

École polytechnique de Louvain

Effet de l'altération hydrothermale des roches volcaniques sur leur comportement micromécanique

Auteur: **Martin MUSYCK**

Promoteur: **Benoît PARDOEN**

Lecteurs: **Pierre DELMELLE, João ALMEIDA, Laurent DELANNAY**

Année académique 2018–2019

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans l'aide précieuse de certaines personnes que j'aimerais remercier pour leur soutien, leurs encouragements ou leurs conseils. Je tiens en particulier à remercier :

Monsieur Benoît Pardoën, promoteur de ce travail, pour plusieurs raisons. Premièrement, pour avoir accepté d'encadrer mon travail de fin d'année durant cette année académique. Malgré ma situation délicate, il m'a accueilli et était très largement disponible pour m'aider à avancer dans mon travail. Ensuite pour tout le temps qu'il a consacré à me transmettre ses connaissances dans un sujet que je découvrais. Sa motivation est restée intacte tout au long de nos nombreuses rencontres. Pour terminer, je tiens à le remercier de m'avoir encouragé jusqu'au bout.

Mes groupes d'amis indispensables à la réussite de mes études. Je pense aux Kap Expé et très particulièrement à la famille de mon premier kot, le Supportkot. J'y ai trouvé une famille en or. Ils ont toujours été là pour me soutenir, et ce jusqu'à la fin de mes études.

Ma famille et surtout mes parents. Ils ont tout fait pour me mettre dans de bonnes conditions pour réussir mes études. Je pense entre autres à leur soutien financier qui m'a permis de m'impliquer dans de nombreux projets parascolaires.

Les autres étudiants de l'EPL. Tant en bac qu'en master, l'entraide entre étudiants s'est ressentie et a été indispensable à ma réussite.

Bonne lecture ...

Table des matières

1 Introduction	1
1.1 Stabilité volcanique	1
1.2 Implication de l'altération	2
1.3 Objectif du travail	3
2 Altérations hydrothermales dans les contextes volcaniques	4
2.1 Les roches	4
2.1.1 Classification des roches	4
2.1.2 Porosité d'une roche	5
2.1.3 Comportement à la compression	6
2.1.4 Comportement à la rupture	8
2.2 Altération dans un contexte volcanique	10
2.2.1 Types d'altérations hydrothermales	11
2.2.2 Impact de l'altération hydrothermale sur la stabilité des volcans	12
2.2.3 Contexte volcanique et minéralogie de la roche	12
2.2.4 Analyses mécaniques	13
2.2.5 Observations	13
3 Méthodes numériques	15
3.1 Modèle numérique des microstructures	15
3.2 Surface élémentaire représentative	15
3.3 Conditions limites	18
3.4 Équations d'équilibre	19
3.5 Modèles (micro)mécaniques constitutifs	19
3.6 Résultats	21
4 Comportement mécanique à petite échelle	23
4.1 Choix des phases	23
4.2 Calibration du modèle numérique	24
4.3 Influence de l'altération	25
4.3.1 Analyse de l'échantillon altéré TUT 7	25
4.3.2 Comparaison avec l'échantillon altéré TUT 54	27
4.3.3 Conclusion	27
4.4 Analyses des déformations et des modes de ruptures microscopiques	27
4.4.1 Pour un échantillon non altéré	29
4.4.2 Pour un échantillon altéré	31
4.4.3 Pour des paramètres d'interfaces à faible adoucissement	33

4.5	Effet de la porosité	35
4.5.1	Intégration de la porosité au sein du modèle numérique	35
4.5.2	Effet de la porosité	36
4.5.3	Discussion	39
5	Perspectives	41
5.1	Analyses complémentaires	41
5.1.1	Quantifier l'influence de l'altération	41
5.1.2	Analyse plus poussée de l'effet de la porosité	41
5.1.3	Autre représentation d'indicateurs	41
5.2	Applications	42
5.2.1	Application à double échelle	42
5.2.2	Modèle de prévision	42

Table des figures

1.1	Vue satellite de la caldeira de Krakatau	1
1.2	L'Anak Krakatau avant et après son éruption	2
2.1	Classification des roches	4
2.2	Cycle des roches	5
2.3	Cycle des roches dans son contexte	5
2.4	Porosité ouverte et fermée	6
2.5	Critère de rupture de Mohr-Coulomb	7
2.6	Critère de rupture de Hoek-Brown	8
2.7	Comparaison des critères de Mohr-Coulomb et Hoek-Brown	8
2.8	Essai de compression uniaxiale	9
2.9	Essai de compression triaxiale	9
2.10	Différents comportements post-pic	9
2.11	Différents échantillons après un essai triaxial	10
2.12	Fumerolles	10
2.13	Localisation du volcan Tutupaca	12
2.14	Complexe volcanique du Tutupaca	12
2.15	Localisation des prélèvements sur le volcan Tutupaca	13
3.1	Microstructures <i>MIRI-150_1</i> et <i>MIRI-50_1</i>	15
3.2	Modèle mécanique microscopique composé d'un assemblage granulaire	16
3.3	Comportement cohésif des interfaces dans la direction normale	20
3.4	Comportement cohésif des interfaces dans la direction tangentielle	20
3.5	Influence de $E_{n/t}^{plast}$ sur la réponse généralisée d'une microstructure	20
3.6	Influence de $c_{n/t}^{max}$ sur la réponse généralisée d'une microstructure	21
3.7	Déformées d'une microstructure à différents points d'observation	21
3.8	Évolution des indicateurs d'endommagement	22
4.1	Microstructure <i>MIRI-150_1</i>	24
4.2	Courbes contraintes-déformations de <i>MIRI-150_1</i> et TUT RI	25
4.3	Microstructure <i>MI7-150_1</i>	25
4.4	Courbes contraintes-déformations de <i>MIRI-150_1</i> , <i>MI7-150_1</i> , TUT 7 et TUT RI	26
4.5	Courbes contraintes-déformations de <i>MI7-150_1</i> , <i>MI7-150_2</i> et TUT 7	26
4.6	Microstructure <i>MI54-150_5</i>	27
4.7	Lois de contacts avec les paramètres <i>Props27</i> , <i>Props37</i> , <i>Props43</i> et <i>Props45</i>	28
4.8	Courbes contraintes-déformations de <i>MI54-150_5</i> avec <i>Props43</i> et <i>Props45</i>	28
4.9	Courbes contraintes-déformations de <i>MIRI-150_1</i> - <i>Props27</i> avec ses points d'observation	29
4.10	Évolution des indicateurs d'endommagement de <i>MIRI-150_1</i> - <i>Props27</i>	30

4.11 Déformées de la microstructure <i>MIRI-150_1 - Props27</i>	30
4.12 Courbes contraintes-déformations de <i>MI54-150_5 - Props43</i> avec ses points d'observation	31
4.13 Évolution des indicateurs d'endommagement de <i>MI54-150_5 - Props43</i>	32
4.14 Déformées de la microstructure <i>MI54-150_5 - Props43</i>	32
4.15 Courbes contraintes-déformations de <i>MIRI-150_1 - Props37</i> avec ses points d'observation	33
4.16 Courbes contraintes-déformations de <i>MI54-150_5 - Props45</i> avec ses points d'observation	33
4.17 Évolution des indicateurs d'endommagement de <i>MIRI-150_1 - Props37</i>	33
4.18 Évolution des indicateurs d'endommagement de <i>MI54-150_5 - Props45</i>	33
4.19 Déformées de la microstructure <i>MIRI-150_1 - Props37</i>	34
4.20 Déformées de la microstructure <i>MI54-150_5 - Props45</i>	34
4.21 Courbe contraintes-déformations avec 5% de porosité	36
4.22 Microstructures avec [0.0, 3.0, 5.4, 7.6, 10.0]	37
4.23 Courbes contraintes-déformations des microstructures à porosité variable	37
4.24 Déformée d'une microstructure avec de la porosité	38
4.25 Pic de résistance q_{max} en fonction de la porosité n	38
4.26 Evolution du module élastique E en fonction de la porosité n	38
4.27 UCS en fonction de la porosité des échantillons	40
5.1 Méthode multi échelle	42

Liste des tableaux

2.1	Minéralogie des échantillons	13
2.2	Propriétés mécanique et physique des échantillons	14
4.1	Répartition des différentes phases	23
4.2	Différentes phases et leurs propriétés mécaniques	23
4.3	Valeurs de paramètres des lois de contact après calibration selon la microstructure.	25
4.4	Valeurs de μ et λ pour simuler la porosité	36

1 Introduction

Ce travail analyse le résultat de modélisations numériques d'échantillons prélevés sur le volcan Tutupaca au Pérou dans le but de mieux comprendre le comportement des roches volcaniques à l'échelle microscopique et de l'effet de cette altération sur ce comportement. Un objectif à long terme est d'intégrer une modélisation des roches à l'échelle microscopique dans un modèle de calcul multi échelle. Le but de cette modélisation multi échelle est d'analyser le comportement d'un édifice volcanique à une échelle macroscopique tout en ayant la possibilité de modifier certains paramètres microscopiques.

1.1 Stabilité volcanique

Il a été démontré à plusieurs reprises qu'une instabilité volcanique peut s'avérer dangereuse. Les effondrements de secteur ou de flanc sont des glissements de terrain à grande échelle qui peuvent emmener le sommet d'un édifice au pied de celui-ci. La quantité de matière déplacée lors de tels effondrements est fort variable et peut dépasser 40 km^3 . Cette masse en mouvement peut se déplacer de plusieurs dizaines de km à une vitesse élevée qui peut atteindre 100 m/s . Ces glissements de terrain peuvent affecter des zones de plus de 1000 km^2 . En plus des menaces et impacts directs sur les infrastructures et populations environnantes, ces événements peuvent déclencher des événements secondaires tels que des tsunamis (Detienne, 2016).

En décembre 2018 en Indonésie, l'Anak Krakatau a déclenché un tsunami lors de son éruption par le biais de l'effondrement d'un flanc. Plusieurs centaines de personnes y ont perdu la vie (Bardintzeff, 2018). En 1883, ce même édifice a causé la mort d'environ 36000 personnes. Suite à l'éruption de 1883, 70 % de l'île a été détruite pour laisser place à une caldeira visible en figure 1.1. Cette destruction de l'édifice volcanique a créé un tsunami qui a dévasté les îles de Java et Sumatra (Cigala, 2018). Les faits de 2018 ne sont pas de la même ampleur, mais comme nous le montre la figure 1.2, l'ampleur de l'effondrement est impressionnant.



FIGURE 1.1 – Vue satellite de la caldeira de Krakatau (NASA, 2001).

Depuis les premières observations d'effondrements de flanc, les scientifiques du monde s'intéressent à ces phénomènes. Des efforts considérables sont réalisés dans le but de déterminer les facteurs qui mènent à l'effondrement d'un édifice volcanique. L'analyse de la stabilité d'un édifice volcanique est une tâche complexe et fastidieuse, car c'est un sol hétérogène incluant des discontinuités structurales telles que des fractures ou des couches fragiles (Zimbelman et al., 2003). Ce caractère hétérogène est illustré en figure 1.3. Il est donc inadapté de définir la stabilité d'un tel édifice à partir d'essais triaxiaux réalisés en laboratoire sur des échantillons de l'échelle de quelques centimètres.



FIGURE 1.2 – Comparaison de l'état de l'Anak Krakatau avant et après son éruption de décembre 2018. L'Anak Krakatau s'élevait à une altitude de 338 *m* avant l'éruption et l'effondrement de flanc, aujourd'hui il ne s'élève plus qu'à 110 *m* (Reynolds, 2019).

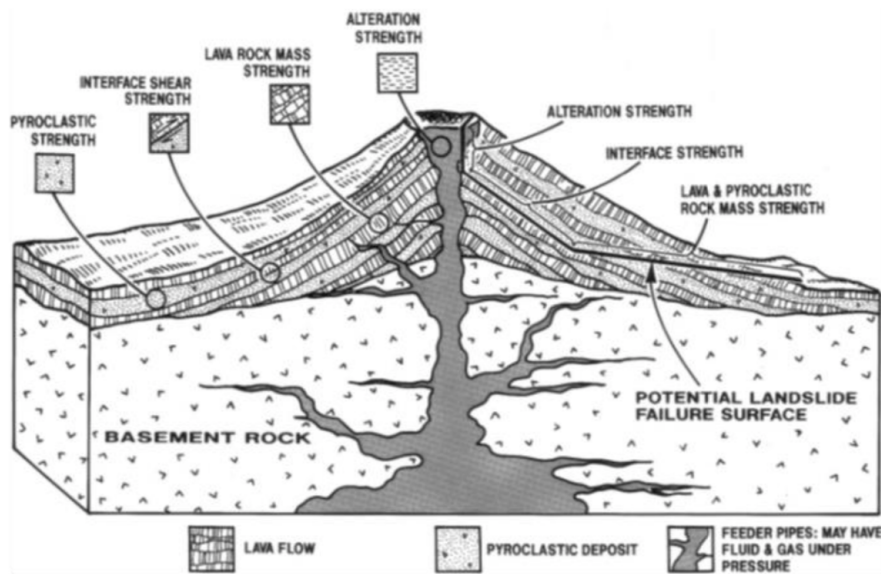


FIGURE 1.3 – Coupe d'un strato-volcan qui illustre la présence de diverses surfaces de rupture potentielles au sein de la roche (Watters et al., 2000).

