de contacts entre les particules fracturées.

Yamamuro et al. (1996) ont réalisé des essais de compression unidimensionnelle sur trois types de sable présentant des compositions minéralogiques différentes. Ces essais ont été effectués sous des pressions allant jusqu'à 800 MPa, dans le but d'étudier le comportement des sols lorsqu'ils sont soumis à des pressions élevées. La Figure 1.3 illustre l'équipement utilisé pour la compression unidimensionnelle ainsi que la courbe de compression obtenue pour le sable de quartz.

Les résultats ont montré que l'effet du taux de vide initial dans les sables disparaît à des pressions élevées. En d'autres termes, les courbes représentant l'évolution du taux de vide tendent à se superposer à haute pression, ce qui suggère une disparition de l'influence de ce paramètre. Cependant, cette convergence des courbes est influencée par la dureté minérale des sables, comme le montre la Figure 1.3(b). En effet, les sables présentant une dureté minérale plus élevée génèrent une contrainte plus importante pour que le taux de vide atteigne la fusion.

En particulier, le sable de Cambria a montré un coefficient K_0 qui est resté constant (valeur $K_0=0.4$) à haute pression. Ce coefficient est légèrement inférieur à celui prédit par l'équation de Jaky (1948) ($K_0=0.45$) selon la Formule 1.5. En outre, une observation microscopique de l'apparence des grains de sable avant et après le processus de l'essai a révélé des différences marquées. En effet, le sable de quartz a montré un écrasement et une fracturation significatifs de ses grains individuels. Ce phénomène de dégradation a été initié dès que la pression a dépassé 10 MPa, indiquant ainsi une fragilité particulière de ce sable sous compression élevée.



(a) Coupe verticale d'un système d'essai de compression 1D, y compris les emplacements des jauges de contrainte et l'échantillon.

(b) Indice des vides relatif à la contrainte axiale pour les essais de compression 1D sur le sable de quartz.

Figure 1.3. Appareillage de compression 1D et courbe de compressibilité du sable de quartz (Yamamuro et al., 1996).

Nakata et al. (2001a) ont étudié la relation entre la courbure et la pente de la ligne de compression des sables de silice et les statistiques d'écrasement des particules. Ils ont utilisé des échantillons contenant des particules marquées pour analyser les effets de la taille des particules et de la distribution granulométrique sous différentes contraintes. Les résultats de cette étude sont présentés sur la figure 1.4.

Les résultats clés de cette étude sont les suivants:

1- Écrasement des particules

- L'écrasement commence à une contrainte d'environ 4 MPa (point B2, Figure 1.4(a)), où 80 % des particules restent intactes (type I).
- À 9,6 MPa (point B1, Figure 1.4(a)), une proportion importante de particules commence à être endommagée.
- Au-delà de 23 MPa (point A1, Figure 1.4(a)), 50 % des particules subissent une fissuration majeure.
- La fissuration majeure se produit principalement entre la limite d'élasticité et le point où l'indice de compression (C_c) atteint son maximum, après quoi les courbes de fréquence cumulative se stabilisent, indiquant que l'écrasement devient moins marqué avec une augmentation supplémentaire de la contrainte.

2- Effet de la granulométrie

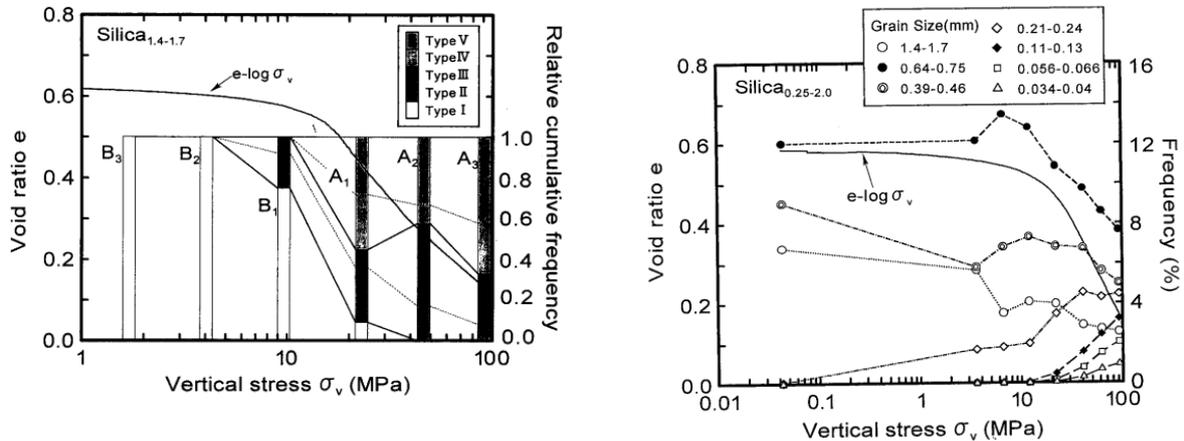
- Les sables à granulométrie uniforme présentent un rendement (limite d'élasticité) beaucoup plus marqué que les sables bien gradués.
- La Figure 1.4(b) montre que, dans les sables bien gradués, la fréquence des particules de grande taille (>1,0 mm) diminue progressivement au cours de la compression, tandis que des particules plus petites apparaissent.

3- Statistiques de fréquence granulométrique

- Les particules de taille intermédiaire (0,5-0,8 mm) augmentent initialement en fréquence avant de diminuer sous une contrainte croissante (Figure 1.4(b)).
- Les particules de taille inférieure (0,21-0,24 mm) augmentent en fréquence tout au long des tests, tandis que celles mesurant moins de 0,2 mm augmentent principalement après 20 MPa (Figure 1.4(b)).

Ces observations confirment que la granulométrie et le rapport des vides initiaux influencent significativement l'écrasabilité et le comportement compressif du sable.

Les résultats, illustrés dans les Figures 1.4(a) et 1.4(b), mettent en évidence l'évolution de la distribution granulométrique sous haute pression et l'impact des caractéristiques granulométriques sur le comportement du matériau.



(a) Fréquence cumulative relative des endommagements dans le sable uniformément gradué.

(b) Variation de la fréquence granulométrique en fonction de la contrainte verticale pour un sable bien gradué.

Figure 1.4. Résultats de compression 1D (Nakata et al., 2001a).

Nakata et al. (2001b) ont étudié les caractéristiques de l'écrasement des matériaux granulaires à travers des essais de compression unidimensionnelle (1D) et de compression de particules individuelles, en analysant l'évolution de la courbe de compression ($e - \log \sigma_v$). Ils se sont concentrés sur l'influence de divers paramètres: taille des particules, rapport des vides initial, angularité et composition minérale. Les résultats de cette étude sont présentés sur la figure 1.5.

Les principaux conclusions tirés de cette étude sont les suivants:

1- Taille des particules:

- La contrainte d'élasticité en compression unidimensionnelle augmente à mesure que la taille des particules diminue, car les petites particules présentent une plus grande résistance individuelle à l'écrasement. Cela est illustré par l'évolution de la courbe ($e - \log \sigma_v$) dans la figure 1.5(a).

2- Rapport des vides initial:

- Une augmentation du rapport des vides entraîne une diminution de la contrainte d'élasticité, attribuée à une baisse du nombre de coordination et une augmentation de

la contrainte caractéristique des particules. La figure 1.5(b) montre comment la courbe $(e - \log \sigma_v)$ reflète cette relation.

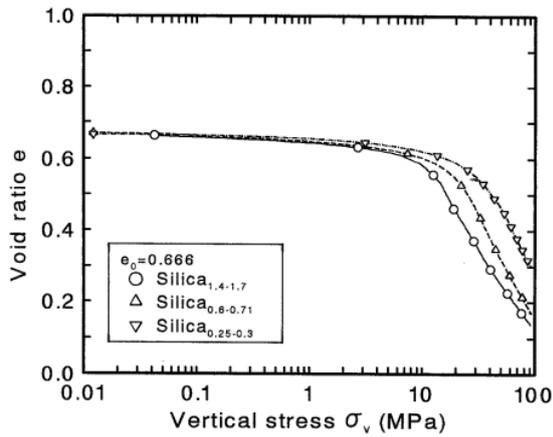
3- Angularité :

- Les particules angulaires, représentées par le verre angulaire (A.G.) avec un rapport des vides initial de 0,74, présentent une contrainte d'élasticité plus faible (~6 MPa) comparé au verre Ballotini (G.B.), avec un rapport des vides initial de 0,6 (~20 MPa). Après l'élasticité, la courbe $(e - \log \sigma_v)$ pour le verre angulaire devient lisse, tandis que celle du verre Ballotini montre une discontinuité marquée avec une forte courbure à la limite d'élasticité (Fig. 1.5c).

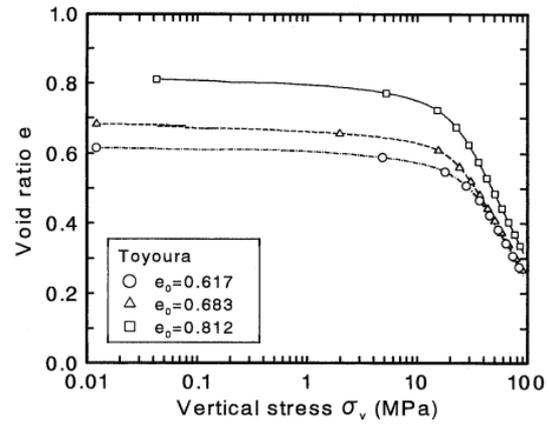
4- Composition minérale:

- La limite d'élasticité augmente avec la teneur en quartz, bien que le rapport des vides initiaux et l'angularité varient entre les échantillons. Cependant, dans la région post-élastique, toutes les courbes $(e - \log \sigma_v)$ convergent, indiquant que la composition minérale n'a plus d'effet significatif après l'élasticité (Fig. 1.5d).

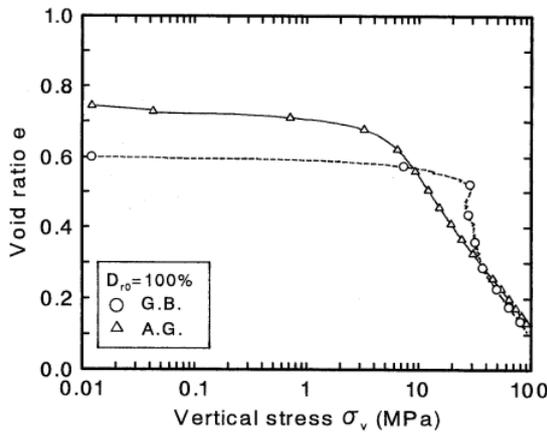
Les résultats de cette étude révèlent une relation entre les caractéristiques d'écrasement des particules individuelles et le comportement en compression unidimensionnelle. Les paramètres tels que la taille des particules, l'angularité et la minéralogie influencent la courbe $(e - \log \sigma_v)$ dans la région élastique, mais leur influence devient négligeable dans la phase post-élastique.



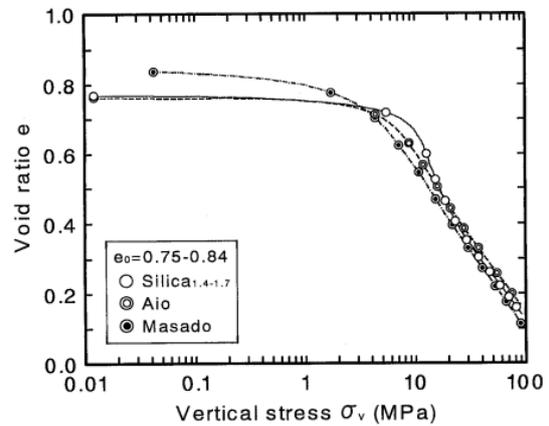
(a) Influence de la taille des particules sur la courbe $e - \log \sigma_v$



(b) Influence du taux de vide initial sur la courbe $e - \log \sigma_v$



(c) Influence de l'angularité des particules sur la courbe $e - \log \sigma_v$



(d) Influence de la composition minérale sur la courbe $e - \log \sigma_v$

Figure 1.5. Résultats de compression 1D (Nakata et al., 2001b).

1.4 Mesure de la Rupture des Grains (Taux de Rupture)

Étant donné l'importance d'évaluer la rupture des particules, de nombreuses études antérieures ont proposé divers indices pour la mesurer. Parmi ces indices, certains sont basés sur les variations de la granulométrie avant et après les essais pour une taille de particule donnée (Lee et Farhoomand 1967 ; Marsal 1967 ; Lade et al. 1996 ; Nakata et al. 1999 ; Miura et al. 2003), les indices de rupture des particules en relation avec le changement de surface du sol (Miura et O-Hara 1979 ; Nakata et al. 2001a), les indices de rupture des particules en relation avec les distributions granulométriques avant et après les essais (Hardin 1985 ; Indraratna et al. 2005 ; Einav 2007a, 2007b ; Muir Wood et Maeda 2008 ; Indraratna et al. 2010 ; Indraratna et al. 2012; Indraratna et Nimbalkar 2013; Yu 2018b), indices de rupture de

particules en introduisant la théorie fractale (Mandelbrot 1983; Turcotte 1986; Tyler et Wheatcraft 1992; McDowell et al. 1996; McDowell et Bolton 1998; Lobo-Guerrero et Vallejo 2005; Yu 2018b), indices de rupture de particules en introduisant la théorie fractale et le concept de rupture relative (Hardin 1985; Einav 2007a, 2007b; Muir Wood et Maeda 2008).

La figure 1.6 présentée par Yu (2019) illustre des définitions de mesure de la rupture des particules les plus couramment utilisés dans la littérature.

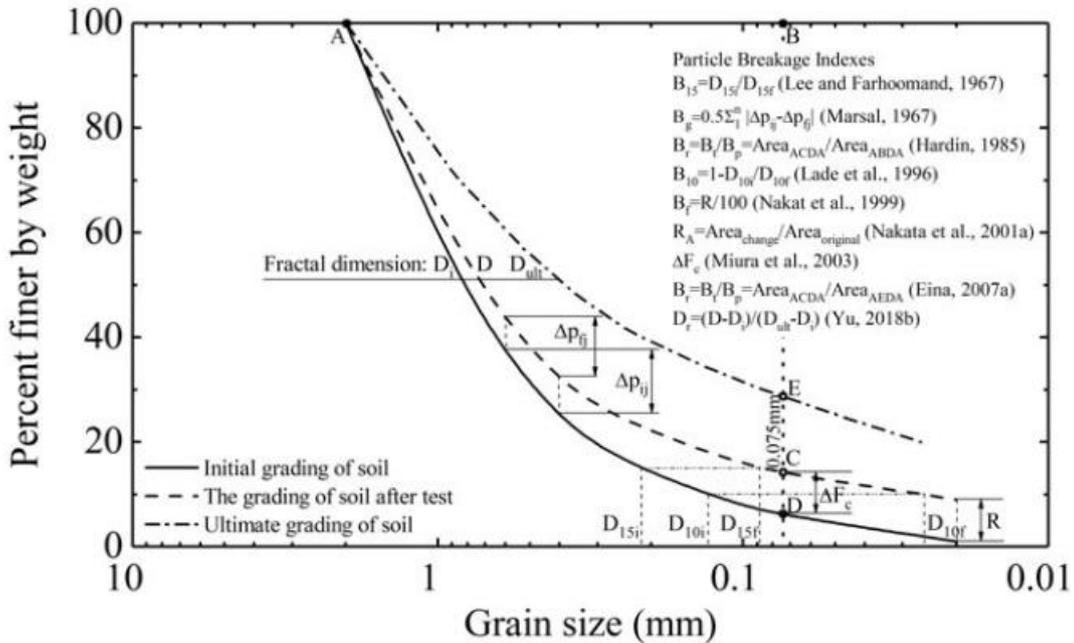


Figure 1.6. Définitions des indices de rupture des particules (Yu, 2019).

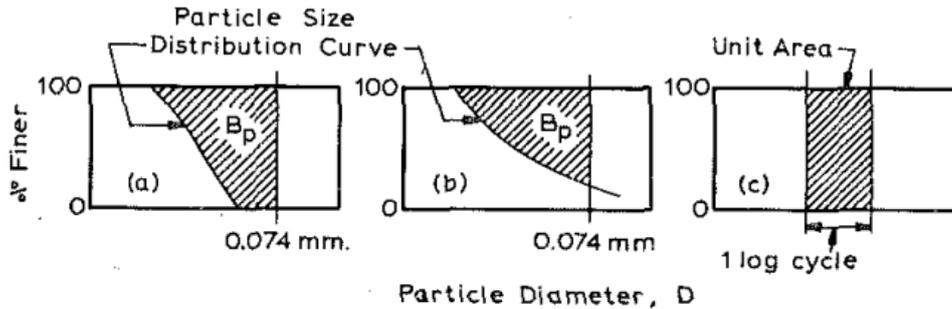
En général, les modèles proposés pour quantifier la rupture des particules (indices de ruptures des particules) visent à introduire un paramètre quantitatif permettant de comparer différents niveaux de rupture. Cette comparaison s'effectue en relation avec une granulométrie de référence, qui peut correspondre à la granulométrie initiale, une granulométrie ultime supposée, ou simplement une taille limite prédéfinie.

L'un des modèles les plus couramment utilisés est celui proposé par Hardin (1985). Il a développé le concept de rupture relative (B_r), définie par:

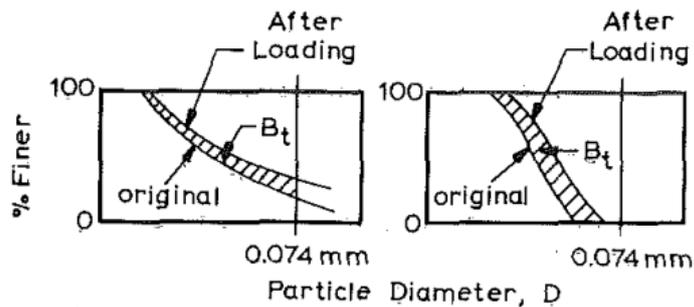
$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (1.8)$$

Qui est le rapport entre la rupture totale (B_t) d'un échantillon et le potentiel de rupture d'une particule (B_p) d'un certain diamètre. Pour définir ces paramètres, Hardin (1985) a utilisé la

forme des courbes de granulométrie initiale et finale, en les tronquant à une valeur constante prédéfinie de 0,0074 mm (comme illustré sur la figure 1.7). La rupture relative est indépendante de la distribution granulométrique si elle est la seule variable. Elle varie entre zéro et un et pour les matériaux soumis à des contraintes extrêmement élevées, B_r approchera sa valeur limite la plus élevée.



(a) Potentiel de Rupture B_p



(b) Rupture Totale B_t

Figure 1.7. Définition du Taux de rupture des particules (Hardin, 1985).

Le modèle proposé par Hardin (1985) a été adopté par plusieurs chercheurs, mais avec des variations concernant la distribution finale. Par exemple, en se fondant sur des données expérimentales, Einav (2007a) a avancé l'idée que la granulométrie finale (ultime) présente toujours une structure fractale. Autrement dit, la répartition des tailles suit une loi de puissance, avec des paramètres relativement constants et largement applicables à divers types de sols granulaires. La Figure 1.8 illustre le modèle utilisé par Einav (2007a), où B_r représente le rapport entre la surface délimitée par la granulométrie initiale et une courbe intermédiaire quelconque (B_t), tandis que B_p correspond à l'aire (surface) située entre les granulométries initiale et finale supposées fractales.

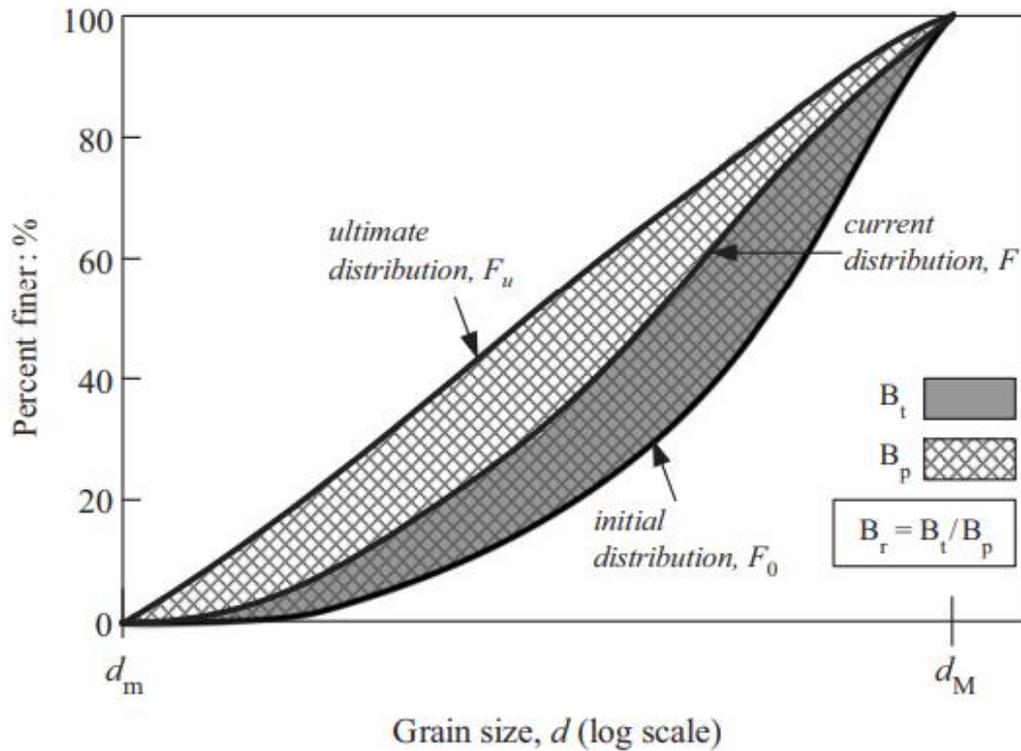


Figure 1.8. Taux de Rupture des Particules (Einav, 2007a).

Un indice destiné à quantifier la proportion des grains ayant subi une rupture a été introduit par Marsal (1967, 1973). Comme le montre la Figure 1.9, cet indice, élaboré par Marsal (1973), repose sur la comparaison des refus partiels avant et après l'essai pour chaque tamis, et est exprimé par la notation (ΔW_k) . L'approche utilisée pour calculer cet indice consiste en une somme algébrique, qui doit théoriquement être nulle, et le taux de rupture est obtenu en additionnant uniquement les valeurs positives de (ΔW_k) .

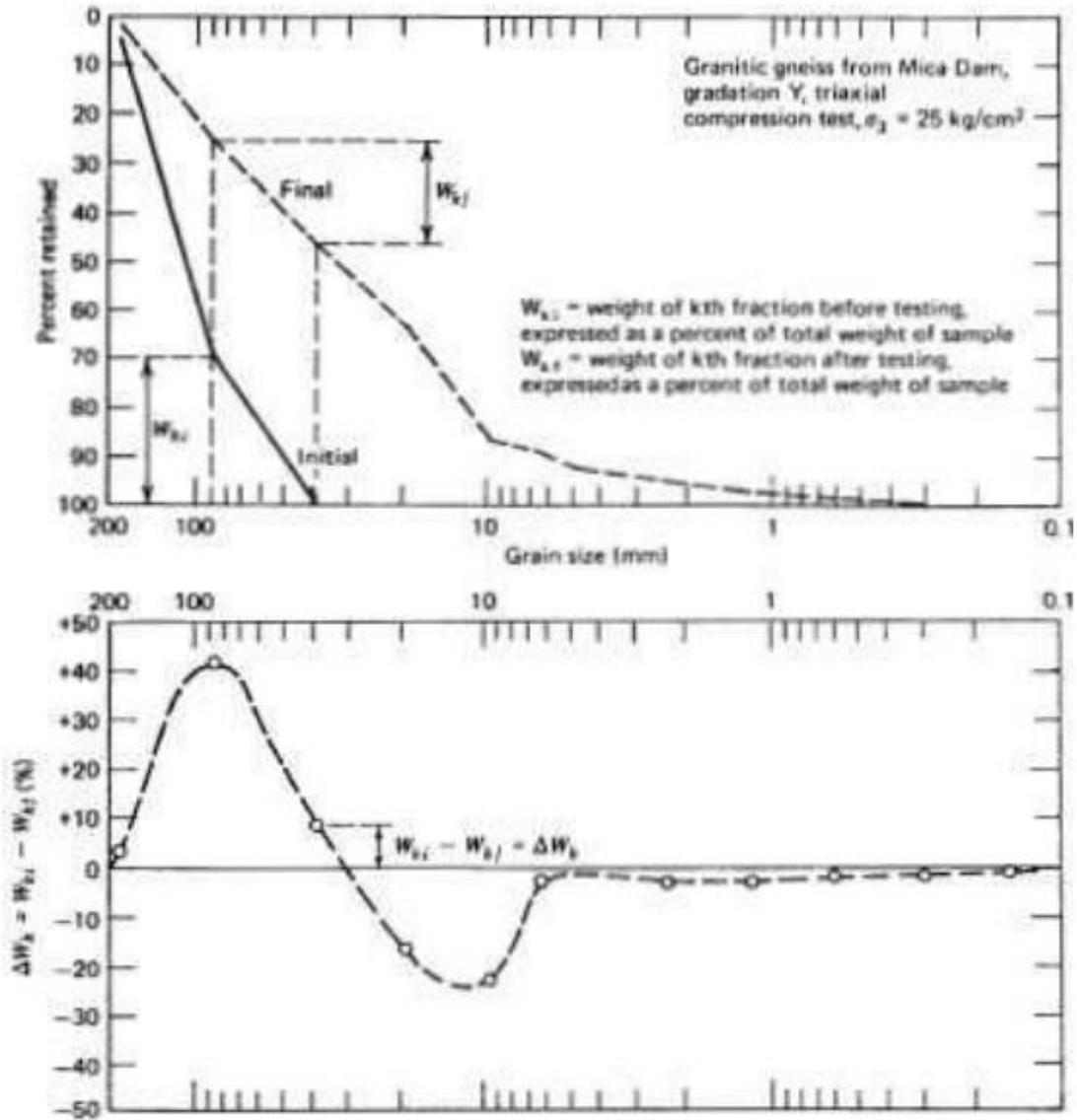


Figure 1.9. Indice de Rupture des Particules (Marsal, 1973).

1.5 Modes de Rupture des Particules

La rupture des particules dans un assemblage granulaire dépend essentiellement de la manière dont les forces de contact sont réparties sur eux. Lorsque ces forces dépassent un seuil critique, les particules se cassent. En raison de la diversité des formes et tailles des grains, cette répartition peut devenir particulièrement complexe. Par conséquent, le taux de la rupture des grains est influencé par la comparaison entre la résistance propre des particules et la contrainte globale qui leur est appliquée. Un rapport faible entre ces deux facteurs conduit à une augmentation notable des ruptures (Ovalle, 2013).

Selon Guyon et Trodec (1994), trois principaux modes de rupture peuvent être identifiés dans un assemblage granulaire (Figure 1.10):

- **Fracture** : Ce mode correspond à la cassure d'un grain en plusieurs fragments de tailles similaires, représentant environ 25 à 50 % de la taille initiale des grains.
- **Attrition** : Ce phénomène se produit lorsqu'une particule se rupture en un fragment principal, légèrement plus petit que la particule d'origine, accompagné de plusieurs fragments plus petits. Ces derniers sont généralement générés par la rupture des aspérités de la particule.
- **Abrasion** : Ce processus résulte du frottement entre les grains, entraînant la formation de fines particules.

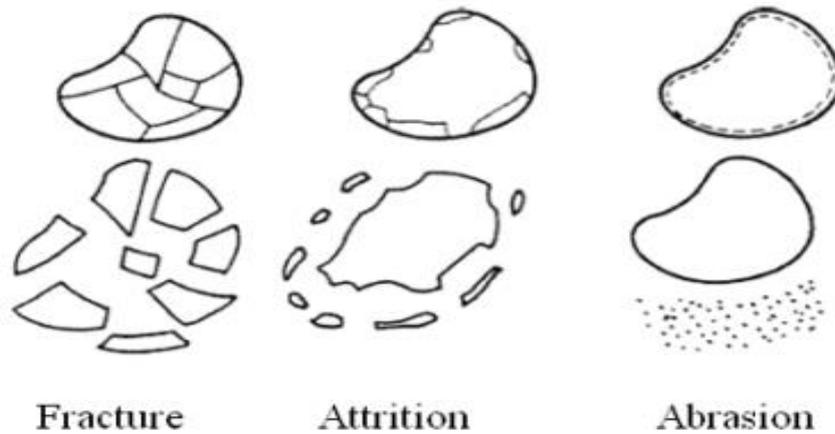


Figure 1.10. Types de Rupture d'une Particule (Guyon et Troadec, 1994).

Par ailleurs, [Unland \(2007\)](#) a détaillé les différents types de rupture des particules identifiés dans la littérature, comme le montre la figure 1.11.

No.	effect	feed	loaded particle	product
a	weakening			
b	cracking			
c	breaking			
d	crumbling			
e	chipping			
f	splitting			
g	disintegrating			

Figure 1.11. Types de ruptures des particules (Unland, 2007).

1.6 Analyse du processus de rupture des particules dans un matériau granulaire soumis à une pression élevée

Le phénomène de la rupture des particules induit des modifications notables dans le comportement des sols granulaires. Dans ce contexte, [Dadda et al. \(2015\)](#) ont mené une étude approfondie en effectuant des essais œdométriques à haute pression sur deux types de sable distincts: un sable carbonaté et le sable d'Hostun HN 34, chacun étant soumis à différentes intensités de chargement. La Figure 1.12 présente une comparaison des courbes contrainte-déformation pour ces deux sables. Les changements observés dans l'inclinaison des courbes contrainte-déformation signalent le commencement de la rupture des grains, mettant en évidence les seuils critiques associés à la structure granulaire et à la rupture des grains.

La réponse mécanique (courbe Contrainte-Déformation) peut être divisée en deux segments distincts. **Le premier segment** correspond à la phase plastique, qui est marquée par un réarrangement des grains, un processus également désigné sous le terme d'effondrement des pores. Ce réarrangement est suivi par une modification de la pente de la courbe, indiquant le début de la rupture des grains. Dans **le second segment** de la courbe, on observe

principalement deux mécanismes: l'écrasement des grains et/ou le réarrangement des particules.

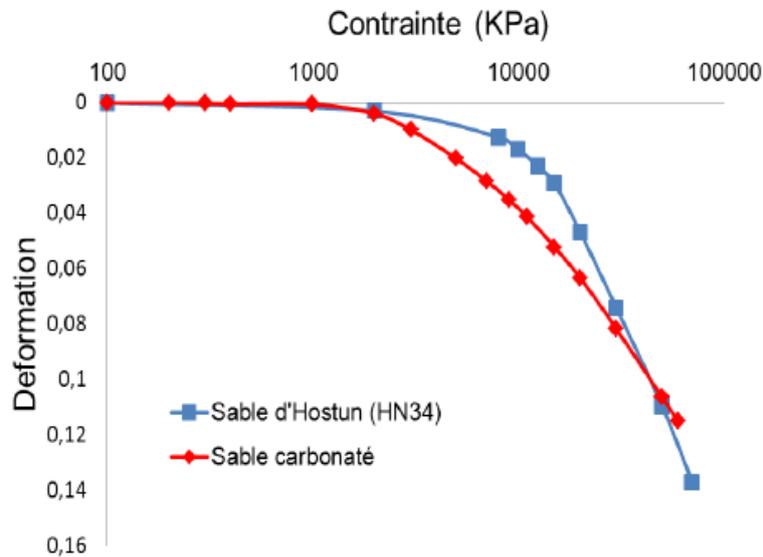


Figure 1.12. Comparaison des courbes contrainte-déformation pour le sable d'Hostun (HN34) et le sable carbonate (Dadda et al., 2015).

Une étude approfondie réalisée par Karatza et al. (2017) se concentre sur la rupture des particules dans les matériaux granulaires. Pour ce faire, des tests œdométriques ont été effectués sur des échantillons de sable de Zéolites, afin d'étudier le phénomène de rupture des grains. Ces tests ont été accompagnés de scans tomographiques aux rayons-X, réalisés à différents niveaux de chargement, permettant de suivre l'évolution de la rupture des particules au fur et à mesure de l'expérience. La Figure 1.13 montre la réponse contrainte-déformation obtenue durant ces essais, tandis que la Figure 1.14 présente des images tomographiques à rayons-X prises à différents niveaux de chargement.

Les résultats de cette étude révèlent plusieurs conclusions majeures :

- La rupture des grains commence par un changement de pente dans la courbe contrainte-déformation ;
- La phase plastique de la courbe est caractérisée par un effondrement des pores ;
- La phase suivante est dominée par deux mécanismes: l'écrasement des grains et le réarrangement des particules.

Ces résultats apparaissent de manière plus précise dans les images 2D obtenues par la tomographie aux rayons X, comme le montre clairement l'illustration présentée dans la figure 1.14.

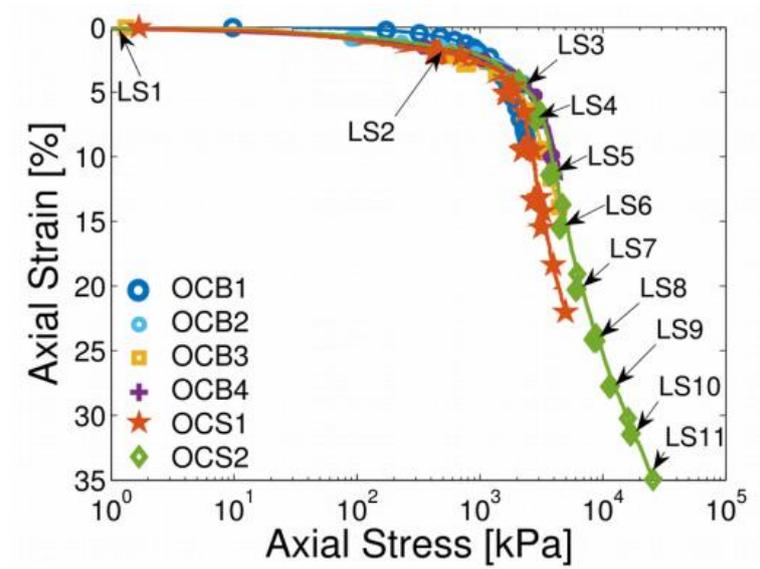


Figure 1.13. Courbe Contrainte-Déformation pour le sable de Zéolites (Karatza et al. 2017).

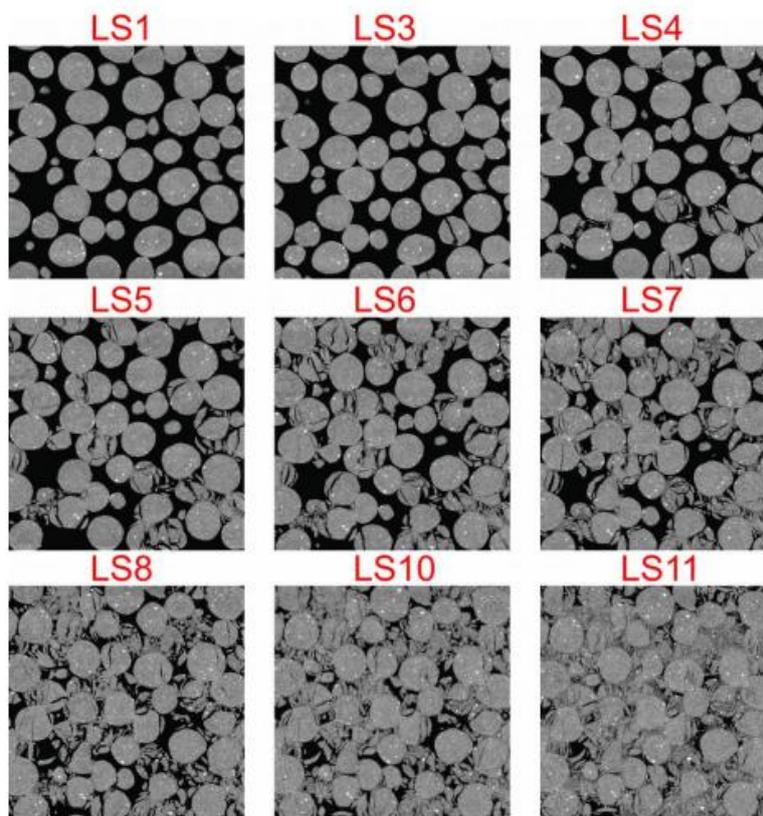


Figure 1.14. Images 2D du sable de Zéolites obtenues par tomographie à rayons-X (essais oedométriques) (Karatza et al. 2017).

1.7 Paramètres affectant la rupture des particules

1.7.1 Influence de la composition minérale

Les propriétés et la résistance de la roche mère, qui constitue la source des particules d'un sol, jouent un rôle clé dans l'évaluation de sa susceptibilité à la rupture des grains. À ce propos, la Figure 1.15 présente un ensemble de tests de compression réalisés par Billam (1971) sur des grains de différentes tailles et compositions minérales. Les résultats obtenus révèlent de manière évidente que la force requise pour provoquer la rupture des grains varie considérablement en fonction de la nature du matériau, qu'il s'agisse de verre, de quartz, de calcaire, de sable ou de craie.

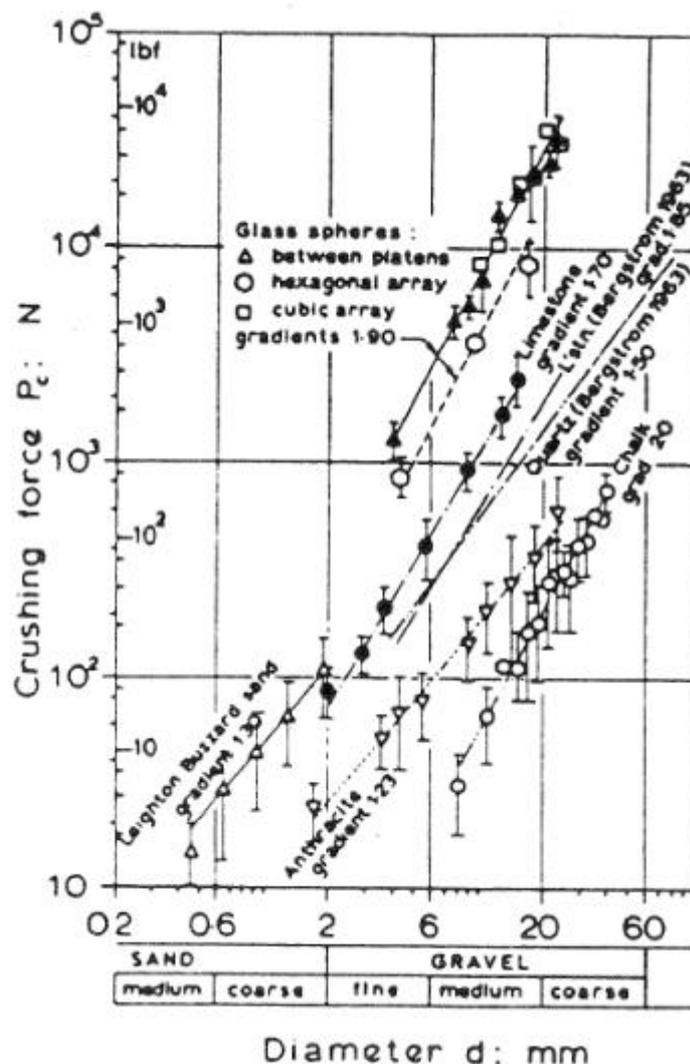
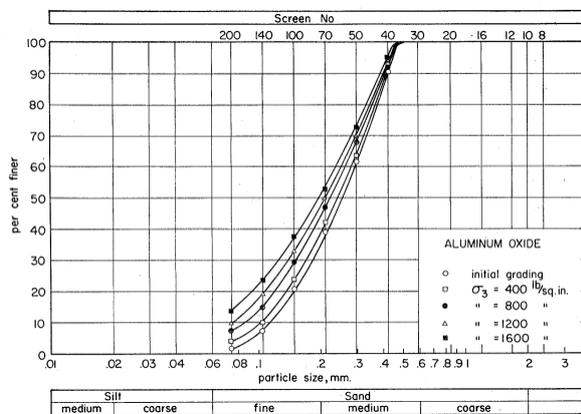
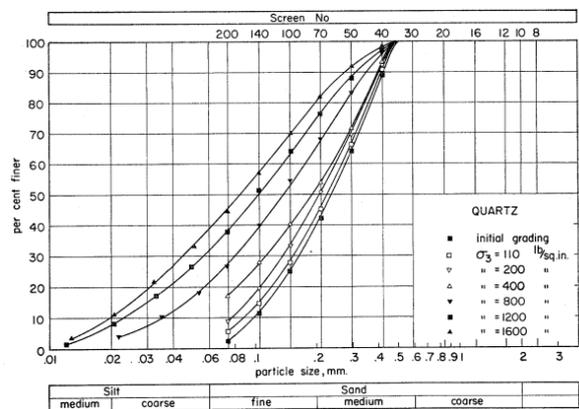


Figure 1.15. Force de rupture des particules lors d'un essai de compression pour des matériaux présentant diverses minéralogies (Billam, 1971).