C'est pour ces raisons-là que ce travail s'intéresse au comportement à l'échelle microscopique de la roche. Ce comportement va être simulé à l'aide d'un modèle basé sur des calculs numériques aux éléments finis sur une surface élémentaire représentative à l'échelle des inclusions minérales de la roche.

1.2 Implication de l'altération

Une multitude de recherches suggèrent la possibilité d'un lien entre des ruptures d'édifices volcaniques et des modifications de la roche par altération hydrothermale. L'altération hydrothermale est une modification minéralogique, chimique et texturale de la roche suite à des interactions entre la roche et des fluides hydrothermaux (Detienne 2016). Malgré ces efforts et recherches de la part de la communauté scientifique, l'impact de l'altération hydrothermale sur la stabilité des édifices volcaniques n'est pas bien comprise. Les différentes modifications d'une roche liées à différents types d'altérations à l'échelle microscopique sont connues d'un point de vue chimique et minéralogique. Mais il est difficile de chiffrer ces phénomènes qui se déroulent sur des échelles temporelles de l'ordre de plusieurs milliers, voir millions d'années. De plus l'altération hydrothermale peut avoir un impact très varié en fonction du type d'altération hydrothermale. La thèse de M. Detienne (2016) recueille des analyses variées sur des échantillons prélevés sur une zone volcanique avalanchée du volcan Tutupaca au Pérou. C'est à partir des données de ces analyses que ce travail tente de reproduire le

comportement de ces roches à l'échelle microscopique.

1.3 Objectif du travail

Étant donné les enjeux liés aux phénomènes d'instabilités de volcans, il est intéressant d'évaluer leur instabilité. Dans un premier temps, le comportement microscopique sera modélisé à l'aide d'un modèle 2D en éléments finis. Ce travail se base sur l'étude expérimentale qu'a menée M. Detienne (2016). Son travail se penche sur la question de l'évaluation de l'impact des activités hydrothermales sur les propriétés physiques et mécaniques des roches volcaniques visant à reproduire l'effet de l'altération hydrothermale à petite échelle, sur le comportement mécanique d'une roche volcanique. Mon travail a pour objectif d'ajouter une analyse numérique au questionnement de M. Detienne.

Dans un premier temps, je vais extraire les informations nécessaires à mon travail du travail de M. Detienne. Ces informations sont tant des informations théoriques à propos de sujets que je n'ai pas eu l'occasion de rencontrer lors de mon parcours universitaire que des informations expérimentales qui concernent des échantillons prélevés. Les informations concernant les échantillons prélevés sont triées et interprétées pour permettre de les modéliser et de les exploiter au sein du modèle numérique. La section 2 synthétise ces informations accompagnées d'informations concernant la mécanique des sols.

En section 3, le fonctionnement du modèle numérique est synthétisé. La modélisation 2D d'une roche à l'échelle microscopique granulaire avec les différents paramètres pris en compte est développée ainsi que la méthode de calcul utilisée par le modèle aux éléments finis.

Ensuite, les analyses réalisées sont expliquées dans la section 4. En commençant par une calibration du modèle numérique à l'aide de résultats expérimentaux, cette section reprend les démarches réalisées pour arriver à certains résultats ainsi que certaines démarches qui ont mené à une nouvelle orientation des recherches. C'est aussi au sein de cette section que les résultats intermédiaires sont discutés.

2 Altérations hydrothermales dans les contextes volcaniques

2.1 Les roches

Qu'est-ce qu'une roche ? *“Les roches sont des géomatériaux généralement solides et formés, essentiellement ou en totalité, par un assemblage de minéraux, comportant parfois des fossiles (notamment dans les roches sédimentaires), du verre résultant du refroidissement rapide d'un liquide (volcanisme, friction) ou des agrégats d'autres roches. Les roches peuvent être formées d'une seule espèce minérale (roches onominérales) ou de plusieurs (roches olyminérales)”* (Benghazi, 2013). Cette définition dévoile l'existence de plusieurs familles de roches qui ont été formées à l'aide de processus variés et desquels en découlent des propriétés et compositions variées.

2.1.1 Classification des roches

En fonction de leur composition et mode de formation, les roches sont classées en trois catégories. Comme illustré sur la figure [2.1](#) les trois familles sont les suivantes : les roches sédimentaires, les roches magmatiques et les roches métamorphiques (Bolly, 2017).

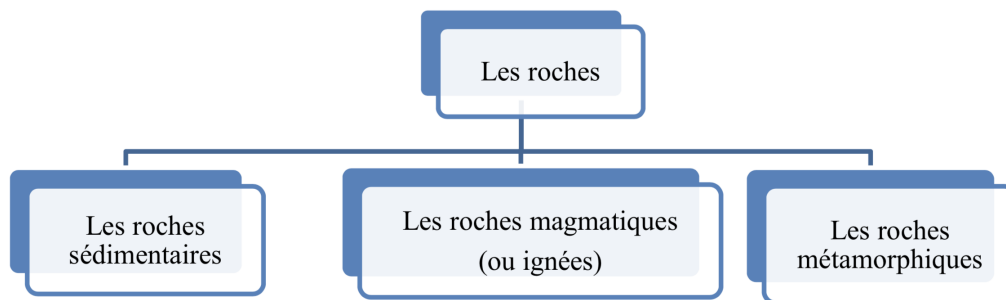


FIGURE 2.1 – Classification des roches.

Les roches sédimentaires sont créées par le biais de l'accumulation de sédiments. Ces sédiments sont des débris de roches, des débris de coquilles ou des fragments variés. La diagenèse est l'ensemble des processus qui va permettre aux sédiments de se transformer en roches sédimentaires (Jauzein, 2001). Ce processus de création des roches sédimentaires donne souvent une roche stratifiée, cette caractéristique aide à l'identification de celle-ci.

Les roches métamorphiques sont des roches qui ont subi une transformation causée par le changement de paramètres physico-chimiques : augmentation de la pression et de la température du milieu en présence de la roche concernée. Cette transformation s'appelle le métamorphisme, une instabilité des minéraux constitutifs donne lieu à des transformations individuelles et de nouvelles associations entre minéraux. Le métamorphisme peut s'appliquer à tout type de roches (Bolly, 2017).

La dernière famille qui regroupe les roches magmatiques est aussi appelée roches ignées. Ces roches proviennent du refroidissement de matière minérale en fusion, le magma. Les roches magmatiques se classent dans deux sous-catégories qui se différencient par la vitesse du processus de formation. Ces classes sont les suivantes (Bolly, 2017).

- Les roches ignées/magmatiques intrusives ou plutoniques. Elles sont caractérisées par une vitesse de refroidissement lente. Cette vitesse a pour conséquence de créer des cristaux relativement gros qui sont visibles à l'œil nu.
- Les roches ignées/magmatiques extrusives, effusives ou encore volcaniques. Elles sont caractérisées par une vitesse de refroidissement rapide. Durant ce refroidissement, les cristaux n'ont pas beaucoup de temps pour se développer. Ils sont donc de taille réduite et souvent invisible à l'œil nu. Dans certains cas il n'y a pas de cristaux.

En parallèle à cette classification, les roches ignées peuvent être classées en fonction de leur composition minéralogique (Bolly, 2017).

Il ne manque plus que quelques concepts pour compléter cette section et avoir une description de l'ensemble du cycle des roches qui est développé en figure 2.2. Les sédiments ont été introduits lors de la description de la formation de roches sédimentaires. Ceux-ci sont formés par le biais d'éléments météorologiques tels que des cycles de gel-dégel ou de l'érosion de roches. Le magma provient de la fonte des roches qui se trouvent à proximité de la source thermique. La figure 2.2 met bien en évidence les liens entre les différents états de la matière et les phénomènes qui les relient. La figure 2.3 permet une visualisation dans l'espace en fusionnant un schéma représentatif du cycle des roches avec un paysage volcanique.

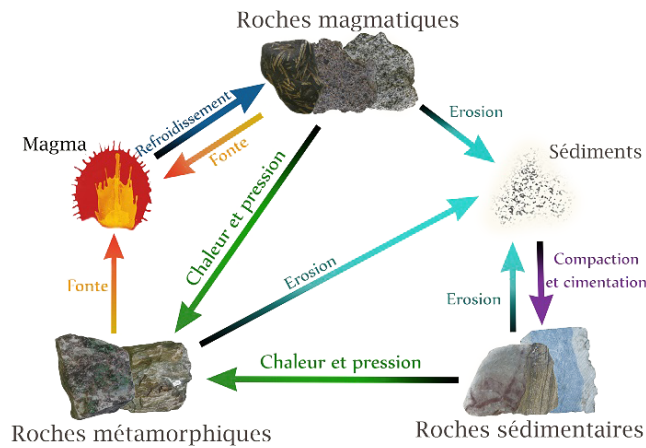


FIGURE 2.2 – Cycle des roches (Rédaction SimplyScience.ch, 2015).

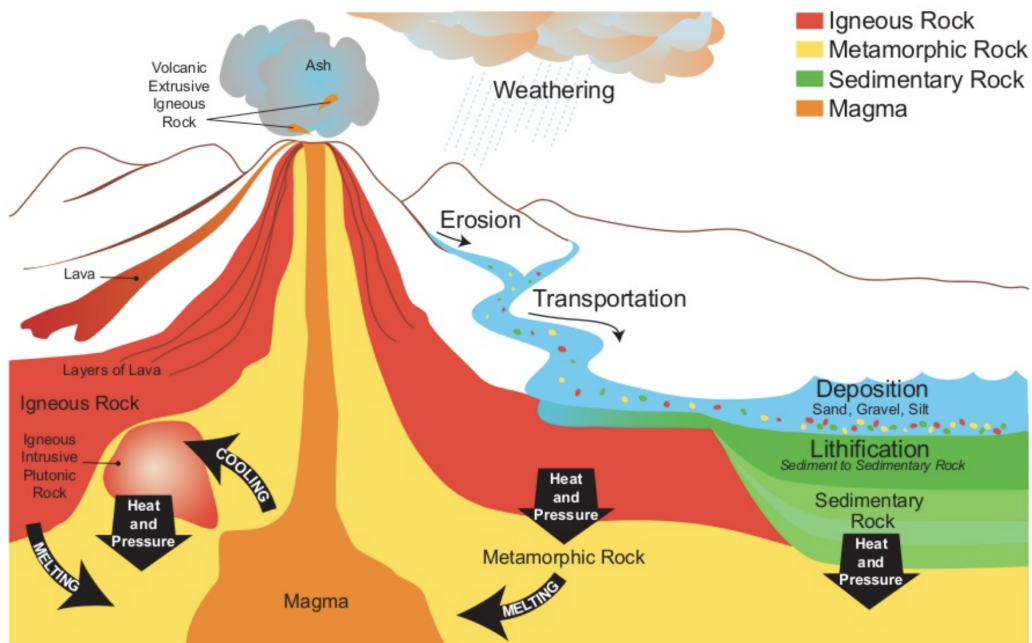


FIGURE 2.3 – Cycle des roches dans son contexte (Mining Matters, 2013).

2.1.2 Porosité d'une roche

Une roche est généralement formée de minéraux dont la formation est développée dans la section précédente. La composition minéralogique peut laisser place à une classification comme introduite

dans le cas des roches ignées. Les agrégats de minéraux ne sont pas parfaits, ils sont en présence d'une multitude de discontinuités telles que des pores, des microfissures, des microspores ou des fissures. Ces discontinuités induisent de la porosité au sein d'une roche (Quirion, 1995). La définition de la porosité donnée par le Larousse aide à la compréhension du principe de la porosité : "*Rapport du volume des espaces du sol non occupés par des éléments solides au volume total du sol*" (2019). Cette définition peut être adaptée à notre cas en remplaçant les termes "sol" par "roche".