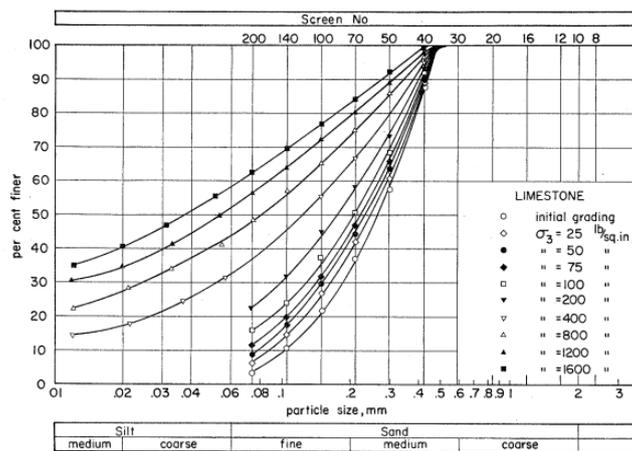
Lo et Roy (1973) ont mené des tests triaxiaux sur divers matériaux aux minéralogies distinctes, mais avec une granulométrie initiale identique. Leur étude a révélé que la rupture des grains est largement influencée par la minéralogie, comme le montre la Figure 1.16. En effet, lorsque la granulométrie et la densité initiales sont similaires, la propension d'un matériau à la rupture des grains est déterminée par le rapport entre la contrainte de confinement (σ_c) et la résistance des particules ($\sigma_f = \frac{F_f}{d^2}$). Un rapport plus élevé engendre une rupture accrue des grains, ce qui est illustré par la Figure 1.17 d'après Ovalle (2013). Les différences observées dans les taux de rupture des grains, malgré un rapport (σ_c/σ_f) constant (la même valeur), sont attribuées à d'autres facteurs influençant ce phénomène.



(a) Distribution granulométrique après essai, oxyde d'aluminium (**Aluminum Oxide**).



(b) Distribution granulométrique après essai, sable de quartz (**Quartz Sand**).



(c) Distribution granulométrique après essai, sable calcaire (**Limestone Sand**).

Figure 1.16. Effet de la composition minéralogique sur la rupture des particules (Lo et Roy, 1973).

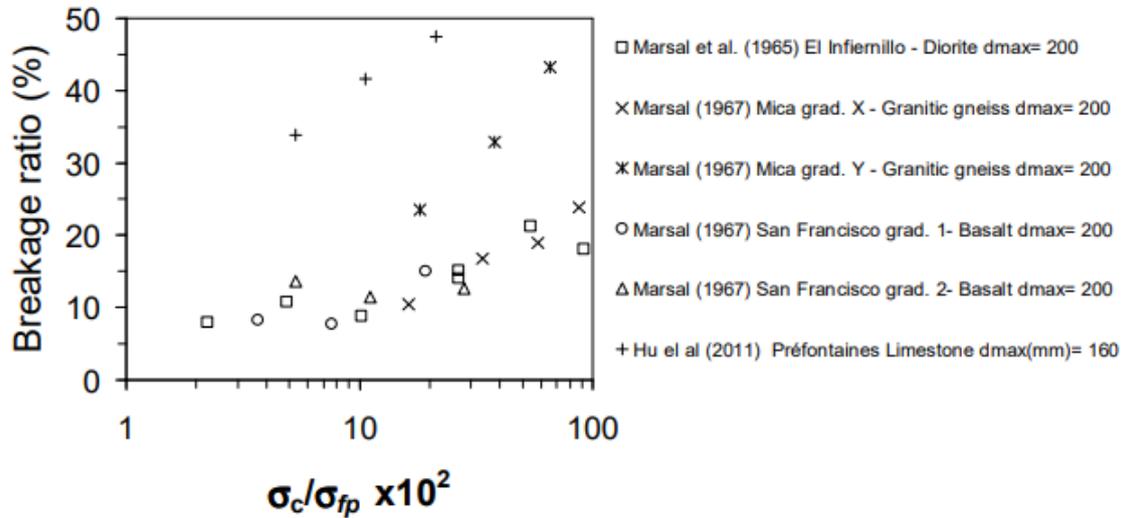


Figure 1.17. Taux de rupture des particules en fonction de leur résistance à la rupture (σ_{fp}) (Ovalle, 2013).

Par ailleurs, la Figure 1.18 (Ovalle, 2013) illustre la contrainte de rupture de divers agrégats rocheux soumis à des tests de compression entre deux plaques rigides et parallèles. La résistance est calculée en rapportant la force de rupture (F_f) au carré de la dimension des grains, soit la distance initiale entre les plaques, conformément à la formule de Jaeger (1967) : ($\sigma_f = \frac{F_f}{d^2}$). On observe que l'amplitude des contraintes peut varier d'un ordre de grandeur selon la nature de la roche, ce qui influence directement le taux de rupture des matériaux granulaires.

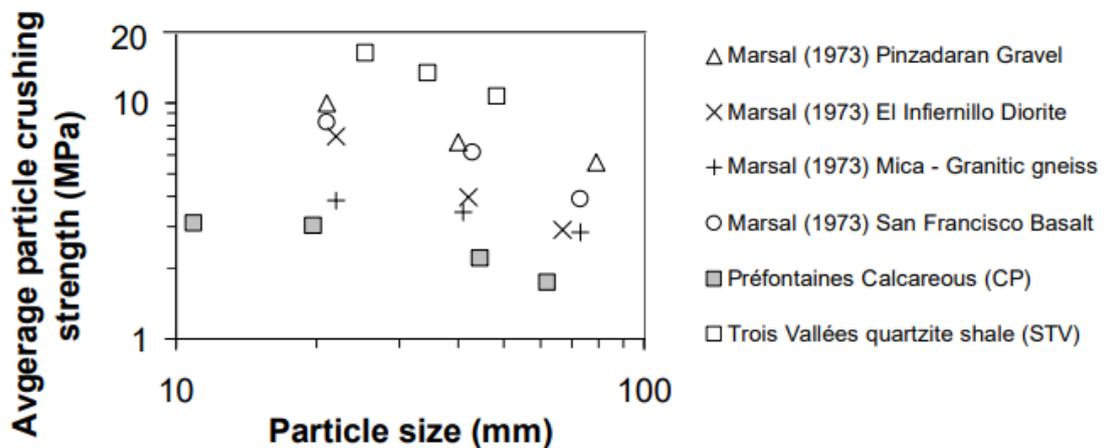


Figure 1.18. Résistance à la rupture des agrégats rocheux (Ovalle, 2013).

1.7.2 Influence de la morphologie des particules

Les recherches menées par Lee et Farhoomand (1967), représentées dans la Figure 1.19, révèlent une corrélation entre l'angularité des grains et leur propension à se rupturer dans le cas d'un gravier granitique soumis à un essai triaxial. Ces travaux démontrent que l'angularité des particules favorise davantage leur rupture. Cela s'explique par le fait que les grains angulaires possèdent un nombre réduit de points de contact entre eux, ce qui amplifie la concentration des forces transmises par rapport aux grains plus arrondis sous une contrainte macromécanique équivalente. Par ailleurs, les caractéristiques géométriques irrégulières ainsi que les arêtes saillantes des particules angulaires augmentent leur susceptibilité à des ruptures localisées et à l'usure par attrition.

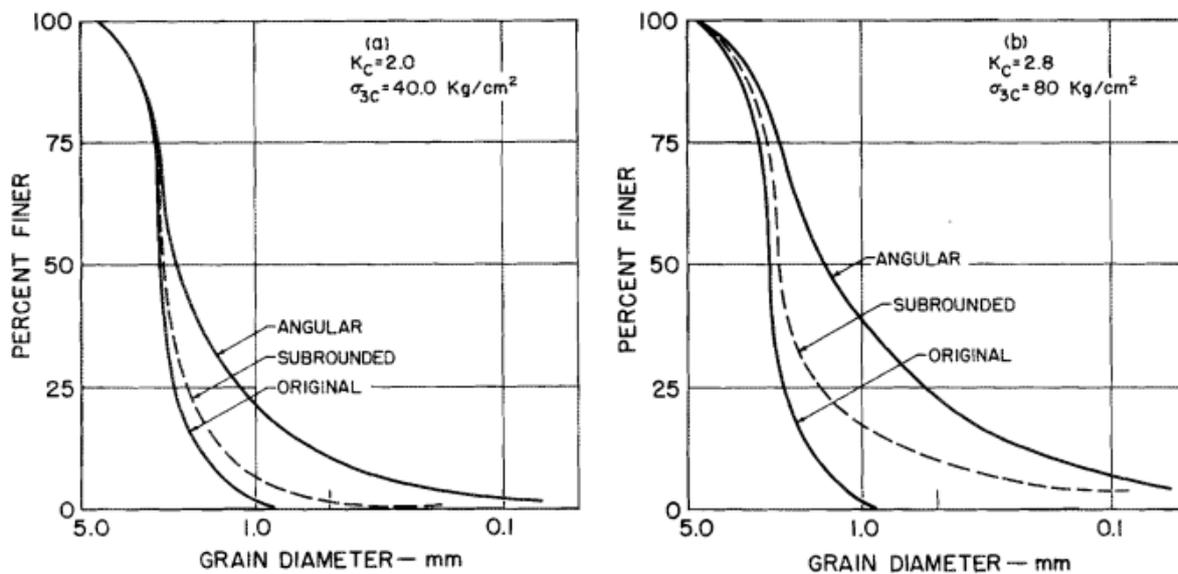


Figure 1.19. Comparaison de l'écrasement du sable grossier angulaire et subarrondi – Effet de l'angularité (Lee et Farhoomand, 1967).

1.7.3 Influence de la distribution granulométrique initiale

La Figure 1.20, telle que présentée par Ovalle (2013), résume les résultats des recherches expérimentales réalisées par Marsal et al. (1965), Marsal et al. (1967), Marachi et al. (1969), ainsi que Hu et al. (2011). Ces études ont comparé le taux de rupture des grains lors d'une série de tests effectués sur des matériaux d'enrochement, qui ont été soumis à des conditions variées et provenaient de roches aux propriétés mécaniques hétérogènes. Les résultats indiquent clairement que la rupture des grains diminue de manière systématique lorsque la granulométrie devient plus variée. Par conséquent, l'homogénéité de la distribution des

particules influence de manière significative la rupture des grains. En effet, lorsque les tailles des grains sont similaires, le nombre de points de contact entre les particules diminue, ce qui entraîne une augmentation des forces de contact pour des contraintes équivalentes. Ainsi, il apparaît que la rupture des grains et le coefficient d'uniformité du matériau granulaire (C_u), sont inversement liés. L'augmentation du taux de rupture des grains lors d'un essai de compression pourrait entraîner une élévation de la constante (C_u), et en conséquence, une réduction progressive du taux de rupture supplémentaire. Par ailleurs, plusieurs études ont révélé que la rupture des grains tend à évoluer vers une granulométrie plus uniforme sous des déformations importantes ou de fortes contraintes (par exemple, Turcotte, 1986 ; Sammis et al., 1986, 1987 ; Fukumoto, 1990, 1992 ; Bard, 1993 ; Fredlund et al., 2000 ; Coop et al., 2004). Cette condition finale pourrait être représentée par une série géométrique, permettant d'obtenir une valeur asymptotique pour (C_u).

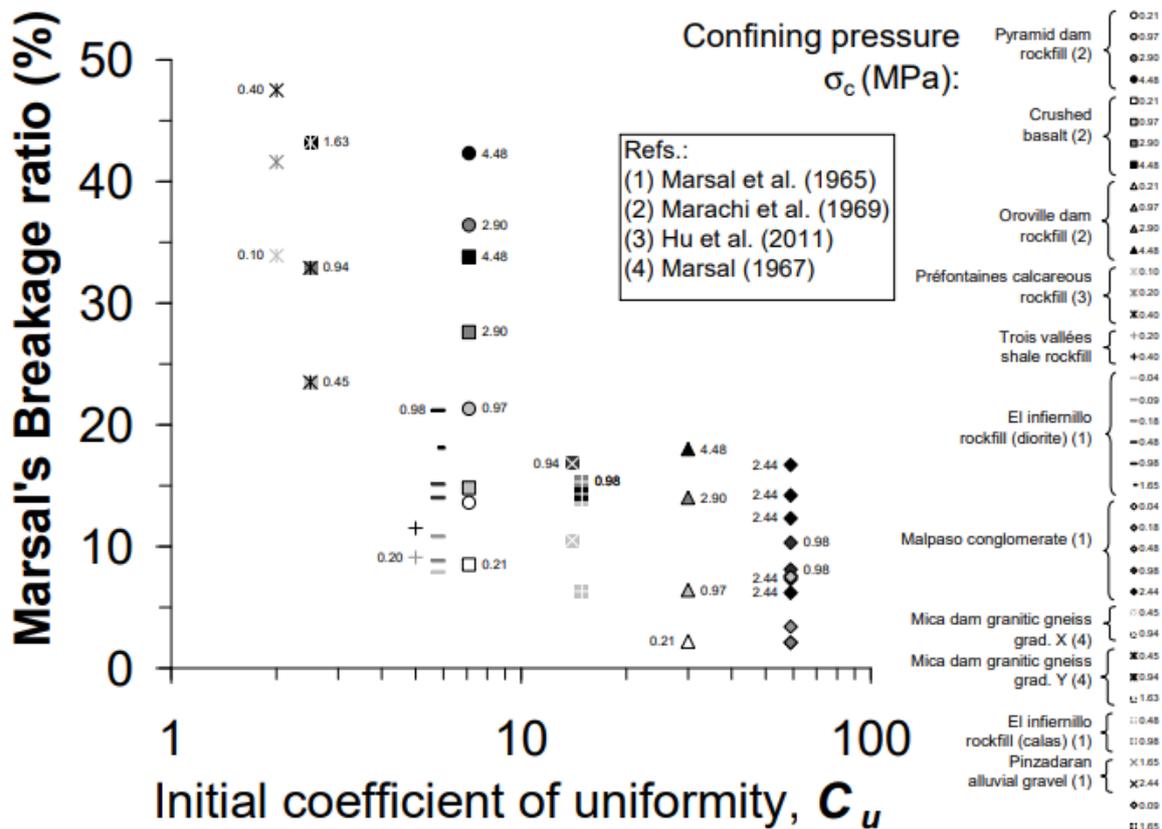


Figure 1.20. Effet du coefficient d'uniformité sur le taux de rupture des particules lors d'un essai triaxial (Ovalle, 2013).

1.7.4 Influence de la densité initiale

Hardin (1985) a étudié l'impact de divers paramètres sur la rupture des grains et a proposé une contrainte de confinement de référence, notée σ'_r , définie pour un taux de rupture des particules ($B = 0.5$). Il a démontré que le produit $\sigma'_r(1 + e_i)$, où e_i représente le rapport de vides initial, reste quasiment constant pour un matériau donné. Cette relation montre que lorsque le rapport de vides initial e_i augmente, la contrainte σ'_r diminue. En d'autres termes, le matériau devient plus sensible à la rupture des grains, comme l'illustre la Figure 1.21. L'effet de la densité initiale peut être expliqué comme suit: plus un matériau possède une densité élevée, plus le nombre de points de contact entre les particules augmente, ce qui conduit à une réduction des intensités moyennes des forces transmises. À l'inverse, lorsque la densité initiale est faible, les forces transmises sont relativement plus fortes (concentration plus élevée), ce qui rend les grains plus susceptibles de se fracturer. Toutefois, au-delà d'un certain seuil de contrainte, l'impact de la densité initiale devient insignifiante (Négligeable), car l'organisation du matériau tend à se stabiliser vers une disposition similaire après consolidation. Cette constatation a également été validée par les travaux de Nakata et al. (2001b).

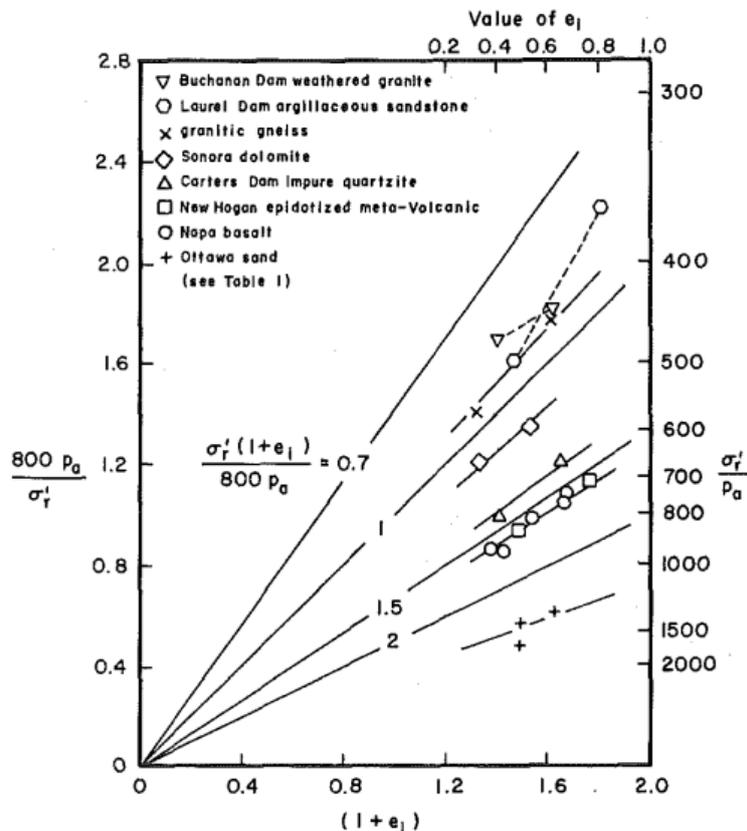


Figure 1.21. Contrainte de référence de Rupture en fonction du rapport de vide initial:
Influence de la densité initiale sur la rupture des particules (Hardin, 1985).

1.7.5 Effet de Saturation (Teneur en Eau)

De nombreuses recherches ont examiné l'effet de la présence d'eau sur la rupture des particules (par exemple, Sowers et al., 1965 ; Marsal, 1973 ; Nobari et Duncan, 1972 ; Dadda et al., 2015). Les études menées par Sowers et al. (1965), Marsal (1973) et Nobari et Duncan (1972) ont démontré que la rupture des particules dans les enrochements et les graviers s'intensifie lorsqu'ils sont soumis à l'eau. En particulier, Nobari et Duncan (1972) ont montré que la saturation d'un enrochement entraîne une diminution de sa résistance ainsi qu'une augmentation de sa contractance, comme illustré à la figure 1.22. Ces recherches ont été motivées par l'observation de tassements, souvent excessifs et différés, dans les remblais et les barrages. Elles ont mis en évidence qu'une légère fluctuation de l'humidité (Teneur en Eau) peut considérablement augmenter la compressibilité des matériaux du fait de la rupture des particules.

L'effet de saturation est observable à la fois en condition de Fluage (Charge Constante) et en condition de Relaxation (Déformation Constante). La Figure 1.23 illustre les résultats des travaux de Lee et Coop (1995) en comparant la réponse d'un même matériau soumis à différents états au cours d'essais triaxiaux. Les essais analysés comprennent:

- 1- **L'état sec** (test 4), où le matériau reste non saturé tout au long de l'essai.
- 2- **La saturation initiale** (test 22), où le matériau est entièrement saturé dès le début de l'essai.
- 3- **La saturation en milieu d'essai sous Relaxation** (Test 30).
- 4- **La saturation en milieu d'essai sous Fluage** (Test 31).

Il ressort de ces résultats qu'après saturation, le taux de rupture des particules augmente, induisant une contraction accrue du matériau. Cette contraction est plus marquée dans les essais où le matériau est saturé en cours d'essai, les courbes de déformation volumique tendant alors à se rapprocher de celles observées dans le cas d'une saturation initiale (test 22).

De plus, la saturation a des effets spécifiques selon le type de condition appliquée:

- Dans le cas d'une **déformation constante** (test 30), la saturation entraîne une relaxation du déviateur des contraintes, réduisant ainsi les contraintes différentielles appliquées au matériau.
- Dans le cas d'une **charge constante** (test 31), la saturation provoque une augmentation de la déformation, phénomène connu sous le terme de fluage (creep).

Ces observations soulignent le rôle crucial de la saturation sur les comportements mécaniques des matériaux en raison de la rupture des particules, qu'il s'agisse de la réponse volumique ou de la variation des contraintes lors de l'essai.

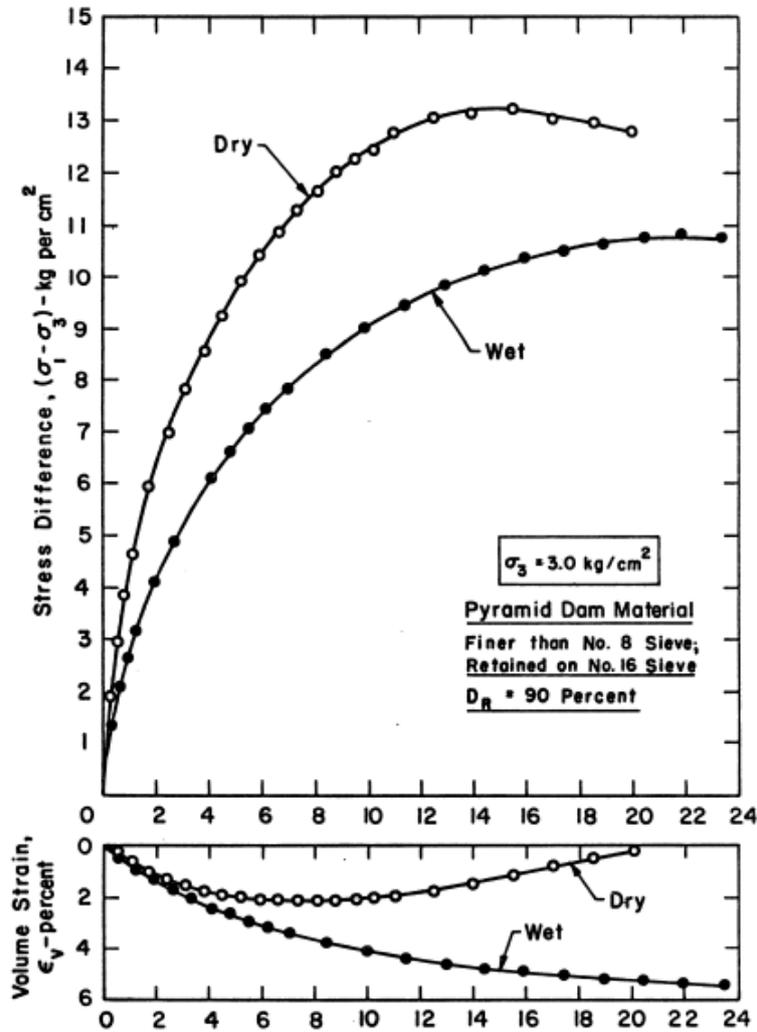


Figure 1.22. Résultats des essais triaxiaux sur des échantillons secs et humides du matériau utilisé pour le barrage (enrochement), $\sigma_3 = 3 \text{ kg/cm}^2$ (Nobari et Duncan, 1972).

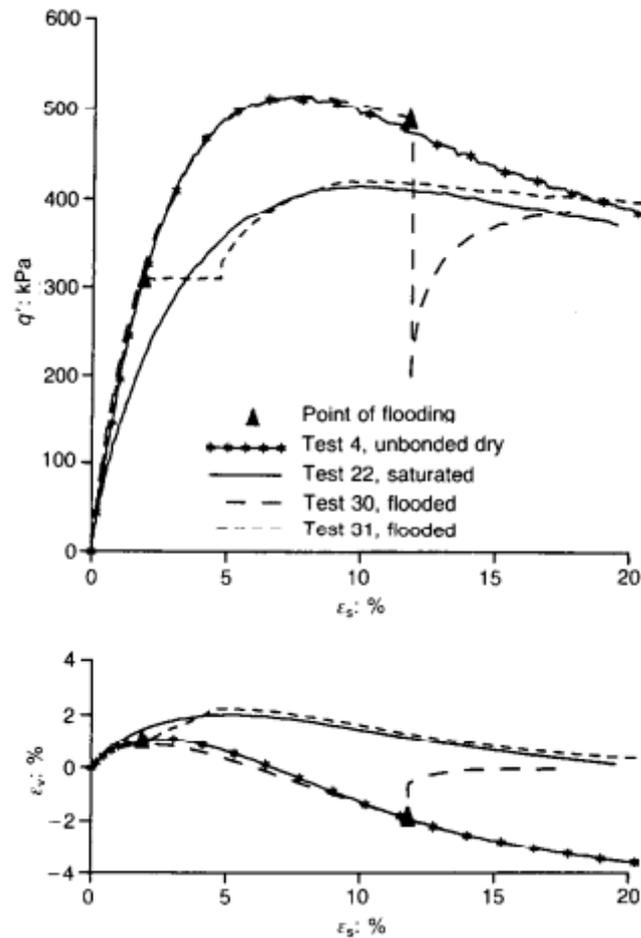


Figure 1.23. Comportement mécanique d'un sable granitique sous essais triaxiaux - Comparaison des états sec et saturé (Influence de Saturation) (Lee et Coop, 1995).

Pour étudier l'influence de la saturation sur le taux d'écrasement des particules, Dadda et al. (2015) ont réalisé des expériences de compression à haute pression sur du sable d'Hostun (HN34), après avoir saturé les éprouvettes. Ils ont ensuite comparé les courbes granulométriques obtenues pour les éprouvettes sèches et saturées. Leurs résultats ont révélé que la rupture des particules est plus importante dans l'échantillon saturé, comme l'illustre la Figure 1.24.

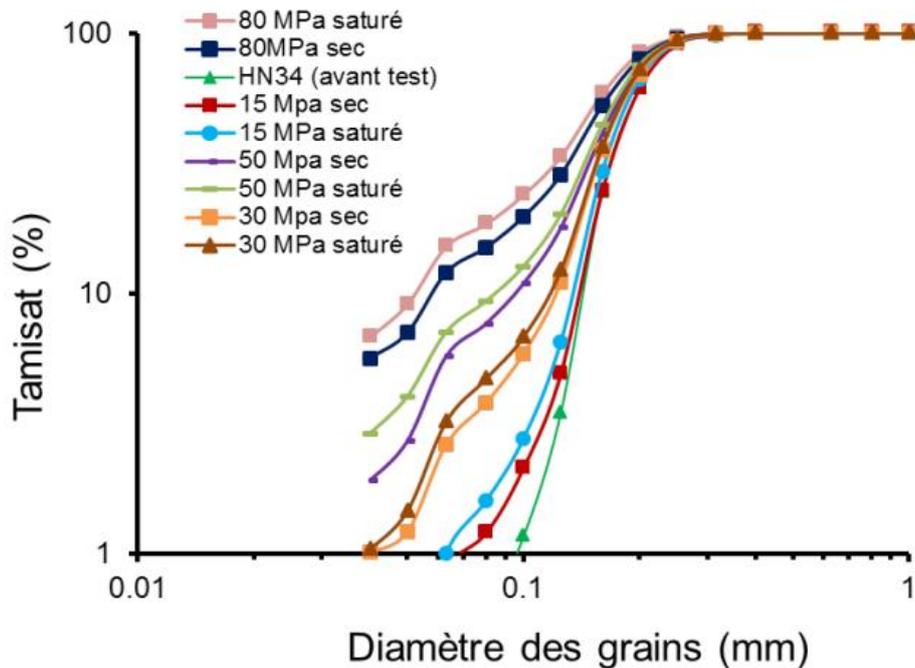


Figure 1.24. Effet de saturation sur la l'écrasement des grains (Dadda et al., 2015).

D'après Ovalle (2013), la source des conséquences de l'eau réside dans les grains individuels. L'eau provoque une réduction de la résistance des grains, ce qui entraîne une augmentation du taux de rupture des particules. En réalité, la saturation partielle des grains crée un ménisque capillaire au sein des microfissures, modifiant ainsi la résistance à la rupture et la contrainte effective. En d'autres termes, les liens capillaires présents au bout d'une fissure sont soumis à une tension et deviennent sensibles aux variations de la succion. Par conséquent, la saturation est le plus préjudiciable, car la succion est annulée, entraînant la disparition des liens capillaires.

1.8 Influence de la Rupture des Particules sur le Comportement des Matériaux Granulaires

La rupture des particules dans les matériaux granulaires entraîne divers changements dans les propriétés microstructurales, tels que la porosité, la surface de contact, l'orientation des contacts, le nombre de coordinations et le réseau de force de contact inter-particules. Ces modifications affectent ensuite les caractéristiques hydromécaniques du sable, notamment la perméabilité, la dilatation, l'angle de frottement, la distribution granulométrique initiale...etc. dans cette section nous présentons l'influence de la rupture des particules sur les changements qui se produisent sur le comportement des matériaux granulaires, tels influence de la ruptures

des particules sur la variation de la distribution de la taille des particules, sur l'évolution de la perméabilité, et sur les changements de la distribution de la taille des pores.

1.8.1 Distribution de la taille des particules

L'analyse de la rupture des particules se base essentiellement sur l'observation des variations de la courbe granulométrique en fonction de la charge appliquée. La Figure 1.25 présente cette évolution pour le sable d'Hostun et le sable carbonaté (Dadda et al., 2015), en tenant compte de divers niveaux de pression. Un aspect important à noter est que, sous l'influence de la contrainte, l'évolution de la granulométrie montre un ralentissement à partir d'un seuil spécifique de contrainte. La courbe granulométrique correspondant à ce seuil est désignée, selon Einav (2007a), sous le terme de « Courbe Granulométrique Ultime ».

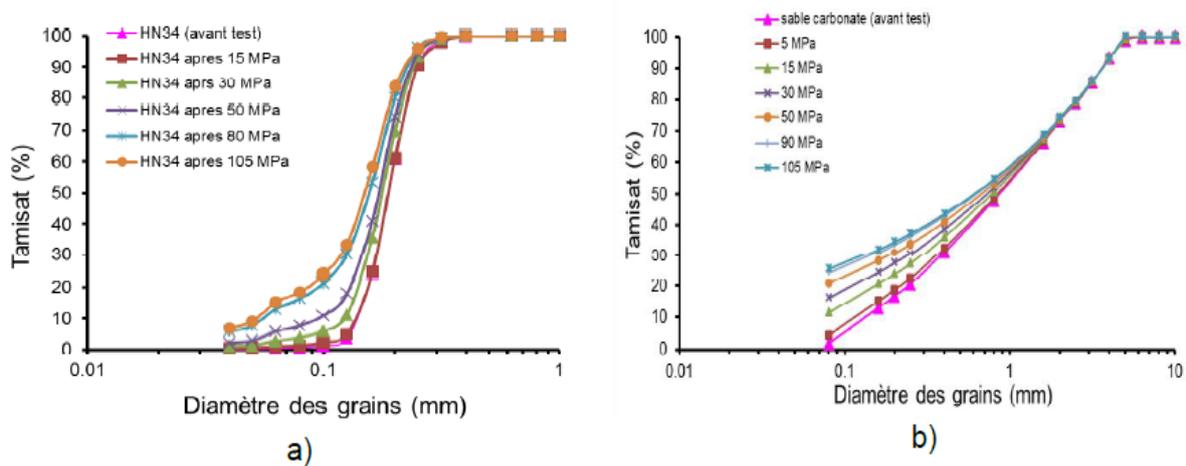


Figure 1.25. Influence de la rupture des particules sur la Distribution granulométrique, (a) Sable d'Hostun, (b) Sable Carbonaté (Dadda et al., 2015).

La représentation physique de la courbe granulométrique finale (Ultime) repose sur un principe d'équilibre géométrique, où le système granulaire augmente progressivement le nombre de connexions entre ses particules. Ce processus continue jusqu'à ce qu'un réseau de contacts stable soit formé, comme l'indique Hardin (1985). À mesure que ce réseau se développe, la répartition des contraintes sur certaines particules devient moins concentrée, permettant ainsi au système dans son ensemble de résister davantage à l'écrasement. Ce processus est illustré de manière schématique par Russell et al. (2013) dans la Figure 1.26.

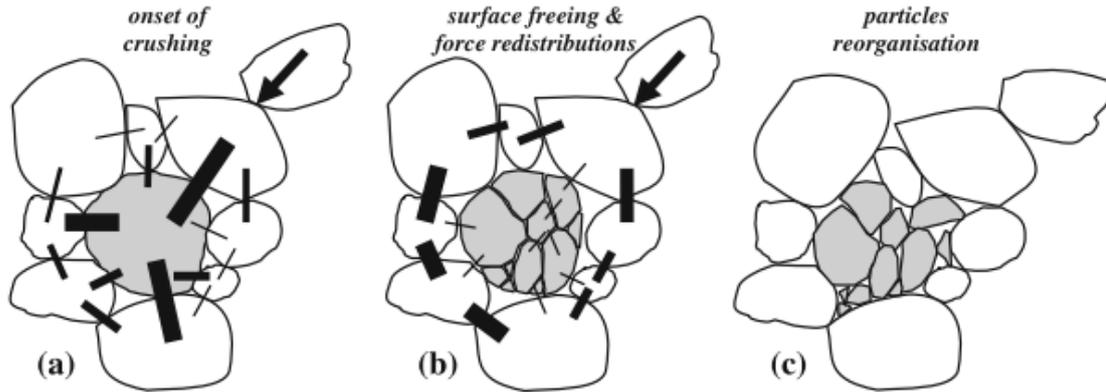


Figure 1.26. Processus de rupture des particules et de consolidation du système granulaire (Russell et al., 2013).

1.8.2 Changement de la perméabilité

Pour analyser l'impact de la rupture des particules sur la variation de la perméabilité, [Chen et al. \(2018\)](#) ont mené une étude sur l'évolution de la perméabilité du sable de grès (sandstone) soumis à différents niveaux de contraintes (0, 2, 4, 8, 12 et 16 MPa), en prenant en compte diverses valeurs de porosité. Ils ont recouru à la tomographie par rayons X pour observer les changements qui se produisent dans la structure des pores en fonction de la contrainte appliquée. La figure 1.27 illustre cette variation de la perméabilité en fonction de la contrainte appliquée, tandis que la figure 1.28 présente des images tomographiques en niveaux de gris à différentes étapes du chargement. Les résultats montrent que la perméabilité décroît avec l'augmentation de la contrainte, phénomène attribué à l'effondrement des pores, au réarrangement des particules et à la génération de petites particules et de fragments fins résultant de la rupture des particules. Ces derniers colmatent les pores, comme en témoignent les images tomographiques obtenues (Figure 1.28).

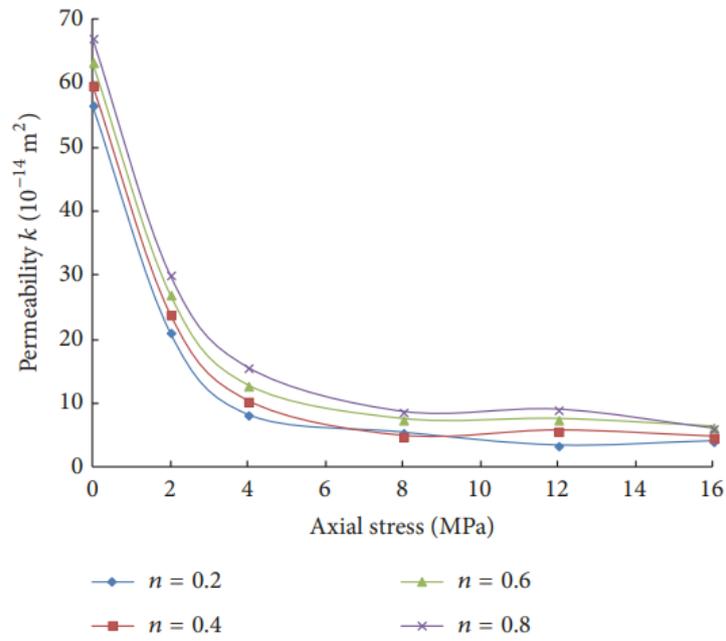


Figure 1.27. Réduction de la perméabilité sous l'effet de la contrainte axiale (Chen et al. 2018).

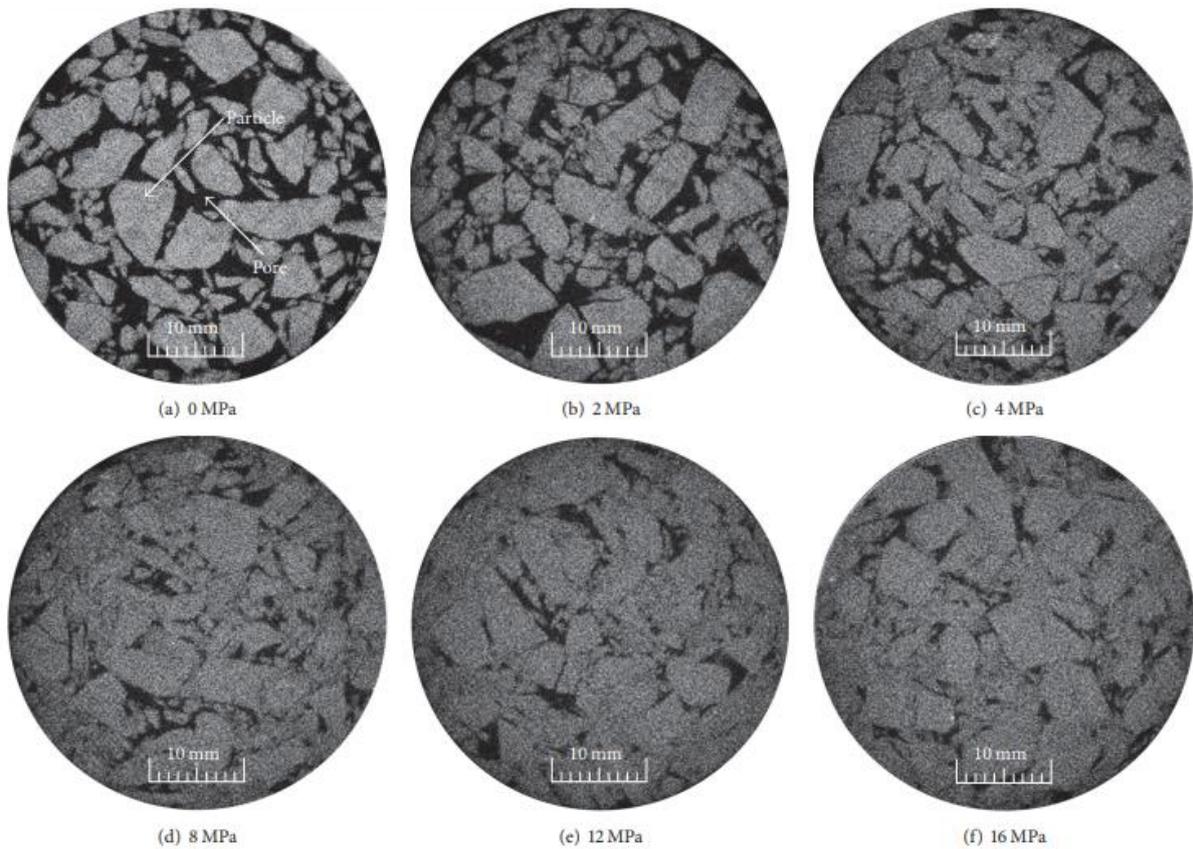


Figure 1.28. Images 2D obtenues par tomographie aux rayons X montrant la formation de pores isolés dans l'échantillon sous contraintes axiales accrues, résultant de la rupture des particules (Chen et al. 2018).

1.8.3 Distribution de la taille des pores

Lorsqu'un sable est soumis à une contrainte élevée, cela induit des changements dans sa microstructure, notamment au niveau de la taille des pores. Dans leur étude, [Dadda et al. \(2015\)](#) ont analysé l'impact de la rupture des particules sur la distribution de la taille des pores, en effectuant des mesures tensiométriques sur du sable carbonaté sous différentes charges. Les résultats de cette étude, présentés dans la Figure 1.29, montrent la répartition des tailles des pores en fonction des contraintes appliquées. Il en ressort que la taille médiane des pores se déplace avec l'augmentation de la charge, un phénomène attribué à l'effondrement des pores et à la rupture des particules. Ce processus génère plusieurs fragments et particules fines qui viennent combler les vides initiaux dans la structure, ce qui entraîne une réduction progressive de la taille des pores.