Il faut néanmoins différencier la porosité interconnectée ou ouverte de la porosité fermée. La figure 2.4 illustre la différence entre ces deux types de porosité. "*La porosité totale correspond au rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche*". "*La porosité ouverte est déterminée par la proportion de vides (pores) reliés entre eux et donc accessibles à l'eau. Elle correspond au rapport entre le volume des pores ouverts sur le volume total de la roche. C'est elle qui conditionne la perméabilité d'un matériau, c'est-à-dire sa capacité à laisser l'eau circuler à travers les vides (pores et fissures)*" (Bolly et Gharsallaoui, 2017). En complément à la porosité ouverte il existe la porosité fermée, elle regroupe l'ensemble des pores qui ne sont pas reliés au réseau créé par la porosité ouverte. La différenciation de ces porosités est indispensable lorsque des calculs hydromécaniques sont réalisés, car seule la porosité ouverte conditionne la perméabilité.

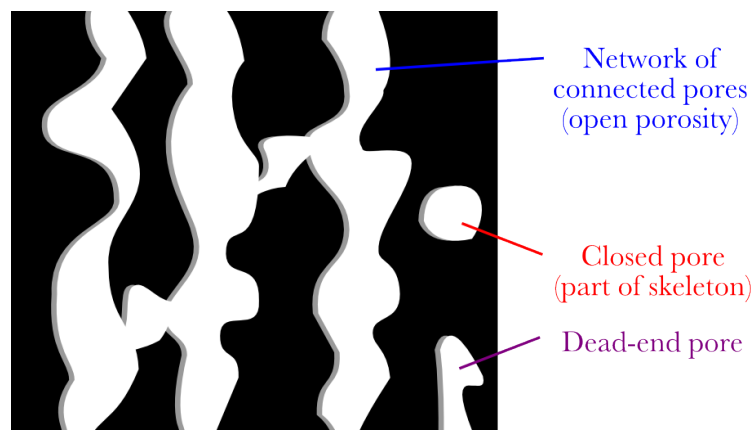


FIGURE 2.4 – Représentation schématique de la porosité ouverte et fermée (Jaouen, 2019).

Dans notre cas, la porosité de nos échantillons est calculée à l'aide d'un pycnomètre à déplacement d'hélium qui donne la porosité en vrac, qui considère tant la porosité ouverte que fermée (Detienne, 2016). Dans le cadre de ce travail, nous parlerons toujours de porosité en totale.

2.1.3 Comportement à la compression

Les modèles constitutifs du comportement sont des modèles théoriques qui permettent la prédiction du comportement de la matière lorsqu'elle est mise sous une contrainte de compression. Dans le cadre de l'étude du comportement des roches, il existe deux modèles courants qui peuvent être appliqués à une telle situation : le critère de rupture de Mohr-Coulomb et celui de Hoek-Brown. Tous les deux peuvent être utilisés avec une représentation graphique qui prend en compte les contraintes principales de la matière qui, dans notre cas, est une roche. Le critère de Mohr-Coulomb est défini à l'aide de l'équation 2.1. Ce critère est défini de manière linéaire, celui-ci permet d'avoir des résultats rapides et proches du comportement réel. Le critère de Hoek-Brown n'est pas défini de manière linéaire. Il est défini à l'aide de l'équation 2.2 (Pardoen et al., 2019). Ces équations décrivent l'état limite d'un élément dans lequel cet élément est susceptible de rompre.

$$\sigma_1 = \frac{2c \cdot \cos\phi}{-\sin\phi} + \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \sigma_3 \quad (2.1)$$

Où σ_1 est la contrainte effective principale maximum, σ_3 est la contrainte effective principale minimum et ϕ est l'angle de frottement de la roche.

Il peut aussi être exprimé comme ceci :

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c$$

Dans cette équation τ est la contrainte de cisaillement, σ est la contrainte normale, c est l'ordonnée de l'enveloppe de rupture par rapport à l'axe des τ et ϕ est la pente de l'enveloppe de rupture.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1\right)^{0.5} \quad (2.2)$$

Ce sont ces états de rupture qui sont utilisés dans les représentations graphiques de ces modèles de rupture. Sur les figures 2.5 et 2.6 on constate que le critère de rupture de Hoek-Brown n'est pas linéaire alors que celui de Mohr-Coulomb l'est bien. Sur ces représentations, l'on réalise que l'on peut tant utiliser ces critères de ruptures pour des contraintes de type triaxiales que uniaxiales. Ces deux types de contraintes peuvent être simulées en laboratoires à l'aide d'essais mécaniques, ils sont décrits ci-après.

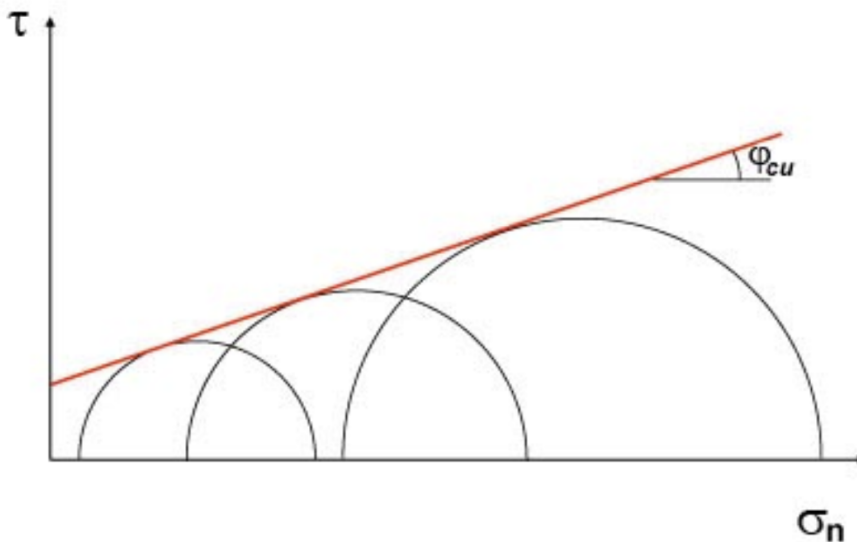


FIGURE 2.5 – Critère de rupture de Mohr-Coulomb.

L'essai uniaxial est aussi appelé essai de compression simple. Il permet de déterminer le module d'élasticité statique E , le coefficient de poisson ν , et la résistance à la compression uniaxiale UCS . Il est réalisé sur des échantillons cylindriques de 2.25 cm de diamètre et 5cm de hauteur selon les standards ASTM (2004). L'échantillon est soumis à une contrainte verticale qui peut soit être en constante augmentation soit liée à une déformation constante. L'essai se termine au moment de la rupture de l'échantillon. Du début jusqu'à la fin, les déformations et les contraintes sont mesurées à l'aide de différents capteurs. Ces informations sont retranscrites sur un graphe contraintes-déformations ($\sigma - \varepsilon$). La figure 2.8 illustre les éléments cités dans ce paragraphe.

L'essai uniaxial comporte certains inconvénients. Il est simple à effectuer, mais le comportement d'une roche sous confinement uniaxial n'est pas fréquent dans un contexte naturel. C'est pour cela que l'essai triaxial est souvent utilisé avec des échantillons de sol ou de roche. La réalisation d'un essai triaxial nécessite du matériel plus lourd. En effet, une cellule de confinement est nécessaire pour reproduire des contraintes de type $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$; $\sigma_2 = \sigma_3 > 0$ comme illustrés en figure 2.9. Ils sont aussi effectués sur des échantillons cylindriques en laboratoire. Les mêmes données sont mesurées et les résultats sont aussi exprimés dans un graphe contraintes-déformations ($\sigma - \varepsilon$). La contrainte de confinement, dans le cas de ce travail, est de $\sigma_2 = \sigma_3 = 5, 10, \text{ ou } 20 \text{ MPa}$.

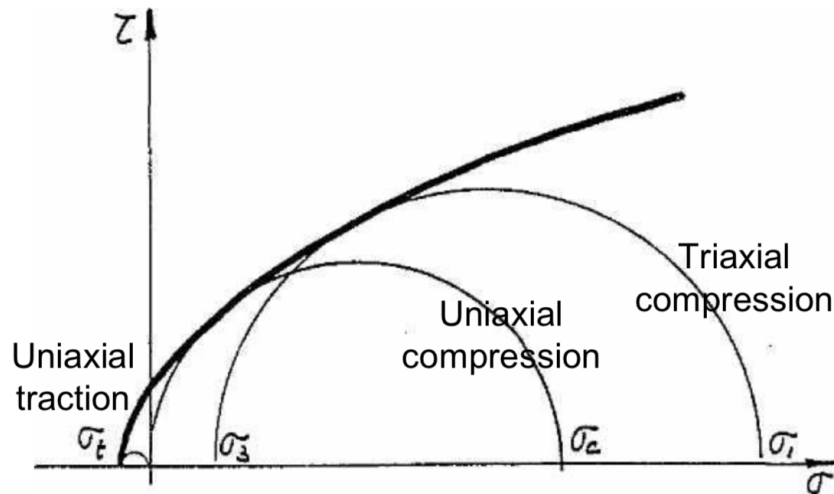


FIGURE 2.6 – Critère de rupture de Hoek-Brown.

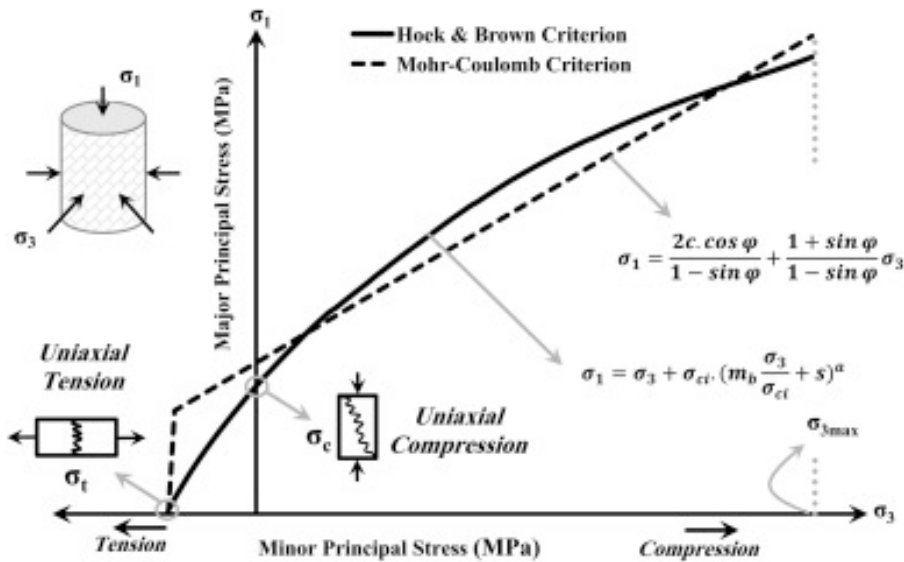


FIGURE 2.7 – Comparaison des critères de Mohr-Coulomb et Hoek-Brown.

2.1.4 Comportement à la rupture

Après son pic de résistance, une roche peut avoir plusieurs comportements distincts. Le pic de résistance est visible sur une courbe contraintes-déformations ($\sigma - \varepsilon$), c'est la contrainte maximum subie par l'échantillon. La zone d'un graphe contraintes-déformations qui se trouve après le pic est nommée post-pic. Elle définit certaines propriétés du matériau telles que son comportement ductile/fragile. Sur la figure [2.10](#) on peut observer différents comportements post-pic type. Un comportement fragile après le pic signifie qu'après la rupture la résistance est inexistante ou négligeable. Un comportement ductile est défini comme suit dans le cours de M. Cap (2013) : *“aptitude qu'un élément a à subir des déformations plastiques importantes sans atteindre la ruine prématurément par excès de déformations. Elle se mesure donc, dans un diagramme contraintes-déformations, par la “longueur” du palier plastique qui précède la rupture”*. Un autre comportement observable est un adoucissement de la résistance, il consiste en une courbe post-pic décroissante sur un graphe contraintes-déformations. La différence entre une roche à comportement fragile et ductile est aussi observable sur la figure [2.11](#).

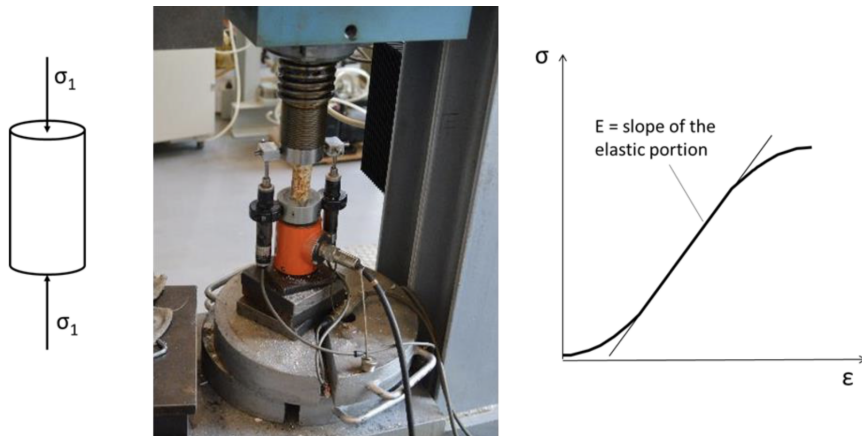


FIGURE 2.8 – Essai de compression uniaxiale. À gauche nous avons les contraintes qui agissent sur l'échantillon ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$). Au centre nous avons un dispositif d'essai uniaxial en laboratoire avec tout l'appareillage de mesure. À droite nous retrouvons un graphe contraintes-déformations ($\sigma - \epsilon$). (Detienne, 2016)

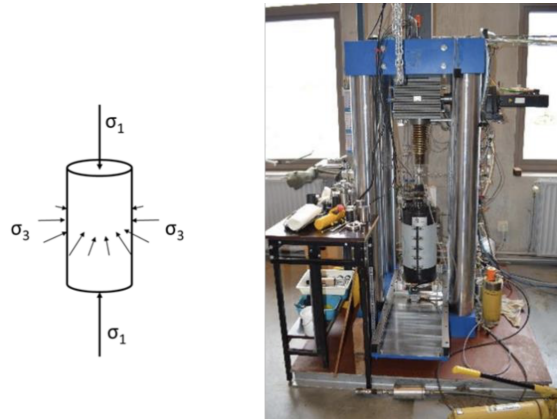


FIGURE 2.9 – Essai de compression triaxiale. À gauche nous avons les contraintes qui agissent sur l'échantillon ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$; $\sigma_2 = \sigma_3 > 0$). À droite nous avons un dispositif d'essai triaxial en laboratoire avec tout l'appareillage de mesure et la cellule de confinement. (Detienne, 2016)

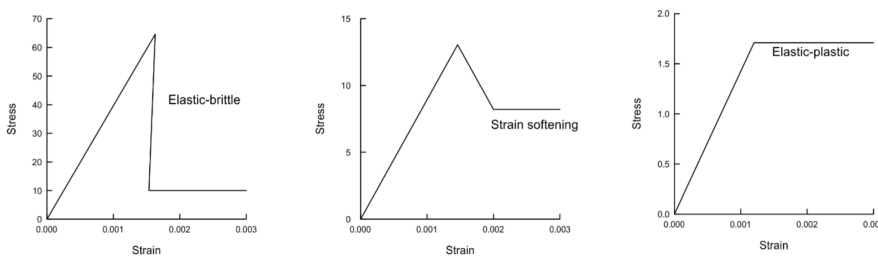


FIGURE 2.10 – Graphes contraintes-déformations ($\sigma - \epsilon$) mettant en évidence différents comportements post-pic. À gauche nous observons un comportement fragile. Au centre nous avons un comportement d'adoucissement avec une résistance résiduelle après la rupture. À droite nous avons un comportement elasto-plastique.

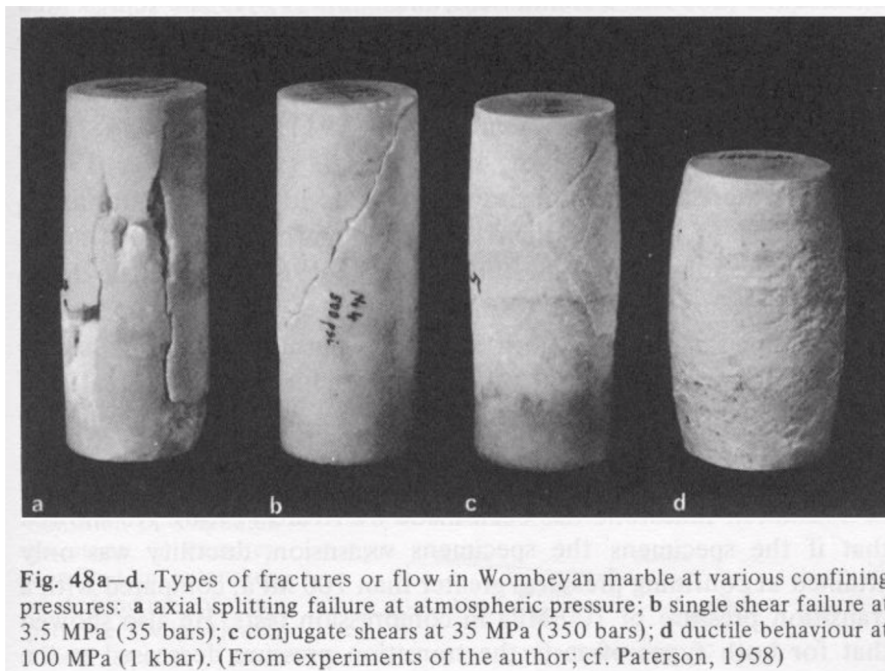


FIGURE 2.11 – Différents échantillons après un essai triaxial. **a** rupture longitudinale sous pression atmosphérique. **b** rupture via une unique fissure de cisaillement sous un confinement de 3.5 MPa. **c** fissures multiples de cisaillement sous un confinement de 35 MPa. **d** comportement ductile sous un confinement de 100 MPa (Paterson, 1958).

2.2 Altération dans un contexte volcanique

L'altération hydrothermale est un sujet qui revient fréquemment dans le domaine de la recherche. Un système est dit hydrothermal lorsqu'un fluide se trouve à l'endroit d'une source de chaleur et permet la dissipation de la chaleur créée par cette source. Alors qu'il existe plusieurs foyers d'altérations hydrothermales, les systèmes magmatiques sont les plus actifs. Cette section introduit le sujet de l'altération hydrothermale dans le cas de systèmes magmatiques. Cette introduction, tout comme l'entièreté de cette section, est basée sur le document de recherche de M. Detienne, 2016.

Sous la surface terrestre se trouve l'accumulation d'un mélange de roches à l'état semi-liquide ou liquide, de composés volatils et cristaux en suspensions, cette mixture est du magma. Lorsque le magma refroidit, il libère certains composants volatils (majoritairement H_2O , C , S , Cl , et parfois S) dissous dans celui-ci. Ces substances volatiles forment des fumerolles lorsqu'elles atteignent directement la surface terrestre. Elles y parviennent en étant canalisées par des conduits. Les fumerolles sont des dégagements gazeux à haute température en surface observables dans des zones de volcanisme actives.



FIGURE 2.12 – Fumerolles dans le parc national de Yangmingshan à Taiwan (Chang, 2003)

À défaut de rejoindre directement la surface, les composants volatiles interagissent pour la plupart des cas avec des eaux souterraines météoriques avant de rejoindre la surface terrestre. Cette interaction est la source du système hydrothermal. Ce système est caractérisé par un flux ascendant de fluide directement au-dessus de la source de chaleur et un flux descendant sur l'extérieur.

Lorsque la pression de confinement n'est plus suffisante pour maintenir le flux ascendant de fluide, une petite portion de l'eau passe à l'état gazeux. Accompagnés d'autres gaz, ils remontent par flottaison. Ceci laisse une eau riche en éléments salins riches en *Na*, *K*, *Ca*, *Cl*.

À proximité de la surface, cette composition de gaz et de vapeur entre dans une zone de condensation pour devenir un fluide acide avec une proportion variable de SO_4 et de HCO_3 . À l'approche de la surface terrestre, le fluide se neutralise en s'enrichissant de cations dissous lors de l'interaction avec la roche. Cette étape va créer une précipitation de minéraux secondaires. Ces étapes donnent un système hydrothermal qui contient une eau à composition très variable et régie par la composition des gaz présents, la lithologie des roches, le ratio eau/roche, le temps d'ascension, et le régime thermique. La production de minéraux secondaire liée à une altération hydrothermale a lieu dans les quatre environnements suivants :

1. Magmatique-hydrothermal

Ce premier environnement concerne de manière générale tout système entraîné par la chaleur magmatique tout en ayant une proportion significative de composants magmatiques dans le fluide hydrothermal.

2. Magmatique-vapeur

Celui-ci correspond à la partie supérieure d'un système hydrothermal, où la phase dominante est la phase vapeur d'origine magmatique. Il est associé aux gaz fumaroliques.

3. Chauffé par la vapeur

Se produit à faible profondeur au-dessus ou au niveau de la nappe phréatique en présence de fluide secondaire formé par oxydation de fluides hydrothermaux.

4. Environnements supergènes

Ce dernier environnement se trouve à la surface terrestre sans influence des fluides hydrothermaux.

2.2.1 Types d'altérations hydrothermales

En plus des différents systèmes hydrothermaux, il existe une multitude de types d'altération hydrothermale. La nature et les quantités relatives de minéraux qui forment divers assemblages d'altération hydrothermale dépendent de cinq facteurs : la température, la pression, la composition de la roche hôte, la composition du fluide primaire et le rapport de quantité fluide/roche. Les types d'altérations hydrothermales les plus significatives dans l'ordre décroissant de températures et de pressions sont les altérations potassiques, propylitiques, séricitiques/phylliques, argilliques et siliciques. Ci-après sont détaillés les types d'altérations hydrothermales qui concernent les échantillons exploités pour les analyses de ce travail.

- Argillique

Ce type d'altération correspond à la formation d'argile suite à un lessivage conséquent par un fluide acide (avec un pH entre 2 et 5). Elle se trouve tant à proximité des environnements intrusifs que dans des environnements de faibles profondeurs. Généralement les minéraux argileux se présentent sous la forme de substituts au plagioclase et au silicate mafique.

- Silice résiduelle

Aussi dénommée Opaline, elle se forme dans des conditions proches de la surface, est due aux eaux sulfatées (avec un pH entre 2 et 3) et aux températures proches des 100 °C. Cette

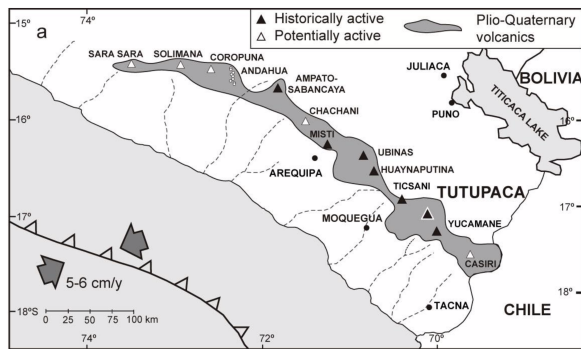


FIGURE 2.13 – Localisation du volcan Tutupaca dans l’arc volcanique péruvien (Samaniego et al., 2015).

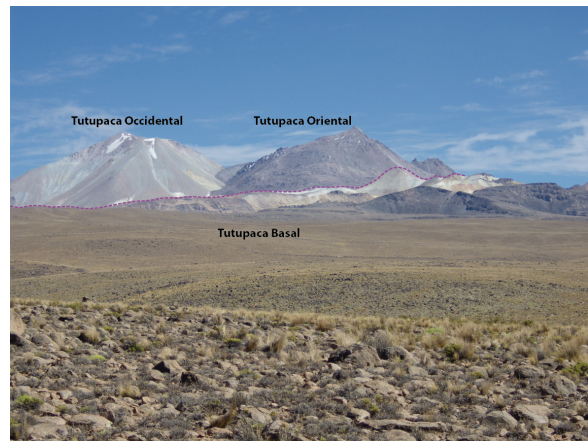


FIGURE 2.14 – Photo du complexe volcanique du Tutupaca (OVI, 2019).

altération donne une teinte blanchâtre à la roche composée de minéraux siliceux tels que l’opale, la calcédoine, le quartz, la tridymite et la cristobalite.

– Silicification

La silicification se produit principalement dans les 500 *m* supérieurs de systèmes géothermiques et hydrothermaux volcaniques. Le refroidissement du fluide hydrothermal saturé en silice résulte en un précipité de silice au sein de la porosité de la roche et augmente donc sa densité.

2.2.2 Impact de l’altération hydrothermale sur la stabilité des volcans

Le lien entre altérations hydrothermales et modification de la résistance de l’édifice volcanique est suggéré par certaines analyses de débris provenant d’édifices qui se sont effondrés. Cette suggestion est liée à des modifications minéralogiques, chimiques et de texture des roches. Dans le cadre de son étude, M. Detienne a analysé une multitude d’échantillons provenant d’un volcan qui s’est effondré il y a environ 200 ans et a réalisé certaines observations (Detienne, 2016). Celles-ci sont développées dans les sections suivantes.