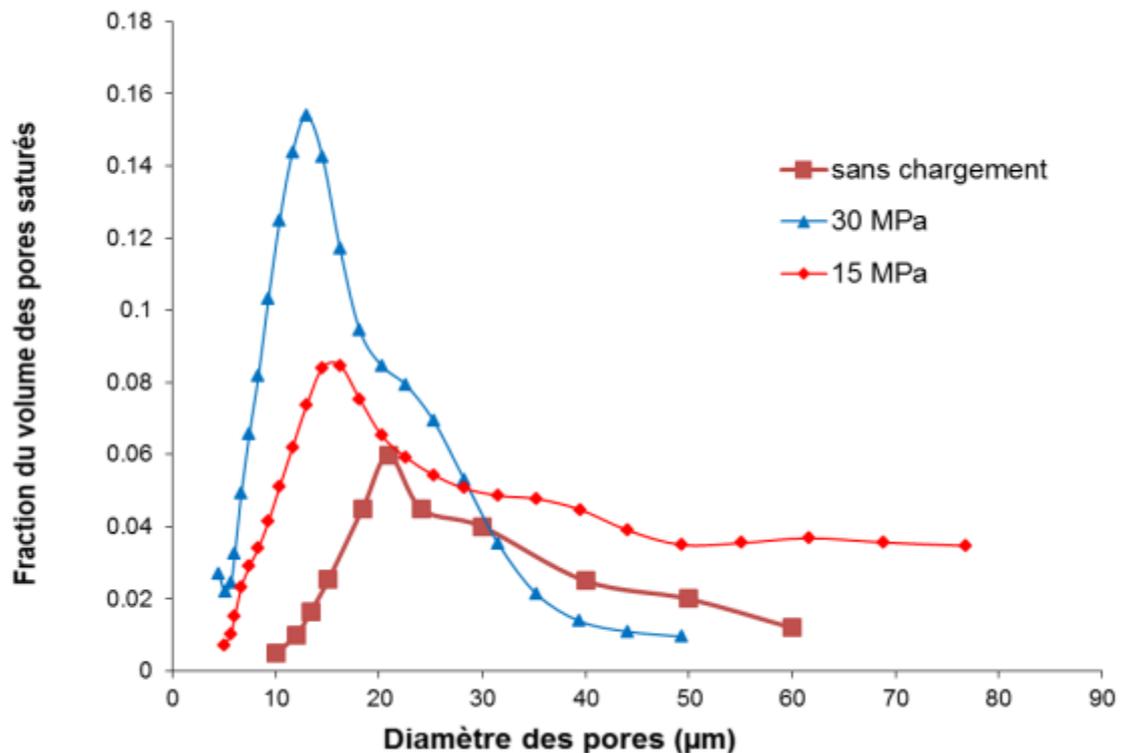


Figure 1.29. Influence de la rupture des particules sur l'évolution de la distribution des tailles des pores - Sable carbonaté ([Dadda et al. 2015](#)).

1.9 Influence de la durée de chargement (Fluage) sur la rupture des particules

De nombreuses recherches se sont penchées sur les effets du temps liés à la rupture des particules (Leung et al., 1996 ; Takei et al., 2001 ; McDowell et Khan, 2003 ; Wang et al., 2011 ; Lade et al., 2010 ; Karimpour et Lade, 2013 ; Andò et al., 2019). Parmi ces études, Takei et al. (2001) ont conduit des essais œdométriques sur quatre types de matériaux compressibles : des barres de craie, des barres de talc, des perles de verre et des particules de quartz. Ils ont démontré que le comportement dépendant du temps sous compression uniaxiale découle principalement d'un processus cyclique comprenant l'écrasement des grains, le réarrangement des particules et la redistribution des contraintes au niveau des contacts intergranulaires. Par ailleurs, Karimpour et Lade (2013) ont réalisé un essai de fluage prolongé sur une période de deux mois en utilisant du sable provenant de la plage de Virginie et un appareil triaxial. Leur analyse a révélé l'absence d'une fin au phénomène de fluage. Selon ces auteurs, le fluage résulterait d'une fatigue statique ou d'une fracture retardée des grains, causant leur écrasement et entraînant un réagencement de la structure granulaire. De leur côté, Lade et al. (2010) ont mené des essais triaxiaux sur du sable corallien, afin d'examiner les effets de fluage et de relaxation. Ils ont observé une déformation progressive au fil du temps, attribuée à une rupture différée des grains, provoquant un effondrement lié à la redistribution des fragments brisés, comme illustré dans la Figure 1.30.

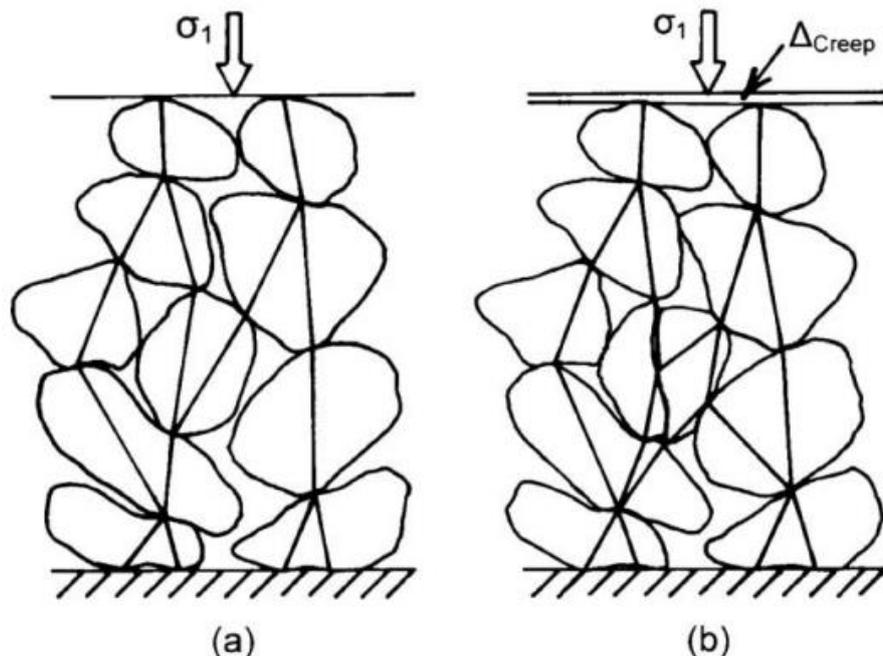


Figure 1.30. (a) Illustration des forces de contact initiales et des effets induits par la rupture des particules, (b) Expérimentation de fluage (Creep) - (Lade et al. 2010).

Dans leur étude, [Andò et al. \(2019\)](#) ont réalisé un essai de fluage de deux heures sur du sable sec soumis à des conditions oedométriques sous une charge axiale de 2,5 MPa. Ils ont utilisé une tomographie par rayons X à haute vitesse et à double résolution de 6,5 μm et 0,65 μm , pour analyser le comportement du matériau. Leurs résultats révèlent que certains petits déplacements observés, comme illustré sur la Figure 1.31, tant en surface qu'à l'échelle des tomographies globales du volume total de l'échantillon, peuvent être attribués, dans certains cas, à une rupture significative de particules individuelles au sein du sable.

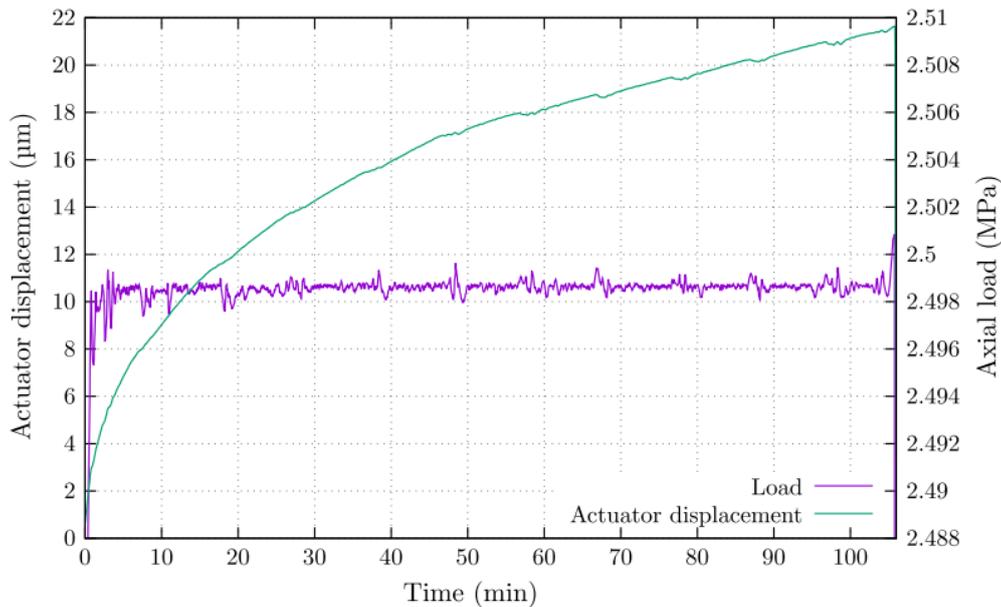


Figure 1.31. Relation entre la charge axiale et le déplacement au cours du temps sous l'effet du fluage ([Andò et al. 2019](#)).

Les résultats obtenus dans l'étude [d'Andò et al. \(2019\)](#), présentés dans la Figure 1.32, montrent que l'analyse à haute résolution réalisée sur un volume relativement petit de 1,3 mm de hauteur et 1,3 mm de diamètre, situé au centre de l'échantillon, révèle des comportements distincts des fissures au niveau des grains. La figure met en évidence deux mécanismes de rupture localisés, identifiés par les cercles bleus **A** et **B**, qui illustrent l'évolution de ces fissures au fil du temps. En bas de la figure, une série chronologique avec un intervalle de 10 minutes détaille l'évolution de ces deux volumes d'intérêt.

Les principaux résultats montrés sur la figure 1.32 sont les suivants :

1- Apparition de la fissure A:

- **Temps écoulé:** Après 20 minutes d'observation, une fissure se forme clairement dans la région **A**.

- **Caractéristiques de la fissure:** Cette fissure est déjà visible et montre une ouverture nette, ce qui suggère qu'elle a commencé à se développer rapidement.

2- Apparition de la fissure B:

- **Localisation:** Une fissure apparaît dans un grain proche, situé directement sous la région B.
- **Temps écoulé:** La fissure dans la région B commence à se former environ 10 minutes après celle de la région A.
- **Comparaison avec A:** Contrairement à la fissure A, la fissure B est plus tardive et n'est pas immédiatement évidente, indiquant qu'elle se forme après un certain temps.

3- Propagation des fissures:

- **Fissure A:** Elle traverse de manière interne le gros du grain, et sa progression est particulièrement rapide dans les 10 premières minutes, ce qui suggère une dynamique de rupture déjà engagée.
- **Fissure B:** La fissure B prend environ 20 minutes pour progresser complètement, ce qui indique un développement plus lent comparativement à la fissure A.

4- Comparaison des ruptures internes:

- **Fissure A:** La fissure A présente une discontinuité notable dès le début de la série chronologique, ce qui pourrait indiquer qu'elle est la réactivation d'une fissure préexistante dans le grain.
- **Fissure B:** Contrairement à la fissure A, la fissure B semble se former de manière plus "fraîche" et pourrait être déclenchée par un événement récent.

5- Hypothèse sur les mécanismes de propagation:

- **Réactivation de la fissure A:** L'hypothèse suggère que la fissure A pourrait être la réactivation d'une fissure déjà présente dans le matériau, expliquant sa rapidité de propagation.
- **Formation de la fissure B:** La fissure B pourrait être initiée par des réarrangements des chaînes de force dans l'assemblage, qui surviennent après la formation de la fissure A.

Ces résultats indiquent que les fissures se développent différemment en fonction de leur nature et de leur localisation dans les particules. Le fluage semble jouer un rôle clé dans la rupture des grains, en particulier pour la fissure A, qui se propage rapidement, suggérant une réactivation d'une fissure existante. Ce comportement pourrait être lié à des mécanismes de fluage prolongés qui affectent la résistance mécanique des particules au fil du temps. La

formation de fissures plus lentes, comme celle observée dans la région **B**, pourrait être le résultat de réarrangements progressifs des chaînes de force sous des conditions de stress accumulé, renforçant l'idée que le fluage influe sur la rupture progressive des particules dans des matériaux soumis à des contraintes sur de longues périodes.

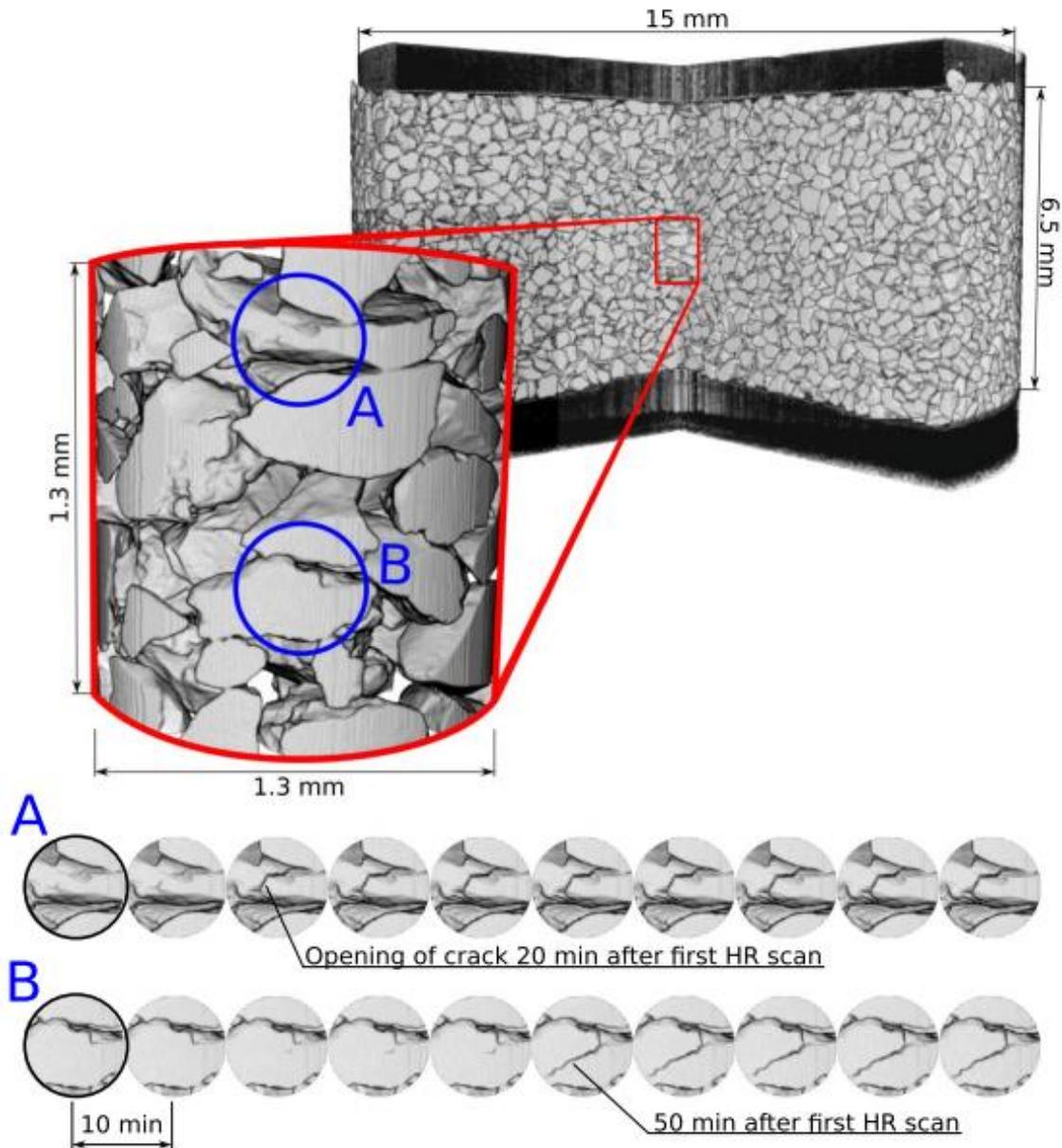


Figure 1.32. Influence de Fluage - Vue 3D d'un scan complet de l'échantillon, avec suivi temporel des positions **A** et **B** sur l'image initiale. Chaque balayage est séparé par un intervalle de 10 minutes (Andò et al. 2019).

1.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté une synthèse bibliographique des principales études publiées sur le phénomène de la rupture des particules dans les matériaux granulaires (sols granulaires) et ses conséquences sur l'évolution des mécanismes d'un système granulaire (assemblage granulaire) soumis à des sollicitations mécaniques (contraintes).

Dans un premier temps, nous avons décrit la rupture de particules sur un grain individuel et la rupture des particules sous l'effet de la Compression Unidimensionnelle. Nous avons également exposé les méthodes les plus couramment utilisées dans la littérature pour mesurer le taux de rupture des particules dans un matériau granulaire.

Ensuite, nous avons présenté divers facteurs influençant ce phénomène, notamment: l'influence de la composition minérale, l'effet de la morphologie des particules, l'influence de la distribution granulométrique initiale, l'influence de la densité initiale, et l'effet de la saturation (Teneur en eau).

Nous avons également exploré les conséquences de la rupture des particules sur certaines propriétés des matériaux granulaires, telles que: le changement de la distribution de la taille des grains, la variation de la perméabilité, et la modification de la taille des pores.

Enfin, nous avons analysé l'influence de la durée de chargement (Fluage) sur la rupture des particules dans les matériaux granulaires.

La littérature scientifique relative à ce sujet est particulièrement riche et offre des résultats approfondis permettant de mieux comprendre le phénomène de la rupture des particules dans les matériaux granulaires. Ces études démontrent que les changements observés à l'échelle macroscopique dans un matériau granulaire sont directement liés aux changements se produisant à l'échelle microscopique (à l'échelle des particules). Cependant, ces travaux requièrent des données expérimentales précises sur la rupture des grains à cette échelle. Par exemple, des informations quantitatives en trois dimensions (3D), obtenues grâce à des techniques telles que la tomographie aux rayons X, sont essentielles pour explorer efficacement les modifications microstructurales liées à la rupture des particules, tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

Chapitre 2. Imagerie 3D par Tomographie aux Rayons-X en Géomécanique

2.1 Introduction

Les matériaux granulaires sont constitués de particules individuelles qui interagissent entre elles de manière complexe et souvent imprévisible. Par conséquent, l'analyse des propriétés microstructurales à l'échelle des particules (échelle microscopique) à l'aide des équipements de laboratoire se heurte à une limitation importante: ces outils ne permettent pas d'évaluer directement les caractéristiques microstructurales au niveau précis des particules elles-mêmes.

La Tomographie 3D par rayons X représente une avancée majeure dans le domaine de la géomécanique expérimentale. Cette méthode, non destructive, est particulièrement bien adaptée à l'analyse des géomatériaux. Elle permet d'observer et d'explorer en détail l'intérieur d'un objet ou d'un système granulaire, sans en altérer l'intégrité. En outre, la sensibilité des rayons X à la densité atomique constitue un atout essentiel pour l'étude des milieux granulaires, car elle facilite la différenciation entre les phases poreuses et solides, offrant ainsi une compréhension approfondie de leur structure interne.

De nombreuses études ont été menées afin de mesurer et d'analyser avec précision diverses caractéristiques des particules, notamment leur morphologie, leur taille, leur forme, leur orientation, ainsi que des phénomènes tels que la rupture des particules et leur cinématique. Ces travaux se sont également penchés sur des propriétés micro-mécaniques telles que le nombre de coordination, les surfaces de contact et l'orientation des points de contact. Ces analyses reposent sur des images 3D obtenues grâce à la tomographie aux rayons X, comme en témoignent les contributions de plusieurs chercheurs (Al-Raoush, 2007 ; Andò, 2013 ; Alshibli et al., 2014 ; Druckrey et Alshibli, 2014 ; Druckrey et al., 2015 ; Zhao et al., 2015 ; Mahbub et Haque, 2016 ; Karatza et al., 2017 ; Karatza et al., 2018 ; Guida et al., 2018 ; Zhao et al., 2019 ; Andò et al., 2019). Ces études montrent que les changements observés à l'échelle macroscopique (réponse globale) dans un matériau granulaire sont directement liés aux changements qui se produisent à l'échelle microscopique (échelle des particules).

Ce chapitre explore le contexte de la tomographie aux rayons-X (XCT). Il débute par un aperçu historique de la découverte des rayons X et de leur première application en médecine. Des explications détaillées sont fournies sur le processus de reconstruction d'une image 3D à partir de la tomographie aux rayons-X. Enfin, nous présentons certains des principaux

travaux de recherche utilisant des images 3D en géomécanique pour analyser la déformation et la cinématique des systèmes granulaires, ainsi que des grains individuels.

2.2 Histoire des rayons-X

Les rayons X ont été découverts en 1895 par Wilhelm Conrad Röntgen, un physicien allemand, alors qu'il expérimentait les rayons cathodiques dans un tube à vide. Il a observé qu'un écran fluorescent dans son laboratoire brillait malgré son blindage, indiquant la présence d'un type de rayonnement inconnu, qu'il a nommé « rayons X » (le « X » désignant l'inconnu). En quelques mois, les rayons X ont été appliqués en médecine, la première image radiographique médicale étant celle de la main de la femme de Röntgen (comme illustré sur la Figure 2.1), mettant en valeur ses os et son alliance. Les premiers appareils à rayons X sont rapidement devenus un outil essentiel dans les diagnostics médicaux, malgré l'absence de mesures de sécurité adéquates, ce qui a entraîné des risques importants d'exposition aux radiations. Au fil du temps, les progrès technologiques ont introduit un blindage en plomb, des techniques d'imagerie améliorées et des protocoles de sécurité plus stricts, améliorant considérablement leur sécurité et leur efficacité. L'avènement de la Tomographie aux rayons X (XCT) dans les années 1970 a marqué une étape majeure, permettant une imagerie 3D détaillée à des fins médicales et de recherche. Aujourd'hui, les rayons X sont indispensables dans de nombreux domaines, notamment la médecine (par exemple, le diagnostic, la dentisterie et la mammographie), l'industrie (par exemple, l'inspection et la sécurité des matériaux) et la recherche scientifique (par exemple, la géomécanique, la cristallographie et l'analyse de la structure atomique). La découverte révolutionnaire de Röntgen lui a valu le premier prix Nobel de physique en 1901 et reste une pierre angulaire de la science et de la médecine modernes.

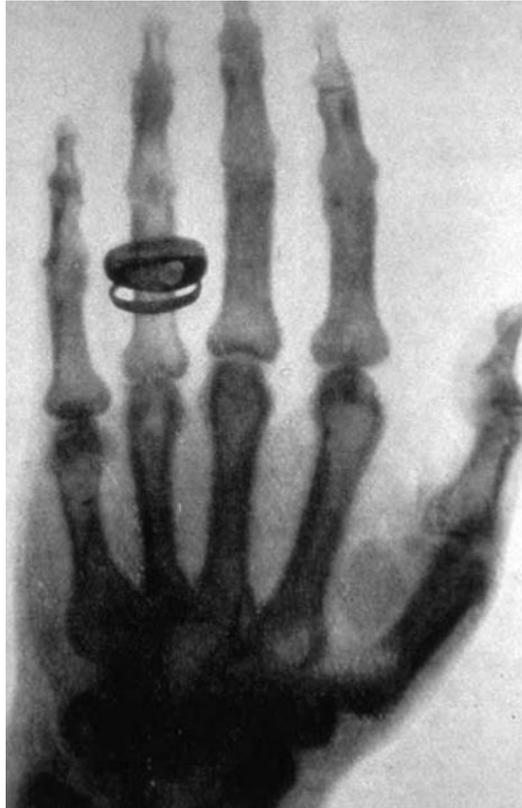


Figure 2.1. Première radiographie de l'histoire, réalisée par Wilhelm Röntgen à l'aide des rayons X. La main de la femme de Röntgen.

2.3 Acquisition des images 3D par la Tomographie aux rayons-X

La Micro-Tomographie aux rayons X (XCT) est une technique permettant de visualiser en trois dimensions (3D) la structure interne d'un objet scanné. Elle repose sur la reconstruction d'un champ 3D des coefficients d'atténuation des rayons X à partir d'une série de radiographies prises sous différents angles.

Une radiographie correspond à une projection bidimensionnelle (2D) de l'atténuation des rayons X traversant la matière d'un objet scanné. Plus précisément, il s'agit d'une mesure 2D de l'intensité des photons de rayons X atteignant chaque point du détecteur (souvent une plaque photographique) après un temps d'exposition donné. Par exemple, la figure 2.2 illustre deux radiographies d'échantillons étudiés par [Karatza \(2018\)](#).

Pour obtenir cette série de radiographies, l'objet scanné est placé sur une platine rotative située entre une source de rayons X et un détecteur. En effectuant une rotation relative de l'objet, des images sont capturées sous différents angles, ce qui permet de reconstruire son

volume en 3D. Behnsen et al. (2023) ont illustré ce processus d'acquisition d'images 3D par tomographie aux rayons X, comme montré dans la Figure 2.3.

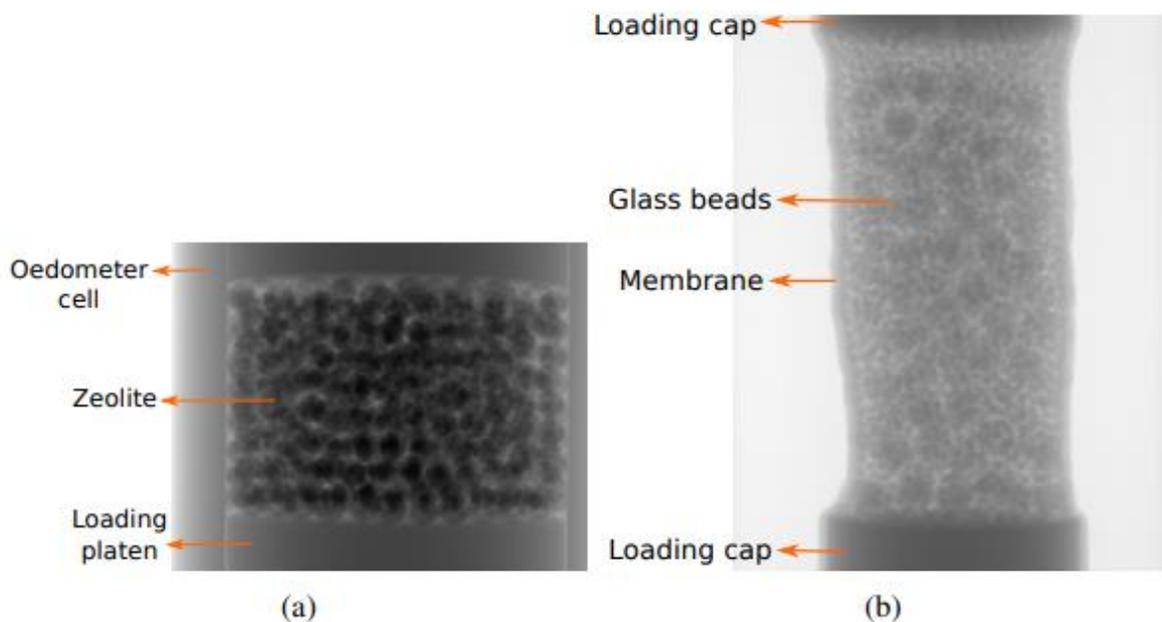


Figure 2.2. Exemples de radiographies obtenue par un scan à rayons-X ; a) Particules de sable zéolite dans l'oedomètre ; b) Échantillon de billes de verre pour essai triaxial. (Karatzas 2018).

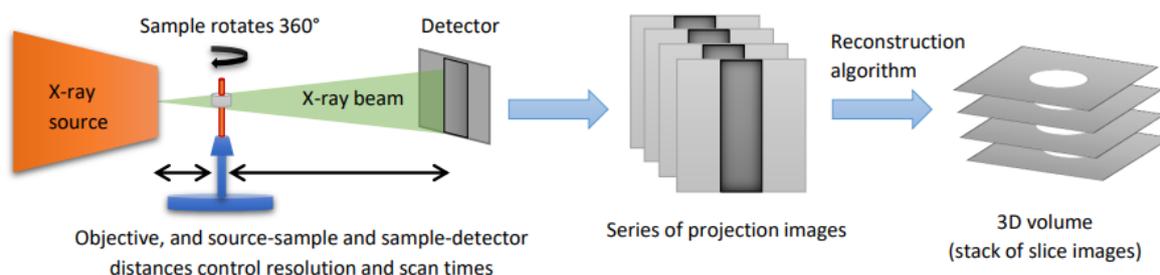


Figure 2.3. Schéma d'un système d'acquisition des images 3D par la Micro-Tomographie aux rayons-X (Behnsen et al. 2023).

Un objet est positionné entre une source de rayons X et un détecteur. La source émet un faisceau polychromatique, c'est-à-dire composé de photons possédant un large spectre d'énergies. Ce faisceau interagit avec l'objet à scanner, qui est généralement constitué d'un appareil et d'un échantillon.

Les photons qui traversent l'objet sans être absorbés sont capturés par un détecteur, générant une projection bidimensionnelle (2D) appelée radiographie. Cette projection correspond à l'atténuation des rayons X de l'objet dans sa totalité, selon une orientation donnée. Chaque matériau possède un coefficient d'atténuation des rayons X (**noté μ**), directement lié à sa densité, comme l'explique l'équation 2.1. Ce coefficient caractérise la facilité avec laquelle un faisceau de rayons X d'une intensité initiale (I_0) peut traverser le matériau.

Lorsqu'un faisceau traverse l'objet scanné, son intensité est réduite à (I) en raison de l'absorption partielle des photons. L'épaisseur (x) du matériau joue également un rôle déterminant dans le degré d'atténuation du faisceau. Ces paramètres sont décrits par la **loi de Beer-Lambert** :

$$I = I_0 e^{-\sum_{i=1}^N \mu_i x} \quad (2.1)$$

Où N représente le nombre de matériaux différents composant l'objet scanné.

Selon [Als-Nielsen et McMorro \(2011\)](#), la section efficace d'absorption photoélectrique (σ_{pe}) est liée au coefficient d'atténuation par l'équation suivante :

$$\mu = \left(\frac{\rho_m N_A}{M} \right) \sigma_{pe} \quad (2.2)$$

Ici :

- ρ_m est la masse volumique,
- N_A est le nombre d'Avogadro,
- M est la masse molaire.

De plus, la section efficace d'absorption photoélectrique varie en fonction du numéro atomique de l'élément absorbant. Cette variation est à l'origine du contraste observé entre différents matériaux dans l'image tomographique.

Pour reconstruire une image 3D d'un objet scanné, plusieurs radiographies sont prises sous différentes orientations. Cela implique de faire tourner l'objet de quelques dixièmes de degré après chaque acquisition. Lorsque le faisceau est de forme conique, une rotation complète de 360° est nécessaire ([Hsieh et al., 2013](#)). En revanche, si le faisceau est parallèle, une rotation

de 180° suffit (Cierniak, 2006, 2011). Une fois les radiographies collectées, un processus d'inversion est appliqué pour générer une image 3D. Ce processus repose sur l'utilisation de l'algorithme de rétroprojection filtrée (Feldkamp et al. 1984).

L'image 3D, ou volume 3D, est reconstruite sous forme d'une série de tranches successives. Ces tranches, une fois empilées, forment une représentation tridimensionnelle pouvant être découpée et explorée dans n'importe quelle orientation.

Après l'obtention d'images 3D par tomographie aux rayons X, ces images nécessitent une analyse et un traitement approfondis afin de réaliser des mesures précises sur les composants de l'objet scanné. Par exemple, dans notre étude portant sur un matériau granulaire, tel qu'un sable carbonaté, ces traitements sont essentiels pour extraire des informations détaillées.

Plusieurs logiciels couramment utilisés permettent de visualiser et de traiter des images 3D, notamment ImageJ (ou sa version améliorée, Fiji), Visilog et Avizo Fire. Par ailleurs, les mesures sont généralement effectuées à l'aide de programmes comme Matlab ou Python. Dans notre étude, nous avons principalement utilisé Fiji, Visilog et Matlab pour mener nos analyses.

Les principales étapes du traitement des images 3D issues de la tomographie par rayons X d'un matériau granulaire comprennent : la séparation des phases solides et vides (binarisation), la segmentation des particules et l'identification des particules (étiquetage).

- **La binarisation** consiste à créer une image binaire (par exemple, en noir et blanc), où tous les voxels représentant la phase solide ont une valeur, tandis que tous les autres voxels représentent la phase vide avec une autre valeur. L'approche d'Otsu (1979) est largement utilisée pour la séparation de la phase vide et solide (grains et air).
- **La segmentation des particules** consiste à isoler les grains les uns des autres. La méthode la plus couramment utilisée à cette étape est l'algorithme de la ligne de partage des eaux (Watershed).
- **L'identification des particules (étiquetage)** consiste à attribuer à chaque particule une étiquette unique, permettant ainsi de définir et d'identifier chaque particule de manière individuelle.

Karatza (2018) présente de manière schématique l'ensemble de la procédure de tomographie par rayons X, allant de l'acquisition des données à leur reconstruction, ainsi que les stratégies typiques de traitement d'image, comme l'illustre la figure 2.4.

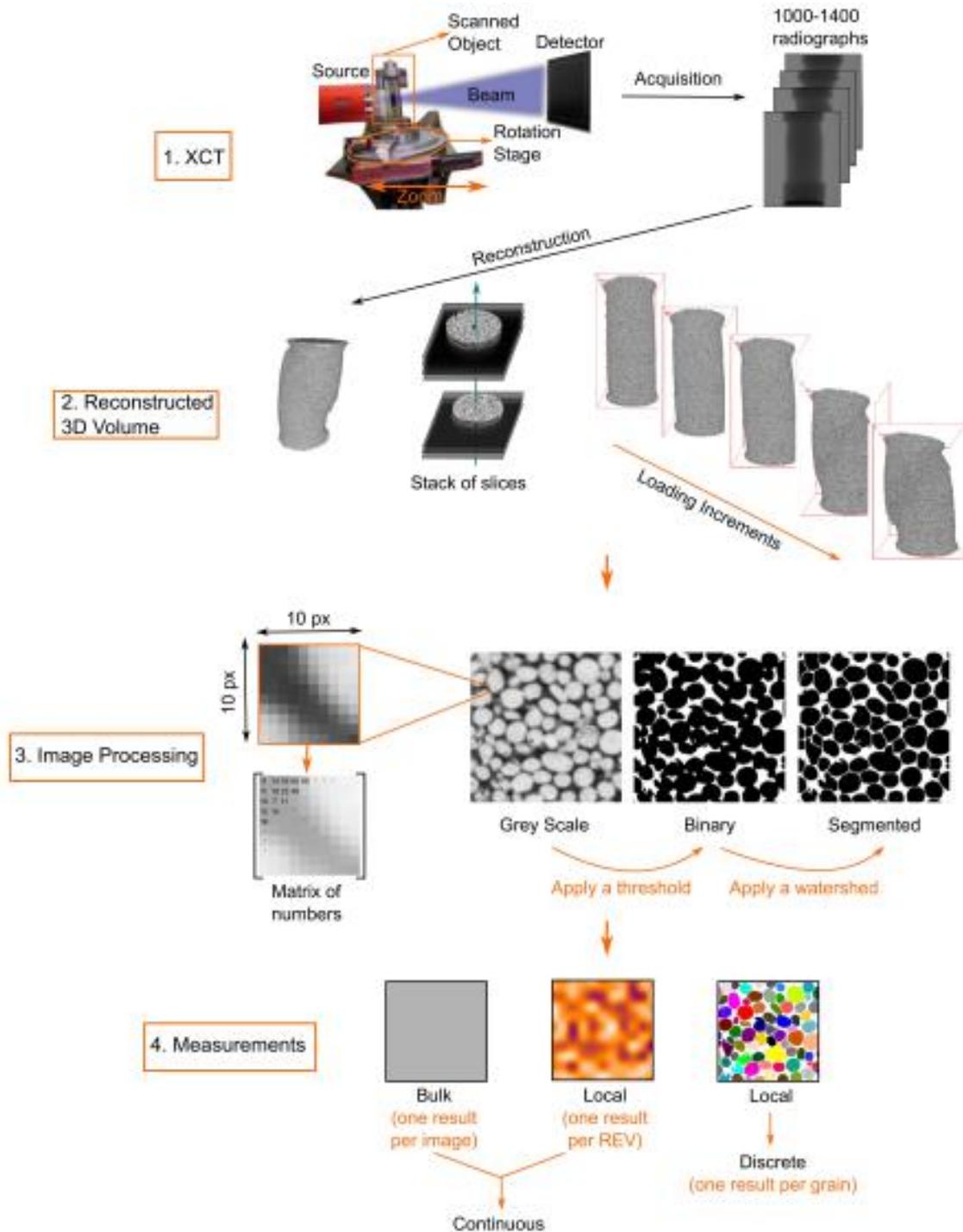


Figure 2.4. Description schématique de l'acquisition d'images 3D par tomographie aux rayons-X d'un matériau granulaire et du traitement des images (Karatza 2018).

2.4 Tomographie aux rayons-X en Géomécanique

La tomographie aux rayons X est une technique permettant de visualiser les processus en trois dimensions (3D) et d'effectuer des mesures 3D au niveau de la microstructure interne des matériaux granulaires. En géomécanique, cette technique a été largement utilisée dans de nombreuses études approfondies basées sur le traitement d'images 3D obtenues par tomographie aux rayons X.

Certaines recherches ont utilisé cette technique pour étudier la localisation des déformations dans les matériaux granulaires (par exemple, [Colliat-Dangus et al., 1988](#) ; [Desrues et al., 1996](#)). D'autres travaux ont exploré l'application de la tomographie aux rayons X sur les géomatériaux ([Otani et Obara 2004](#) ; [Desrues et Viggiani 2004](#) ; [Desrues et al., 2010](#)).

[Oda et al. \(2004\)](#) ont observé les changements survenus dans la microstructure d'une bande de cisaillement à partir de sections minces post-mortem. Ces observations ont été complétées par l'utilisation de la tomographie aux rayons X (XCT), offrant une perspective tridimensionnelle et détaillée des transformations internes. [Hall et al. \(2010\)](#) ont introduit une méthodologie novatrice pour suivre les déplacements et les rotations des particules individuelles au cours d'incrément de chargement successifs. En utilisant des images obtenues par tomographie aux rayons X sur des échantillons de sable, ils ont démontré la capacité de cette approche à capturer les cinématiques internes de manière précise et en temps réel. [Hasan et Alshibli \(2012\)](#), ainsi que [Druckrey et Alshibli \(2016\)](#), se sont intéressés à la cinématique des particules dans des bandes de cisaillement en mettant en évidence les différences d'échelle dans les rotations des particules. Leur travail, basé sur des essais de compression triaxiale combinés à des analyses par tomographie aux rayons X, a permis de distinguer les comportements cinématiques entre les particules situées à l'intérieur et à l'extérieur de la bande de cisaillement. [Fonseca et al. \(2012\)](#) ont insisté sur l'importance d'utiliser des images 3D pour caractériser la morphologie des particules. Leur étude comparant les mesures bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D) a révélé des écarts significatifs dans plusieurs paramètres liés à la forme des particules, mettant ainsi en avant les limites des analyses 2D pour appréhender les caractéristiques complexes des sols granulaires. Dans des travaux complémentaires, [Fonseca et al. \(2013a, b\)](#) ont approfondi l'analyse de la structure du sol en développant des outils de quantification basés sur des paramètres directionnels et scalaires. Ils ont exploité des images obtenues par tomographie aux rayons X et par microscopie électronique à balayage (MEB) à haute résolution sur des sous-

échantillons reconstitués, issus d'un échantillon ayant subi un essai triaxial conventionnel. Ces études ont fourni des données essentielles pour relier les caractéristiques microstructurales aux comportements macroscopiques du sol.

Zhao et al. (2015) ont étudié le comportement de fracture de particules individuelles (évolution de la forme et énergie de rupture) de deux types différents de sable naturel et ont acquis des images avec une résolution de quelques micromètres (nanoXCT). Ils ont montré un lien entre l'hétérogénéité initiale de la microstructure des particules (par exemple, les vides) et le type de fracture ainsi que la forme et la taille des fragments. La figure 2.5 illustre une visualisation du processus de fracture d'une particule individuelle de sable, présentée par Zhao et al. (2015). Ces résultats mettent en évidence l'efficacité précieuse de la tomographie aux rayons X pour observer et analyser la rupture des particules à l'échelle microscopique.

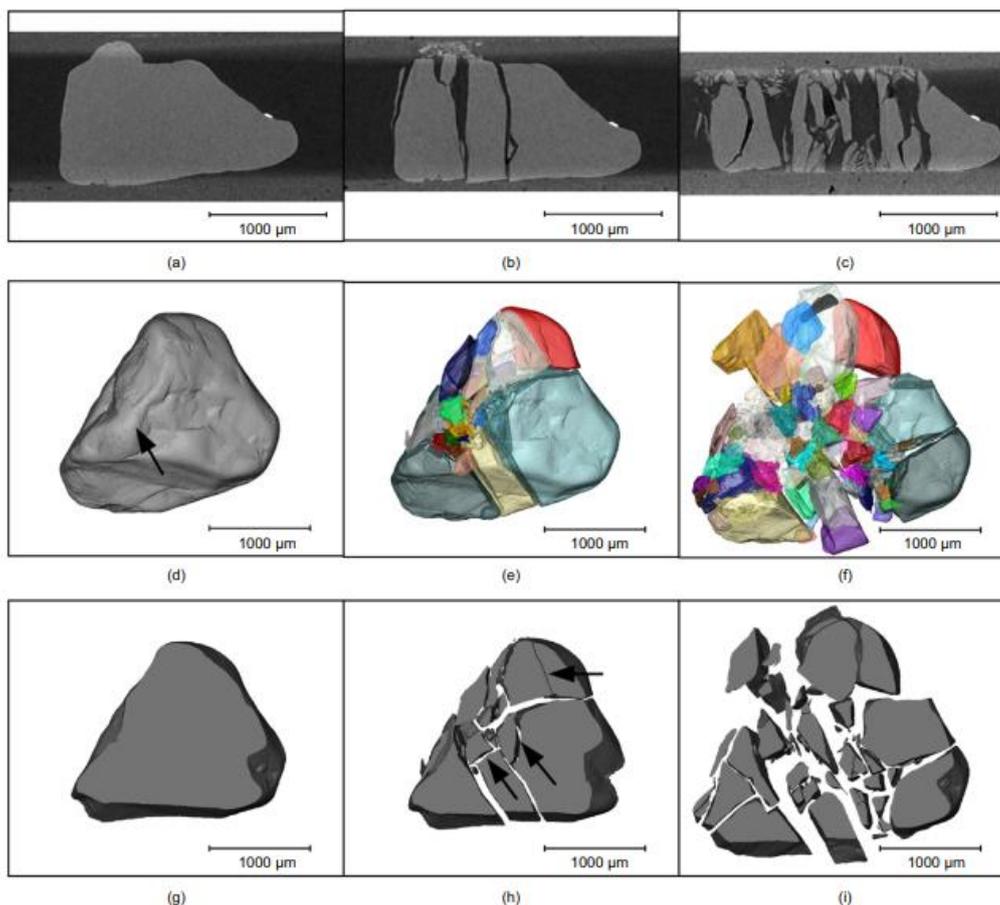


Figure 2.5. Visualisation du processus de fracture du LBS-1 (particule d'un sable) à partir de trois scans : (a–c) tranches 2D parallèles à la direction de chargement ; (d–f) images 3D étiquetées en vue de dessus ; (g–i) sections des images segmentées de seuillage en vue de dessus. (Zhao et al. 2015).

Cil et Alshibli (2014) ont étudié l'évolution de la fracture du sable sous compression 1D (œdométrique). Ils ont étudié l'effet du rapport d'élanement d'un échantillon de sable de granulométrie uniforme, ont utilisé des images du synchrotron pour visualiser les grains (nombre, position et déformation) et ont ensuite fait une comparaison qualitative du processus de déformation avec un modèle de méthode des éléments discrets (DEM) comme illustré sur la figure 2.6.

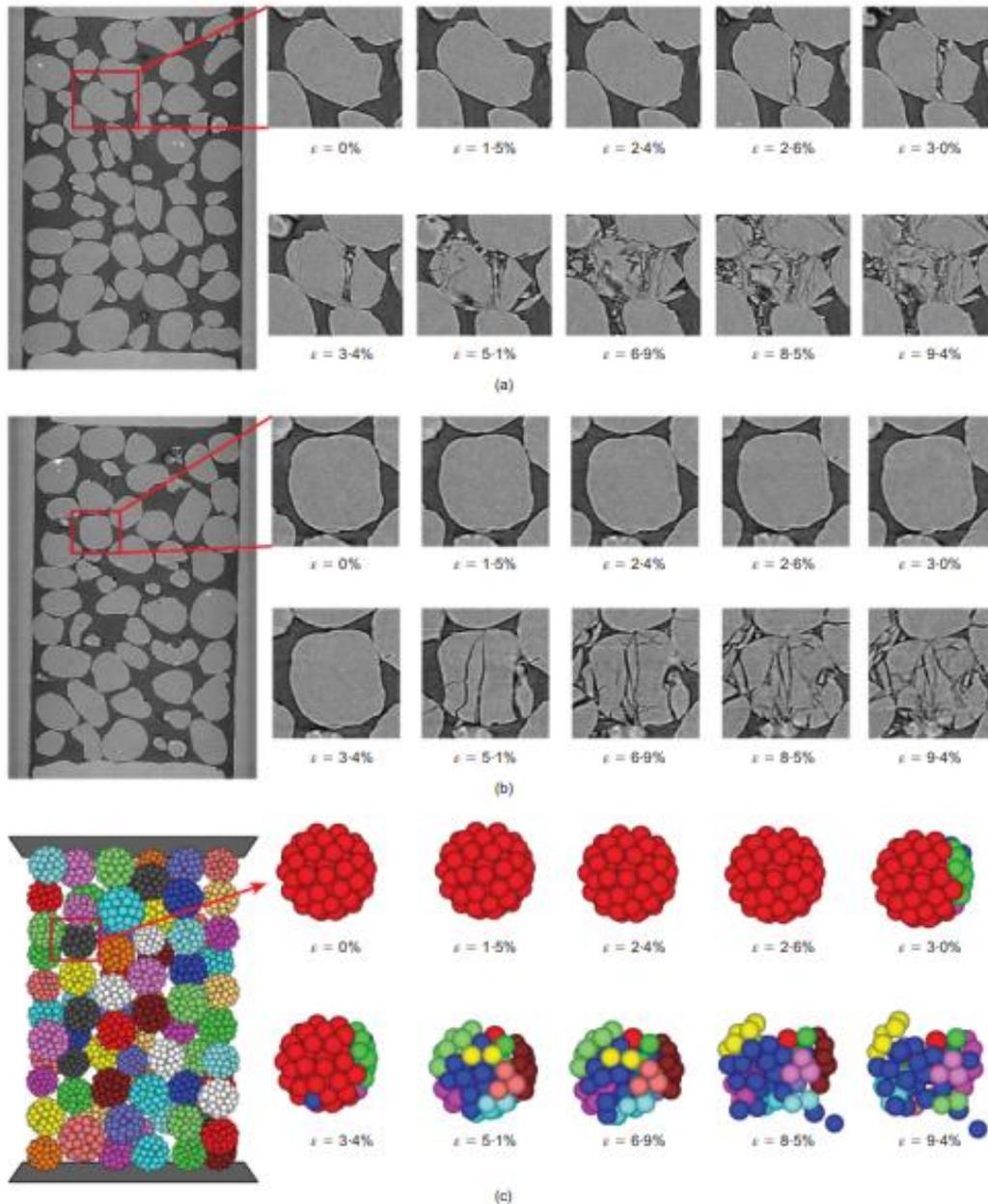


Figure 2.6. Exemples de mécanismes de fracture de particules individuelles lors d'une compression 1D : (a) et (b) dans les images SMT ; (c) dans le modèle DEM (Cil et Alshibli 2014).

Guida et al. (2018) ont effectué des tests de compression unidimensionnelle sur un sable artificiel à haute porosité, utilisant la tomographie par rayons X pour suivre, en trois dimensions, l'évolution des particules. Grâce à cette technique, ils ont pu, pour la première fois, observer le comportement des particules et fournir une mesure objective de la durée de vie de chaque particule dans un matériau très poreux. La figure 2.7 présente les résultats de Guida et al. (2018), qui illustrent l'identification de trois particules ayant survécu tout au long du processus de compression.

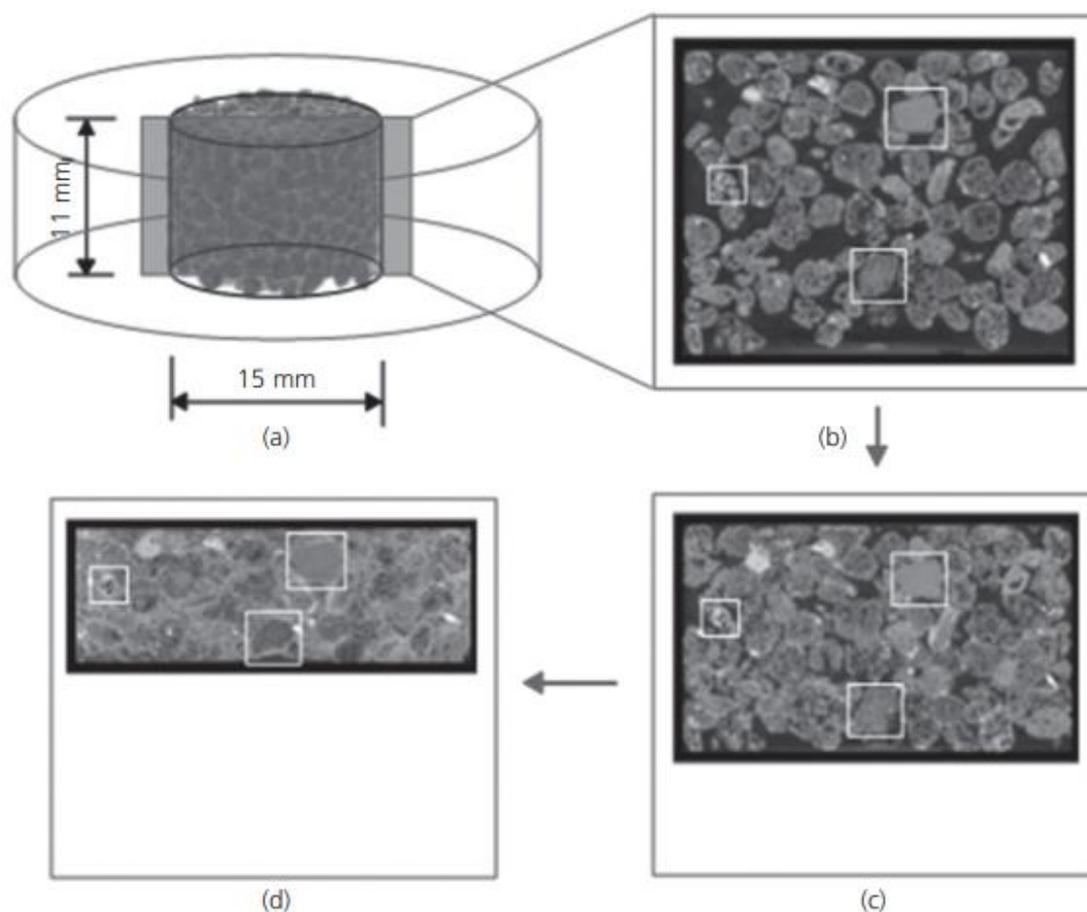
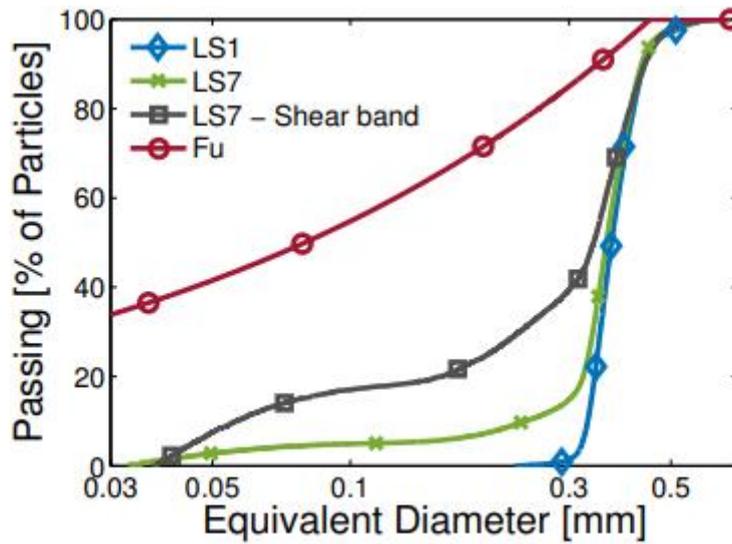
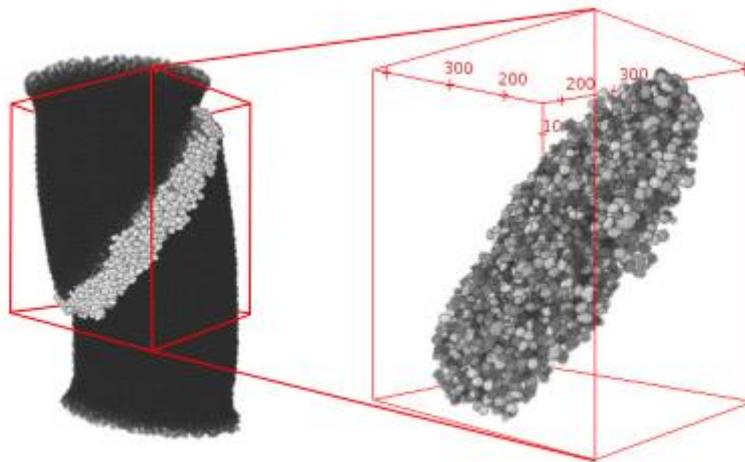


Figure 2.7. Configuration et résultats de l'essai : (a) reconstruction 3D de l'échantillon ; (b-d) tranches verticales augmentant les étapes de chargement. Trois particules survivant tout au long de la compression sont identifiées. (Guida et al. 2018).

Karatzas (2018) a étudié l'effet de la rupture des particules sur un sable composé de Caicos oïdes à travers des essais de compression triaxiale et de tomographie par rayons X. À partir des images 3D obtenues par tomographie, Karatzas (2018) a quantifié la distribution granulométrique sur l'ensemble de l'échantillon ainsi que dans la bande de cisaillement. Les résultats de cette étude sont présentés dans la figure 2.8.



(a)



(b)

Figure 2.8. Détermination de la rupture totale de l'échantillon entier et de la bande de cisaillement et b) Image 3D des grains dans la bande de cisaillement de l'essai TXC1.

(Karatzas 2018).

Andò et al. (2019) ont mené un essai de fluage d'une durée de 2 heures sur du sable sec à l'aide d'un dispositif oedométrique, appliquant une contrainte de 2,5 MPa. Pour cela, ils ont utilisé une tomographie par rayons X à haute vitesse offrant une double résolution de 6,5 μm et 0,65 μm . Par ailleurs, les auteurs ont réalisé un balayage local détaillé sur une zone limitée, mesurant 1,3 mm de hauteur et 1,3 mm de diamètre, située au centre de l'échantillon. Les résultats de leur étude, présentés dans la figure 2.9, illustrent clairement l'influence du fluage sur la rupture des particules ainsi que sur la propagation des microfissures à l'intérieur de celles-ci. Ces observations confirment que la tomographie aux rayons X constitue une méthode précise et efficace pour suivre avec une grande finesse l'évolution des microfissures à l'échelle des particules.

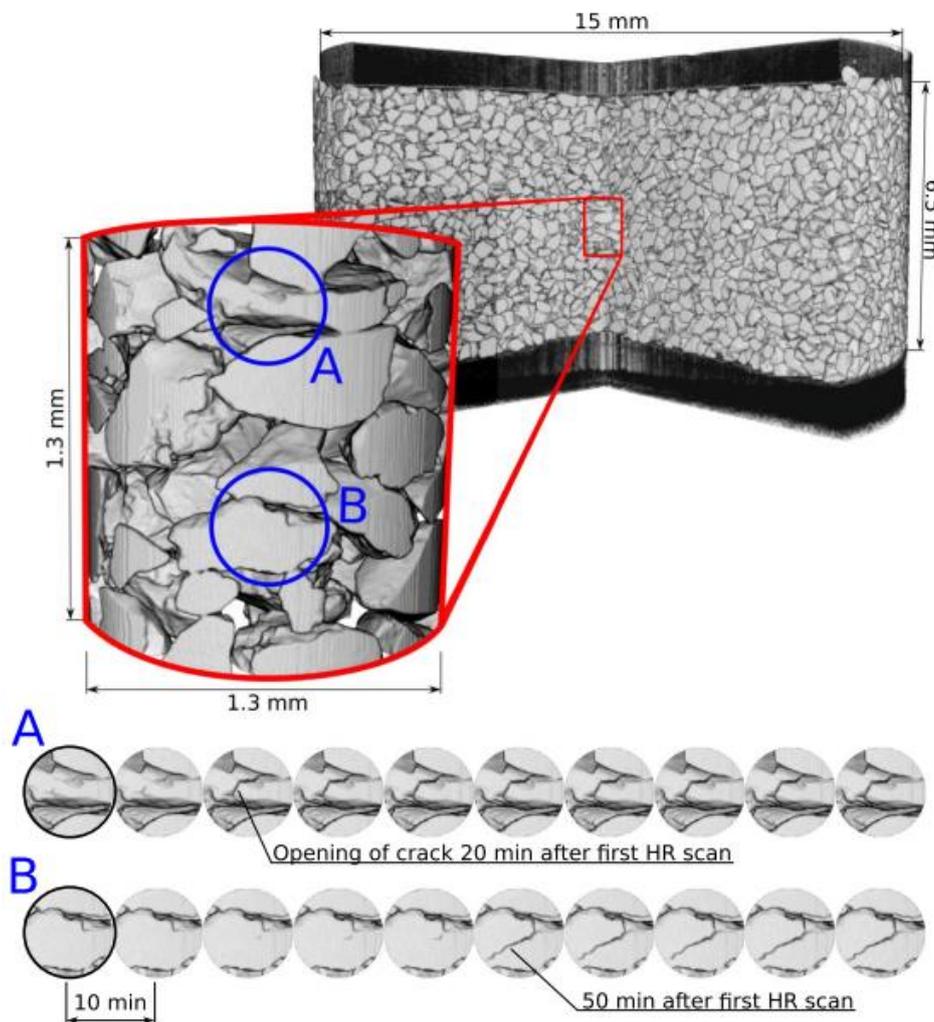


Figure 2.9. Vue 3D d'un scan complet de l'échantillon, avec suivi temporel des positions **A** et **B** sur l'image initiale. Chaque balayage est séparé par un intervalle de 10 minutes (Andò et al. 2019).

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté le principe de l'imagerie 3D par tomographie aux rayons X en géomécanique expérimentale, notamment pour l'étude des matériaux granulaires. Nous avons débuté par un aperçu historique de la découverte des rayons X et de leur développement, jusqu'à ce qu'ils deviennent l'un des outils les plus utilisés dans divers domaines, dont la géomécanique.

Nous avons ensuite détaillé la méthode d'acquisition des images 3D par tomographie aux rayons X, en plaçant un échantillon entre une source de rayons X et un détecteur. Nous avons également expliqué les étapes essentielles du traitement et de l'analyse des images tridimensionnelles obtenues par cette technique.

Enfin, nous avons présenté quelques travaux significatifs de la littérature qui utilisent l'imagerie 3D par tomographie aux rayons X pour étudier les changements microscopiques dans les matériaux granulaires. Ces études ont permis une analyse approfondie des modifications microscopiques des matériaux, en abordant des aspects essentiels tels que la cinématique des particules, la morphologie des particules, la distribution de la taille des particules et la rupture des particules.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons le matériau étudié dans ce travail ainsi que les techniques expérimentales utilisées. Nous aborderons également l'imagerie 3D par tomographie aux rayons X appliquée à un sable carbonaté soumis à différents niveaux de contrainte oedométrique à haute pression.

Chapitre 3. Caractéristiques des Matériaux et Méthodes d'Analyse Expérimentale

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous débutons par une présentation détaillée du matériau étudié (un sable carbonaté, caractérisé par des grains de taille supérieure à 1,6 mm). Nous décrivons ses propriétés physiques et granulométriques, en mettant en avant sa composition chimique, sa forme, sa structure interne et les spécificités qui le distinguent des autres types de sables. Cette analyse permet de mieux comprendre le comportement mécanique du matériau.

Nous abordons ensuite les dispositifs expérimentaux utilisés pour l'étude. Le dispositif œdométrique à haute pression est présenté en détail, avec une explication de son principe de fonctionnement, des conditions expérimentales appliquées (charge) et des mesures effectuées (déformation). Le dispositif de mesure granulométrique, basé sur la technique de tamisage, est également décrit afin d'illustrer la répartition des tailles de particules dans les échantillons étudiés. Enfin, le dispositif de mesure de la perméabilité (Tube de Mariotte) est présenté, en précisant la méthode employée pour quantifier la capacité du sable à permettre l'écoulement des fluides sous différentes contraintes.

Nous poursuivons en détaillant l'étude expérimentale des tests de fluage, menée sur des échantillons œdométriques de sable carbonaté dont la taille des grains dépasse 1,6 mm. Ce programme inclut plusieurs étapes: la préparation des échantillons, les chargements appliqués, les conditions de saturation, la densité des échantillons, ainsi que les durées des essais (Fluage). Les résultats obtenus sont analysés pour évaluer les effets du fluage sur la microstructure et la rupture des particules de sable sous différentes contraintes.

Enfin, nous décrivons l'acquisition des images 3D par tomographie aux rayons X. Cette technique permet d'observer et de quantifier les changements microstructuraux du sable carbonaté sous différents niveaux de contrainte (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Nous présentons également les techniques de traitement et d'analyse des images 3D, ainsi que les méthodes de calcul des propriétés microstructurales telles que la porosité, la surface spécifique (SSA) et la distribution des tailles des pores. Enfin, nous abordons les méthodes de calcul des propriétés de contact, telles que le nombre de coordination et les surfaces de contact inter-particulaires.

3.2 Caractéristiques du Matériau et Méthodes Expérimentales

3.2.1 Description du Matériau (Sable Carbonaté)

Dans le cadre de ce travail, un sable carbonaté a été choisi en raison de sa fragilité (Coop et al., 2004). Ce sable est constitué principalement de matériaux d'origine biologique, notamment des fragments de coraux, des coquilles de mollusques et des algues calcifiées. Sa composition chimique est dominée par la calcite (CaCO_3), qui représente 98 % de sa masse. Cette forte teneur en calcite confère au matériau des propriétés mécaniques et physiques caractéristiques des sables carbonatés.

Les analyses réalisées sur ce sable, par la Microscopie électronique à Balayage (MEB) et de la Micro-Tomographie aux rayons-X, sont illustrées à la figure 3.1. Ces observations révèlent que les grains présentent une morphologie anguleuse, avec des surfaces irrégulières ornées de petites aspérités de l'ordre de quelques micromètres. Cette rugosité microscopique peut influencer les propriétés de contact entre les grains, ce qui joue un rôle déterminant dans le comportement mécanique du matériau.

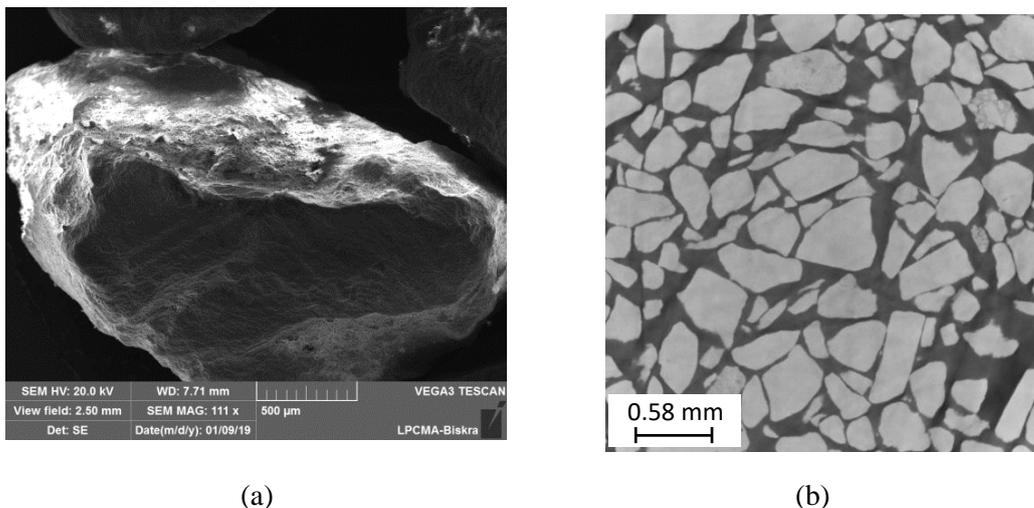


Figure 3.1. (a) Image obtenue par Microscope électronique à Balayage (MEB), (b) Observation par Micro-tomographie à rayons-X - Sable Carbonaté.

Afin d'exploier la rupture des particules dans les essais, un tamis de 1,6 mm a été utilisé pour éliminer les grains de plus petite taille. Après ce tamisage, la courbe granulométrique du sable a été établie et est présentée dans la figure 3.2. Elle illustre la distribution des tailles des grains après traitement. Par ailleurs, les caractéristiques physiques principales, telles que, le diamètre moyenne, le coefficient d'uniformité, la densité volumique, et les indices de vide minimum et

maximum, sont récapitulées dans le tableau 3.1, fournissant ainsi des informations essentielles pour la caractérisation du matériau.

Conformément à la classification des sols USCS (Unified Soil Classification System), ce sable est catégorisé dans la classe des sols à gros grains. Cette classification souligne l'importance de la taille des particules dans les propriétés géomécaniques du sable et permet de situer ce matériau dans un contexte plus large d'ingénierie des sols.

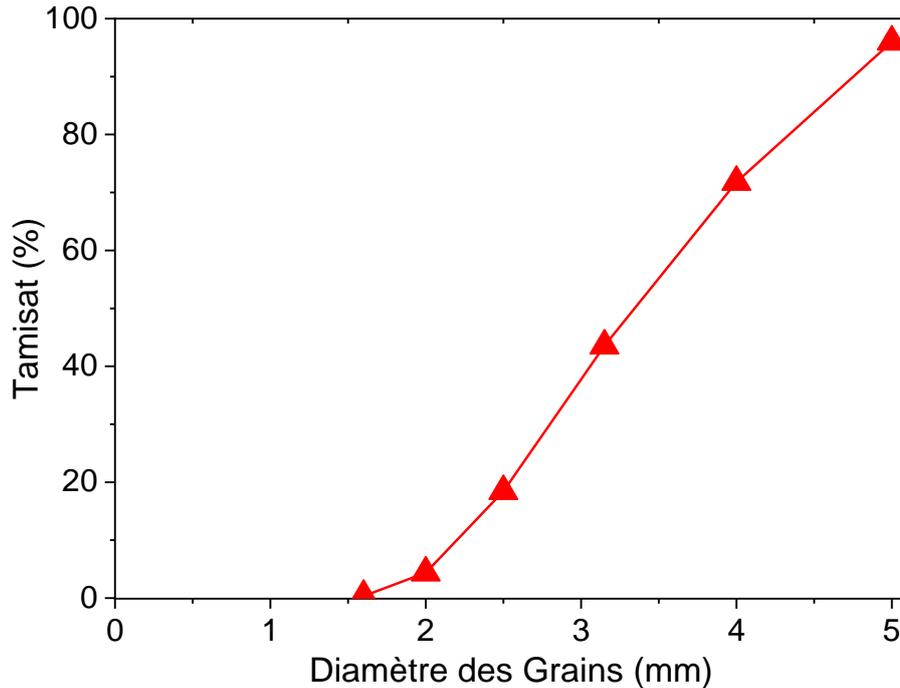


Figure 3.2. Distribution granulométrique du sable étudié (Sable Carbonaté).

Tableau 3.1. Caractéristiques du sable étudié (sable carbonaté).

Sable	$D_{50}(mm)$	C_u	e_{min}	e_{max}	$\rho_s(g/cm^3)$
Sable Carbonaté	2.85	1.53	0.52	0.84	2.65

3.2.2 Méthodes de caractérisation du matériau étudié

3.2.2.1 Détermination des indices des vides minimum et maximum

Pour calculer l'indice de densité, I_D on utilise la relation suivante :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.1)$$

Où e_{min} est le taux de vide pour l'état le plus dense possible, e_{max} est le taux de vide pour l'état le plus lâche possible, e l'indice des vides de l'éprouvette dans son état naturel.

➤ **Indice des vides minimum (e_{min})**

Nous avons procédé au remplissage du moule avec du sable carbonaté en le plaçant par couches successives. Le moule utilisé avait un diamètre de 10,3 cm et une hauteur de 11,8 cm. Pour ce faire, nous avons utilisé une cuillère pour verser progressivement le sable dans le moule, en veillant à répartir le sable uniformément.

Afin de garantir une densité plus élevée, nous avons secoué le moule à l'aide d'un petit marteau. Cette opération a été réalisée en frappant le moule sur ses quatre côtés, ce qui a permis de compacter le sable à chaque couche ajoutée (voir Figure 3.3).

Ce processus de remplissage et de secouage a été répété jusqu'à ce que le moule soit rempli à sa capacité maximale, assurant ainsi que le sable soit bien compacté sans espaces vides importants. Une fois le moule rempli, nous avons soigneusement pesé l'échantillon de sable pour mesurer sa masse totale.

À partir des mesures obtenues et de la relation (3.2), nous pouvons maintenant calculer la valeur minimale de l'indice des vides.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (3.2)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{v} \quad (3.3)$$



Figure 3.3. Processus détaillé de détermination de l'indice des vides minimum (e_{min}).

➤ **Indices des vides maximum e_{max}**

Dans le cas du sable plus lâche, nous commençons par placer un entonnoir en papier au fond du moule. Ensuite, nous remplissons soigneusement l'entonnoir par le sable carbonaté, en veillant à ne pas le laisser déborder ou se compacter prématurément. Une fois que l'entonnoir est bien rempli, nous procédons à son soulèvement lent et contrôlé, afin que l'échantillon de sable reste uniformément distribué dans l'entonnoir. Il est essentiel que l'entonnoir reste rempli d'échantillon tout au long du processus, sans que le sable ne soit perturbé ou tombé en dehors de l'entonnoir, jusqu'à ce que l'essai soit terminé (comme indiqué à la Figure 3.4).

Après avoir soulevé l'entonnoir, nous procédons à la pesée de l'échantillon de sable carbonaté, et nous utilisons la relation (3.2) pour calculer l'indice des vides.



Figure 3.4. Processus détaillé de détermination de l'indice des vides maximum (e_{max}).

3.2.2.2 Analyse granulométrique par tamisage

Les tamis sont empilés les uns sur les autres, en suivant un ordre croissant de mailles, du plus petit au plus grand, en commençant par un récipient à fond plein destiné à recueillir les particules fines. Un couvercle est placé en haut pour éviter la dispersion des poussières (voir Figure 3.5). Le processus de tamisage commence par le versement du matériau sec dans l'ensemble des tamis. Après tamisage, on distingue deux fractions: le refus (les particules qui restent sur le premier tamis) et le tamisât (les particules qui passent à travers les mailles). Ce tamisât est ensuite subdivisé, certaines particules étant retenues tandis que d'autres continuent

de passer à travers les tamis, jusqu'à ce que le dernier tamis laisse passer uniquement les particules dont la taille est inférieure à 0,08 mm.



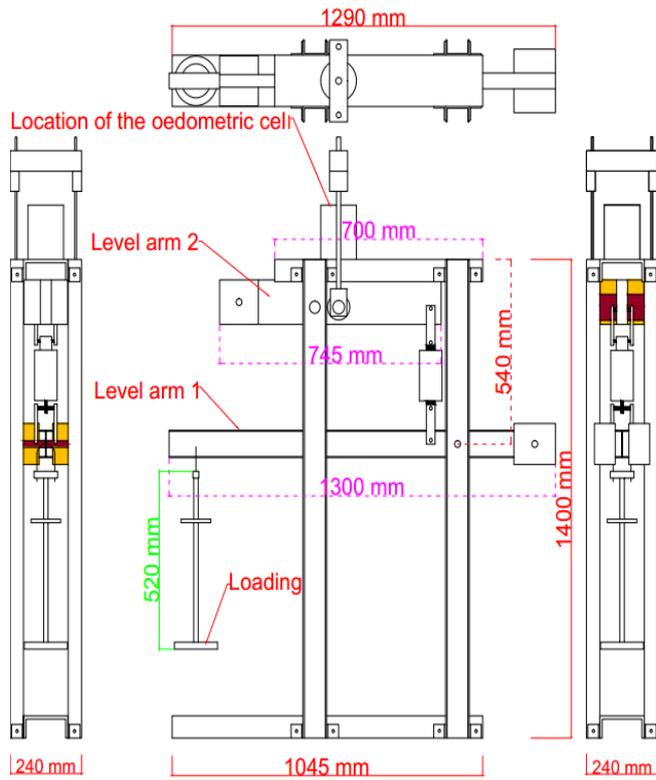
Figure 3.5. Série des tamis utilisé pour l'analyse granulométrique.

3.2.3 Dispositif oedométrique à haute pression

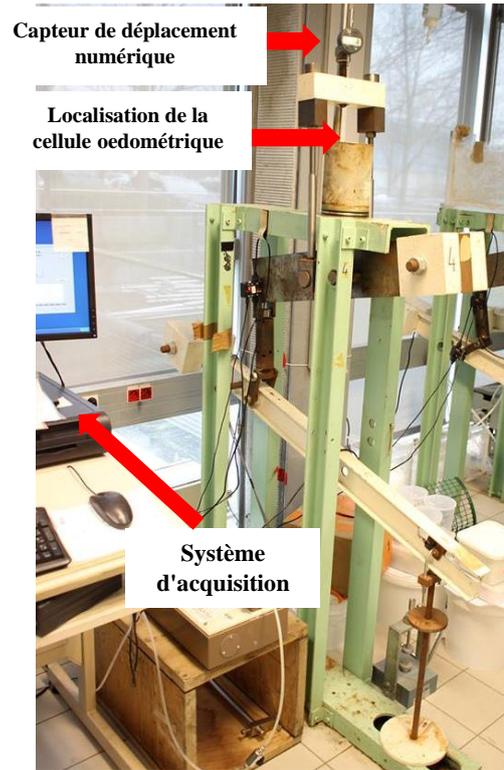
Des essais ont été réalisés à l'aide d'un dispositif oedométrique à haute pression, comme illustré à la figure 3.6. La figure 3.6 (a) présente le schéma du dispositif développé au sein de notre laboratoire de recherche en génie civil (LRGC), spécifiquement pour cette étude. Ce dispositif s'inspire de celui conçu par le laboratoire Navier de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris, France, représenté à la figure 3.6 (b). Enfin, la figure 3.6 (c) montre le dispositif réel développé dans notre laboratoire (LRGC) à l'Université Mohamed Khider de Biskra. Ce dispositif est constitué de bâtis de charge à haute pression, les bâtis possèdent un système de levier à double bras avec des rapports égaux à 10 et 5, ce qui donne un rapport total de 50. Ce dispositif peut atteindre une contrainte maximale d'environ 113 MPa (Marcial et al. 2002). La déformation axiale dans ce dispositif est mesurée par un capteur de déplacement numérique, d'une précision de 1 μm , installé dans la partie supérieure du bâti et relié à un système d'acquisition. Des essais oedométriques ont été réalisés sous différents niveaux de contrainte (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Ces essais sont réalisés afin d'étudier l'évolution des paramètres macroscopiques pour les différentes mesures (distribution granulométrique (établie selon la norme NFP94-056 (1996)), courbe contrainte-déformation et perméabilité),

dans ces expériences, tous les échantillons sont similaires. Les essais ont été réalisés sur une cellule oedométrique de 50 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur avec un rapport d'élanement de l'échantillon égal à 1,25. [Cil et Alshibli \(2014\)](#) et [Karatza \(2018\)](#) ont utilisé différentes valeurs du rapport d'élanement de l'échantillon et ont montré que le rapport d'élanement n'affecte pas la réponse macroscopique.

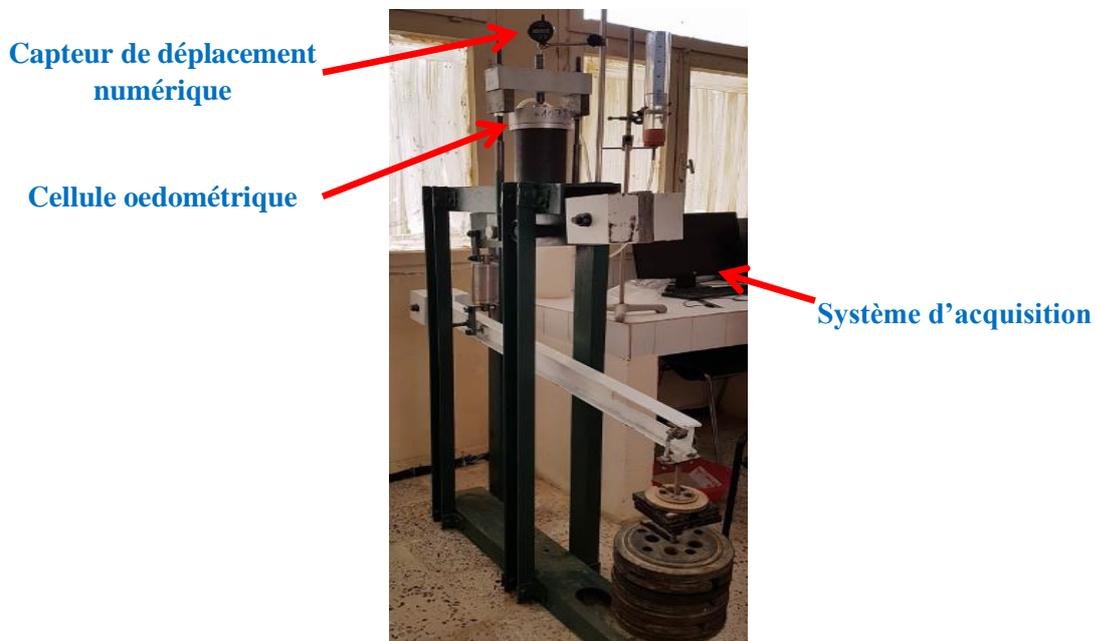
Afin d'évaluer les variations des propriétés microstructurales (telles que la porosité, la distribution de la taille des pores, la surface spécifique, le nombre de coordination et la surface de contact) du sable carbonaté sous diverses contraintes appliquées, un échantillon a été préparé de manière similaire à ceux utilisés pour les tests de perméabilité et de distribution granulométrique. Cet échantillon subit quatre examens de microtomographie à rayons-X à quatre niveaux de contrainte différents (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Ces examens sont réalisés à l'aide d'une cellule oedométrique en plexiglas (diamètre = 50 mm et hauteur = 40 mm) et du scanner à rayons-X du laboratoire Navier (Paris, France) pour acquérir des images tridimensionnelles de l'échantillon.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.6. (a) Schéma du dispositif oedométrique à haute pression développé dans notre laboratoire de recherche en génie civil (LRGC) pour cette étude ; (b) Dispositif oedométrique à haute pression du laboratoire Navier, Paris, France ; (c) Dispositif oedométrique à haute pression développé dans notre laboratoire (LRGC), Université Mohamed Khider de Biskra.

3.2.4 Mesure de la perméabilité

La perméabilité a été mesurée dans la cellule œdométrique, à l'aide d'un système Mariotte (Castiglione et al. 2005 ; Feia et al. 2016), à partir de la mesure du débit à travers l'éprouvette sous une charge hydraulique constante (ΔH) (Figure 3.7). Ces mesures ont été réalisées sur un échantillon similaire aux échantillons des essais œdométriques sous les différents niveaux de charge (0, 2,5, 5 et 10 MPa).

Le principe de mesure de la perméabilité du sable carbonaté lors de l'essai consiste à connecter le tube de Mariotte au dispositif de drainage de la cellule œdométrique. Une pierre poreuse est disposée au sommet de l'éprouvette pour faciliter l'écoulement de l'eau. Les volumes d'eau pénétrant dans l'éprouvette sont mesurés à intervalles réguliers à l'aide d'un tube gradué, comme le montre la Figure 3.7.

La mesure du temps de circulation de l'eau s'effectue à des intervalles réguliers de 3 cm le long de la hauteur du tube. Par la suite, la perméabilité est calculée en appliquant la loi de Darcy, conformément à l'équation 3.4.

$$K = \frac{V.L}{\Delta H.S.t} \quad (3.4)$$

- Où K : est la perméabilité (en cm/s),
- V : Représente le volume d'eau (en cm³),
- L : Correspond à la hauteur de la cellule œdométrique (en cm),
- ΔH : Est la charge constante (en cm),
- S : Désigne la surface de la cellule œdométrique (en cm²),
- t : Indique le temps (en secondes).

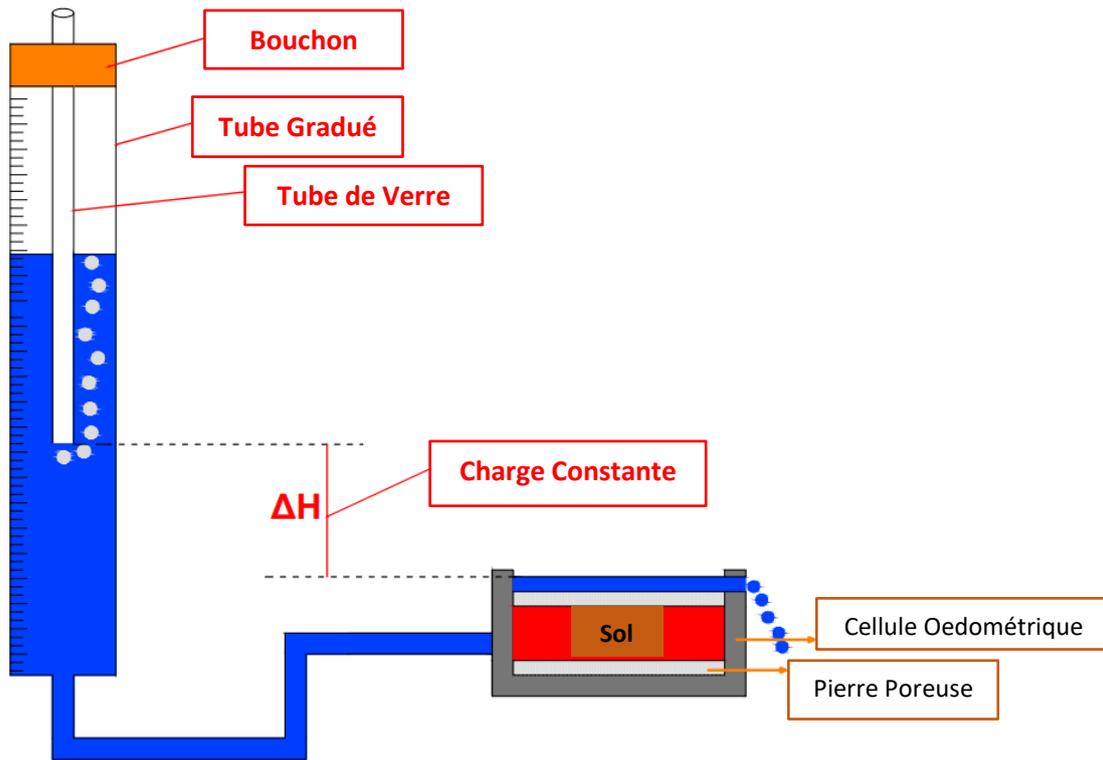


Figure 3.7. Représentation schématique du dispositif expérimental de mesure de la perméabilité.