2.2.3 Contexte volcanique et minéralogie de la roche

Les échantillons qui ont été analysés (Detienne, 2016) ont été prélevés aux abords du volcan Tutupaca au sud du Pérou dans l’arc volcanique péruvien. Ils ont été prélevés à différentes altitudes et dans différentes zones de ce complexe volcanique. La position des prélèvements repris dans ce travail se trouve dans la figure 2.15. Le volcan repose à un niveau de 4400 - 4600 *m* d’altitude sur un sol composé de roches volcaniques et sédimentaires altérées. Le complexe volcanique du Tutupaca est constitué d’un large édifice basal (Tutupaca Basal) vieux de plus de 25 000 ans accompagné de deux sommets dénommés Tutupaca Occidental (5815 *m* d’altitude) et Tutupaca Oriental (5790 *m* d’altitude) observables sur la figure 2.14.

La combinaison d’analyses de diffraction de rayon X, de microscopie électronique à balayage et de spectroscopie de rayons x à dispersion d’énergie a permis de définir la composition minéralogique des échantillons. De plus, la porosité a été définie à l’aide d’un pycnomètre à déplacement de gaz à l’hélium. Celles-ci sont reprises dans le tableau 2.1 pour les échantillons qui ont subi des essais mécaniques.

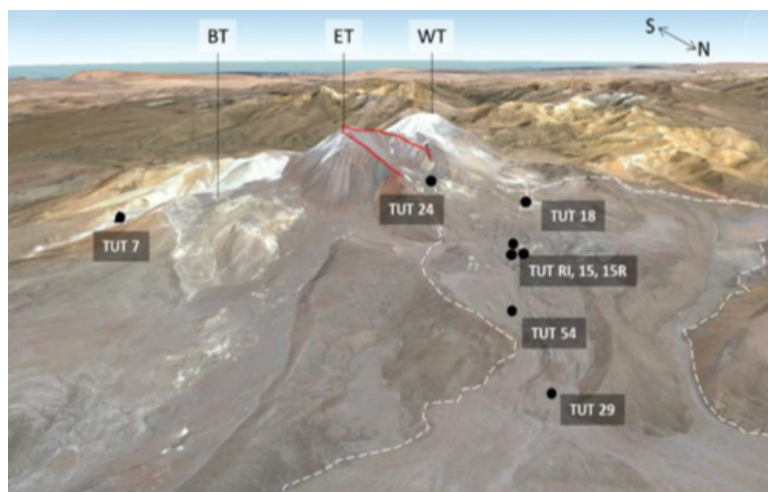


FIGURE 2.15 – Visualisation tridimensionnelle de la localisation des prélèvements sur le volcan Tutupaca. Les lignes pointillées délimitent la zone de dépôt des débris suite à l’avalanche et la ligne rouge désigne la cicatrice de celle-ci. BT, ET, et WT désignent respectivement le Tutupaca Basal, le Tutupaca Oriental et le Tutupaca Occidental. (Detienne, 2016)

		Unités	TUT RI	TUT 15	TUT 15R	TUT 18	TUT 24	TUT 7	TUT 29	TUT 54
Primary minerals		%_volSolide	49,2	50,4	63,9	65,4	37,0			
Silica	Quartz	%_volSolide	3,0	17,7		18,3		4,3		2,4
	Cristobalite	%_volSolide			10,7			24,1		11,1
	Amorphous Si	%_volSolide	47,8	25,9	20,4	11,1	48,1	71,2	79,9	84,9
Clay Min	Montmorillolite	%_volSolide		6,0		2,6	2,7			
	Halloysite	%_volSolide			5,0		12,2			
	Kaolinite	%_volSolide				2,6			2,6	
	Dickite	%_volSolide							3,0	
Sulfates, sulfides, Sulfur		%_volSolide							14,2	
Other Min		%_volSolide						0,4	0,3	1,6
Porosité		%_volTot	14,0	41,0	10,0	18,0	56,0	41,0	41,0	20,0

Tableau 2.1 – Minéralogie des échantillons utilisés dans le cadre de ce travail.

2.2.4 Analyses mécaniques

Via une multitude d’analyses et de tests, certaines propriétés des échantillons ont été déterminées. Ces valeurs sont reprises dans le tableau 2.2. Les échantillons ont notamment subi des essais de résistance mécanique de compressions uniaxiale et triaxiale. Les contraintes d’essai de compression triaxiale se rapprochent au mieux des contraintes au sein d’un sol in situ, ces résultats sont donc indispensables à mon travail. De plus, le modèle numérique utilisé dans la suite du travail permet de reproduire une sollicitation en cisaillement (sous contrainte déviatorique), mais se limite à une simulation bidimensionnelle.

2.2.5 Observations

Les résultats des essais réalisés en laboratoire sur ces échantillons montrent que les variations des propriétés physiques causées par l’altération hydrothermale à faible profondeur sont variées. Néanmoins, certaines observations ressortent de cette étude.

1. Une altération argilique intermédiaire qui induit un dépôt de minéraux argileux dans les pores et en remplacement des minéraux primaires altérés a un impact négatif non négligeable sur les propriétés mécaniques de la roche altérée. Ce qui signifie qu’elle réduit sa résistance et augmente sa ductilité.

	n (%)	ρ (kg/m ³)	k (m/s)	Waves (m/s)			τ (MPa)							
				Vp	Vs	νd (-)	Ed (MPa)	UCS (Mpa)	E (MPa)	$\sigma_3=5$	$\sigma_3=10$	$\sigma_3=20$	c (Mpa)	φ (°)
TUT7	58	1056	2.20E-08	1929 ± 105	896	0.37	2274	8.1	1615	18.0	35.4	45.0	3.8	16
TUT15	41	1553	ND	3224 ± 94	1478	0.41	6898	33.9	6610	ND	71.4	93.0	15.3	24
TUT15R	10	2307	ND	4682 ± 392	ND	ND	ND	57.7	12135	ND	ND	ND	ND	ND
TUT18	18	2031	1.10E-09	3790 ± 166	1197	0.44	8325	40.8	9510	53.0	61.0	114.0	8.8	37
TUT24	56	1088	6.37E-07	1899 ± 325	ND	ND	ND	8.6	2288	5.6	ND	6.8	ND	ND
TUT29	41	1677	2.40E-07	2515 ± 131	1000	0.40	5479	7.4	2227	15.0	42.7	72.6	2.2	32
TUT54	20	1701	1.20E-10	2495 ± 164	1029	0.41	5094	18.2	4620	45.0	68.0	101.0	9.7	32
TUTRI	14	2145	9.40E-08	3226 ± 154	1068	0.44	7022	23.7	7450	78.0	96.0	130.0	16.0	34

Tableau 2.2 – Propriétés mécanique et physique des échantillons. n = porosité, ρ = densité, k = perméabilité, Vp = vitesse de l'onde élastique de compression, Vs = vitesse de l'onde élastique de cisaillement, νd = coefficient dynamique de poisson, Ep = module dynamique de Young, UCS = uni-axial compressive strength (essai de compression uniaxiale), E = module de Young, τ = résistance au cisaillement, σ_3 pression de confinement des essais triaxiaux, c = cohésion, φ = angle de frottement; ND = non déterminé.

2. La silicification d'une roche par précipitation de silice cristalline au sein de pores (par exemple, la cristobalite et le quartz) a un impact positif sur sa résistance.
3. De l'opaline dominée par la silice amorphe résultant du lessivage des roches par les fluides acides présente une résistance relativement faible, probablement en raison de leur porosité.
4. Les roches altérées hydrothermalement développent un comportement ductile à plus faible profondeur que les roches non altérées, quel que soit le type d'altération et les minéraux secondaires.
5. Plus que leur abondance, la nature des minéraux secondaires contenus dans une roche altérée, c'est-à-dire le type de modification qu'elle a subi, est un facteur critique à prendre en compte lors de l'évaluation de ses propriétés mécaniques.

3 Méthodes numériques

Cette section développe différents aspects du modèle numérique réalisé par mon promoteur. Cette section se base sur son travail (Pardoen et al., 2019).

3.1 Modèle numérique des microstructures

Dans le cadre d'une recherche au sujet de la réponse hydromécanique de sols argileux sous certaines contraintes, Pardoen et al. (2019) ont considéré une approche à double échelle aux éléments finis sur des microstructures 2D. Les microstructures sont une modélisation du comportement microscopique d'une roche granulaire cohésive. L'échelle microscopique ici correspond à l'échelle des grains des différentes phases minérales qui constituent la roche et est reproduite par une surface élémentaire représentative bidimensionnelle. La représentation numérique de la roche à l'échelle granulaire est observable sur les exemples de microstructures générées dans le cadre de ce travail en figure 3.1.

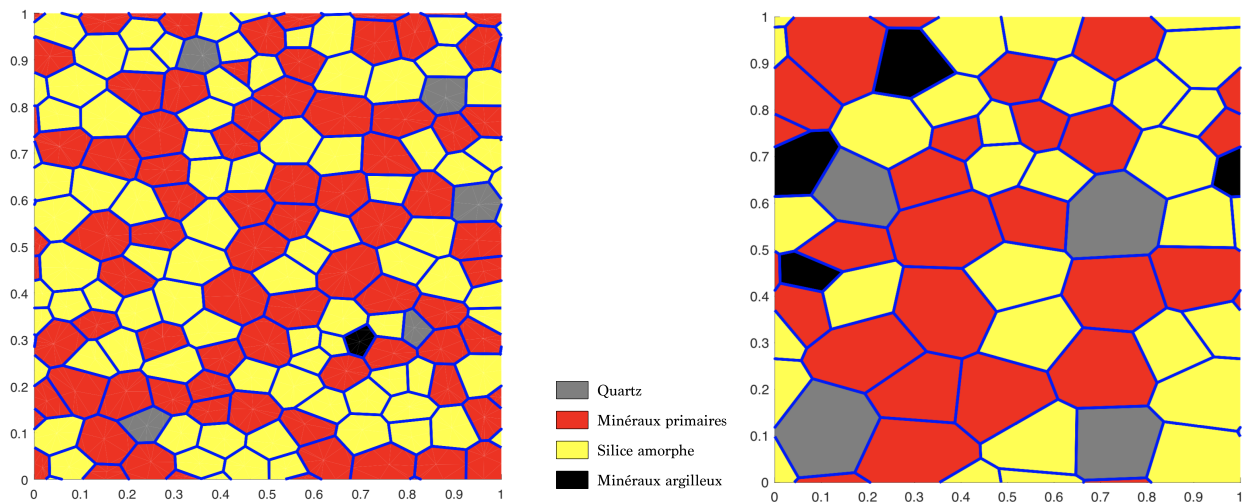


FIGURE 3.1 – À gauche : *MIRI-150_1*. Microstructure de 150 grains représentant l'échantillon non altéré TUT RI. À droite : *MIRI-50_1*. Microstructure de 50 grains représentant l'échantillon non altéré TUT RI.

Ce modèle va être utilisé ici pour simuler la réponse mécanique de sols altérés et non altérés. Rappelons ici de préciser que les analyses réalisées pour ce travail sont des analyses mécaniques et non hydromécaniques. Le comportement mécanique global d'une microstructure est calculé à l'aide d'une méthode aux éléments finis. Ce calcul donne une réponse homogénéisée de la microstructure face à un chargement. Cette réponse qui s'exprime sous la forme d'un graphe contraintes-déformations peut remplacer une loi constitutive dans une application à double échelle.

3.2 Surface élémentaire représentative

L'objectif d'une surface élémentaire représentative est de reproduire le comportement mécanique d'une roche à petite échelle. Le modèle à l'échelle microscopique est bidimensionnel et sous des conditions de déformations plane (van den Eijnden et al., 2017). Pour ce faire, elle est composée d'un assemblage granulaire représentant les différentes phases minéralogiques d'un sol. Alors que le comportement intrinsèque des grains est défini par une loi de déformation purement élastique, le

comportement entre les grains est dicté par des lois de comportements d'interfaces cohésifs endommageables. Les interactions entre deux interfaces sont observables en figure 3.2. La définition de ces lois de comportements est développée plus en détail dans la section 3.5.