3.2.5 Méthodes de Test et Plan Expérimental

Dans cette étude, des tests œdométriques ont été effectués sous haute pression sur des échantillons secs de sable carbonaté dont la taille des grains dépasse 1,6 mm. Ces essais ont été conduits à différents niveaux de chargement, à savoir 0, 2,5, 5 et 10 MPa, afin d'évaluer les variations du comportement mécanique du sable en fonction de la contrainte appliquée. En outre, des essais de fluage œdométriques sous haute pression ont été réalisés sur des échantillons dans deux états distincts: secs et saturés. Ces tests ont été réalisés sous différentes périodes de chargement, et ce, pour des indices de densité variables, mais toujours sous une charge constante de 10 MPa.

L'objectif principal de ces essais est d'analyser les effets du temps de chargement et de la densité du matériau sur la rupture des particules. Une analyse granulométrique de l'éprouvette a été réalisée après chaque palier de contrainte pour observer l'évolution de la granulométrie du sable par rapport à son état initial. Cette analyse permet de comprendre comment les différentes contraintes appliquées affectent la taille et la distribution des particules du sable, ce qui peut avoir des implications sur la porosité et la perméabilité du matériau.

De plus, des mesures de perméabilité ont été effectuées tout au long du processus de fluage pour observer l'évolution de la capacité de filtration du sable sous une contrainte constante. Ces données sont essentielles pour déterminer l'impact de la contrainte et du temps sur la compaction et la perméabilité du matériau. Les caractéristiques des essais réalisés, incluant les différents paramètres et conditions de tests, sont synthétisées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Description détaillée des propriétés des essais réalisés.

Test	Echantillon	I_D	Charge (MPa)	Temps (Fluage)
T1	Sèc	0.9	0	/
T2	Sèc	0.9	2.5	/
T3	Sèc	0.9	5	/
T4	Sèc	0.9	10	/
T5	Sèc	0.9	10	1 Heure
T6	Sèc	0.9	10	24 Heures
T7	Saturé	0.9	10	1 Heure
T8	Sèc	0.6	10	1 Heure
T9	Sèc	0.4	10	1 Heure

Dans le cadre de la préparation de nos échantillons, notre objectif était d'atteindre des valeurs de densité proches de 0,9, 0,6 et 0,4. Nous avons disposé le sable par couches, en vérifiant la densité obtenue à chaque étape. De plus, nous avons tenté de vibrer notre échantillon tout en appliquant un léger compactage.

Après avoir préparé l'échantillon, nous avons positionné la cellule œdométrique sur l'appareil œdomètre à haute pression et avons assuré le contact entre le chapeau de l'odomètre et le piston de chargement. Par la suite, nous avons appliqué la charge (en termes de masse) et enregistré les variations de déplacement à l'aide du comparateur, tout au long de l'expérience. La figure 3.8 présente les étapes clés de la préparation des échantillons pour l'essai œdométrique à haute pression.



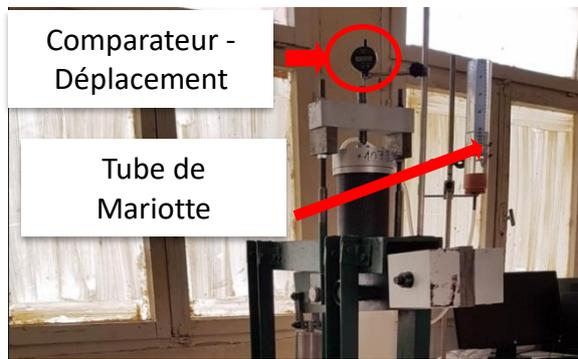
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.8. Étapes de préparation d'un échantillon œdométrique de sable carbonaté à grains supérieurs à 1,6 mm: **(a)** Positionnement du papier filtre, **(b)** Ajout du sable, **(c)** Installation de la pierre poreuse et du piston, **(d)** Montage de la cellule sur le Bâti œdométrique.

3.3 Acquisition d'images tridimensionnelles 3D

Une cellule oedométrique en plexiglas (Figure 3.9) a été fabriquée pour le présent travail afin de réaliser des observations par microtomographie à rayons-X sur des échantillons de sable. Le plexiglas utilisé dans la cellule oedométrique a une densité de 1,18 g/cm³. Il a été choisi comme matériau de faible densité par rapport aux grains de sable afin d'éviter l'atténuation des rayons-X générés lors des scans, et d'améliorer la qualité de l'image de l'échantillon scanné.



Figure 3.9. Cellule oedométrique en plexiglas conçue pour les observations par micro-tomographie à rayons-X.

Quatre scans aux rayons X ont été réalisés sur le même échantillon sous différentes charges de contrainte (0, 2,5, 5 et 10 MPa). L'échantillon de sable carbonaté testé a été préparé avec une densité relative initiale de 0,88. Un échantillon de référence a été scanné sans aucune charge (0 MPa) afin d'obtenir l'état microstructural initial du sable. Le même échantillon a été chargé et scanné sous 3 niveaux de contrainte différents (2,5, 5, 10 MPa) sachant que le seuil de rupture pour le sable carbonaté est de 2,5 MPa (Dadda et al., 2015).

Pour chaque scan, la cellule oedométrique a été placée après le test oedométrique sur l'axe rotatif de la tomographie, entre la source de rayons-X et le détecteur comme indiqué sur la Figure 3.10. La rotation discontinue de l'échantillon de sable pendant l'opération de scan est nécessaire, afin de prendre une position angulaire différente de l'échantillon à chaque étape du scan.

Lors de l'opération de scan, les rayons-X traversant l'échantillon de sable sont atténués à des degrés divers en fonction des propriétés spécifiques des différents constituants de l'échantillon : la cellule en plexiglas, le vide, et le sable. Cette atténuation est directement influencée par deux facteurs principaux : la densité moléculaire et le numéro atomique de chaque matériau. Plus ces propriétés sont élevées, plus l'atténuation des rayons-X est importante.

Dans ce contexte, chaque constituant de l'échantillon possède des caractéristiques distinctes en termes de densité moléculaire, ce qui entraîne des niveaux variés d'atténuation. Par

exemple, le sable, dont la densité est significativement plus élevée que celle du vide ou de la cellule en plexiglas, absorbe davantage les rayons-X. Cette différence d'atténuation permet une identification visuelle claire des constituants dans les images produites par le scan.

Ces variations d'atténuation sont bien mises en évidence dans les résultats obtenus, comme illustré par la figure 3.10. Celle-ci montre clairement les contrastes entre les grains de sable, le vide, et les parois de la cellule en plexiglas, permettant ainsi une distinction précise entre ces différents éléments. Ce contraste visuel est essentiel pour l'analyse des propriétés et de la répartition des matériaux au sein de l'échantillon.

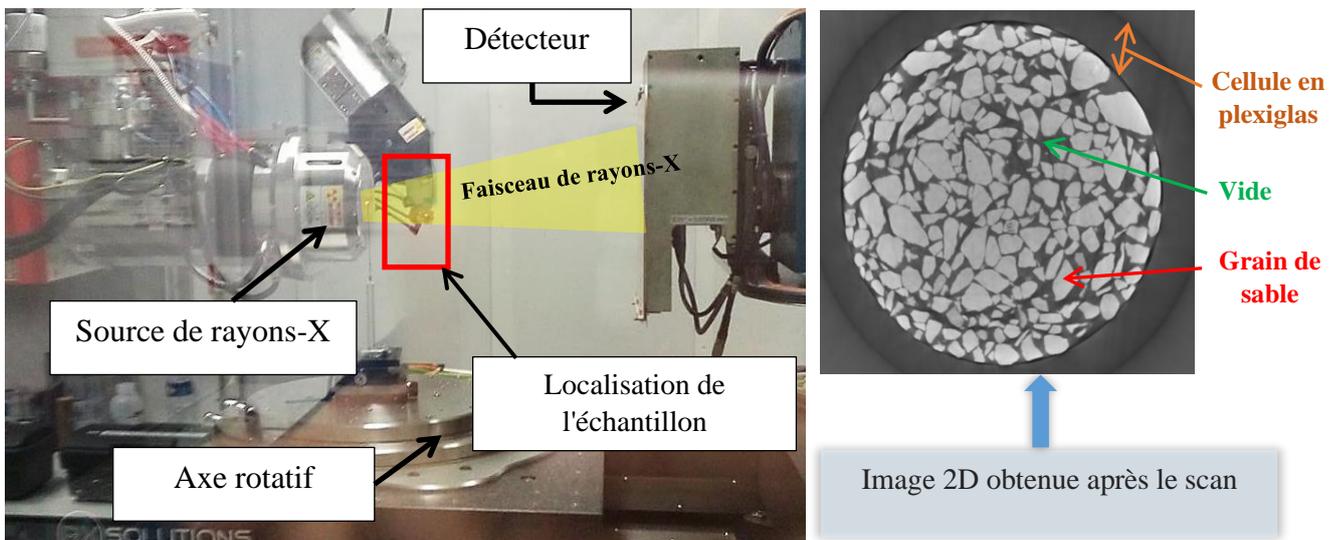


Figure 3.10. Le scanner à rayons-X utilisé dans le laboratoire Navier (Paris, France).

Pour chaque position, une image de l'échantillon doit être enregistrée. Ces images, collectées au fil des positions, permettent de reconstruire un volume 3D du matériau scanné. Ce volume 3D constitue une représentation de l'intensité enregistrée en niveaux de gris, qui reflète principalement les variations de densité des différents matériaux constituant l'échantillon.

La reconstruction des images 2D repose sur l'utilisation de l'algorithme de rétroprojection par filtre, garantissant une précision optimale dans les résultats obtenus. Une résolution de 34 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ a été spécifiquement choisie pour permettre la visualisation détaillée des plus petits grains présents dans l'échantillon de sable, assurant ainsi une analyse approfondie de la structure interne.

Les scans ont été effectués à travers 1800 projections, couvrant un champ de vision de $1040 \times 1040 \times 1040$ Voxels. Un ensemble de 1040 images 2D a été collectée. Ces images

servent à la fois pour le traitement et l'analyse des niveaux de contraintes dans l'échantillon, comme illustré à la Figure 3.11.

3.4 Traitement et analyse d'images

Pour analyser l'évolution des propriétés microstructurales et des interactions de contact, les images 3D en niveaux de gris obtenues par tomographie à rayons-X doivent subir un ensemble de traitements spécifiques. Ces étapes incluent d'abord la segmentation des différentes phases présentes dans l'échantillon, suivie de la séparation des grains individuels afin de mieux comprendre leur distribution et leur structure. Enfin, une détection précise des contacts entre les grains, permettant ainsi d'évaluer les interactions micro-mécaniques.

3.4.1 Segmentation – Binarisation

Afin de distinguer les deux phases (vide et grains) dans l'échantillon, la méthode classique d'Otsu (1979) a été appliquée sur des images 2D en niveaux de gris, comme illustré à la Figure 3.11 (1. Image en niveaux de gris). Cette approche de seuillage permet de segmenter efficacement les différentes phases en fonction de l'intensité des pixels. En combinant l'ensemble des images 2D ainsi traitées, une représentation tridimensionnelle (3D) de la microstructure interne de l'échantillon est obtenue, permettant d'analyser les variations de la microstructure à différents niveaux de contrainte (Figure 3.11).

Cependant, la détection de fissures, notamment la rupture des grains, reste un défi lorsqu'on utilise des observations à faible résolution. Cela est principalement dû à la difficulté de discerner les détails fins des fissures à cette échelle. Néanmoins, pour faciliter cette détection, une étape préalable d'écrêtage du sable a été réalisée à l'aide d'un tamis de 1,6 mm. Cette opération permet d'éliminer les petites particules qui pourraient interférer avec l'analyse des fissures, rendant ainsi l'opération de traitement des images plus efficace et précise. Ce processus a permis de rendre plus visible la détection des fissures, tout en optimisant la qualité des images traitées pour une analyse plus approfondie.

3.4.2 Identification des grains et détection de contact

Afin de définir avec précision les grains individuels présents dans l'image, il est essentiel de segmenter la phase sableuse en objets distincts, où chaque grain peut être identifié de manière indépendante. Pour ce faire, l'algorithme Watershed a été utilisé sur des images 3D binarisées, une technique avancée intégrée dans le logiciel Visilig®. Cet algorithme Watershed 3D fonctionne en modélisant les grains comme des objets distincts dans un espace

tridimensionnel. Il procède à la séparation des grains en éliminant un voxel à la jonction des contacts entre les grains adjacents, afin de réduire les connexions indésirables entre eux (voir Figure 3.11 – 3. Image segmentée). Ce processus permet de créer une représentation claire et précise des grains individuels, en rendant visibles leurs limites respectives.

Une fois cette étape de segmentation terminée, chaque grain peut être étiqueté et coloré à l'aide d'un code personnalisé développé dans Matlab®. Ce code est spécifiquement conçu pour la détection d'objets en 3D, en assignant à chaque grain une étiquette unique qui le distingue des autres objets présents dans l'image. Cette approche permet une analyse détaillée et quantitative des caractéristiques des grains (voir Figure 3.11 – 4. Image étiquetée), facilitant ainsi l'étude de leur distribution, de leur forme et de leur taille dans la phase sableuse.

Les surfaces de contact entre les particules ont été calculées à partir d'images binaires et segmentées, dans lesquelles les grains ont été séparés en 3D. La méthode consiste à soustraire les images binaires des images segmentées, permettant ainsi d'identifier les zones correspondant aux surfaces de contact. Ces surfaces de contact ont ensuite été étiquetées (voir Figure 3.11 – 5. Contact étiqueté) en utilisant une méthode développée par [Dadda et al. \(2018a\)](#) et implémentée sous Matlab®.

Cette méthode repose sur l'exploration des 26 voxels voisins entourant chaque voxel appartenant à une surface de contact. Plus précisément :

- **Six voxels** représentent les connexions directes aux faces du voxel.
- **Douze voxels** sont situés sur les bords adjacents du voxel.
- **Huit voxels** se trouvent aux coins du voxel.

L'objectif est d'attribuer une couleur unique à chaque surface de contact, en fonction des couleurs des deux grains impliqués dans cette interaction. Ce processus permet de différencier les contacts individuels et de les analyser de manière détaillée.

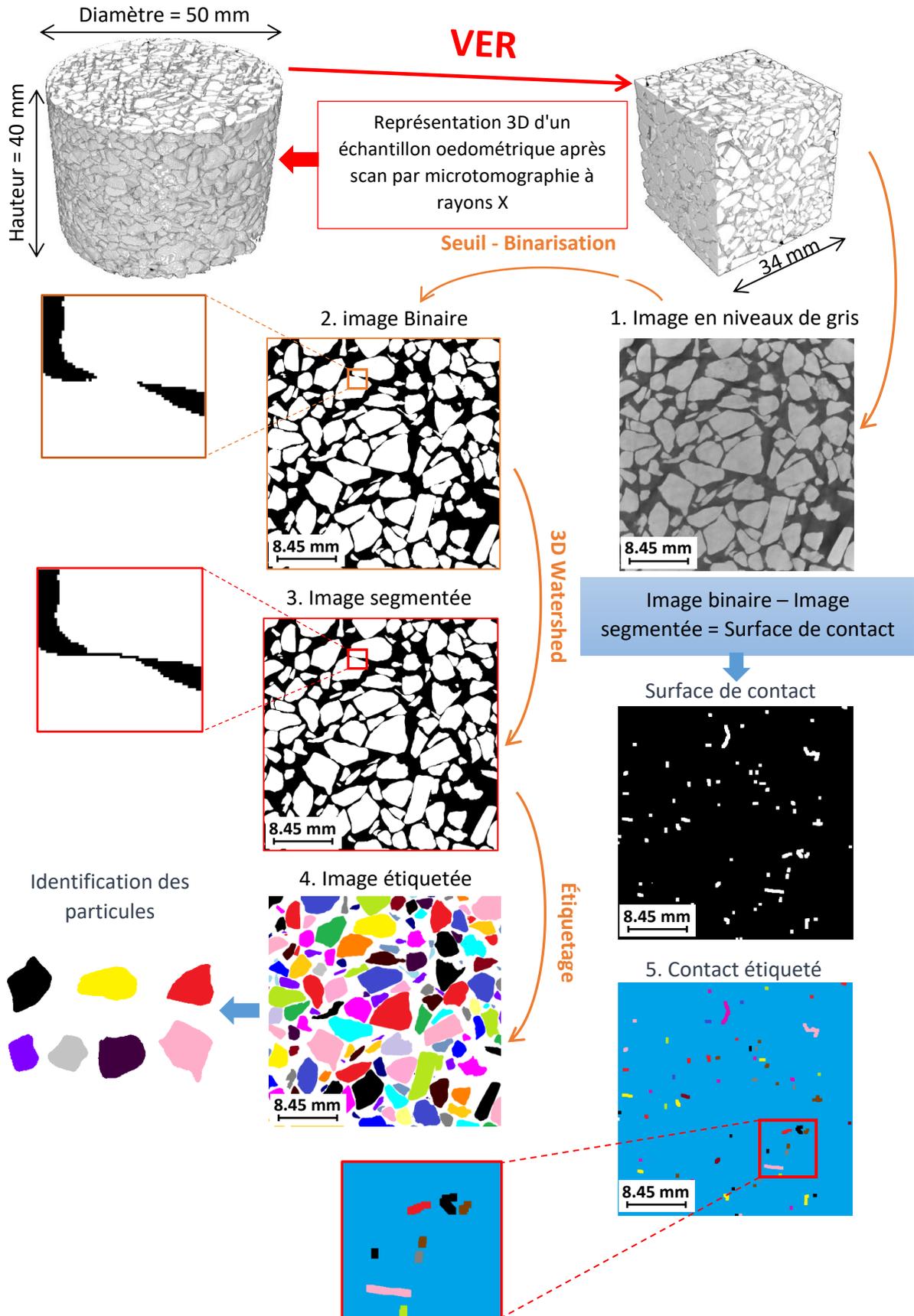


Figure 3.11. Étapes du traitement et de l'analyse des images 3D obtenues par tomographie aux rayons-X.

3.5 Calcul des propriétés microstructurales

Trois propriétés microstructurales ont été déterminées à partir des images 3D binarisées : (1) la porosité, (2) la surface spécifique du sable et (3) la distribution des tailles de pores. Ces propriétés ont été analysées afin d'évaluer leur évolution en fonction des différents niveaux de contrainte appliqués. Pour ce faire, le calcul de chaque propriété a été réalisé sur l'ensemble des échantillons scannés.

Les calculs de la porosité et de la surface spécifique ont été effectués sur des sous-volumes (cubes) extraits des images 3D globales. Ces cubes, placés au centre des images pour garantir leur homogénéité et limiter les effets des bords, présentent des tailles variées, allant de 2 mm jusqu'à environ 34 mm de côté. L'objectif de cette variation de taille était d'évaluer la représentativité des images 3D en fonction de l'échelle d'observation.

Enfin, chaque propriété microstructurale a été représentée en fonction de la taille des cubes. Cette approche permet de valider la fiabilité des images 3D pour capturer les caractéristiques microstructurales des échantillons.

3.5.1 Porosité

La porosité a été déterminée par le comptage des voxels vides présents dans l'image 3D obtenue par tomographie, suivie d'une normalisation par rapport au nombre total de voxels de l'image complète. Ce calcul a été réalisé pour chaque échantillon scanné, lequel a été soumis à différents niveaux de contrainte afin d'étudier l'évolution de cette propriété en fonction du phénomène de rupture des grains. L'objectif était de comprendre comment la porosité varie à mesure que les grains subissent des fractures, et de comparer ces résultats numériques aux mesures expérimentales obtenues sur le même échantillon scanné.

3.5.2 Surface spécifique (SSA)

Le calcul de la surface spécifique (SSA) d'un matériau est réalisé selon l'approche stéréologique (Flin et al. 2011), une méthode largement reconnue pour son efficacité dans l'évaluation de la surface spécifique des matériaux isotropes, tels que le sable. Cette technique repose sur l'analyse des points d'interception du solide, qui correspondent aux contours ou bords du matériau scanné. Ces points sont identifiés en observant les intersections du matériau avec un réseau de lignes tracées dans l'espace tridimensionnel.

Pour obtenir une mesure précise de la surface spécifique, le nombre total de points d'interception doit être normalisé en fonction de la longueur totale de l'image dans chaque

direction de l'espace 3D (x, y, et z). Cette normalisation permet de compenser les effets de l'échelle et d'assurer que les résultats sont indépendants de la taille de l'échantillon ou du grossissement de l'image.

Enfin, la surface spécifique (SSA) de l'échantillon est déterminée en prenant la moyenne des valeurs obtenues pour chaque direction spatiale (x, y, z). Cette approche assure une estimation précise de la surface spécifique en tenant compte des variations géométriques du matériau dans les trois dimensions de l'espace.

3.5.3 Distribution de la taille des pores

La distribution de la taille des pores pour chaque image 3D a été déterminée à l'aide du logiciel GeoDict. Ce dernier offre la capacité de simuler un test de porosimétrie par intrusion de mercure (MIP) en ajustant des sphères dans le volume des pores. De plus, le logiciel prend en compte les pores fermés présents dans l'image 3D, ce qui permet d'obtenir une représentation plus précise et complète de la structure poreuse.

3.5.4 Calcul des propriétés de contact

Les contacts entre grains constituent les points de transmission des forces dans un milieu granulaire. Ces interactions jouent un rôle crucial dans la mécanique des matériaux granulaires, car elles sont responsables de la résistance globale du système. Afin de mieux comprendre le comportement de ces milieux, il est essentiel d'étudier l'impact de la rupture des grains sur l'évolution des propriétés de contact à l'échelle microscopique. La rupture d'un grain modifie non seulement la structure locale des contacts, mais peut aussi entraîner une redistribution des forces entre les grains restants, affectant ainsi les caractéristiques globales du milieu. L'analyse de ces phénomènes à une échelle micro permet de mieux appréhender la déformation, la compaction.

Deux propriétés fondamentales de contact ont été explorées à partir des images 3D : (1) le nombre de coordination et (2) la surface de contact. L'évolution de ces propriétés de contact a été calculée dans un volume élémentaire représentatif (REV) de $34 \times 34 \times 34 \text{ mm}^3$, à différents niveaux de chargement (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Ces calculs ont été réalisés selon la méthode employée par [Dadda et al. \(2018a\)](#), en excluant les grains situés aux bords de l'échantillon afin d'éviter l'effet de bord dans le calcul.

Le nombre de coordination a été déterminé en comptabilisant le nombre de contacts pour chaque grain à partir de l'image des contacts étiquetés. Ce calcul permet non seulement de

dresser la distribution du nombre de coordination à l'intérieur de l'image 3D, mais également de déterminer la valeur moyenne pour l'ensemble de l'échantillon, donnant ainsi une vue d'ensemble de la structure du matériau sous différentes conditions de chargement.

La surface de contact est définie par un nuage de voxels ayant une forme complexe. Pour estimer les surfaces discrétisées, une approche mathématique développée par [Legland et al. \(2011\)](#) est utilisée, où la surface est quantifiée par une discrétisation de la formule de Crofton. Cette méthode permet de calculer la surface de contact en prenant en compte la géométrie tridimensionnelle des voxels impliqués.

Pour plus de précisions sur cette méthode, vous pouvez vous référer aux travaux de [Dadda et al. \(2018a\)](#), qui approfondissent les détails techniques et les applications de cette approche dans le contexte des images 3D. Grâce à cette estimation, il est possible de déterminer non seulement la répartition spatiale de la surface de contact au sein de l'image tridimensionnelle, mais aussi d'en calculer la valeur totale pour l'ensemble de l'échantillon, ce qui permet d'obtenir une mesure complète de la surface de contact présente dans le volume étudié.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté les propriétés du matériau étudié, à savoir le sable carbonaté avec des grains de taille supérieure à 1,6 mm, ainsi que les techniques et les procédures expérimentales adoptées dans cette étude.

Dans un premier temps, nous avons décrit les propriétés physiques et la composition chimique du sable carbonaté. À partir de son aspect morphologique, nous avons utilisé un microscope électronique à balayage (MEB) pour analyser en détail la forme et les angles des grains.

Ensuite, nous avons présenté la méthode expérimentale utilisée pour déterminer les indices des vides minimum et maximum du sable étudié. Nous avons également décrit en détail les dispositifs expérimentaux et les protocoles utilisés dans les essais, notamment :

- **L'œdomètre à haute pression**, permettant d'étudier le comportement mécanique sous différentes contraintes,
- **La méthode de mesure de la perméabilité** à l'aide d'un tube de Mariotte sous charge constante,
- **La méthode de tamisage**, pour déterminer la distribution granulométrique de l'échantillon.

Nous avons ensuite détaillé le programme expérimental réalisé dans le cadre de ce travail. Celui-ci comprend des essais œdométriques à haute pression sur des échantillons de sable carbonaté soumis à différents niveaux de contrainte (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Nous avons également décrit les essais de fluage et les paramètres affectant le phénomène de rupture des particules, tels que:

- **L'effet de la densité,**
- **L'effet de la saturation de l'échantillon,**
- **La durée d'application de la charge.**

Par la suite, nous avons expliqué la méthode permettant d'obtenir des images tridimensionnelles (3D) d'un échantillon de sable carbonaté par tomographie aux rayons X, sous différents niveaux de contrainte (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Dans cette section, nous avons présenté deux étapes principales :

- 1- **L'acquisition des images 3D** par tomographie aux rayons X.
- 2- **L'analyse des images 3D**, réalisée en trois étapes principales :
 - La séparation des vides et des grains (Segmentation – Binarisation),
 - La segmentation des grains (méthode Watershed),
 - L'identification des particules et des contacts interparticulaires.

Nous avons également expliqué comment calculer certaines propriétés microstructurales, telles que :

- La porosité,
- La surface spécifique (SSA),
- La distribution de la taille des pores.

Enfin, nous avons décrit la méthode pour déterminer des propriétés micromécaniques, comme:

- Le Nombre de Coordination,
- La Surface de Contact entre les particules.

Les images 3D obtenues par tomographie aux rayons X ont démontré l'efficacité de cette méthode pour analyser et quantifier la microstructure interne d'un matériau granulaire.

Dans le chapitre suivant, nous exposerons les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais effectués à l'aide de l'œdomètre à haute pression ainsi que du dispositif de

perméabilité. Une analyse approfondie et une interprétation détaillée des données issues de l'analyse des images tridimensionnelles, générées par tomographie aux rayons-X, seront également présentées.

Chapitre 4. Présentation et Analyse des Résultats Expérimentaux et des Données d'Analyse d'Images 3D

4.1 Introduction

Les principaux objectifs de ce travail sont d'étudier l'effet de la rupture des particules dans un matériau granulaire sur l'évolution de la distribution granulométrique et de la perméabilité, d'analyser l'impact du fluage sur la progression de cette rupture, et d'explorer en profondeur les changements microstructuraux à l'échelle microscopique. Ces derniers seront étudiés de manière qualitative et quantitative à l'aide d'images 3D obtenues par tomographie aux rayons X, permettant ainsi une compréhension détaillée des phénomènes associés à la rupture des grains.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus à partir de différents essais réalisés sur divers dispositifs, notamment l'œdomètre à haute pression et le dispositif de mesure de la perméabilité (tube de Mariotte).

Ensuite, nous exposons les résultats des essais œdométriques à haute pression en mettant l'accent sur le fluage et les influences des paramètres étudiés dans cette partie. Parmi ces paramètres figurent :

- L'effet de la saturation de l'échantillon,
- L'effet de la densité de l'échantillon,
- Et l'effet de la durée de chargement.

Ensuite, nous présentons les résultats d'analyse d'images 3D obtenues par tomographie aux rayons X. Cette partie est divisée en deux volets principaux :

- 1- La présentation des résultats relatifs à l'évolution des **propriétés microstructurales**, telles que la porosité, la surface spécifique (SSA) et la distribution de la taille des pores.
- 2- La présentation des résultats concernant les changements des **propriétés micro-mécaniques de contact**, telles que le nombre de coordination, la surface de contact, et le réseau de contact.

4.2 Analyse des Résultats Expérimentaux

4.2.1 Courbe Contrainte-Déformation - Réponse Mécanique

La Figure 4.1 illustre l'évolution de la courbe contrainte-déformation du sable carbonaté. Cette courbe présente un changement de pente distinct, lequel est dû au phénomène d'écrasement des grains de sable. Ce changement de pente marque une transition importante dans le comportement mécanique du matériau, indiquant que les grains commencent à s'écraser sous l'effet des contraintes appliquées. Le seuil d'écrasement a été déterminé en utilisant la méthode de Casagrande, une approche couramment utilisée pour évaluer ce phénomène dans les sols granulaire.

Dadda et al. (2015) ont également appliqué cette même méthode pour évaluer le seuil d'écrasement dans leurs travaux, en confirmant que le sable carbonaté présente un seuil d'écrasement d'environ 2,5 MPa. Ce résultat est cohérent avec les observations précédentes et souligne l'importance de ce seuil dans le contexte de l'analyse comportementale du sable carbonaté sous des charges élevées.

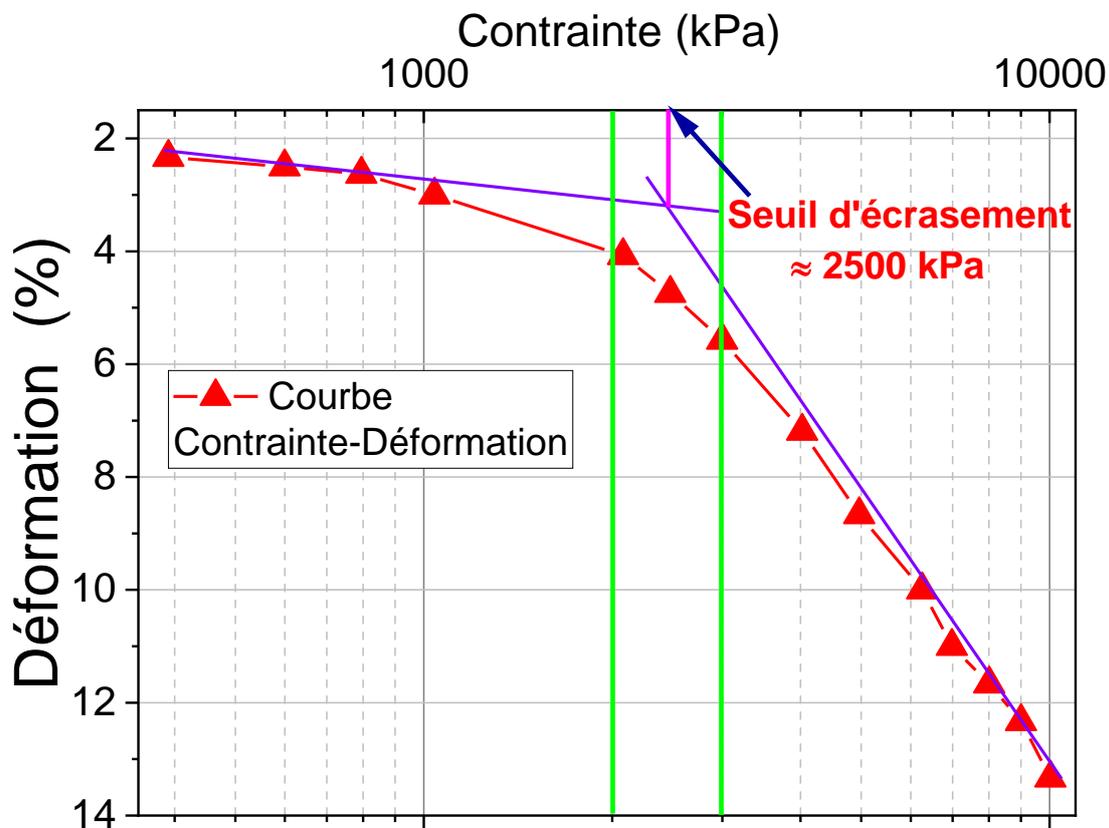


Figure 4.1. Courbe contrainte-déformation du sable carbonaté.

La réponse mécanique du sable carbonaté peut être divisée en trois phases distinctes, chacune marquée par des comportements particuliers en fonction de l'évolution de la contrainte appliquée.

- **Première phase** : réponse linéaire initiale

Dans cette première phase, la courbe de réponse mécanique présente une tendance linéaire avec une pente relativement modeste. À ce stade, l'indice de compression atteint une valeur de 0,17. Il est observé que les vides dans le matériau sont relativement élevés et que la rupture des grains n'est pas encore manifeste, ce qui est illustré dans la Figure 4.2 par l'image 2D à 0 MPa obtenue par micro-tomographie à rayons X. Les grains restent intacts, et le matériau semble se comporter de manière souple sous la contrainte appliquée.

- **Deuxième phase** : écrasement des grains

En progressant dans l'augmentation de la contrainte, un changement subtil de la courbe devient visible lorsque la contrainte atteint 2,5 MPa. Ce phénomène est attribué à l'écrasement des grains, où des déformations plastiques commencent à se produire. La Figure 4.2 montre à 2,5 MPa, via une image 2D, l'apparition de particules écrasées qui sont désormais évidentes. À ce stade, le matériau présente un changement de comportement, avec une transition vers une courbe plus marquée indiquant des déformations plastiques croissantes.

- **Troisième phase** : compression intense et fragmentation des particules

Au-delà de cette étape, une phase de compression normale presque linéaire se développe, avec une pente beaucoup plus raide et un indice de compression qui atteint 1,48. Durant cette phase, la rupture des particules devient plus prononcée, comme le révèlent les images 2D à 5 MPa et 10 MPa dans la Figure 4.2. Ces images montrent clairement la production de fragments et de fines particules qui remplissent les vides, ce qui entraîne une réduction du volume des vides et induit une modification notable de la courbe de compression.

Cette évolution de la courbe dans la troisième phase est expliquée par [McDowell \(2002\)](#), qui décrit ce phénomène comme un changement dans le comportement du matériau. À mesure que la contrainte augmente, le sable carbonaté se comporte de plus en plus comme une roche, ce qui se traduit par une augmentation de la rigidité. Les particules plus grosses, protégées par les particules plus petites et fragmentées, sont moins susceptibles de subir des contraintes de traction, ce qui contribue à une stabilité accrue du matériau. En parallèle, les particules plus

petites ayant atteint leur limite de fragmentation, il devient impossible de provoquer d'autres fractures. Cela résulte en une rigidité accrue du matériau, ce qui marque la fin de la phase de déformation plastique et le passage à un comportement plus rigide et cohérent du matériau.

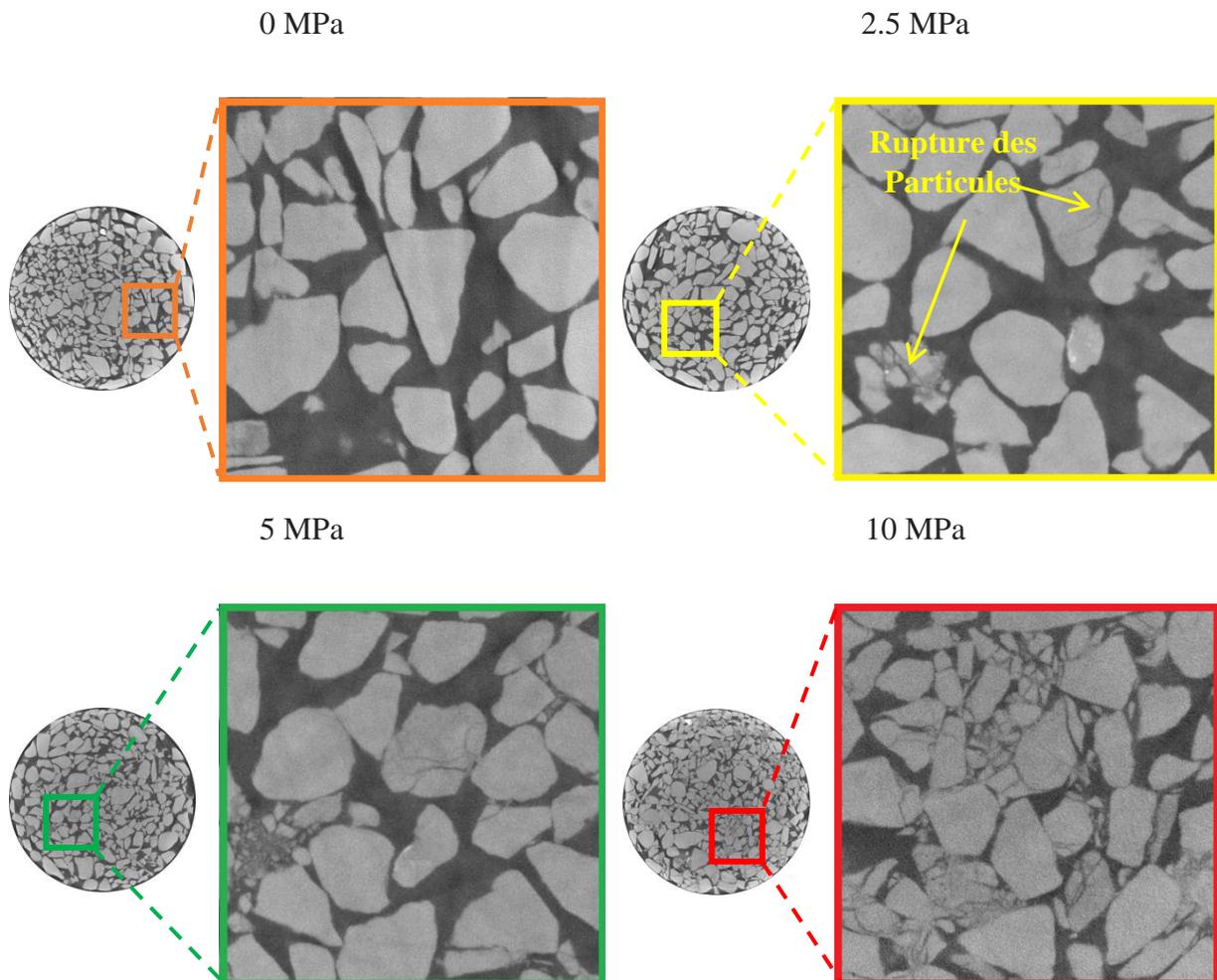


Figure 4.2. Images 2D obtenues par micro-tomographie à rayons X à différents niveaux de chargement.

4.2.2 Distribution de la Taille des Particules

Les essais de comportement à la compression uniaxiale (Oedométriques) effectués selon plusieurs intensités de contrainte ont été complétés par une analyse granulométrique par tamisage, afin de quantifier la production de petites particules une fois la contrainte appliquée. La figure 4.3 illustre l'évolution de la distribution granulométrique pour les divers niveaux de charge (0, 2,5, 5 et 10 MPa) appliqués au sable testé. L'évolution de la taille des particules selon l'intensité de la contrainte appliquée est particulièrement notable. Ces résultats indiquent que la génération de particules fines croît à mesure que la contrainte appliquée

s'intensifie. Selon [Einav \(2007a\)](#), les courbes de distribution granulométrique évoluent avec l'augmentation du niveau de contrainte, mais leur taux de variation diminue rapidement pour tendre vers une « courbe de distribution ultime » lorsque la contrainte appliquée devient plus élevée, cette dernière ayant été observée à 80 MPa pour le même sable dans l'étude de [Dadda et al. \(2015\)](#).

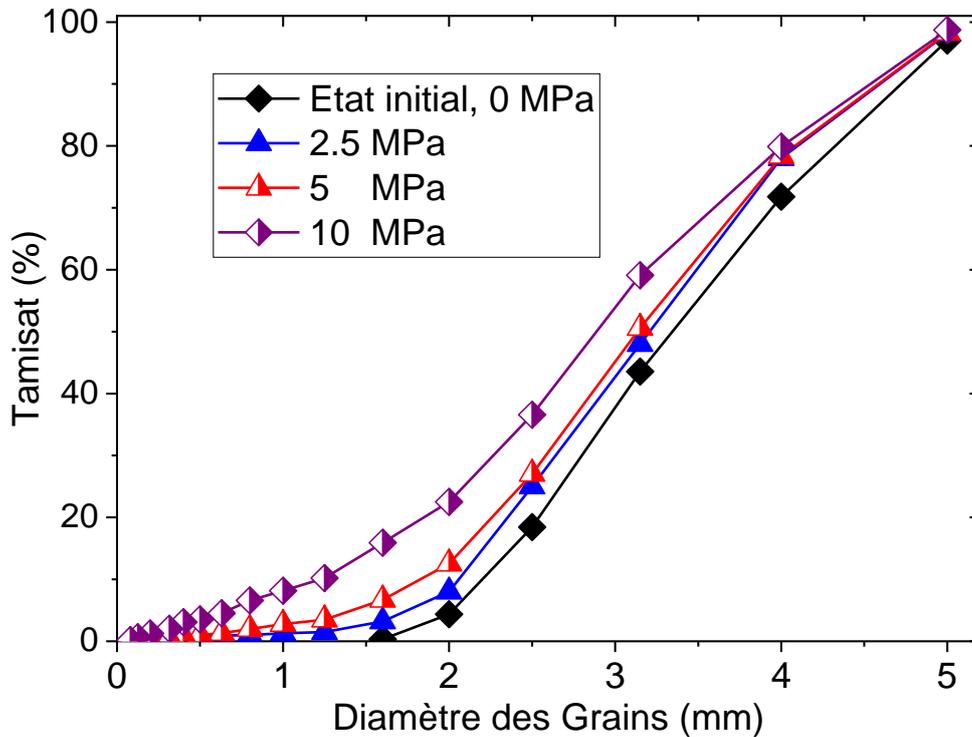


Figure 4.3. Évolution de la courbe de distribution granulométrique en fonction du niveau de contrainte.

4.2.3 Analyse des variations de la Perméabilité

Des évaluations de perméabilité ont été effectuées à différents niveaux de chargement, et les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.4. Ces résultats révèlent une diminution significative de la perméabilité en réponse à l'augmentation de la contrainte appliquée. Cette réduction de la perméabilité s'explique par la combinaison de deux mécanismes principaux :

- 1- **Le réarrangement des particules** : Ce phénomène, caractérisé par l'effondrement des pores, modifie la structure interne du matériau.
- 2- **La production de particules fines** : Provoquée par la rupture des grains, cette production obstrue les pores et contribue à réduire la connectivité poreuse.

Ces deux mécanismes sont clairement illustrés dans les images obtenues par tomographie aux rayons X (Figure 4.5). Dans l'état initial (0 MPa), la perméabilité est élevée en raison de la grande taille des pores, qui assurent une bonne connectivité entre eux. Cependant, à mesure que la contrainte appliquée augmente, les pores subissent une compression significative (10 MPa), entraînant la formation de particules fines issues de la rupture des grains. Ces particules viennent combler les espaces interstitiels entre les grains plus volumineux.

Ainsi, la connectivité entre les pores est fortement altérée, ce qui se traduit par une réduction drastique de la perméabilité de l'échantillon de sable. Ce phénomène met en évidence l'importance des interactions mécaniques et granulaires dans la modification des propriétés hydrauliques du matériau.

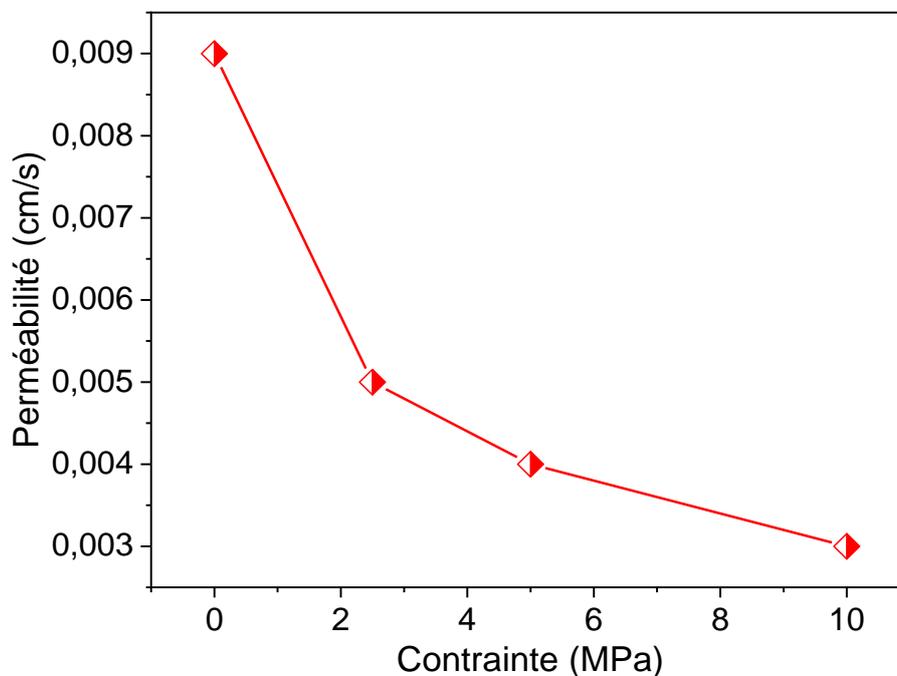


Figure 4.4. Variation de la Perméabilité en fonction de la contrainte appliquée.

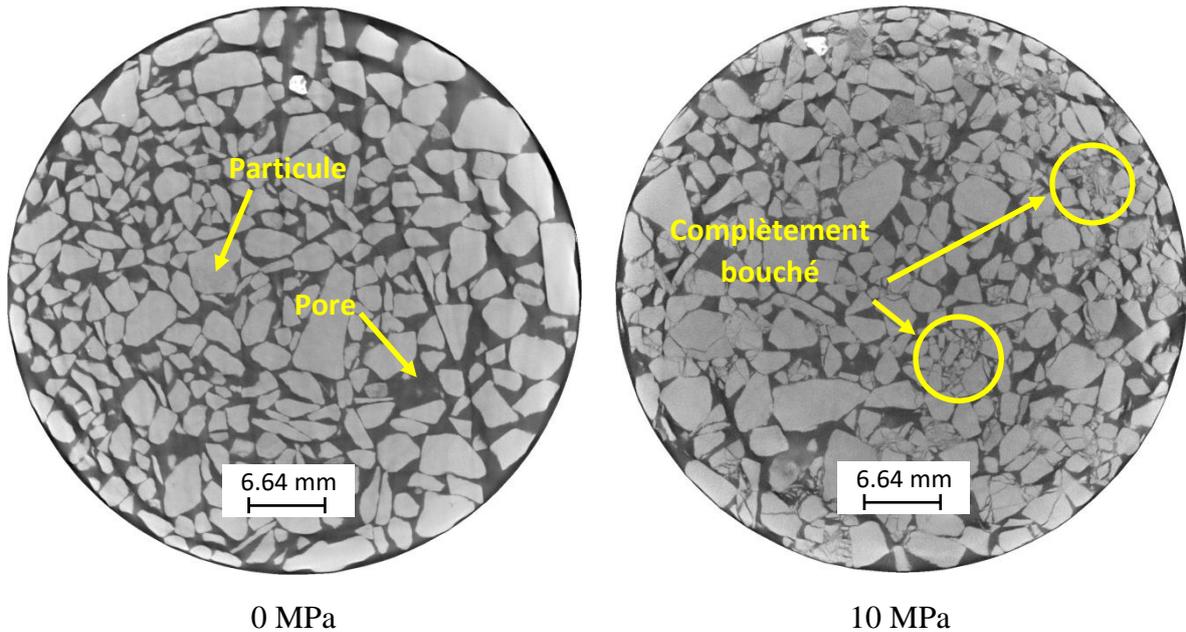


Figure 4.5. Observation par microtomographie à rayons X de sable carbonaté, en 0 et 10 MPa.

4.3 Résultats des essais de fluage

4.3.1 Influence de la saturation de l'échantillon

Afin d'analyser l'effet de la saturation de l'échantillon sur la rupture des particules, deux essais distincts ont été réalisés. Le premier essai a été effectué sur un échantillon sec, tandis que le second a été conduit sur un échantillon saturé. Dans les deux cas, une charge constante de 10 MPa a été appliquée et maintenue durant une période d'une heure. Les résultats obtenus, représentant l'évolution du déplacement en fonction du temps pour ces deux conditions, sont présentés dans la Figure 4.6.

Les résultats révèlent un déplacement plus prononcé dans le cas de l'échantillon saturé par rapport à l'échantillon sec. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment une production accrue de particules fines due à la rupture des grains, ainsi qu'un réarrangement plus important des grains au sein de l'échantillon saturé, ce qui engendre une déformation plus significative.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse granulométrique des deux essais, illustrés dans la Figure 4.7, mettent en évidence une augmentation légèrement supérieure du taux de rupture des grains dans l'échantillon saturé. Notamment, une production plus marquée de particules dont la taille est inférieure à 1,6 mm a été observée dans cet échantillon, comme illustré par la Figure 4.8.

D'après Ovalle (2013), la présence d'eau engendre une réduction de la résistance des particules, ce qui pourrait expliquer l'augmentation du taux de rupture. Ce phénomène est attribué à la pression interstitielle, en particulier l'effet de la capillarité au sein des microfissures, qui modifie les contraintes effectives et diminue ainsi la force requise pour provoquer la propagation des fissures à travers les particules.

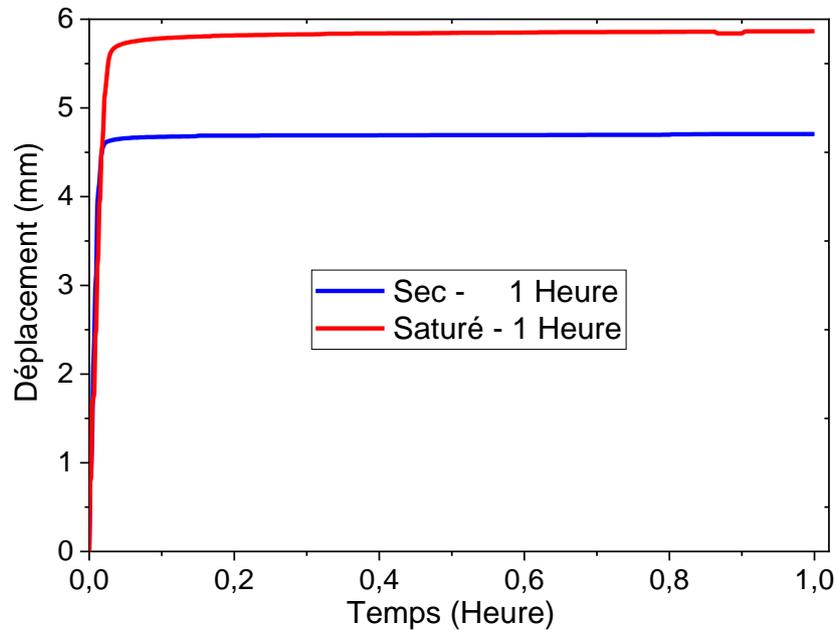


Figure 4.6. Courbe temps-déplacement - Effet de saturation.

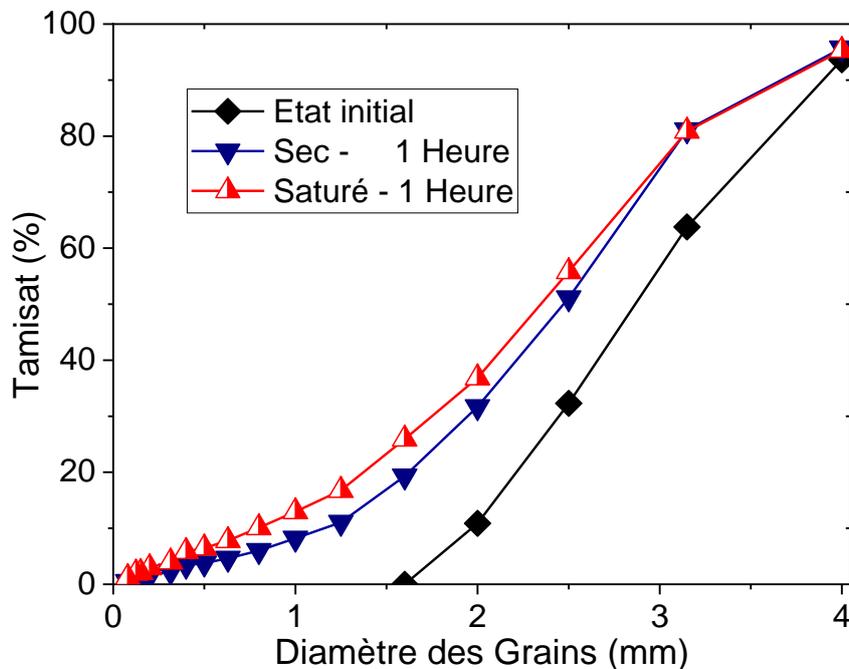


Figure 4.7. Variation de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final - Influence de la saturation.

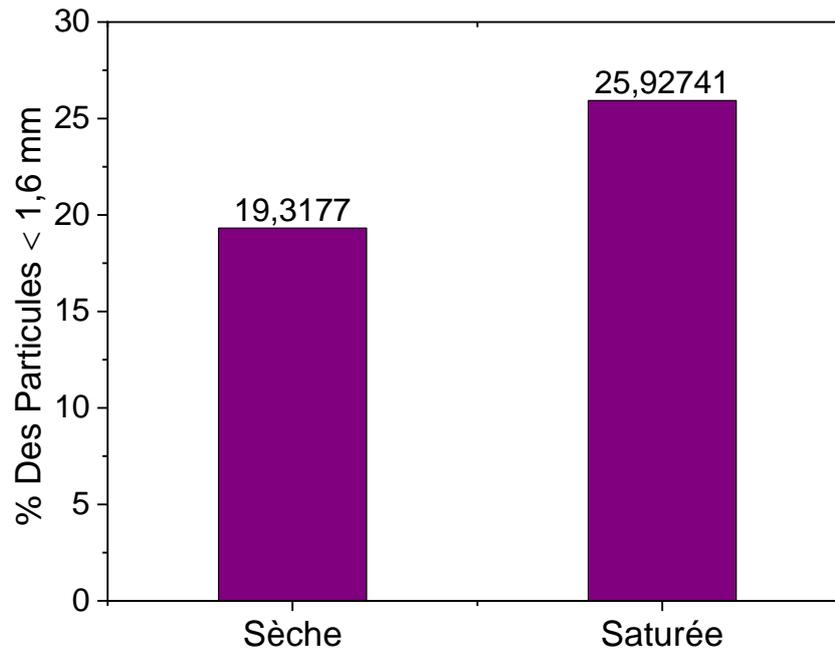


Figure 4.8. Pourcentage de particules inférieures à 1,6 mm - Influence de la saturation.

4.3.2 Influence de la densité initiale

Pour analyser l'impact de l'indice de densité des échantillons, trois essais distincts ont été menés sur des échantillons présentant des indices de densité de 0,9, 0,6 et 0,4. Une charge de 10 MPa a été appliquée lors de ces essais, puis maintenue pendant une durée d'une heure. La Figure 4.9 illustre l'évolution du déplacement en fonction du temps pour chacun de ces indices de densité. Les résultats montrent clairement que l'échantillon avec l'indice de densité le plus faible (0,4) subit un déplacement plus important. Ce comportement peut s'expliquer par un réarrangement notable des grains sous l'effet de la contrainte appliquée. Ce phénomène est attribué à la forte proportion de vides dans cet échantillon, ce qui limite la densité de contact entre les particules et favorise un ajustement structurel accru.

Les résultats de l'analyse granulométrique des trois échantillons, obtenus lors des essais, sont illustrés dans la Figure 4.10. Ces données révèlent que le taux de rupture des particules est modérément plus élevé pour l'échantillon ayant un indice de densité réduit (0,4), ce qui suggère une fragilité accrue des particules sous la contrainte appliquée. De plus, la production de particules de taille inférieure à 1,6 mm est également plus marquée pour cet échantillon (Figure 4.11), confirmant ainsi l'impact de la densité sur la résistance mécanique du matériau.

Cette tendance peut s'expliquer par la concentration de la charge appliquée (contrainte) à chaque échantillon. L'échantillon à faible densité, comportant un nombre réduit de particules,

présente un nombre limité de contacts entre les particules. Par conséquent, la contrainte est plus concentrée sur chaque grain, ce qui augmente la probabilité de rupture. En revanche, l'échantillon à densité plus élevée, avec un grand nombre de grains, favorise une distribution plus homogène de la contrainte grâce à un plus grand nombre de contacts, réduisant ainsi la concentration de la charge appliquée et diminuant la probabilité de rupture des grains.

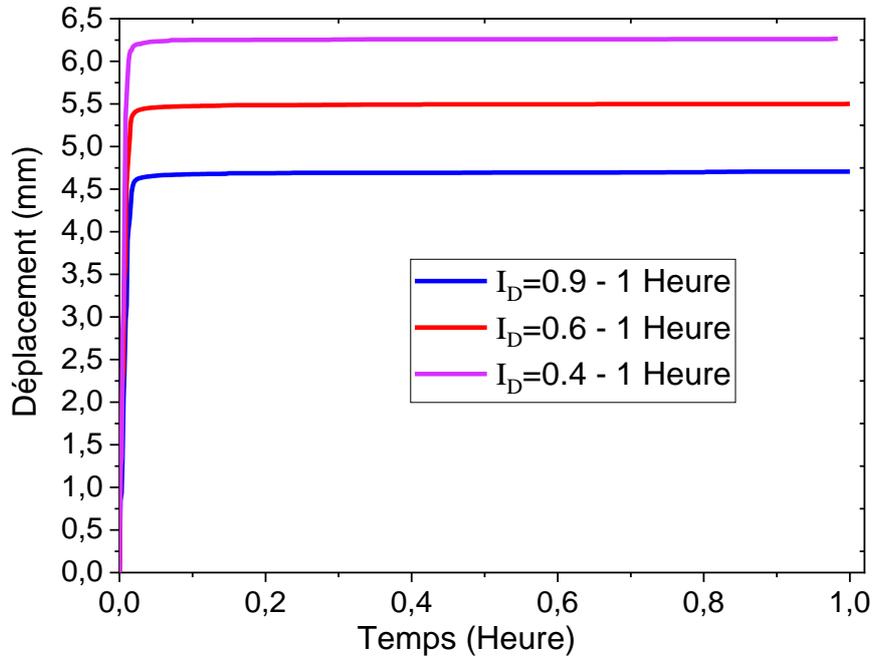


Figure 4.9. Courbe temps-déplacement - Effet de la densité.

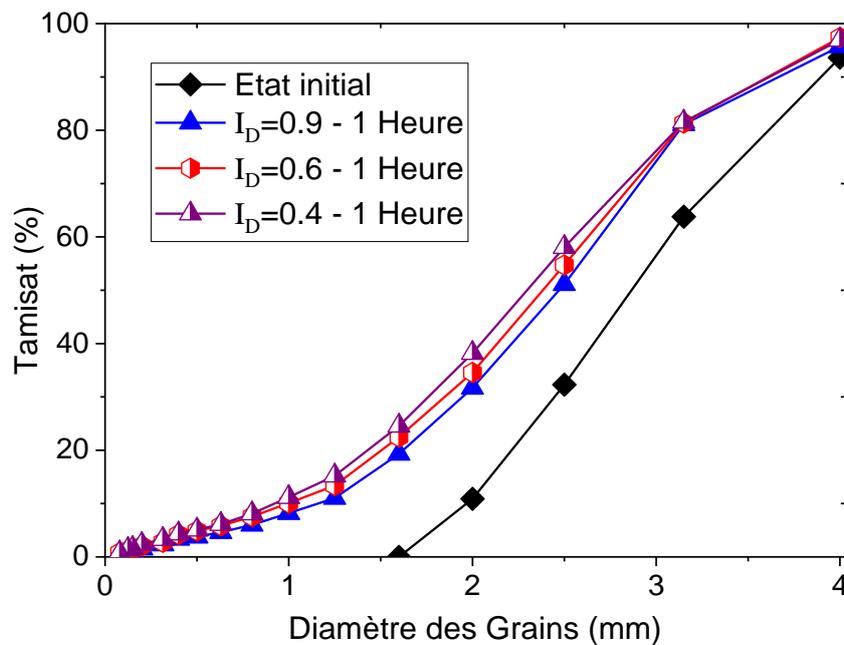


Figure 4.10. Variation de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final - Influence de la densité.

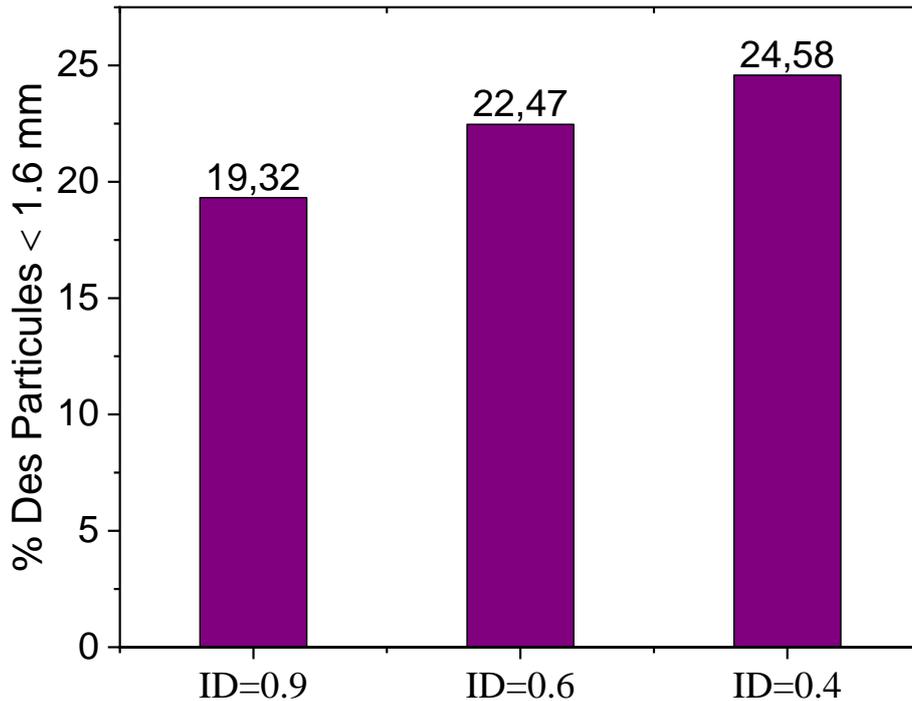


Figure 4.11. Pourcentage de particules inférieures à 1,6 mm - Influence de la densité.

4.3.3 Influence de la durée d'application de la charge - Fluage

Le temps d'application de la charge, également appelé Fluage, constitue l'un des facteurs essentiels pour l'étude du phénomène de rupture des particules d'un assemblage granulaire soumis à de fortes contraintes mécaniques. Ce phénomène est particulièrement pertinent dans l'analyse de la déformation progressive des matériaux sous charge constante. Un essai a été effectué sur une éprouvette sèche pendant une période prolongée de 24 heures, sous une contrainte maintenue de 10 MPa, tandis qu'un autre essai a été mené durant une heure. La variation du déplacement selon le temps, obtenue lors de ces tests, est illustrée à la Figure 4.12. Il est notable que, pour l'essai de 24 heures, le déplacement continue de croître au fil du temps sans se stabiliser, ce qui témoigne de l'effet persistant du fluage dans ce cas particulier.

La variation de la courbe granulométrique, comparant l'état initial à l'état final des deux essais, est illustrée dans la Figure 4.13. À l'état final, il est clairement visible qu'une nouvelle production de particules, absentes dans le matériau initial, a eu lieu au cours de l'essai. Cette production est légèrement plus marquée dans l'essai de 24 heures, suggérant que le fluage a induit un réarrangement et une fragmentation plus prononcés des grains. De plus, l'analyse granulométrique montre que la production de particules de taille inférieure à 1,6 mm est également plus importante pour l'essai de 24 heures, comme le montre la Figure 4.14. Ce phénomène peut être interprété comme une conséquence directe du fluage, où l'écrasement

des grains génère une réduction progressive de leur taille sous l'effet de la contrainte prolongée.

Selon les travaux de [Karimpour et Lade \(2013\)](#), le fluage est lié à un phénomène de fatigue statique ou de fracture retardée, où les grains se fracturent progressivement, entraînant un réarrangement de la structure granulaire. Cette déformation peut être expliquée par un processus où les grains se brisent lentement sous l'effet d'une contrainte appliquée de manière continue, provoquant ainsi une redistribution des fragments cassés. Dans une étude réalisée par [Lade et al. \(2010\)](#) sur un sable corallien, des essais triaxiaux ont été menés pour étudier les effets du fluage et de la relaxation. Les résultats ont montré que la déformation augmente avec le temps, confirmant ainsi l'hypothèse que cet effet résulte de la rupture retardée des grains, produisant un effondrement progressif du matériau par redistribution des fragments issus de cette fracture.

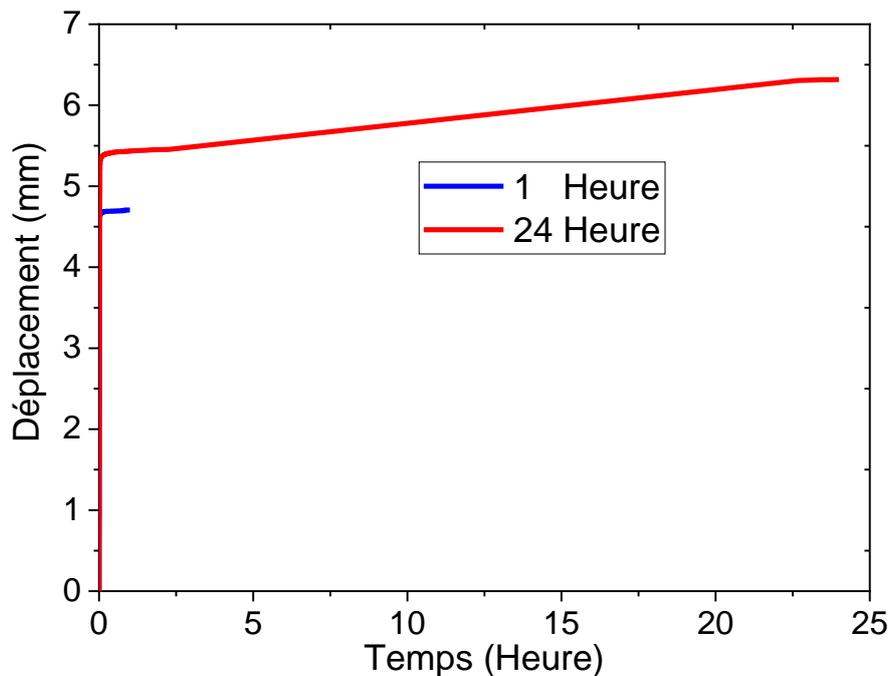


Figure 4.12. Courbe temps-déplacement - Effet du temps de chargement (Fluage).

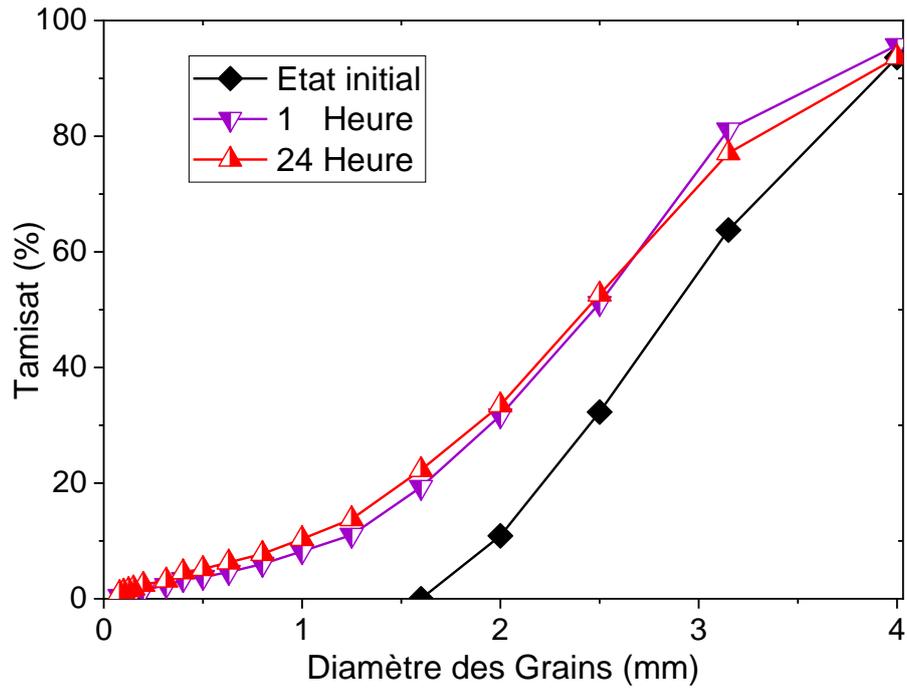


Figure 4.13. Variation de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final – Influence du Fluage.

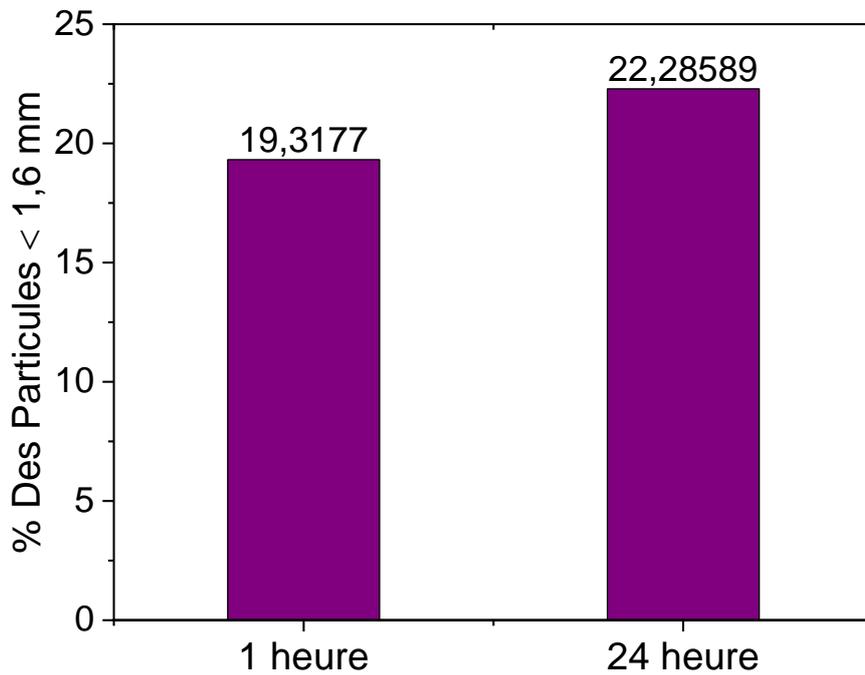


Figure 4.14. Pourcentage de particules fines inférieures à 1,6 mm – Influence du Fluage.

4.3.4 Analyse temporelle de la Perméabilité - Impact du Fluage

Pour analyser l'impact de la rupture des particules sur l'évolution de la perméabilité du sable carbonaté au cours du temps, des mesures de perméabilité ont été effectuées sur un échantillon de densité 0,9, exposé à une pression constante de 10 MPa. Ces tests ont été réalisés à divers moments, et les résultats sont illustrés dans la Figure 4.15. L'analyse des données révèle une réduction significative de la perméabilité du sable carbonaté au fil du temps. Cette altération peut être attribuée à l'effondrement progressif des pores ainsi qu'à la formation de fines particules, qui se produisent à cause de la rupture, et qui peuvent, avec le temps, s'accumuler et favoriser le colmatage lors du passage (circulation) de l'eau.

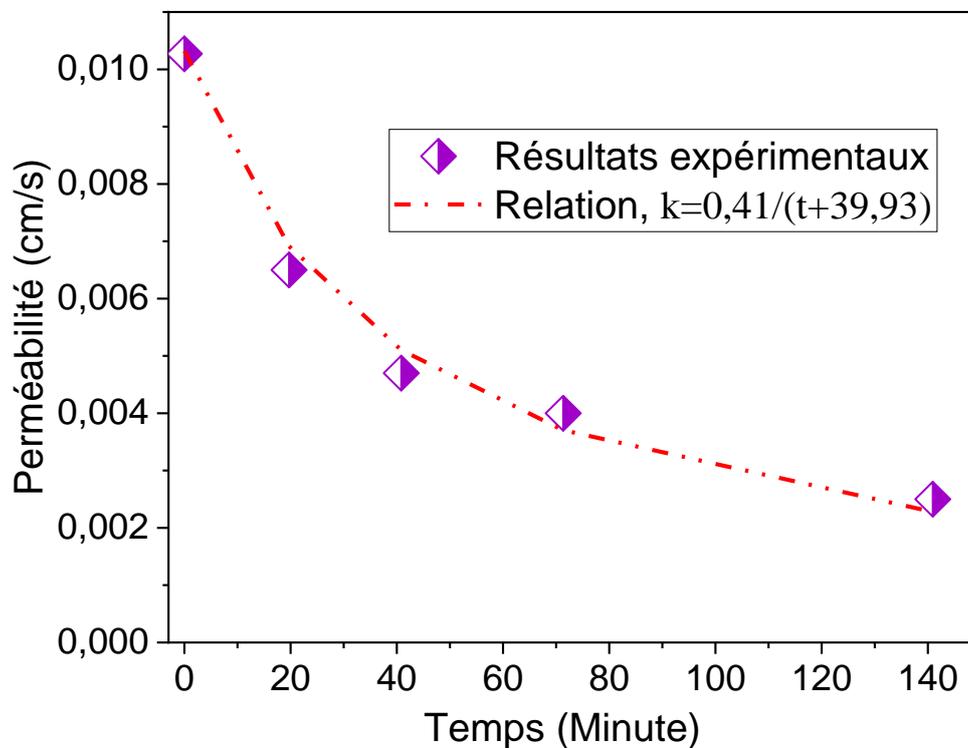


Figure 4.15. Variation de la perméabilité du sable carbonaté au fil du temps - Impact de Fluage.

De plus, dans ces conditions, la relation entre la perméabilité et le temps pour notre échantillon peut être décrite par la fonction suivante :

$$K = \frac{0,41}{t + 39,93} \quad (4.1)$$

Où 0.41 et 39.93 sont les coefficients de régression.

Cette relation présente un intérêt pratique majeur, car elle peut être utilisée pour évaluer la perméabilité d'un échantillon sans nécessiter la réalisation d'expériences supplémentaires.

4.4 Résultats de l'analyse d'images 3D

4.4.1 Propriétés microstructurales

Dans cette section, un premier calcul a été réalisé pour évaluer la représentativité des images 3D obtenues. Ces analyses ont porté sur la porosité et la surface spécifique (SSA) du premier échantillon à 0 MPa, comme illustré à la Figure 4.16. Les résultats montrent que le volume élémentaire représentatif (VER) pour ces deux propriétés est supérieur à 14 mm^3 (Figure 4.16). Par ailleurs, il est observé que le VER associé à la surface spécifique (SSA) est plus élevé que celui de la porosité.

Pour des dimensions de volume élémentaire représentatif VER (valeurs L) allant de 10 mm à 15 mm, on observe une nette augmentation de la surface spécifique et une légère diminution des valeurs de porosité. Cela peut s'expliquer par le fait que l'indice de vide est faible et que la quantité de grains est élevée. Cependant, il est important de noter que le volume élémentaire représentatif dans ces valeurs L (10 mm - 15 mm) n'est pas homogène, ce qui rend difficile l'adoption d'une approche continue. Lorsque la taille du volume élémentaire représentatif (VER) augmente (au-delà de la dimension VER de $L = 20 \text{ mm}$), les niveaux de porosité et de surface spécifique (SSA) restent constants. Cela favorise une représentation plus homogène du matériau, permettant ainsi l'adoption d'une approche continue. La dimension de VER adoptée dans cette étude est de $34 \times 34 \times 34 \text{ mm}^3$, afin de présenter adéquatement les caractéristiques du sable étudié.

Le choix d'un volume élémentaire représentatif (VER) de dimensions $34 \times 34 \times 34 \text{ mm}^3$ a été retenu afin de garantir une représentation fidèle des propriétés microstructurales du matériau. Ce volume permet notamment de capturer de manière adéquate la distribution granulométrique ainsi que la morphologie des particules. Comparé à des volumes de dimensions inférieures, ce VER offre une meilleure représentativité statistique de la structure interne du matériau, en particulier en ce qui concerne la diversité des formes (morphologie) et des tailles des grains.

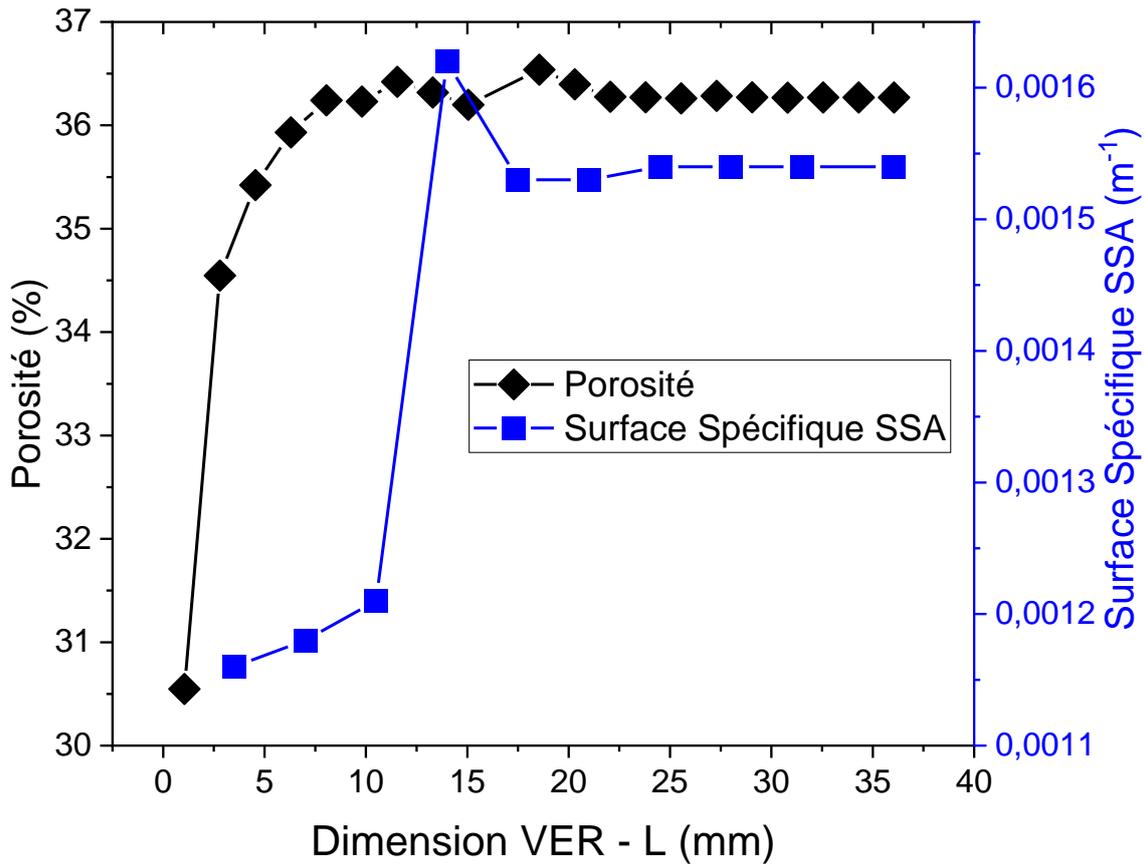


Figure 4.16. Calcul de la porosité et de la surface spécifique SSA de l'échantillon non chargé (0 MPa).

4.4.1.1 Porosité

La porosité des échantillons a été déterminée à partir des images 3D obtenues pour chaque étape de chargement (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Les résultats révèlent une diminution progressive et significative de la porosité au fur et à mesure de l'augmentation de la charge. Cette réduction est attribuée au réarrangement des grains ainsi qu'à la rupture des particules (Figure 4.17).

Les valeurs de porosité calculées ont ensuite été comparées aux données issues des mesures expérimentales. Cette comparaison met en évidence une concordance remarquable entre les deux approches, avec une précision élevée, l'erreur relative étant inférieure à 1,5 %. Ces résultats confirment la fiabilité de la méthode de calcul adoptée pour l'estimation de la porosité dans ce contexte.

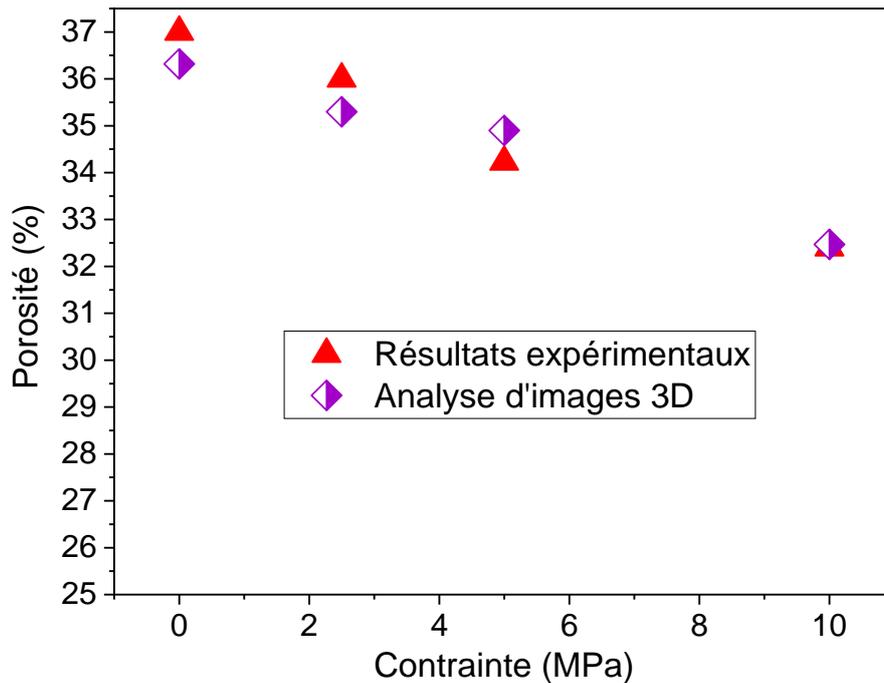


Figure 4.17. Evolution de la porosité en fonction de la contrainte appliquée.