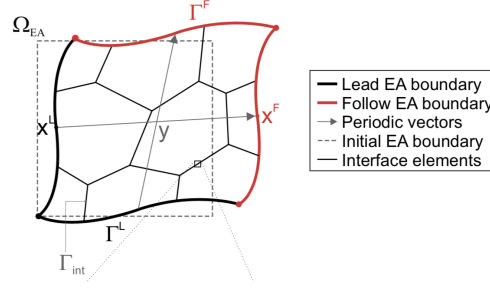


FIGURE 3.2 – Modèle mécanique microscopique composé d'un assemblage granulaire. Au-dessus nous avons une représentation de la périodicité des déformations. En dessous nous retrouvons les interactions entre deux interfaces (Marinelli et al., 2016).

La cinématique de la surface élémentaire représentative est liée à deux champs de déplacement : le champ de déplacement micro u_i^m et le champ des déformations homogénéisées u_i^M qui est à l'échelle macro. L'ensemble mathématique de la surface élémentaire Ω_{SE} est composé de sous-ensembles. Ces sous-ensembles sont les ensembles des grains et sont considérés comme continus. Les frontières entre les grains Γ_{int} et la frontière de l'ensemble Ω_{SE} donnent l'ensemble complet des frontières $\Gamma = \Gamma_{SE} \cup \Gamma_{int}$.

La réponse du calcul qui nous intéresse est la réponse homogénéisée de la surface élémentaire. Celle-ci est dérivée de la résolution d'un problème aux limites par un système de calcul aux éléments finis. Celui-ci est décrit dans la section suivante.

Il est pertinent de développer la dénomination des microstructures qui est utilisée pour ce travail. Prenons pour exemple le nom de la microstructure se trouvant à gauche en figure 3.1 : *MIRI-150_1*. Chaque microstructure possède un nom unique pour permettre une différenciation. Étant donné que certains paramètres seront modifiés lors des différentes simulations, une microstructure est définie d'une part par sa répartition de grains des différentes phases et d'autre part par les propriétés mécaniques de ces phases. Ces paramètres sont définis plus loin dans cette section. La nomination se découpe en plusieurs parties, elles sont développées ci-dessous.

MI sont simplement les deux premières lettres du mot microstructure.

RI est le nom de l'échantillon que représente la microstructure. La nomination des échantillons est celle utilisée dans le document de Detienne (2016). L'échantillon représenté définit les proportions des phases minérales au sein de la microstructure. Les différents échantillons sont repris dans le tableau 2.1

-150 indique le nombre de grains qui composent la microstructure.

_1 est une valeur incrémentée lorsque plusieurs microstructures représentant un même échantillon avec un même nombre de grains sont utilisées.

Une microstructure ou surface élémentaire n'a pas de dimension bien définie, d'où son appellation de surface représentative. Nous allons estimer ci-dessous cette dimension à partir de la dimension des inclusions minérales. La méthode de calcul utilisée pour estimer la taille d'une surface représentative à partir de la dimension d'une inclusion est exprimée dans la formule 3.1

$$S_{SR}^{num} = \frac{N_{incl}^{num}}{d_{Sur} f_{incl}^{num}} S_{incl,moy}^{exp} \quad (3.1)$$

$$L_{SR} = \sqrt{S_{SR}}$$

avec :

S_{SR}^{num} : estimation de l'aire de la surface représentative.

L_{SR}^{num} : longueur d'un côté de la surface représentative, liée à l'aire estimée.

N_{incl}^{num} : nombres d'inclusions de phase i au sein de la surface représentative.

$dSurf_{incl}^{num}$: proportion de la surface occupée par la phase i au sein de la surface représentative.

$S_{incl,moy}^{exp}$: aire moyenne d'une inclusion de la phase i mesurée de manière expérimentale.

À partir de la microstructure *MIRI-150_1* qui est la plus utilisée dans ce travail, nous allons estimer la dimension d'une microstructure de 150 grains. Ensuite une comparaison sera faite avec le résultat de cette même estimation sur une microstructure de 50 grains, *MIRI-150_1*. L'analyse est réalisée sur les inclusions de quartz. Nous savons que pour le quartz $S_{quartz,moy}^{exp} = 100\mu m^2$ (Pardoen et al., 2019). Dans le cas de la microstructure, nous avons les valeurs suivantes pour les différentes variables.

$$N_{quartz}^{MIRI-150_1} = 5 \text{ grains}$$

$$dSurf_{quartz}^{MIRI-150_1} = 0.0295 \%$$

En injectant ces valeurs dans l'équation [3.1](#), nous obtenons :

$$S_{SR}^{MIRI-150_1} = \frac{N_{quartz}^{MIRI-150_1}}{dSurf_{quartz}^{MIRI-150_1}} S_{quartz,moy}^{exp} = \frac{5}{0.0295} 100 = 16949.15\mu m^2$$

Ce qui nous donne un carré de longueur :

$$L_{SR}^{MIRI-150_1} = \sqrt{S_{SR}^{MIRI-150_1}} = \sqrt{16949.25} = 130.2\mu m$$

Rappelons que ceci est une estimation qui nous permet de donner un ordre de grandeur. Nous allons donc retenir qu'une microstructure de 150 grains a une dimension de l'ordre d'un carré de $100\mu m$ de côté. Pour confirmer cette estimation, la même analyse est réalisée sur la microstructure *MIRI-50_1*. Étant donné que c'est une microstructure de 50 grains, nous pouvons nous attendre à avoir une surface réduite de $\frac{250}{50} = 5$ et donc un côté réduite de $\sqrt{\frac{250}{50}} \approx 7$. En plus de nous donner un ordre de grandeur pour une microstructure de 50 grains, cette analyse nous permet de comparer les résultats et tirer certaines conclusions au sujet de la significativité de ces approximations. Les données des inclusions de quartz de *MIRI-50_1* sont les suivantes.

$$N_{quartz}^{MIRI-50_1} = 4 \text{ grains}$$

$$dSurf_{quartz}^{MIRI-50_1} = 0.1139\%$$

Ce qui nous donne les dimensions suivantes.

$$S_{SR}^{MIRI-50_1} = \frac{N_{quartz}^{MIRI-50_1}}{dSurf_{quartz}^{MIRI-50_1}} S_{quartz,moy}^{exp} = \frac{4}{0.1139} 100 = 3511.85\mu m^2$$

$$L_{SR}^{MIRI-50_1} = 59.3\mu m$$

De prime à bord, l'ordre de grandeur ne semble pas démesuré comparé aux résultats de l'analyse sur la microstructure de 150 grains. Mais si on compare le ratio des longueurs estimées avec le ratio théorique des longueurs, nous observons une variance significative.

$$\sqrt{\frac{S_{SR}^{MIRI-150_1}}{S_{SR}^{MIRI-50_1}}} = \frac{L_{SR}^{MIRI-150_1}}{L_{SR}^{MIRI-50_1}} = \frac{130.2}{59.3} = 2.19$$

Alors que ce ratio est du même ordre de grandeur que le ratio calculé à partir des nombres de grains qui est de 7, il malgré tout fort différent. Cette comparaison indique que ces calculs mènent bien à des estimations et non un calcul exact de la dimension d'une microstructure. Les résultats sont donc à exploiter avec précaution.

3.3 Conditions limites

Pour permettre des calculs multi échelle, les surfaces représentatives supposent un continuum périodique caractérisé par une condition aux limites périodique. Ceci signifie que deux frontières opposées de la surface élémentaire ont une déformation et un déplacement identique, comme représenté dans la figure 3.2. La frontière inférieure ainsi que la frontière gauche sont des frontières directrices Γ^L , qui sont donc imitées par les deux autres frontières Γ^F . Ceci signifie que deux points homologues ont une même cinématique. Ce comportement est illustré sur la figure 3.2 pour x_i^L et x_i^F . Les exposants L et F signifient *lead* et *follow*.

Les conditions limites externes sont formulées comme suit :

$$u_i^{m,F} - u_i^{m,L} = \nabla u_{ij}^M (x_i^F - x_i^L) \quad (3.2)$$

$$t_i^F + t_i^L = 0 \quad (3.3)$$

où :

∇u_{ij}^M est le gradient des déformations macroscopiques.

$y_i = x_i^F - x_i^L$ est le vecteur périodique reliant deux points de frontière homologues.

t_i est la force de traction en frontière.

La force de traction en frontière est définie de manière antipériodique pour l'équilibre :

$$\nabla u_{ij}^M = \frac{\partial u_i^M}{\partial x_j} = \frac{1}{\Omega_{SE}} \int_{\Gamma_{SE}} u_i^m n_j d\Gamma \quad (3.4)$$

$$t_i = \sigma_{ij}^m n_j \quad (3.5)$$

où :

n_i est le vecteur normal de la frontière extérieure Γ_{SE} dirigé vers l'extérieur.

Les frontières inférieures Γ_{int}^- et supérieures Γ_{int}^+ des interfaces sont distinctes et sont respectivement de normale n^- et n^+ . Il en est de même pour les forces de cohésion $c_i^{-/+}$ et les déplacements $u_i^{-/+}$. Le champ des micros déplacements est généralement discontinu, cette discontinuité est située aux interfaces Γ_{int} et s'exprime en fonction des déplacements inférieurs et supérieurs : $\Delta u_i = u_i^+ - u_i^-$.

3.4 Équations d'équilibre

Ce sont les équations d'équilibre de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement à l'échelle microscopique qui dictent l'équilibre de la surface élémentaire. La conservation de la masse solide est nécessairement vérifiée, car une configuration lagrangienne mise à jour est prise en compte dans la formulation large des contraintes. La formulation faible de l'équation de conservation de la quantité de mouvement pour la phase solide est la suivante :

$$\int_{\Omega_{SR}} \sigma_{ij}^m \frac{\partial u_i^{m,*}}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Gamma_{int}} t_i u_i^{m,*} d\Gamma \quad (3.6)$$

où :

$u_i^{m,*}$ est un champ virtuel de micro déplacement.

$t_i = c_i$ est la force de cohésion qui s'applique à Γ_{int} .

La résolution du système non linéaire se fait sans prendre en compte la gravité via l'application des contraintes aux conditions limites, la linéarisation des équations de champ grâce à la procédure itérative de Newton-Raphson et la discrétisation spatiale du maillage d'éléments finis. Cette dernière est appliquée aux grains et aux interfaces. Les grains solides sont discrétisés à l'aide d'éléments finis quadrilatères isoparamétriques bidimensionnels à quatre points d'intégration. Les interfaces sont discrétisées à l'aide d'éléments unidimensionnels à quatre nœuds ayant une épaisseur initiale nulle. Cette résolution mène à la détermination du champ de déplacement inconnu u_i^m sous les conditions d'équilibre.

3.5 Modèles (micro)mécaniques constitutifs

Le comportement micromécanique d'une surface représentative granulaire est défini par deux modèles. Le comportement de la phase solide est considéré comme isentropique linéaire élastique. Entre ces phases solides, les interfaces sont modélisées à l'aide d'un modèle de fissures cohésif. Ce modèle cohésif de fissures permet l'endommagement des interfaces intergranulaires par le biais de mouvement des grains solides. Les modèles cohésifs linéaires tangentiel et normal sont définis indépendamment et sont illustrés en figure 3.3 et 3.4. Les expressions sont constituées d'une phase élastique suivie d'une phase d'adoucissement.

$$\begin{aligned} c_n &= c_n^{max}(1 - D_n) \frac{1}{D_n} \frac{\Delta u_n}{\delta_n^c} & \text{si } \Delta u_n \geq 0 \\ &= c_n^{max}(1 - D_n) \frac{1}{D_n} \frac{\Delta u_n}{\delta_n^c} - \kappa \Delta u_n^2 & \text{si } \Delta u_n < 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$c_t = c_t^{max}(1 - D_t) \frac{1}{D_t} \frac{\Delta u_t}{\delta_t^c} \quad (3.8)$$

où :

n, t sont des indices déterminant la direction concernée ; normale ou tangentielle.

$c_{n/t}$ est la force de cohésion de l'interface.

$c_{n/t}^{max}$ est la cohésion maximale théorique de l'interface.

$\Delta u_{n/t}$ est le déplacement adimensionnel relatif à la taille de la surface représentative.

$D_{n/t}$ est un paramètre qui détermine le début de la phase d'adoucissement relative de l'interface.