4.4.1.2 Surface spécifique (SSA)

La surface spécifique (SSA) du sable a été déterminée à partir d'images 3D pour chaque étape de chargement en utilisant l'approche stéréologique, telle que décrite par [Flin et al. \(2011\)](#). Ce paramètre joue un rôle clé dans l'analyse des propriétés granulaires, car son évolution fournit une indication indirecte du phénomène d'écrasement des grains. En effet, l'augmentation de la SSA résulte de la fragmentation des grains et de la formation de particules fines.

La figure 4.18 illustre l'évolution de la SSA du sable en fonction des différentes contraintes appliquées. Cette évolution suit une tendance non linéaire, caractérisée par une augmentation progressive à mesure que la contrainte augmente. Un seuil critique a été identifié à partir de cette courbe, situé approximativement entre 2,5 et 3 MPa. Cette valeur est en excellent accord avec les résultats expérimentaux obtenus lors des essais œdométriques, où une contrainte équivalente de 2,5 MPa a été observée sur la courbe contrainte-déformation.

En détail, la SSA a connu une augmentation de 3,26 % lorsque la contrainte a atteint 2,5 MPa, et cette augmentation a grimpé significativement à 27,45 % sous une contrainte de 10 MPa. Ces résultats confirment la relation directe entre l'intensité des contraintes appliquées et le degré de fragmentation des grains de sable.

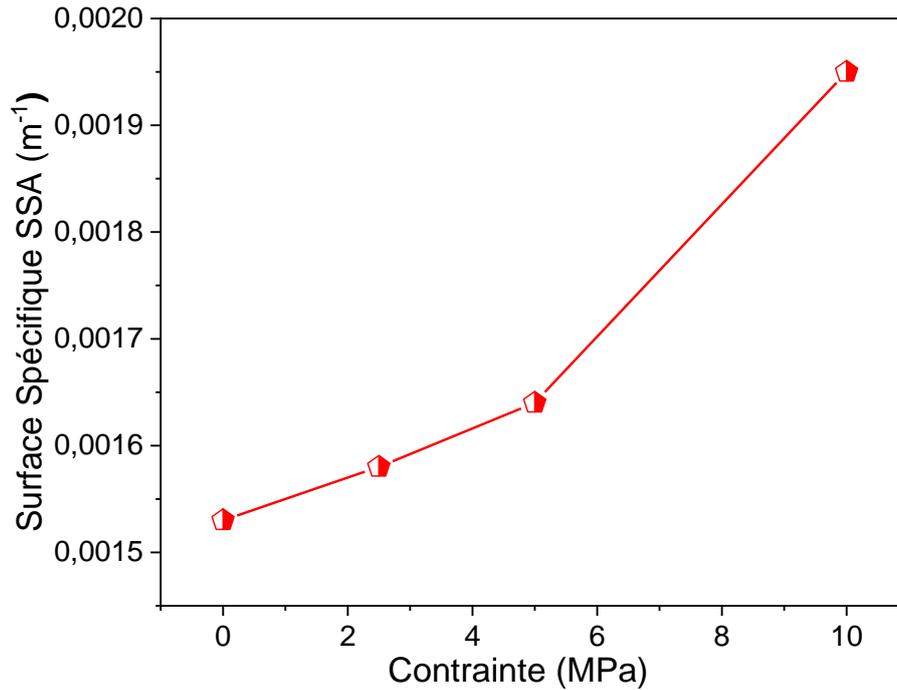


Figure 4.18. Evolution de la surface spécifique (SSA) au cours des étapes de chargement.

La Figure 4.19 illustre l'évolution du taux de vide en fonction de la surface spécifique. On observe clairement que le taux de vide diminue à mesure que la surface spécifique augmente. Ce phénomène peut être principalement attribué à plusieurs facteurs : tout d'abord, la réduction du volume des particules, accompagnée de la rupture des grains, entraîne la génération de particules fines. Cette fragmentation contribue à la création de nouvelles surfaces, ce qui, en retour, densifie le matériau. En effet, à mesure que la surface spécifique augmente, le matériau devient de plus en plus compact, réduisant ainsi les espaces vides.

Dans ce contexte et dans ces conditions de notre échantillon, une relation empirique a été développée dans ce travail afin de relier de manière quantitative la surface spécifique au taux de vide. Cette relation suit une loi exponentielle et peut être formulée comme suit :

$$e = 2641,37 \times \exp(-SSA/1,51 \times 10^{-5}) + 0,47 \quad (4.2)$$

Où e est le taux de vide, SSA est la surface spécifique (m⁻¹), 2641,37 et $1,51 \times 10^{-5}$ sont les coefficients de régression, et 0,47 est la valeur du taux de vide final. La mesure de fiabilité statistique pour les coefficients de régression R^2 est égale à 0,968.

Cette relation peut être utilisée afin d'établir le lien entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique.

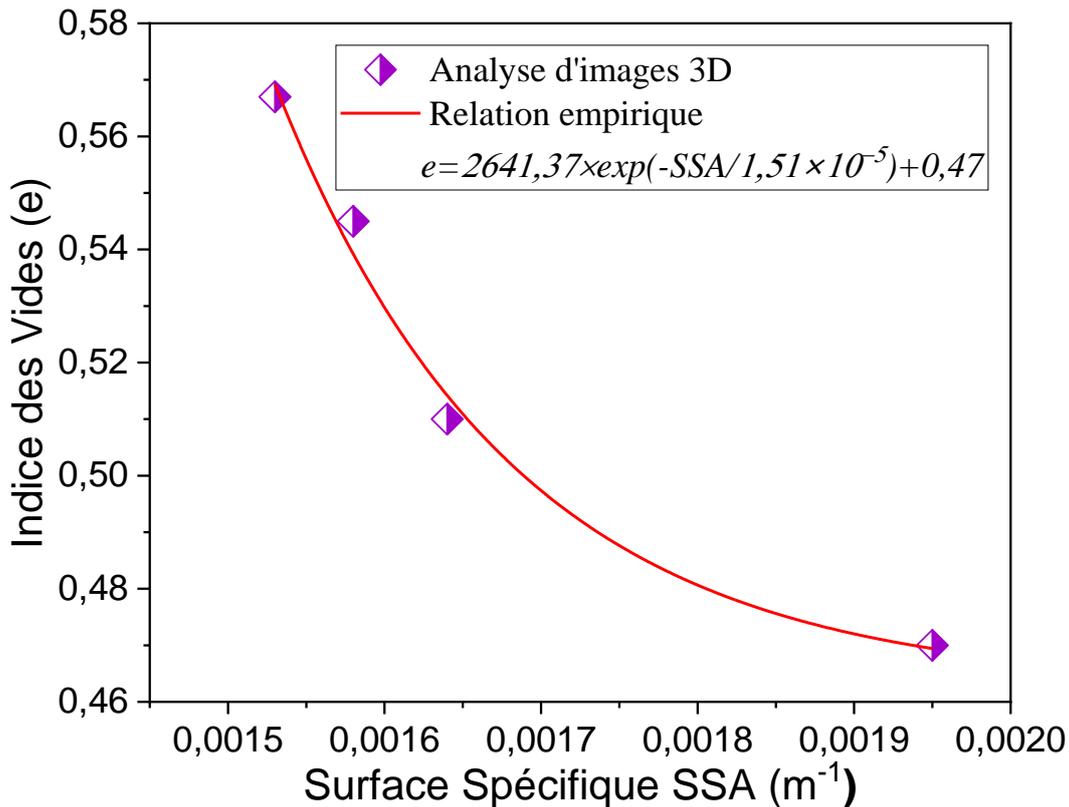


Figure 4.19. Évolution du taux de vide en fonction de la surface spécifique.

4.4.1.3 Distribution de la taille des pores

La figure 4.20 illustre l'évolution de la distribution des tailles des pores dans le sable à différentes étapes de chargement, mettant en évidence des variations significatives liées à l'application de différentes contraintes. Pour un chargement de 2,5 MPa, il est observé une diminution de la taille médiane des pores d'environ 50 μm par rapport à l'état initial, ce qui suggère un processus de compression du matériau. Cette réduction s'accompagne d'une modification marquée dans la distribution des tailles des pores : les pores de grande taille, variant entre 884 μm et 1496 μm , subissent une réduction importante, tandis que les pores plus petits, dont la taille varie de 68 μm à 476 μm , connaissent une augmentation notable après avoir franchi le seuil d'écrasement (2,5 MPa). La valeur médiane reste constante pour les autres contraintes appliquées (5 et 10 MPa) avec une nette diminution de la porosité. Il serait intéressant de comparer ces résultats obtenus à partir de l'analyse par tomographie à rayons X à ceux obtenus à partir d'un essai tensiométrique (Feia et al. 2014 ; Della et Feia 2018).

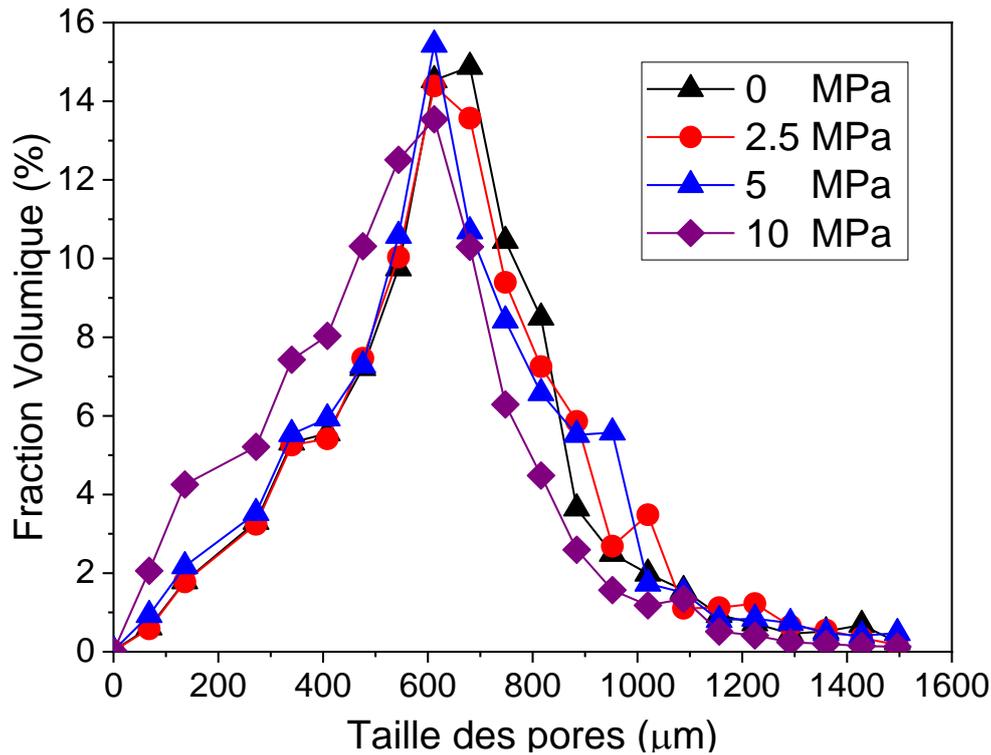


Figure 4.20. Distribution de la taille des pores pour les différents niveaux de contrainte.

4.4.2 Propriétés de contact

4.4.2.1 Nombre de coordination

Le nombre de coordination constitue un paramètre essentiel dans l'étude du phénomène de rupture des grains dans les matériaux granulaires. Il correspond au nombre de contacts qu'une particule entretient avec ses particules voisines. Ce nombre de contacts joue un rôle crucial dans le maintien de la stabilité et de la structure de l'assemblage granulaire, en représentant la quantité de forces ou de contraintes agissant sur chaque particule pour préserver son intégrité.

Le nombre de coordination est donc un indicateur fondamental pour appréhender le comportement mécanique des systèmes granulaires. En particulier, une particule possédant un nombre de coordination faible est davantage susceptible de subir une rupture des grains, due à la concentration des forces exercées sur elle (Karatzas et al. 2019). Plus précisément, les particules mal connectées, avec moins de contacts voisins, sont plus vulnérables à la rupture sous l'effet de contraintes locales.

La Figure 4.21 illustre la répartition du nombre de coordination sous l'effet de différentes valeurs de contraintes appliquées (0, 2,5, 5 et 10 MPa). À mesure que la contrainte augmente, on observe que la distribution du nombre de coordination se déplace légèrement vers la droite.

Cela indique que le nombre de contacts par grain tend à augmenter légèrement en réponse aux phénomènes de rupture et de compactage des particules. Cette évolution montre l'impact de la compression sur la densification du matériau granulaire et son influence sur la résistance mécanique de l'ensemble.

Dans la figure 4.21, l'axe des ordonnées (axe Y) représente la fréquence relative, définie comme le rapport entre l'effectif d'une valeur donnée et l'effectif total. Dans notre cas, l'effectif de la valeur correspond au nombre de répétitions du nombre de coordination par grain, tandis que l'effectif total représente le nombre total de grains dans l'échantillon. Cette définition est exprimée par l'équation (4.3) comme suit :

$$\text{Fréquence Relative} = \frac{\text{Effectif de la valeur}}{\text{Effectif Total}} = \frac{\text{Répétition du nombre de coordination}}{\text{Nombre total de grains dans l'échantillon}} \quad (4.3)$$

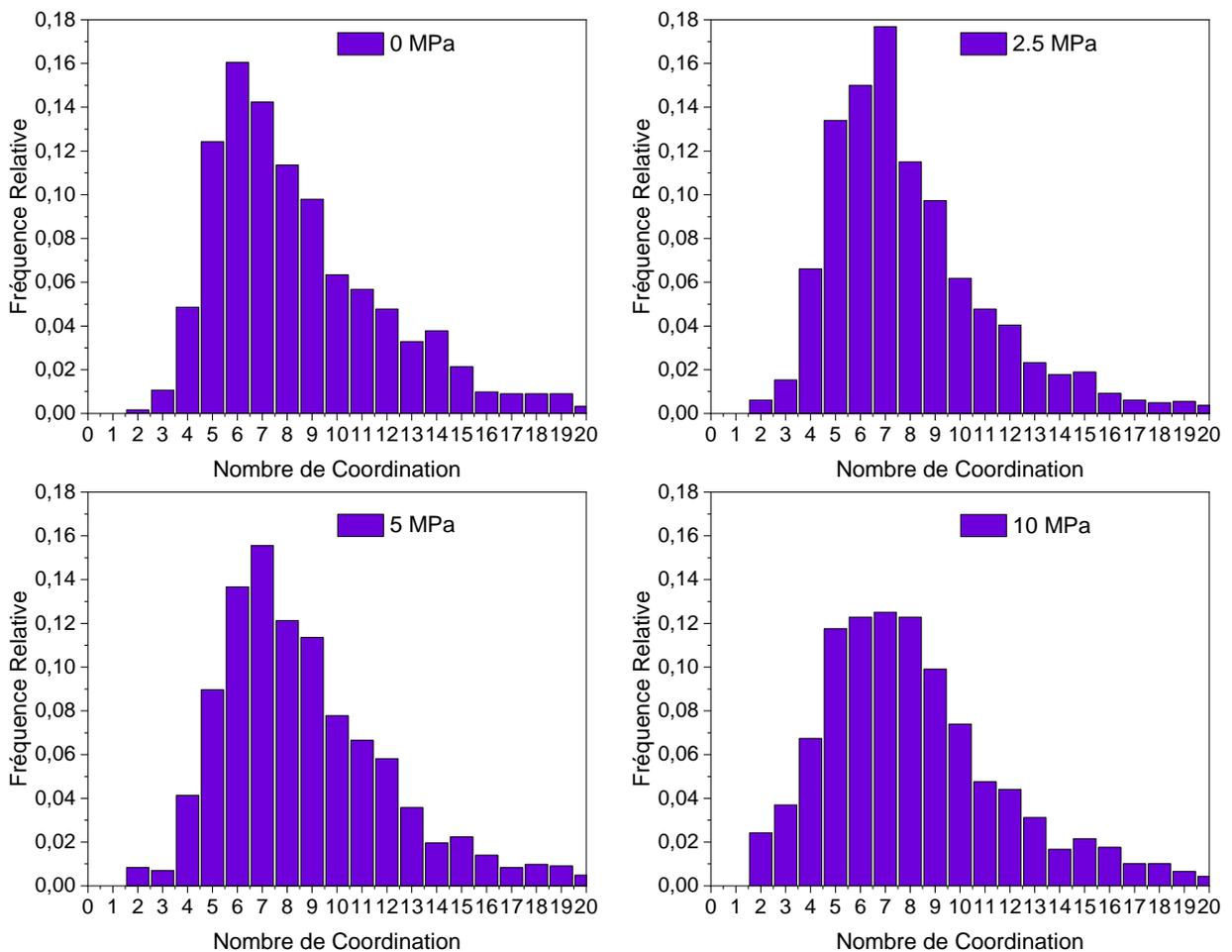


Figure 4.21. Distribution du nombre de coordination.

Le nombre de coordination moyen a été calculé pour chaque niveau de contrainte appliqué, afin d'étudier son évolution en réponse à ces variations. La figure 4.22 illustre clairement cette évolution, montrant l'impact de la contrainte sur le nombre de coordination moyen. Les résultats indiquent que ce nombre reste globalement stable autour de 8 pour l'ensemble des étapes de chargement. Pour l'échantillon non chargé, le nombre de coordination moyen initial était de 8,5, avant de diminuer légèrement à 7,7 lorsqu'une contrainte de 2,5 MPa a été appliquée. Cependant, cette diminution n'est pas permanente, car le nombre de coordination moyen a augmenté pour atteindre 8,6 lorsque l'échantillon a été soumis à une contrainte de 10 MPa.

Cette fluctuation du nombre de coordination moyen peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment la taille des grains et la rupture des particules sous l'effet de la contrainte. En effet, [Zhao et al. \(2019\)](#) ont observé que la fragmentation des particules génère une grande quantité de fragments plus petits, lesquels remplissent les vides et entourent les particules plus grosses. Ce phénomène de fragmentation contribue à une réduction du nombre de coordination, car ces fragments de petite taille ont tendance à présenter de faibles valeurs de coordination.

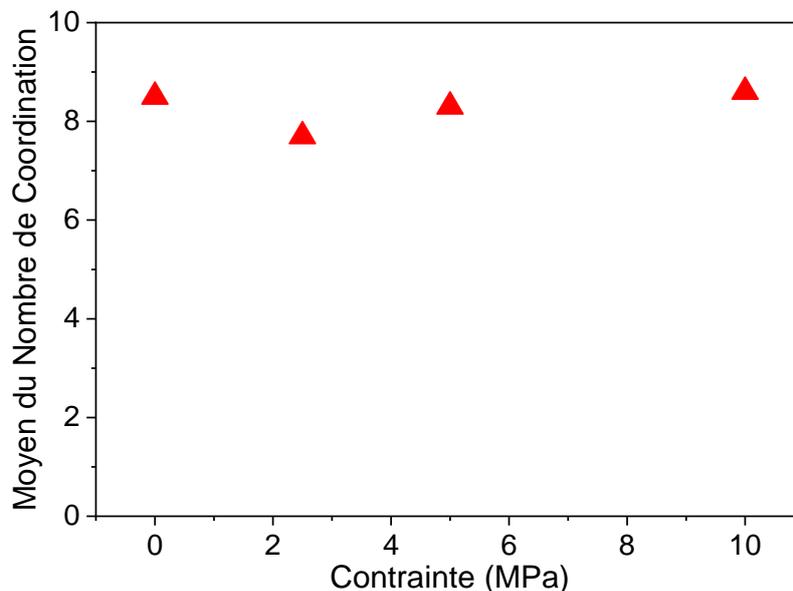


Figure 4.22. Évolution du nombre de coordination moyen en fonction de la contrainte appliquée.

Afin d'illustrer l'évolution du nombre de coordination, deux grains ont été suivis à chaque niveau de charge. Le premier grain reste intact tout au long des étapes de chargement, tandis que le deuxième est divisé en trois parties distinctes à 10 MPa. Les résultats obtenus à partir du suivi de ces deux grains sont présentés respectivement dans les figures 4.23 et 4.24.

Les résultats de la figure 4.23 montrent que le nombre de coordination du grain intact augmente au fur et à mesure de l'application de la charge. En effet, à 0 MPa, le nombre de coordination est de 14, tandis qu'à 10 MPa, il atteint 21. Cette augmentation est principalement due à la génération de nouvelles particules plus petites qui se forment autour du grain intact, créant ainsi davantage de contacts avec les autres particules.

En revanche, les résultats relatifs au deuxième grain, illustrés dans la figure 4.24, révèlent une dynamique différente. À 0 MPa, ce grain présente un nombre de coordination de 11, qui grimpe à 26 à 5 MPa. Cependant, lorsque la charge atteint 10 MPa, le grain se divise en trois fragments de tailles différentes. On observe que le plus gros fragment, représenté par le grain rouge, possède un nombre de coordination relativement élevé, atteignant 16, tandis que le fragment le plus petit, identifié par le grain vert, ne compte que 7 contacts. Cette observation met en évidence que le nombre de coordination dépend non seulement de la taille de la particule, mais aussi des fragments qui l'entourent. Les particules de plus grande taille tendent à présenter un nombre de coordination plus élevé, tandis que les fragments plus petits, formés lors de la rupture du grain, affichent un nombre de coordination plus faible.

De plus, la probabilité qu'un grain se rupture ou reste intact peut être influencée par la distribution des forces de contact dans son état initial, ce qui est étroitement lié à la concentration de contrainte. En effet, lorsque le grain présente un nombre élevé de contacts, la force appliquée se répartit sur une plus grande surface, entraînant une réduction significative de la concentration de contrainte. Cette répartition atténuée ainsi les effets de la force locale sur le grain. En revanche, lorsqu'un grain possède un nombre faible de contacts, la force appliquée est moins répartie, ce qui augmente la concentration de contrainte sur des zones spécifiques, rendant ainsi le grain plus susceptible à la rupture. Par conséquent, la probabilité de rupture des particules est plus élevée lorsque le grain présente un faible nombre de contacts (nombre de coordination).

Zhao et al. (2019) ont mené une étude approfondie sur l'impact des modes de rupture des particules sur le nombre de coordination. Ils ont identifié trois principaux modes de fracture :

- 1- **L'écaillage** : Ce processus consiste en la séparation de petites parties superficielles de la particule, souvent sans altérer sa structure principale.
- 2- **La division** : Ce mode implique la scission de la particule en deux ou plusieurs fragments principaux, généralement de tailles significatives.

- 3- **La fragmentation** : Ce phénomène correspond à une désintégration extensive de la particule, produisant une grande variété de fragments, souvent de très petites dimensions.

Ces différents modes de rupture influencent directement la distribution des tailles des particules, ce qui a un impact notable sur le nombre de coordination. Zhao et al. (2019) ont observé que le nombre de coordination moyen augmente avec la taille des particules, en particulier pour les particules les plus grandes. Cette tendance est attribuée à la génération d'un grand nombre de fragments plus petits, qui remplissent les vides et s'agglomèrent autour des particules plus volumineuses. En revanche, les fragments plus petits présentent généralement un nombre de coordination moyen inférieur.

Cette relation est illustrée par les résultats figurant dans la figure 4.24, où l'évolution d'un seul grain a été suivie à différents niveaux de chargement. À une contrainte de 10 MPa, ce grain s'est scindé en trois fragments distincts de tailles variées. Les observations révèlent une corrélation directe entre la taille des grains et leur nombre de coordination. Plus précisément :

- Le plus **petit** fragment (en vert) présente seulement 7 contacts.
- Le fragment de **taille intermédiaire** (en violet) atteint un nombre de coordination de 14.
- Le plus **gros** fragment (en rouge) affiche un nombre de coordination élevé de 16.

Ces résultats mettent en évidence que les particules plus grandes, entourées de multiples fragments, tendent à établir davantage de contacts avec leur environnement, renforçant ainsi leur rôle dans la microstructure du matériau.

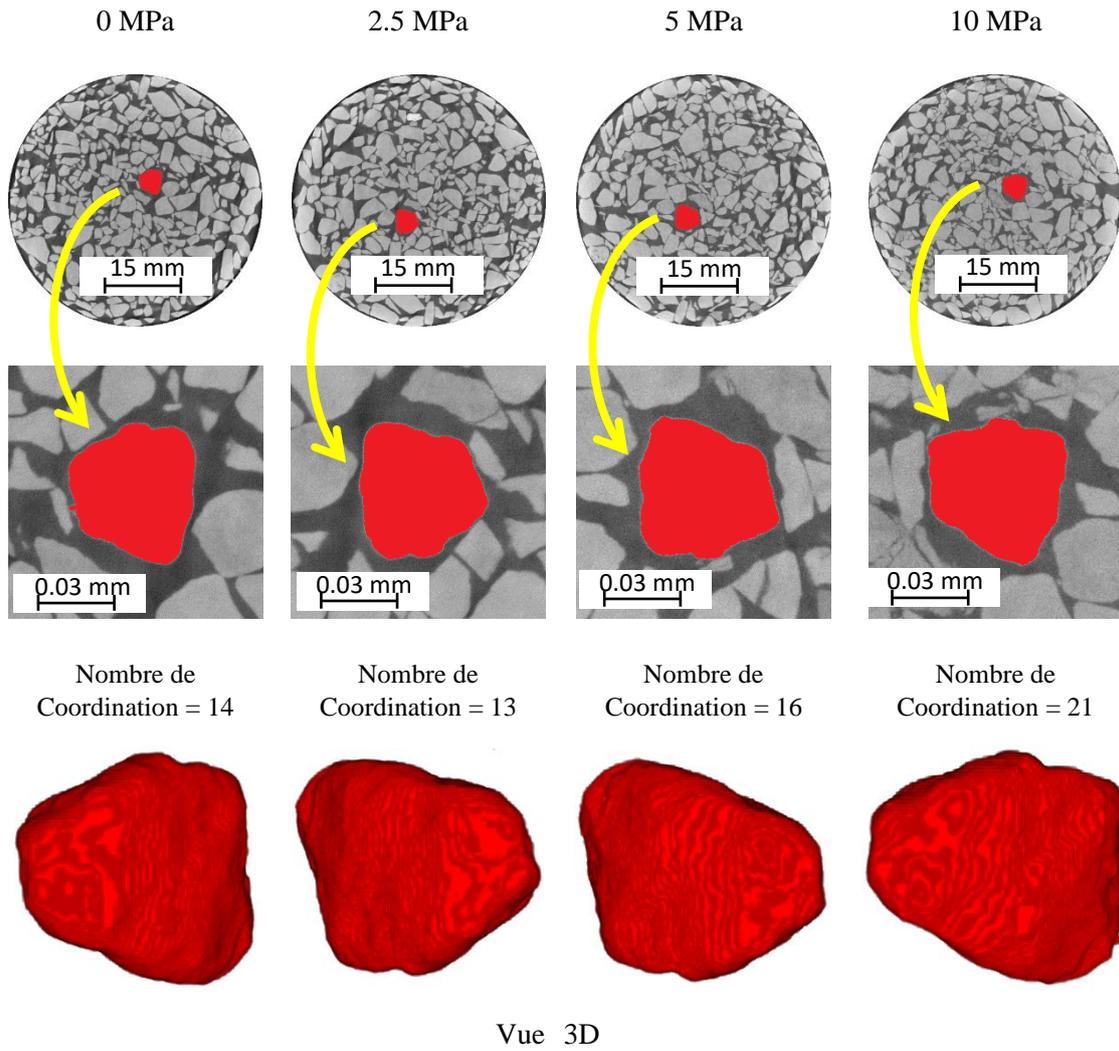


Figure 4.23. Évolution du nombre de coordination d'une particule intacte en fonction de la contrainte appliquée.

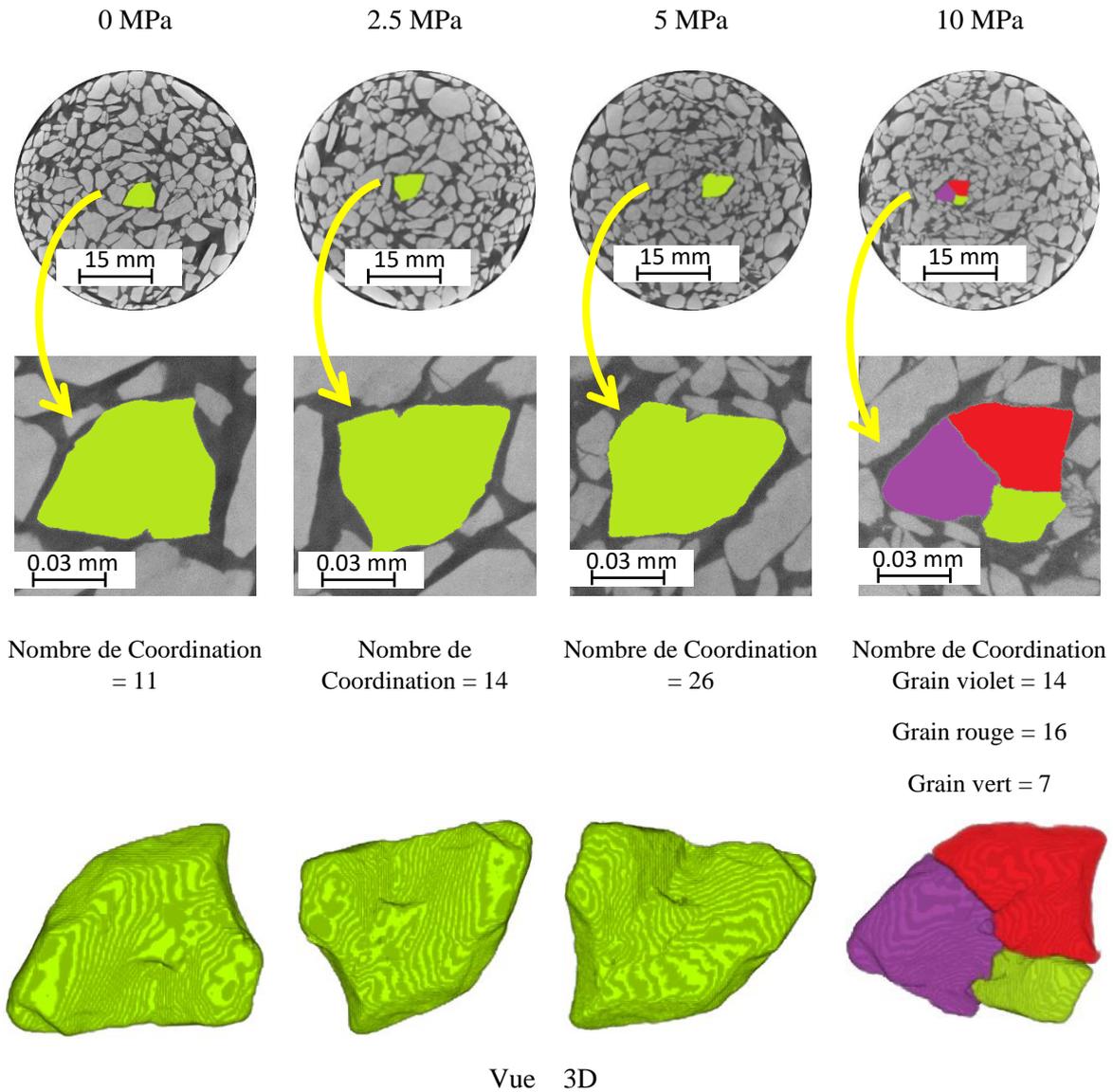


Figure 4.24. Évolution du nombre de coordination d'une particule divisée en trois parties à 10 MPa en fonction de la contrainte appliquée.

4.4.2.2 Surface de contact

Le phénomène de rupture des grains joue un rôle crucial dans l'évolution des surfaces de contact au sein d'un matériau granulaire. Ce processus induit la formation de nouveaux contacts en raison du réarrangement et de la rupture des grains. La figure 4.25 illustre la distribution des surfaces de contact sous différentes contraintes appliquées : 0 MPa, 2,5 MPa, 5 MPa et 10 MPa.

Les résultats révèlent une augmentation progressive des surfaces de contact avec l'accroissement de la contrainte appliquée. En particulier, on observe une augmentation notable du pourcentage des grandes surfaces de contact (comprises entre 1000 et 2500 μm^2).

Ce pourcentage passe de 5,2 % dans l'état initial (0 MPa) à 10,45 % sous la contrainte maximale de 10 MPa. Ce phénomène s'explique par la rupture des particules, qui génère de nouvelles surfaces de contact plus importantes. La rupture des grains contribue ainsi non seulement à la création de nouveaux points de contact, mais également à l'augmentation de leur taille moyenne, modifiant ainsi les propriétés mécaniques globales du matériau.

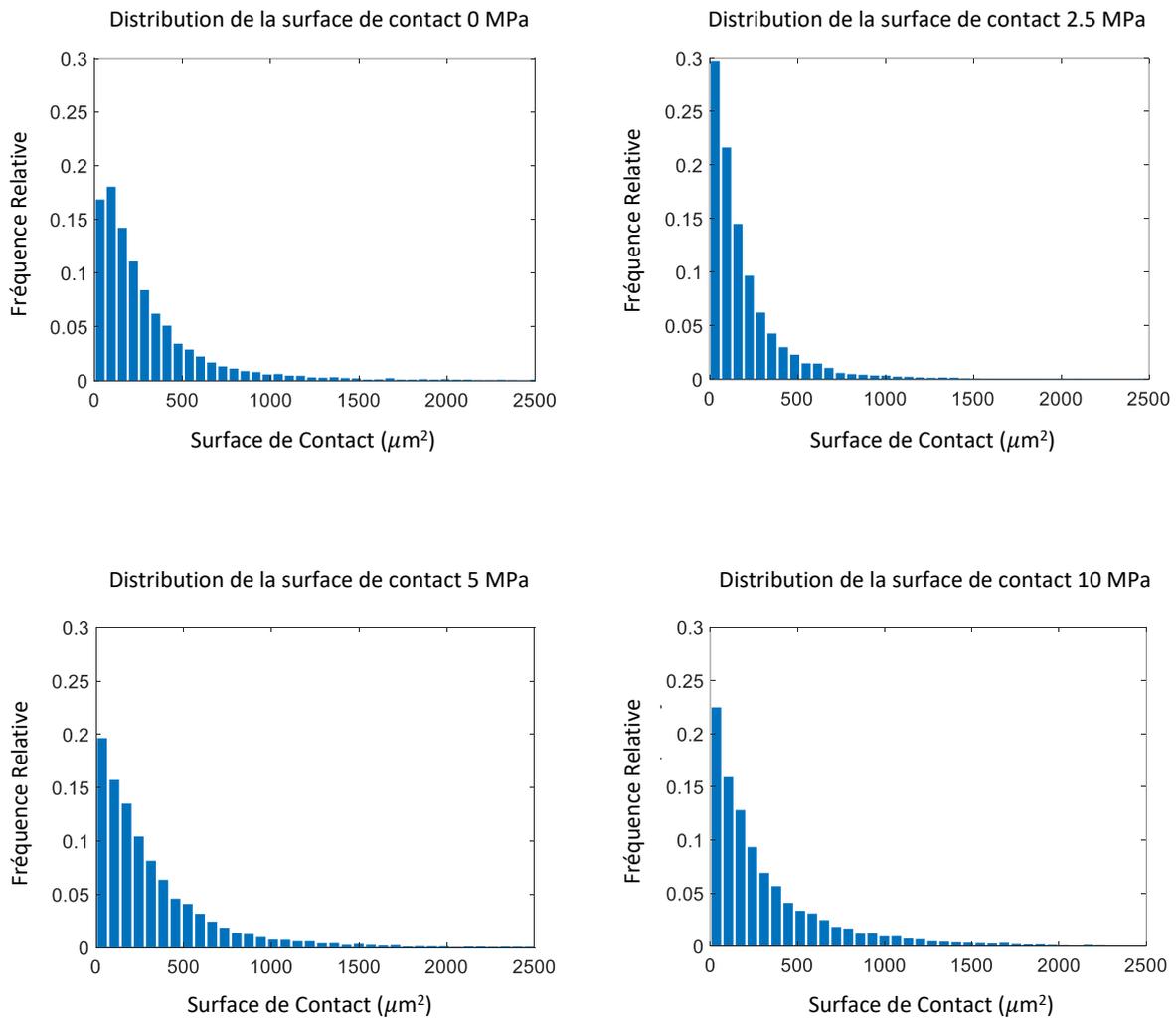


Figure 4.25. Distribution de la surface de contact.

De plus, la surface de contact moyenne, définie comme le rapport entre la surface de contact totale et le nombre total de contacts, a été calculée pour chaque niveau de charge appliquée. L'évolution de cette surface de contact moyenne en fonction de la contrainte appliquée est illustrée dans la Figure 4.26.

Cette figure met en évidence une tendance claire : la surface de contact moyenne augmente progressivement avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Plus précisément, une augmentation significative de 14,18 % a été observée lorsque la contrainte atteignait son

niveau le plus élevé (10 MPa). Ce phénomène peut être expliqué par l'accroissement des interactions entre les surfaces en contact sous des charges plus importantes.

L'augmentation de la surface de contact moyenne confère à l'échantillon une plus grande résistance, notamment face aux contraintes de cisaillement et de compression, ce qui peut avoir des implications importantes pour sa durabilité et ses performances mécaniques dans des conditions de charge extrêmes.

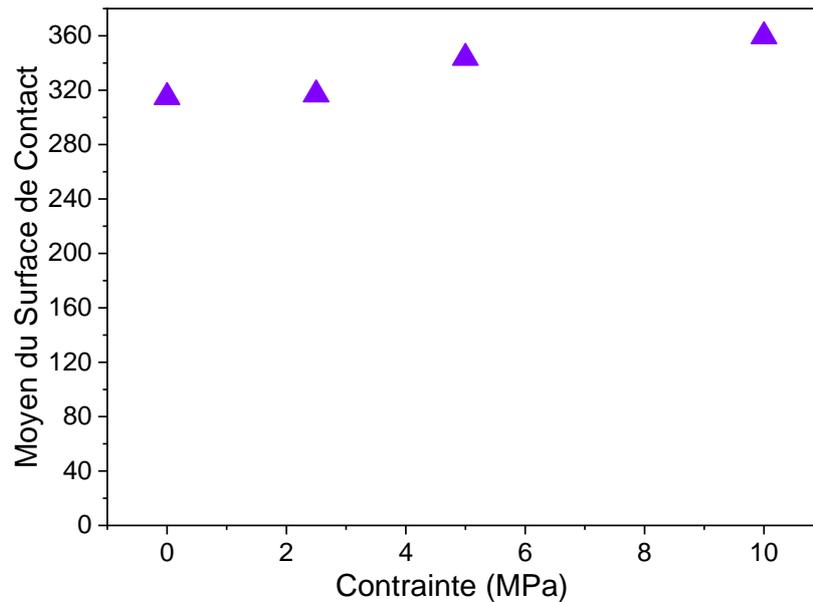


Figure 4.26. Évolution de la surface de contact moyenne en fonction de la contrainte appliquée.

4.4.2.3 Réseau de contact

Dans les matériaux granulaires, les particules interagissent principalement par l'intermédiaire de forces de contact. Ces interactions se traduisent par un réseau de contact, qui constitue une représentation spatiale de la distribution et de la connectivité des points de contact entre les grains. Chaque point de contact agit comme un site de transmission des forces, jouant ainsi un rôle crucial dans l'intégrité structurelle et la réponse mécanique globale de l'ensemble granulaire.

Une visualisation tridimensionnelle des surfaces de contact permet de mieux comprendre la structure interne du réseau de contact au sein de l'échantillon étudié. Cette analyse met en évidence l'évolution du réseau à mesure que l'échantillon subit des niveaux croissants de chargement. La figure 4.27 illustre comment le réseau de contact évolue avec l'application progressive de la charge.

Avec l'augmentation de la charge appliquée, on observe une densification progressive du réseau de contact, et le nombre total de contacts dans l'échantillon augmente avec la contrainte appliquée, passant de 7760 à 0 MPa à exactement 13729 à 10 MPa, comme illustré à la figure 4.27. Ce phénomène s'explique par deux mécanismes principaux : d'une part, la formation de nouveaux contacts due au rapprochement des grains ; d'autre part, la rupture des particules, qui génère de nouvelles interfaces de contact.

Cette densification du réseau de contact joue un rôle fondamental dans la répartition des contraintes appliquées. En multipliant les points de contact, le matériau répartit plus efficacement les forces, ce qui réduit les concentrations locales de contrainte et confère une plus grande rigidité à l'échantillon. Ainsi, l'évolution du réseau de contact constitue un indicateur clé des propriétés micro-mécaniques et de la résistance structurelle du matériau granulaire sous contrainte.

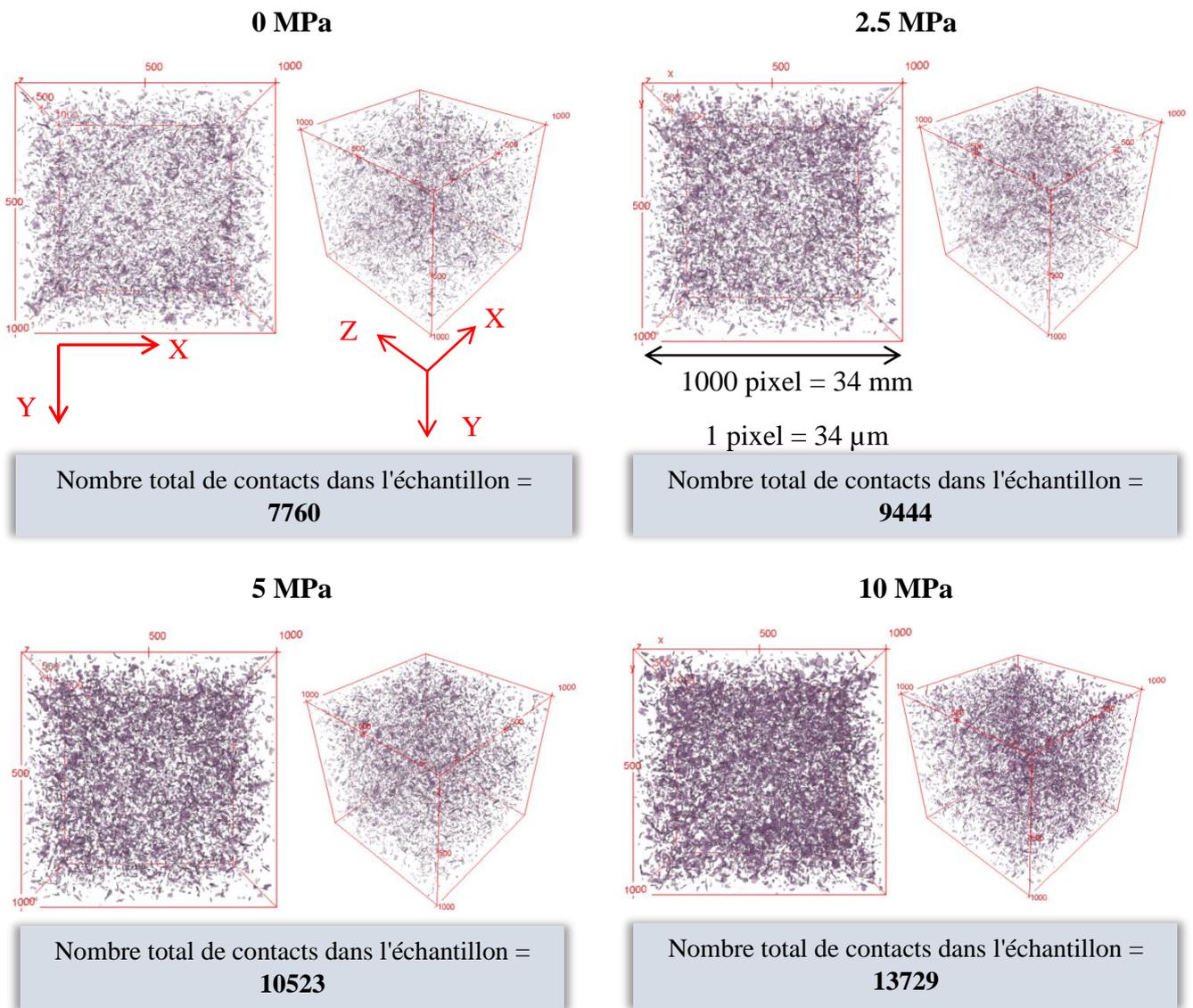


Figure 4.27. Évolution du réseau de contact en fonction de la contrainte appliquée.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude expérimentale a été réalisée pour explorer l'effet du phénomène de rupture de grains sur l'évolution des propriétés microstructurales et de contact à l'intérieur de sable carbonaté soumis à une contrainte oedométrique élevée. Ces essais ont été suivis par des analyses de la distribution granulométrique et des mesures de perméabilité. Et des essais oedométrique à haute pression de fluage ont été effectués afin d'explorer l'effet de fluage sur le phénomène de la rupture des particules dans un matériau granulaire. Les changements microstructuraux ont également été suivis en effectuant une microtomographie 3D à rayons-X pour le même échantillon testé sous différents niveaux de contrainte (0, 2,5, 5, 10 MPa). Différentes propriétés microstructurales et de contact ont été calculées à partir de ces images telles que : la porosité, la SSA, la distribution de la taille des pores, la surface de contact, le nombre de coordination et le réseau de contact. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Une diminution de la perméabilité a été constatée en fonction de la contrainte exercée. Cette réduction résulte de l'effondrement des pores et de la génération de fines particules qui obstruent les pores lors de la rupture des grains.
- Les résultats des essais de fluage révèlent que la rupture des particules augmente avec le temps, c'est-à-dire avec la durée de chargement. Ils mettent également en évidence que cette rupture est particulièrement prononcée dans les échantillons saturés ainsi que dans ceux présentant un faible indice de densité.
- Les résultats des essais de fluage et l'analyse de l'évolution de la perméabilité au fil du temps sous une charge constante ont conduit à l'élaboration d'une loi empirique décrivant la relation entre la perméabilité et le temps. Cette loi constitue un outil précieux pour estimer la perméabilité sans avoir recours à des expérimentations supplémentaires.
- La porosité calculée à partir d'images 3D a montré une très bonne concordance avec la porosité mesurée expérimentalement avec une erreur inférieure à 1,5 %.
- Une diminution des gros pores et une augmentation des petits pores ont été observées après le seuil de rupture de l'échantillon scanné.
- La surface de contact augmente avec l'accroissement de la charge, en raison de la rupture des particules, où une augmentation de 14,18 % a été observée dans la contrainte appliquée la plus élevée (10 MPa). L'évolution du nombre de coordination a montré une forte dépendance à la taille des grains et à la fragilité des grains qui dépend des microfissures à l'intérieur des grains. Les particules plus grosses ont un

nombre de coordination élevé, tandis que les fragments plus petits ont un petit nombre de coordination. Pour les grains qui restent intacts après le chargement, leur nombre de coordination augmente à mesure que la charge augmente et vice versa. La surface de contact supplémentaire et le nombre de coordination rendent l'échantillon plus résistant aux contraintes de cisaillement et de compression.

- Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de développer une relation empirique entre l'indice de vide et la surface spécifique (SSA). Cette relation peut être liée à la surface spécifique et à l'indice de vide à l'échelle micro-macro ou vice versa.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale

Le but de cette thèse est d'analyser le phénomène de rupture des particules dans un matériau granulaire lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques importantes. Cette étude vise à comprendre les mécanismes à l'origine de la rupture des particules à l'échelle micro et à évaluer leur impact sur les propriétés globales du matériau. Il vise également à analyser les changements microstructuraux qui se produisent entre les particules en raison de ce phénomène de rupture. Cette étude a été menée suivant deux volets complémentaires. Le premier volet expérimental repose sur l'utilisation de deux dispositifs : l'oedomètre à haute pression et un dispositif de mesure de perméabilité basé sur le tube de Mariotte. Cette étude a permis d'explorer l'influence de divers paramètres clés tels que l'intensité de la contrainte appliquée, la saturation et la densité de l'échantillon, ainsi que la durée de chargement (Fluage). Le deuxième volet s'est consacré à l'analyse des images 3D obtenues par tomographie aux rayons-X, afin d'approfondir, qualitativement et quantitativement, l'étude de l'évolution des propriétés microstructurales (porosité, surface spécifique (SSA), distribution des tailles de pores) et des propriétés micro-mécaniques des contacts (nombre de coordination, surface de contact, réseau de contacts).

Des tests oedométriques à haute pression ont été réalisés sur des échantillons de sable carbonaté dont les grains dépassaient 1,6 mm, à différents niveaux de pression (0, 2,5, 5 et 10 MPa). Après chaque essai, des analyses granulométriques ont été menées sur les éprouvettes pour examiner la génération de fragments ou de particules fines issus de la rupture des grains. Par ailleurs, des mesures de perméabilité ont été réalisées pour chaque niveau de pression appliqué, afin d'évaluer l'effet de cette pression sur les propriétés du sable.

En outre, des essais oedométriques à haute pression ont été réalisés sur des échantillons de sable carbonaté, dans deux conditions distinctes : état sec et état saturé. Ces essais ont été réalisés sur des échantillons présentant des densités variées, ainsi que pour différentes durées de chargement, afin d'explorer l'effet du fluage sur la rupture des particules. Des mesures de perméabilité ont également été effectuées sur un échantillon de sable carbonaté pendant 24 heures.

Quatre scans aux rayons X ont été réalisés sur un échantillon de sable carbonaté soumis à différentes charges de contrainte (0, 2,5, 5 et 10 MPa). L'échantillon, préparé avec une densité relative initiale de 0,88, a d'abord été scanné sans contrainte (0 MPa) pour établir son état

microstructural initial. Par la suite, il a été exposé à trois niveaux de contrainte supplémentaires (2,5, 5 et 10 MPa) et scanné à chaque étape afin d'analyser l'évolution de sa microstructure en fonction de la charge appliquée. Les images 3D obtenues par tomographie aux rayons-X, après les quatre scans, ont été traitées et analysées afin d'explorer l'évolution des propriétés microstructurales et des propriétés de contact.

Les résultats majeurs obtenus au cours de cette étude sont les suivants :

- Le niveau de contrainte appliqué a un impact significatif sur la rupture des grains. En effet, la production de fragments et de fines particules augmente à mesure que la contrainte appliquée augmente.
- Une diminution de la perméabilité a été observée en fonction de la contrainte appliquée. Cette réduction est attribuée à l'effondrement des pores et à la génération de fines particules qui obstruent les pores lors de la rupture des grains.
- Les essais de fluage ont montré que la rupture des particules s'intensifie avec le temps, en particulier pendant la période de chargement prolongé. Ce phénomène est plus marqué dans les échantillons saturés et ceux présentant une faible densité.
- Les résultats des essais de fluage, couplés à l'analyse de l'évolution de la perméabilité au fil du temps sous charge constante, ont permis d'établir une loi empirique qui décrit la relation entre la perméabilité et le temps. Cette loi constitue un outil précieux pour estimer la perméabilité sans nécessiter de nouvelles expérimentations.
- La porosité calculée à partir d'images 3D a montré une excellente concordance avec la porosité mesurée expérimentalement, avec une erreur inférieure à 1,5 %.
- Une diminution des gros pores et une augmentation des petits pores ont été observées après le seuil de rupture de l'échantillon scanné.
- La surface de contact a augmenté avec la charge appliquée en raison de la rupture des particules, avec une augmentation de 14,18 % pour la contrainte la plus élevée (10 MPa).
- L'évolution du nombre de coordination a montré une forte dépendance à la taille et à la fragilité des grains, ces derniers étant influencés par les microfissures internes. Les particules plus grosses présentent un nombre de coordination élevé, tandis que les fragments plus petits en ont un plus faible. Pour les grains restants intacts après chargement, le nombre de coordination augmente avec la charge, et vice versa. Cette augmentation de la surface de contact et du nombre de coordination améliore la résistance de l'échantillon aux contraintes de cisaillement et de compression. De plus,

ces résultats montrent que le nombre de coordination dépend du mode de rupture des particules.

- Les résultats du réseau de contacts révèlent que la rupture des grains mène à un système stable. Suite à la rupture des particules, de nouveaux contacts inter-particulaires se forment, permettant une répartition plus uniforme des forces de contact. Cela entraîne une réduction de l'intensité de la contrainte exercée, diminuant ainsi la probabilité de rupture des particules.
- Les données expérimentales ont permis d'élaborer une relation empirique entre l'indice de vide et la surface spécifique (SSA). Cette relation peut être utilisée pour lier ces deux paramètres à l'échelle micro-macro ou inversement.

Perspectives

Nous pouvons envisager de poursuivre l'étude par les axes suivants :

- Analyser le phénomène de rupture des particules en utilisant un dispositif expérimental différent, comme un appareil triaxial, afin d'approfondir la compréhension du comportement des particules sous diverses conditions de contrainte.
- Réaliser des scans tomographiques in situ par rayons X pendant les essais.
- Analyser la rupture des particules dans les matériaux granulaires par tomographie aux rayons X dans un état partiellement saturé.
- Étudier l'effet du fluage sur la rupture des grains à l'aide de tomographie aux rayons X in situ.
- Explorer le phénomène de rupture des grains dans différents matériaux ayant des formes (morphologies), des minéralogies et des distributions granulométriques variées.
- Développer de nouveaux modèles théoriques ou numériques, tels que la modélisation par éléments discrets (DEM), afin d'étudier l'évolution d'autres propriétés micro-mécaniques, telles que l'intensité des forces de contact inter-particulaires et l'orientation des contacts.

Références Bibliographiques

- Alikarami, R., E. Andò, M. Gkiouzas-Kapnisis, A. Torabi, and G. Viggiani. 2014. Strain localisation and grain breakage in sand under shearing at high mean stress: insights from in situ X-ray tomography. *Acta Geotechnica*, 10(1), 15–30. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0364-6>.
- Alonso, E. E., Olivella, S. & Pinyol, N. M. (2005). A review of Beliche dam. *Géotechnique* 55, No. 4, 267–285, <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.4.267>
- Alshibli, K.A., Druckrey, A.M., R.I. Al-Raoush, T. Weiskittel, N.V. Lavrik. (2015). Quantifying morphology of sands using 3D imaging, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (10) (2015), 04014275.
- Als-Nielsen, J. and McMorrow, D. (2011). *Elements of Modern X-ray Physics*. 2nd ed., Wiley and Sons.
- Al-Raoush R. 2007. Microstructure characterization of granular materials. *Phys A: Stat Mech Appl* 2007;377:545–58.
- Altuhafi, F.N. and Coop, M.R. (2011). Changes to particle characteristics associated with the compression of sands. *Geotechnique*, No.6, 459-471.
- Altuhafi, F., R. J. Jardine, V. N. Georgiannou, W. W. Sim. 2017. Effects of particle breakage and stress reversal on the behaviour of sand around displacement piles. *Géotechnique* 68(6):1-10. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.117>.
- Andò, E. 2013. Experimental investigation of micro-structural changes in deforming granular media using x-ray tomography. Ph.D. thesis, Université de Grenoble.
- 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., G. Viggiani, S. A. Hall, J. Desrues. 2013. Experimental micro-mechanics of granular media studied by X-ray tomography: recent results and challenges. *Géotechnique Lett.* 3, No. 3, 142–146, <http://dx.doi.org/10.1680/geolett.13.00036>.
- Andrawes, K.Z. and EI-Sohboy, M.A. (1973). Factors affecting coefficient of earth pressure K0. *J. Soil Mech. And Found. Div., ASCE*, 99(7):527-539.
- Bard E. (1993): *Comportement des matériaux granulaires secs et à liant hydrocarboné*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.
- Behnsen, J. G., Black, K., Houghton, J. E., & Worden, R. H. (2023). A Review of Particle Size Analysis with X-ray CT. *Materials*, 16(3), 1259. <https://doi.org/10.3390/ma16031259>

- Billam J. (1971): Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures. Proceeding of the ROSCOE Memorial Symposium, Cambridge, 69 – 80.
- Bishop, A.W. (1958). Test requirements for measuring the coefficient of earth pressure at rest. Proc. Brussels Conf. on Earth Pressure Problems, Brussels, Belgium, Vol. 1, 2-14.
- Casagrande, A. (1932). The structure of clay and its importance in foundation engineering. J. Boston Soc. Civil Engrs., 19(4):168 209.
- Castiglione, P., Shouse P.J., Mohanty, B.P., Van Genuchten, M.Th. 2005. Analysis of temperature effects on tension infiltrometry of low permeability materials. Vadose Zone J, 4(3), 481–487. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0134>
- Chen, Y., Yu, B., Zhang, K., Zhang, M., Xu, G., & Chen, Z. (2018). Permeability Evolution and Particle Size Distribution of Saturated Crushed Sandstone under Compression. Geofluids, 2018, 1–12. doi:10.1155/2018/6043420
- Cierniak, R. (2006). A Novel Approach to Image Reconstruction from Discrete Projections Using Hopfield-Type Neural Network. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 890–898.
- Cierniak, R. (2011). X-Ray Computed Tomography in Biomedical Engineering. 1st ed., Springer-Verlag London.
- 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., K. A. Alshibli. 2014. 3D evolution of sand fracture under 1D compression. Géotechnique 64, No. 5, 351–364, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.13.P.119>.
- Cil, M. B., & Alshibli, K. A. (2015). Modeling the influence of particle morphology on the fracture behavior of silica sand using a 3D discrete element method. Comptes Rendus Mécanique, 343(2), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2014.11.004>
- Colliat-Dangus, J.L., Desrue, J., and Foray, P. (1988). Triaxial testing of granular soil under elevated cell pressure. Proc. of conf. on advanced triaxial testing for soil and rocks, Philadelphia: American Society for Testing and Materials., STP977:290-310.
- Coop, M.R., K. K. Sorensen, T. Bodas Freitas, G. Georgoutsos. 2004. Particle breakage during shearing of a carbonate sand. Géotechnique 54, No. 3, 157–163, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2004.54.3.157>.
- 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.

- Dadda, A., C. Geindreau, F. Emeriault, S. R. du Roscoat, A. Garandet, L. Sapin, A. E. Filet. 2017. Characterization of microstructural and physical properties changes in biocemented sand using 3D X-ray microtomography. *Acta Geotech* 12(5):955–970. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0578-5>
- Dadda, A., C. Geindreau, F. Emeriault, S. R. du Roscoat, A. E. Filet, A. Garandet. 2018. Characterization of contact properties in biocemented sand using 3D X-ray microtomography. *Acta Geotechnica*, <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0744-4>.
- Della, N., S. Feia. 2018. Experimental Investigation on the Effect of the Mode of Deposition on the Pore-Access Size Distribution of Sand. *Geomechanics and Geoengineering* 13 (1): 33–41. [doi:10.1080/17486025.2017.1324177](https://doi.org/10.1080/17486025.2017.1324177).
- Donohue, S., C. O’sullivan, and M. Long. 2009. Particle breakage during cyclic triaxial loading of a carbonate sand. *Geotechnique* 59 (5): 477–82. doi: 10.1680/geot.2008.T.003.
- Druckrey, A.M. and Alshibli, K.A. (2016). 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.
- Druckrey, A. M., K. A. Alshibli, R. I. Al-Raoush. 2016. 3D characterization of sand particle-to-particle contact and morphology. *Computers and Geotechnics*, 74, 26–35, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.12.014>.
- Desrues, J. and Viggiani, G. (2004). Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(4): 279-321.
- Desrues, J., Viggiani, G., and Bésuelle, P. (2010). *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*. ISTE.
- Einav, I. 2007. Breakage mechanics—Part I: Theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6), 1274–1297. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.11.003>.
- Einav, I. 2007. Breakage mechanics—Part II: Modelling granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6), 1298–1320. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.11.004>.
- Feia, S., S. Ghabzloo, J. F. Bruchon, J. Sulem, J. Canou, J. F. Dupla. 2014. Experimental evaluation of the pore-access size distribution of sands. *Geotech Test J* 37(4):613–620. [doi:10.1520/GTJ20130126](https://doi.org/10.1520/GTJ20130126).

- Feia, S., J. Sulem, J. Canou, S. Ghabezloo, X. Clain. 2016. Changes in permeability of sand during triaxial loading: effect of fine particles production. *Acta Geotechnica*, 11, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0351-y>
- Feia, S., J. Dupla, J. Canou, S. Ghabezloo, J. Sulem, B. Chabot, E. Aubry, M. Mainguy. 2017. Radial injection device for experimental investigation of transport and deposition of suspended particles in porous media. *Geotech. Test. J.* 40 (6):1115-1124.
- Feldkamp, L.A., Davis, L.C., and Kress, J.W. (1984). Practical cone beam algorithm. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1(6).
- Flin, F., B. Lesaffre, A. Dufour, L. Gillibert, A. Hasan, S. Rolland du Roscoat, S. Cabanes, P. Pugliese. 2011. On the computations of specific surface area and specific grain contact area from snow 3D images. *Physics and Chemistry of Ice 2010*. Sapporo, Japan, September 5-10, 2010. Hokkaido University Press, eds: Y. Furukawa, G Sazaki, T. Uchida, N. Watanabe: 321–328.
- Fonseca, J., C. O’Sullivan, M. R. Coop, and P. D. Lee. 2012. Non-invasive characterization of particle morphology of natural sands. *Soils and Foundations*, 52(4), 712–722. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.011>.
- Fonseca, J., O’Sullivan, C., Coop, M.R., and Lee, P.D. (2013a). Quantifying the evolution of soil fabric during shearing using directional parameters. *Géotechnique*, 63(6):487-499.
- Fonseca, J., O’Sullivan, C., Coop, M.R., and Lee, P.D. (2013b). Quantifying the evolution of soil fabric during shearing using scalar parameters. *Géotechnique*, 63(10):818-829.
- Fredlund, M., Fredlund, D., Ward Wilson, G. (2000): An equation to represent grain-size distribution. *Can. Geotech. J.* 37, 817-827.
- Fukumoto, T. (1990): A grading equation for decomposed granite soil. *Soils Found.* 30(1), 27-34.
- Fukumoto, T. (1992): Particle breakage characteristics of granular soils. *Soils Found.* 32(1), 26-40.
- Geodict: The GeoDict software package computes, in general, predictions of physical material properties on basis of real (i.e., tomographic) microstructures (<http://www.geodict.com/>).
- Griffith, A.A. (1920). The phenomenon of rupture and flow in soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, V221:163-198.
- Guida, G., F. Casini, G. M. B. Viggiani, E. Andò, G. Viggiani. 2018. Breakage mechanisms of highly porous particles in 1D compression revealed by X-ray tomography.

- Géotechnique Letters, Volume 8, Issue 2, 1 Jun 2018 (155–160), <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00035>
- Guyon E., Troadec J.-P. (1994). Du sac de billes au tas de sable. Editions Odile JACOB Sciences, Paris.
- Hagerty, M.M., Hite, D.R., Ullrich, C.R. and Hagerty, D.J. (1993). One dimensional high pressure compression of granular media. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(1):1-18.
- Hall, S.A., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G., and Bésuelle, P. (2010). Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using x-ray ct and volumetric digital image correlation. *Géotechnique*, 60(5):315-322.
- Hardin, B. O. (1985). Crushing of Soil Particles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(10), 1177–1192. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1985)111:10(1177).
- Hasan, A., and K. A. Alshibli. 2010. Experimental assessment of 3D particle-to-particle interaction within sheared sand using synchrotron microtomography. *Géotechnique*, 60(5), 369–379. <https://doi.org/10.1680/geot.2010.60.5.369>.
- Hasan, A. and Alshibli, K. (2012). Three dimensional fabric evolution of sheared sand. *Granular Matter*, 14(4): 469-482.
- Hendron, A.J. (1963). The behavior of sand in one-dimensional compression. Ph.D. dissertation, Univ. of Illinois, Ill.
- Hsieh, J., Nett, B., Yu, Z., Sauer, K., Thibault, J.B., and Bouman, C.A. (2013). Recent advances in CT image reconstruction. *Current Radiology Reports*, 1(1): 39-51.
- Hu, W., Dano, C., Hicher, P.-Y., Le Touzo, J.-Y., Derkx, F., Merliot, E.(2011a): Effect of sample size on the behavior of granular materials. *Geotech. Test. J.* 34(3).
- Hu W., Yin Z., Dano C., Hicher P.-Y. (2011b): A constitutive model for granular materials considering grain breakage. *Sci. China Tech. Sci.*, 54, 1-9.
- Hu, W., Dano, C., Hicher, P.-Y. (2011c): Experimental study on monotonic and cyclic behaviour of crushable limestone with consideration of grain breakage. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Seoul 2011, 1–3 September 2011, Seoul, Korea.*
- Hyodo, M., F. L. Hyde Adrian, N. Aramaki, and Y. Nakata. 2002. Undrained monotonic and cyclic shear behavior of sand under low and high confining stresses. *Soils and Foundations* 42 (3):63–76. doi: 10.3208/sandf.42.3_63.

- Igwe, O., K. Sassa, and F. W. Wang. 2007. The influence of grading on the shear strength of loose sands in stress-controlled ring shear tests. *Landslides* 4 (1):43–51. doi: 10.1007/s10346-006-0051-2.
- 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.
- Indraratna, B., J. Lackenby, and D. Christie. 2005. Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading. *Geotechnique* 55 (4):325–8. doi: 10.1680/geot.2005.55.4.325.
- Indraratna, B., P. K. Thakur, and J. S. Vinod. 2010. Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading. *International Journal of Geomechanics* 10 (4):136–44. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000055.
- Indraratna, B., P. K. Thakur, J. S. Vinod, and W. Salim. 2012. Semiempirical cyclic densification model for ballast incorporating particle breakage. *International Journal of Geomechanics* 12 (3): 260–71. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000135.
- Indraratna, B., and S. Nimbalkar. 2013. Stress-strain degradation response of railway ballast stabilized with geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139 (5):684–700.
- Jaeger, J.C. (1967). Failure of rocks under tensile conditions. *Int. J. Rock Min. Sci.*, 4:219-227.
- Jaky, J. (1948). Pressure in silos. *Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, ASCE, Vol. 1, 103-107.
- Karatza, Z. 2017. A study of temporal and spatial evolution of deformation and breakage of dry granular materials using X-ray computed tomography and the discrete element method. PhD. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Edinburgh (2017).
- Karatza, Z., Andò, E., Papanicolopulos, S.-A., Viggiani, G., & Ooi, J. Y. (2017). Evolution of particle breakage studied using x-ray tomography and the discrete element method. *EPJ Web of Conferences*, 140, 07013. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714007013>
- Karatza, Z., E. Andò, S. A. Papanicolopulos, J. Ooi, G. Viggiani. 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>.
- Karatza, Z., Andò, E., Papanicolopulos, S.A., Viggiani, G., Ooi, J.Y. 2019. Effect of particle morphology and contacts on particle breakage in a granular assembly studied using X-

- ray tomography. *Granular Matter* 21, 44 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0898-2>
- Karimpour, H., Lade, P. V. (2013). Creep behavior in Virginia Beach sand. *Canadian Geotechnical Journal* (202), 1–61.
- Kikumoto, M., D. M. Wood, and A. Russell. 2010. Particle crushing and deformation behaviour. *Soils and Foundations* 50 (4):547–63. doi: 10.3208/sandf.50.547.
- Kuang, DM., Long, ZL., Ogwu, I. et al. A discrete element method (DEM)-based approach to simulating particle breakage. *Acta Geotech.* 17, 2751–2764 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01406-3>
- Lade, P. V., J. A. Yamamuro, and P. A. Bopp. 1996. Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering* 122 (4):309–16. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(309).
- 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)
- Laufer, I. 2015. Grain crushing and high-pressure oedometer tests simulated with the discrete element method. *Granular Matter* 17 (3), 389-412, <https://doi.org/10.1007/s10035-015-0559-z>.
- Lee, D.M. (1992). The angles of friction of granular fills. Ph.D dissertation, University of Cambridge.
- Lee, I. K., & Coop, M. R. (1995). The intrinsic behaviour of a decomposed granite soil. *Géotechnique*, 45(1), 117–130. doi:10.1680/geot.1995.45.1.117
- Lee, K. L., & Farhoomand, I. (1967). Compressibility And Crushing Of Granular Soil In Anisotropic Triaxial Compression. *Canadian Geotechnical Journal*, 4(1), 68–86. doi:10.1139/t67-012
- Legland, D., K. Kiêu, M. F. Devaux. 2011. Computation of minkowski measures on 2d and 3d binary images. *Image Analysis & Stereology*, 26(2) :83–92.
- Leung, C.F., F. H. Lee, N. S. Yet. 1996. The role of particle breakage in pile creep in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33 (6): 888–898.
- Lobo-Guerrero, S., and L. E. Vallejo. 2005. Analysis of crushing of granular material under isotropic and biaxial stress conditions. *Soils and Foundations* 45 (4):79–87. doi: 10.3208/sandf.45.4_79.

- LO, K. Y., & ROY, M. (1973). RESPONSE OF PARTICULATE MATERIALS AT HIGH PRESSURES. SOILS AND FOUNDATIONS, 13(1), 61–76. doi:10.3208/sandf1972.13.61
- Mahbub, A.A., and A. Haque. 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.
- Ma, G., W. Zhou, X. L. Chang. 2014. Modeling the particle breakage of rockfill materials with the cohesive crack model. *Computers and Geotechnics* 61, 1320-1143. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.05.006>.
- Mandelbrot, B. B. 1983. *The fractal geometry of nature*. New York, NY: W.H. Freeman and Company.
- Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B., Duncan, J.M. (1969): Strength and deformation characteristics of rockfills materials. Report No. TE-69-5, Department of civil engineering, University of California, Berkeley.
- Marcial, D., P. Delage, Y. J. Cui. 2002. On the high stress compression of bentonites. *Can Geotech J* 39, 1–9.
- 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.
- Marsal, R. J. 1967. Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 94 (SM2):27–43.
- Marsal, R. (1973): Mechanical properties of rockfill dams, Ed. Hirschfeld, R. y Poulos, S., Embankment-dam engineering: Casagrande Volumen. New York, Wiley, 454 p.
- Mao, W. W., and I. Towhata. 2015. Monitoring of single-particle fragmentation process under static loading using acoustic emission. *Applied Acoustics* 94:39–45. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.02.007.
- Mao, W. W., Y. Yang, W. L. Lin, S. Aoyama, and I. Towhata. 2018. High frequency acoustic emissions observed during model pile penetration in sand and implications for particle breakage behavior. *International Journal of Geomechanics* 18 (11):04018143. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001287.
- McDowell, G. R., M. D. Bolton, and D. Robertson. 1996. The fractal crushing of granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 44 (12):2079–102. doi: 10.1016/S0022-5096(96)00058-0.

- McDowell, G. R., and M. D. Bolton. 1998. On the micromechanics of crushable aggregates. *Geotechnique* 48 (5):667–79. doi: 10.1680/geot.1998.48.5.667.
- McDowell, G.R. 2002. On the yielding and plastic compression of sand. *Soils Found.* 42(1), 139–145 (2002). <https://doi.org/10.3208/sandf.42.1139>
- 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>
- McDowell, G., and J. De Bono. 2013. On the micro mechanics of one-dimensional normal compression. *Géotechnique* 63 (11), 895-908. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.041>
- Miura, N., and S. O-Hara. 1979. Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses. *Soils and Foundations* 19 (3):1–14. doi: 10.3208/sandf1972.19.3_1.
- Miura, S., K. Yagi, and T. Asonuma. 2003. Deformation-strength evaluation of crushable volcanic soils by laboratory and in-situ testing. *Soils and Foundations* 43 (4):47–57. doi: 10.3208/sandf.43.4_47.
- Muir Wood, D., and K. Maeda. 2008. Changing grading of soil: Effect on critical states. *Acta Geotechnica* 3 (1):3–14. doi: 10.1007/s11440-007-0041-0.
- Nakata, Y., A. F. L. Hyde, M. Hyodo, H. Murata. 1999. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test. *Geotechnique* 49, No. 5, 567–583, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1999.49.5.567>.
- Nakata, Y., Hyde, A.F.L., Kato Y., Hyodo, M. and Murata, H. (1999b). Single particle crushing and the mechanical behaviour of sand. *Proc. of 2nd Int. Symp. on Pre-Failure Deformation of Geomaterials, IS Torino 99*, 221-228.
- Nakata, Y., M. Hyodo, A. F. L. Hyde, Y. Kato, H. Murata. 2001a. Microscopic Particle Crushing of Sand Subjected to High Pressure One-Dimensional Compression. *Soils and Foundations*, 41(1), 69–82. <https://doi.org/10.3208/sandf.41.69>.
- Nakata, Y., Kato Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L. and Murata, H. (2001b). One-dimensional compression behavior of uniformly graded sand related to single particle crushing strength. *Soils and Foundations*, 41(2):39-51.
- NF P94-056 (1996) Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.
- Nguyen, G., Einav, I. (2009): The energetics of cataclasis based on breakage mechanics. *Pure Appl. Geophys.* 166,1693-1724.
- Nguyen, D. H., E. Azéma, P. Sornay, F. Radjai. 2015. Bonded-cell model for particle fracture. *Physical Review E*, 91(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.91.022203>.

- Nobari, E., Duncan, J. (1972): Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams, International Report N°.TE-72-1, University of California, pp. 1-186.
- Oda, M., Takemura, T., and Takahashi, M. (2004). Microstructure in shear band observed by microfocus x-ray computed tomography. *Géotechnique*, 54(8):53.
- Otani, J. and Obara, Y. (2004). Xray CT for Geomaterials: Soils, Concrete, Rocks. Kumamoto, Japan, CRC Press.
- Otsu, N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms". *IEEE Trans. Sys., Man., Cyber*, 9 (1), 62–66.
- 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.
- Pestana, J.M. and Whittle, A.J. (1995). Compression model of cohesionless soils. *Geotechnique*, 45(4):611-631.
- Roberts, J.E. and De Souza, J.M. (1958). The compressibility of sand. *Proc. Am. Soc. for Testing Mat.*, Vol. 58, ASTM, Philadelphia, Pa., 1269-1277.
- Robert, W.D. (1997). One-dimensional compression of sands at high pressures: Discussion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5):491-492.
- Russell A. R., and I. Einav. 2013. Energy dissipation from particulate systems undergoing a single particle crushing event. *Granular Matter*, 15, No. 3: 299–314. <https://doi.org/10.1007/s10035-013-0408-x>.
- Salim, W., and B. Indraratna. 2004. A new elastoplastic constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage. *Canadian Geotechnical Journal* 41 (4):657–71. doi: 10.1139/t04- 025.
- Sammis, C.G., Osborne, R.H., Anderson, J.L., Banerdt, M., White, P.(1986): Self-similar cataclasis in the formation of fault gouge. *Pure Appl. Geophys.* 124(1/2), 53-78.
- Sammis, C.G., King, G., Biegel, R. (1987): The kinematics of gouge deformations. *Pure Appl. Geophys.* 125(5), 777–812.
- Seyyedani, S.M., Mirghasemi, A.A. & Mohammadi, S. (2023). DEM-XFEM Study of Particle Shape Effect on Particle Breakage of Granular Materials. *Geotech Geol Eng* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02448-y>
- Shi, D. D., D. Cao, Y. B. Deng, J. F. Xue. 2020. DEM investigations of the effects of intermediate principal stress ratio and particle breakage on the critical state behaviors of granular soils. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.094>.

- Shi, D., Cao, D., Xue, J. et al. (2022). DEM studies on the effect of particle breakage on the critical state behaviours of granular soils under undrained shear conditions. *Acta Geotech.* 17, 4865–4885 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01580-y>
- Shipway, P.H. and Hutchings, I.M. (1993a). Fracture of brittle spheres under compression and impact loading. I. Elastic stress distributions. *Philosophical Magazine A*, 67(6):1389-1404.
- Sowers, G., Williams, R., Wallace, T. (1965): Compressibility of broken rock and settlement of rockfills. *Proc., 6th ICSMFE, Montreal, Vol. 2*, 561-565.
- Takei, M., Kusakabe, O. & Hayashi, T. (2001). Time-dependent behavior of crushable materials in one-dimensional compression tests. *Soils Found.* 41, No. 1, 97–121.
- Terzaghi, K. (1920). Old earth pressure theories and new test results. *Engrg. News Record*, Vol.85, 632.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 65-67.
- Terzaghi, K. (1925). Structure and volume of voids of soils. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, pp.10-13, Translated by A. Casagrande in *From Theory to Practice in Soil Mechanics*, New York, John Wiley & Sons, INC., (1960), pp.146-148.
- Turcotte, D. L. 1986. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysical Research* 91 (B2):1921–6. doi: 10.1029/JB091iB02p01921.
- Tyler, S. W., and S. W. Wheatcraft. 1992. Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal* 56 (2):362–9. doi: 10.2136/sssaj1992.03615995005600020005x.
- Ueng, T. S., and T. J. Chen. 2000. Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands. *Geotechnique* 50 (1):65–72. doi: 10.1680/geot.2000.50.1.65.
- Unland, G. (2007). The principles of single-particle crushing. *Handbook of powder technology*, 12: 117-225.
- Wang, F. W., K. Sassa, and G. H. Wang. 2002. Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan. *Engineering Geology* 63 (1–2):169–85. doi: 10.1016/S0013-7952(01)00080-1.
- Wang, P., Karatza, Z., & Arson, C. (2019). DEM modelling of sequential fragmentation of zeolite granules under oedometric compression based on XCT observations. *Powder Technology*, 347, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.050>

- Wang, Z., G. Wang, Q. Ye. 2020. A constitutive model for crushable sands involving compression and shear induced particle breakage. *Computers and Geotechnics*, 126, 103757, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103757>.
- Wang, Z., Wong, R. C. K., & Qiao, L. (2011). Investigation on relations between grain crushing amount and void ratio change of granular materials in one-dimensional compression and creep tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3, 415–420. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2011.00415>
- Wiebicke, M., E. Andò, I. Herle, G. Viggiani. 2017. On the metrology of interparticle contacts in sand from x-ray tomography images. *Measurement Science and Technology*, 28(12): 124007.
- Xiao, Y., H. Liu, C. S. Desai, Y. Sun, and H. Liu. 2016a. Effect of intermediate principal-stress ratio on particle breakage of rockfill material. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 142 (4):06015017. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001433.
- Xiao, Y., H. Liu, X. Ding, Y. Chen, J. Jiang, and W. Zhang. 2016b. Influence of particle breakage on critical state line of rockfill material. *International Journal of Geomechanics* 16 (1):04015031.
- Xiao, Y., and H. Liu. 2017. Elastoplastic constitutive model for rockfill materials considering particle breakage. *International Journal of Geomechanics* 17 (1):04016041. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622. 0000681.
- Xiao, Y., H. Liu, Q. Chen, Q. Ma, Y. Xiang, Y. Zheng. 2017. Particle breakage and deformation of carbonate sands with wide range of densities during compression loading process. *Acta Geotechnica* 12 (5), 1177-1184. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0580-y>.
- Xu, M., J. Hong, E. Song. 2017. DEM study on the effect of particle breakage on the macro- and micro-behavior of rockfill sheared along different stress paths. *Computers and Geotechnics*, 89, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.04.012>.
- Yamamuro, J. A., Bopp, P. A., & Lade, P. V. (1996). One-Dimensional Compression of Sands at High Pressures. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(2), 147–154. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:2(147)
- Yao, Y. P., H. Yamamoto, and N. D. Wang. 2008. Constitutive model considering sand crushing. *Soils and Foundations* 48 (4):603–8. doi: 10.3208/sandf.48.603.
- Yasufuku, N. and Hype, A.F.L. (1995). Pile end-bearing capacity in crushable sands. *Geotechnical*, 45(4):663-676.

- Yu, F. W., and L. J. Su. 2016. Particle breakage and the mobilized drained shear strengths of sand. *Journal of Mountain Science* 13 (8): 1481–8. doi: 10.1007/s11629-016-3870-1.
- Yu, F. W. 2017a. Characteristics of particle breakage of sand in triaxial shear. *Powder Technology* 320:656–67. doi: 10.1016/j.powtec.2017.08.001.
- Yu, F. W. 2018b. Particle breakage in triaxial shear of a coral sand. *Soils and Foundations* 58 (4):866–80. doi: 10.1016/j.sandf.2018.04.001.
- Yu, F. W. 2019. The behavior of coral sands incorporating particle breakage in triaxial tests. *International Journal of Geomechanics*.(In press) doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000919.
- Yu, F. (2019). Particle breakage in granular soils: a review. *Particulate Science and Technology*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1666946>
- Zhang, C., I. Einav, G. Nguyen. 2013. The end-bearing capacity of piles penetrating into crushable soils. *Géotechnique* 63, No. 5, 341–354, <https://doi.org/10.1680/geot.11.P.117>.
- Zhang, C., Z. Yang, G. Nguyen, R. Jardine, I. Einav. 2014. Theoretical breakage mechanics and experimental assessment of stresses surrounding piles penetrating into dense silica sand. *Geotech. Lett.* 4 (2014) 11–16. <https://doi.org/10.1680/geolett.13.00075>.
- Zhao, B., J. Wang, M. R. Coop, G. Viggiani, M. Jiang. 2015. An investigation of single sand particle fracture using X-ray micro-tomography. *Géotechnique* 65, No. 8, 625–641, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.4.P.157>.
- Zhao, B., J. Wang, E. Andò, G. Viggiani, M. R. Coop. 2019. An investigation of particle breakage under one-dimensional compression of sand using X-ray micro-tomography. *Can Geotech J.* <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0548>.
- Zhou, W., L. Yang, G. Ma, K. Xu, Z. Lai, X. Chang. 2017. DEM modeling of shear bands in crushable and irregularly shaped granular materials. *Granular Matter* 19 (2). <https://doi.org/10.1007/s10035-017-0712-y>.
- Zhou, W., D. Wang, G. Ma, X. Cao, C. Hu, W. Wu. 2019. Discrete element modeling of particle breakage considering different fragment replacement modes. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.002>.