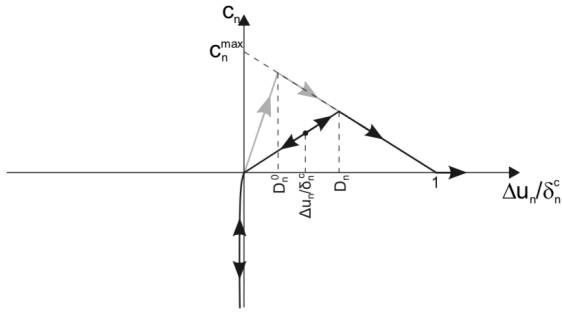


FIGURE 3.3 – Comportement cohésif des interfaces représenté par des lois linéaires dans la direction normale (van den Eijnden et al. 2016). L'expression de cette loi est définie par l'équation [3.7](#)

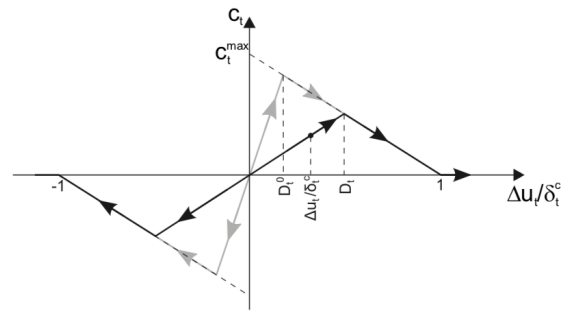


FIGURE 3.4 – Comportement cohésif des interfaces représenté par des lois linéaires dans la direction tangentielle (van den Eijnden et al. 2016). L'expression de cette loi est définie par l'équation [3.8](#)

$\delta_{n/t}^c$ est le déplacement critique relatif qui correspond à une décohésion complète.

La grande différence entre le comportement de l'interface dans la direction normale et dans la direction tangentielle réside dans le comportement face à un déplacement négatif. Dans la direction tangentielle, celui-ci correspond à une fermeture de l'interface sur elle-même. Dans ce cas-là le terme additionnel $\kappa \Delta u_n^2$ évite des pénétrations inter granulaire. Le comportement cohésif peut être assimilé à des modules de rigidité d'une part avant le début de l'adoucissement $E_{n/t}^{elast}$ et d'autre part pendant l'adoucissement $E_{n/t}^{plast}$. Ces modules sont utilisés dans la suite de ce travail lors de la définition de ces paramètres et sont définis dans les équations [3.9](#) et [3.10](#). Sur la figure [3.5](#) nous observons l'effet de la variation du module plastique sur la réponse généralisée d'une microstructure. L'influence de cette pente est exclusivement observable dans la partie post-pic de la réponse exprimée sous forme d'un graphe contraintes-déformations.

$$E_{n/t}^{elast} = \frac{c_{n/t}^{max}(1 - D_{n/t})}{D_{n/t}\delta_{n/t}^c} \quad (3.9)$$

$$E_{n/t}^{plast} = -\frac{c_{n/t}^{max}}{\delta_{n/t}^c} \quad (3.10)$$

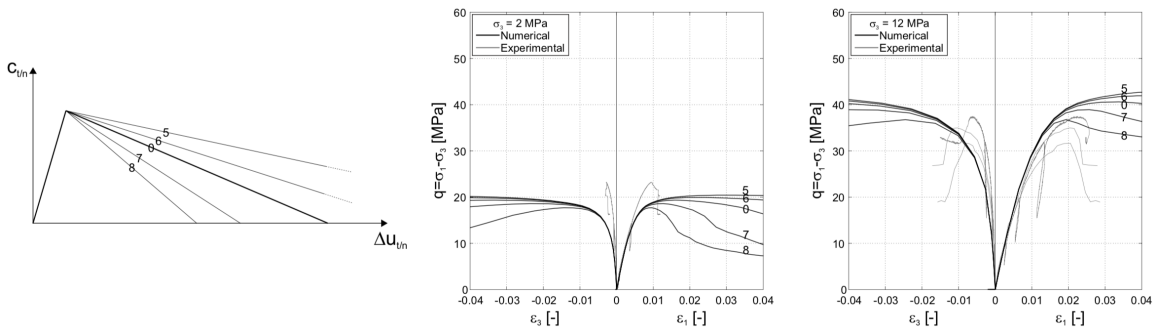


FIGURE 3.5 – Influence de la variation du module plastique $E_{n/t}^{plast}$ des propriétés d'interfaces sur la réponse généralisée d'une microstructure.

Un autre paramètre qui sera utile à la compréhension de la définition des différents paramètres de ces lois d'interfaces est la cohésion maximale réelle de l'interface. En effet, comme on peut l'observer sur la figure [3.7](#), la force de cohésion $c_{n/t}^{max}$ n'est pas rencontrée lors de la déformation de l'interface. C'est

pour cela qu'elle est une force de cohésion maximale théorique. La cohésion maximale réelle $T_{n/t}^{max}$ est définie à l'aide de l'équation 3.11. Sur la figure 3.6 nous observons l'influence du paramètre $c_{n/t}^{max}$ sur la réponse généralisée d'une microstructure. L'influence de cette pente est exclusivement observable dans la partie post-pic de la réponse exprimée sous forme d'un graphe contraintes-déformations.

$$T_{n/t}^{max} = c_{n/t}^{max} (1 - D_{n/t}) \quad (3.11)$$

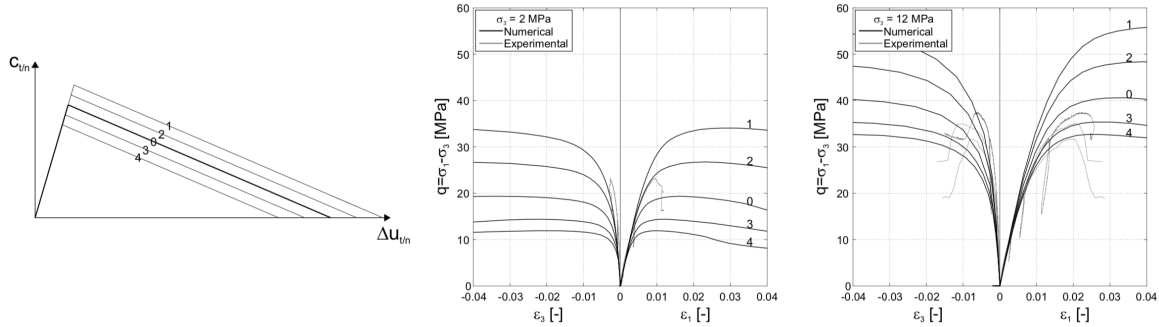


FIGURE 3.6 – Influence de la variation de la cohésion maximale théorique de l'interface $c_{n/t}^{max}$ sans en changer les modules $E_{n/t}^{elast}$ et $E_{n/t}^{plast}$ des propriétés d'interfaces sur la réponse généralisée d'une microstructure.

3.6 Résultats

Les résultats fournis par ce modèle numérique sont analysables à l'aide de plusieurs illustrations et indicateurs. La représentation visuelle des résultats la plus exploitée dans ce travail est un graphe contrainte-déformation. C'est ce graphe qui représente la réponse généralisée de la microstructure face à un chargement. Un tel graphe est visualisable en figure 3.5. Le déplacement des éléments d'une microstructure est visualisable à l'aide de la déformée de la microstructure pour une déformation généralisée définie. Cette représentation permet d'observer la création, la propagation de microfissures et la déformation des inclusions minérales. C'est un complément à l'information fournie par le graphe contrainte-déformation. La figure 3.7 illustre la représentation d'un des cas analysés en section 4.

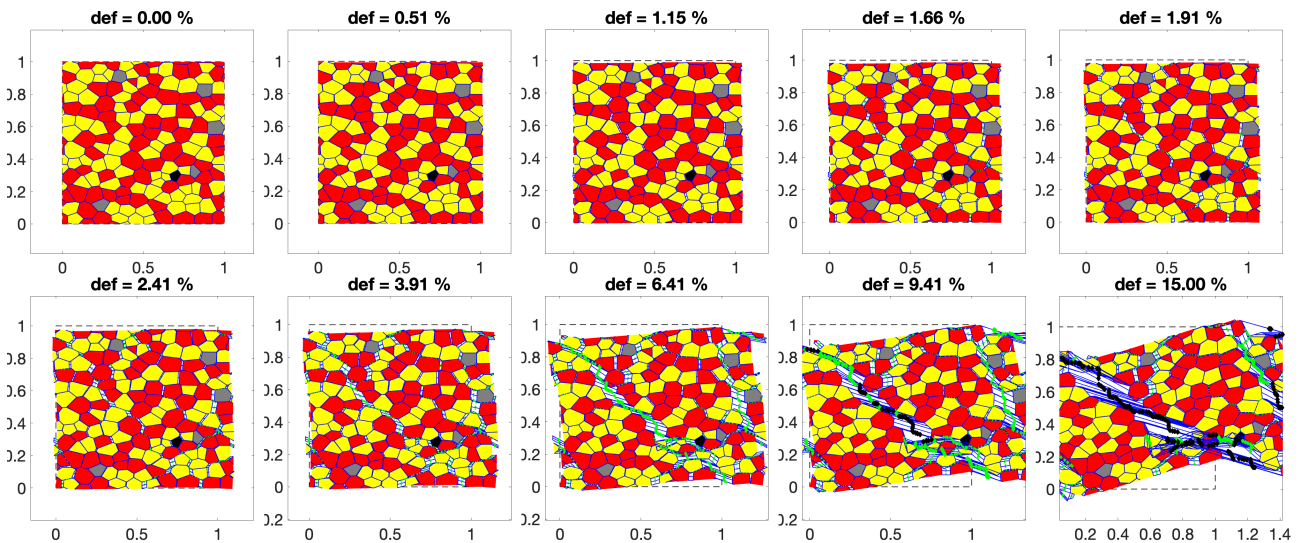


FIGURE 3.7 – Déformées d'une microstructure à différents points d'observation.

D'autres indicateurs sont exploitables. Au sein d'une déformée d'une microstructure on observe pour certains cas la présence de losanges sur certaines interfaces. D'une part leur couleur indique l'état d'endommagement de l'interface dans la direction la plus endommagée. Un losange vert signifie que le comportement de l'interface est dans la phase d'adoucissement et un losange noir indique qu'il est complètement endommagé. D'autre part, la taille du losange indique l'avancement de son état d'adoucissement.

Ces indicateurs propres à chaque interface sont repris dans d'autres indicateurs qui sont à l'échelle d'une microstructure : $intSOFT_t$, $intSOFT_n$, $intDAM_t$ et $intDAM_n$. Ces indicateurs donnent la proportion des interfaces qui sont en phase d'adoucissement $intSOFT_{t/n}$ ou totalement endommagées $intDAM_{t/n}$. La figure 3.8 est une représentation de l'évolution de ces indicateurs avec la déformation généralisée.

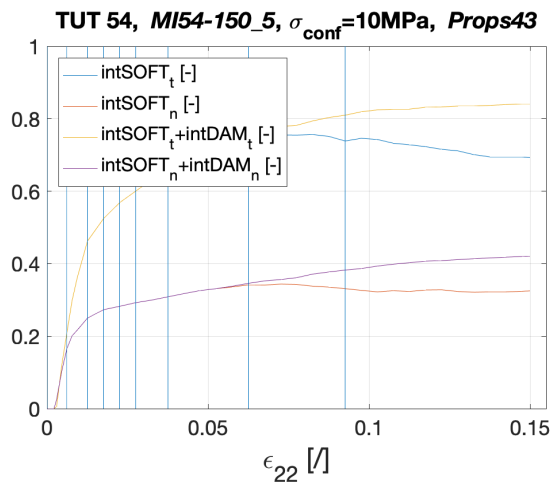


FIGURE 3.8 – Évolution des indicateurs d'endommagement des interfaces $intSOFT_t$, $intSOFT_n$, $intDAM_t$ et $intDAM_n$ en fonction des déformations.

Ces différentes représentations sont à utiliser en parallèle pour permettre une compréhension plus complète du résultat du calcul numérique.

4 Comportement mécanique à petite échelle

L'objectif de ce travail est d'exploiter l'outil numérique à disposition (développé dans la section 3) pour analyser l'effet de l'altération des roches sur leur réponse mécanique à partir d'informations expérimentales issues de Detienne M. (2016).

En amont de toute analyse numérique, il faut s'assurer que le modèle numérique soit adapté au contexte volcanique et à aux roches étudiées. Il est en effet nécessaire de reproduire le comportement à petite échelle des roches volcaniques saines et altérées. Pour cela il faut, d'une part, interpréter les données issues du travail de Detienne M. (2016) pour permettre de les utiliser au sein du modèle numérique. Et, d'autre part, calibrer le modèle est nécessaire avant toute analyse. Cette section reprend l'évolution des analyses réalisées, leurs résultats et les discussions de ces résultats.

4.1 Choix des phases

Le modèle numérique permet de représenter jusqu'à quatre phases minérales dans les microstructures numériques. La définition de la répartition des phases est motivée par certains principes. Il faut que cette répartition mette en évidence les variations de phases liées à de l'altération. Mais, étant donné que les propriétés mécaniques exploitées par le modèle sont définies pour chacune des phases, il faut que les minéraux regroupés dans une même phase aient des propriétés mécaniques similaires.

Primary minerals		Phase 2
Silica	Quartz	Phase 1
	Cristobalite	
	Amorphous Si	Phase 3
Clay Min	Montmorillolite	Phase 4
	Halloysite	
	Kaolinite	
	Dickite	
Sulfates, sulfides, Sulfur		
Other Min		

Tableau 4.1 – Différentes phases et les compositions minérales qu'elles reprennent.

Le choix utilisé pour les simulations est représenté dans le tableau 4.1. Les minéraux primaires ont été regroupés pour permettre un reflet du degré d'altération. Au sein des silicates, la silice amorphe a été séparée du quartz et de la cristobalite, car ils n'ont pas une même structure moléculaire. La silice amorphe n'a pas un comportement mécanique similaire aux silices sous forme cristalline de par leur arrangement moléculaire. Une autre hypothèse simplificatrice appliquée ici est que la phase de quartz et de cristobalite est considérée comme une phase homogène ayant les propriétés mécaniques des quartz. Enfin, la dernière phase reprend les minéraux argileux, les groupes des sulfates, sulfures et soufres en plus des autres minéraux présents en faible quantité.

	Phase	E [GPa]	ν [-]	μ [MPa]	λ [MPa]
1	Quartz	95.00	0.074	44227.2	7682.7
2	Minéraux primaires	90.00	0.26	35714.3	38690.5
3	Silice amorphe	72.84	0.167	31200.0	15700.0
4	Minéraux argileux	43.20	0.26	17142.9	18571.4

Tableau 4.2 – Différentes phases et leurs propriétés mécaniques (μ et λ).

Ce choix est basé sur des hypothèses simplificatrices qui ne sont pas le reflet de la réalité, mais nous verrons que les proportions des phases (et donc leurs propriétés mécaniques) n'influencent que très

peu la réponse mécanique des microstructures. Rappelons tout de même que la porosité n'est pas prise en compte dans la microstructure lorsqu'on utilise ces quatre phases alors que celle-ci est, pour certains échantillons, très loin d'être négligeable. Une analyse de l'impact de la porosité est réalisée dans la section [4.5] Celle-ci remplacera les propriétés mécaniques d'une partie des grains pour simuler une proportion de pores au sein d'une microstructure.

4.2 Calibration du modèle numérique

Avant de pouvoir interpréter les résultats du modèle numérique, il faut définir certains paramètres qui sont encore inconnus dans le contexte des roches volcaniques du Tutupaca. Alors que les propriétés mécaniques des phases minérales sont connues (Pardoen et al., 2019; Bass, 1995; Pabst et al., 2015; Pabst et Gregorová, 2013), les paramètres des lois de comportement des interfaces des grains ne sont, eux, pas connus. Il y a six paramètres à calibrer, trois définissant la loi de comportement des interfaces dans la direction normale (c_n^{max} , δ_n^c , D_n^0) et trois pour la direction tangentielle (c_t^{max} , δ_t^c , D_t^0). Dans le cadre de ce travail, nous allons considérer des paramètres identiques dans les deux directions (c.-à-d. $c_n^{max} = c_t^{max}$, $\delta_n^c = \delta_t^c$ et $D_n^0 = D_t^0$).

Ce qui nous laisse trois paramètres à calibrer. Cette calibration consiste à faire concorder la courbe de la contrainte déviatorique $q = \sigma_1 - \sigma_3$ en fonction de la déformation du même axe ε_1 donnée par le calcul à éléments finis et celle de l'essai triaxial. Une concordance parfaite entre les courbes n'est pas aisée et l'objectif est principalement de reproduire la résistance au cisaillement de la roche, représentée par le déviateur maximal de contrainte q_{max} . Ceci est réalisé par la correspondance des pics de contraintes des courbes numériques et expérimentales, c'est-à-dire des points de plus grande contrainte (tant leur abscisse que leur ordonnée). En conséquence, la calibration du facteur $\delta_n^c = \delta_t^c$ est moins importante, car celui-ci n'a que très peu d'influence sur le comportement avant le pic. Ce facteur caractérise le comportement post-pic (c.-à-d. le comportement plastique des interfaces). Ce paramètre sera néanmoins pris en compte dans le processus de calibration, deux bornes extérieures seront définies. Ces bornes seront utiles lors de l'exploitation de ces paramètres lors d'un calcul multi échelle.

La première calibration des paramètres des lois de contact se fait à partir de la microstructure représentée sur la figure [4.3] C'est une microstructure de 150 grains ayant des proportions de phases correspondantes aux proportions de l'échantillon non altéré TUT RI. Les trois courbes des essais triaxiaux nous donnent des réponses différentes. Ceci nous mène donc à trois jeux de paramètres différents pour chacun des confinements ($\sigma_3 = 5, 10, 20 MPa$). Ceux-ci sont observables dans le tableau [4.3] et les courbes contraintes-déformation pour chacun des confinements se trouvent dans la figure [4.2]. Sans être trop éloignés, les jeux de paramètres varient avec le confinement σ_3 .

Cette calibration doit mener à un jeu unique de paramètres, le jeu de paramètres médian *Props27* est donc considéré comme paramètres de calibrage pour cette microstructure. Ce jeu va de pair avec le jeu de paramètres *Props37* qui présente un comportement post-pic qui s'affaiblit moins. Il est maintenant possible d'analyser une microstructure représentant un échantillon altéré à l'aide de ces

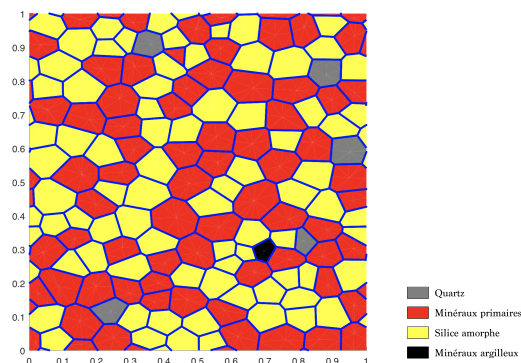


FIGURE 4.1 – *MIRI-150_1* : microstructure de 150 grains représentant l'échantillon non altéré TUT RI.

	Confinement [MPa]	$c_{n/t}^{max}$ [MPa]	$c_{n/t}$ [-]	$D_{n/t}^0$ [-]
<i>Props22</i>	20	7	0.2	0.02
<i>Props27</i>	10	7.8	0.2	0.02
<i>Props31</i>	5	8.5	0.2	0.01

Tableau 4.3 – Valeurs de paramètres des lois de contact après calibration selon la microstructure.

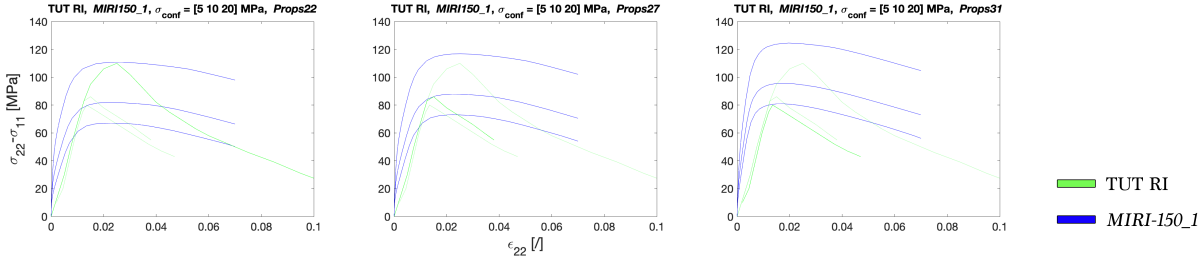


FIGURE 4.2 – Bleu : courbe contraintes-déformations issues des simulations sur la microstructure *MIRI-150_1* pour chaque confinement et les propriétés de lois de contact 22, 27 et 31. Vert : courbes résultantes des essais en laboratoire sur l'échantillon TUT RI.

mêmes paramètres d'interfaces pour observer les effets de la modification des proportions de phases induites par l'altération.

4.3 Influence de l'altération

Maintenant que le modèle est calibré, analysons la réponse de microstructures reflétant le comportement d'échantillons altérés.

4.3.1 Analyse de l'échantillon altéré TUT 7

Le choix de baser cette première analyse sur les données de l'échantillon TUT 7 a été motivé par les résultats de celui-ci à l'essai triaxial. La courbe de contrainte-déformation de cet échantillon est la plus basse de toutes celles qui ont été réalisées. En choisissant cet échantillon, les chances d'observer une variation de la réponse du modèle sont normalement maximisées.

Les résultats issus des simulations d'une microstructure représentant l'échantillon TUT 7 (*MI7-150_1*) sont fort similaires à ceux issus des simulations réalisées sur les microstructures représentant l'échantillon non altéré TUT RI (*MIRI-150_1*). La première conclusion à tirer de cette première comparaison est que les modifications de proportions de phases n'influencent que de manière négligeable la courbe contraintes-déformations. Cette variation négligeable est illustrée sur la figure 4.4 à l'aide des graphes des deux microstructures avec les mêmes paramètres de loi de comportement d'interface *Props27* sous un confinement de 20 MPa.

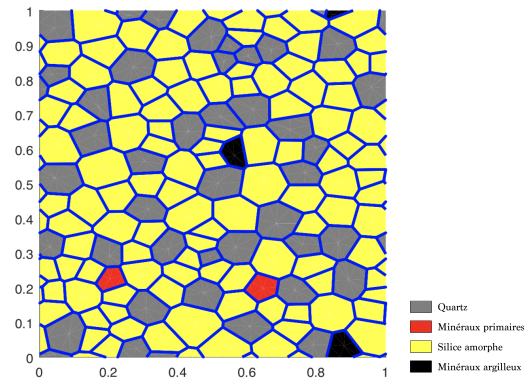


FIGURE 4.3 – *MI7-150_1* : microstructure de 150 grains représentant l'échantillon altéré TUT 7.

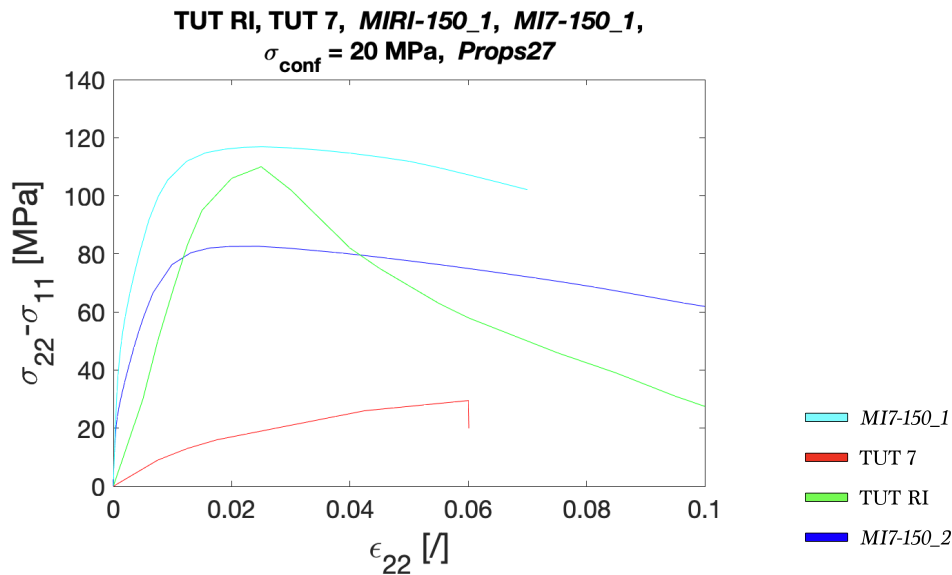


FIGURE 4.4 – En cyan et en bleu, les courbes contraintes-déformations données respectivement par les microstructures *MIRI-150_1* et *MI7-150_1* sous un confinement de 20 MPa avec les paramètres *Props27*. En rouge et en vert, les courbes correspondant aux essais triaxiaux réalisés en laboratoire respectivement sur l'échantillon TUT 7 et TUT RI.

L'hypothèse émise ci-dessus est confirmée par la figure 4.5 compare le résultat de deux microstructures identiques sous un même confinement avec pour seule différence la valeur des propriétés mécaniques des grains. Dans la microstructure *MI7-150_2*, chaque module élastique a été réduit à une valeur de 10 MPa.

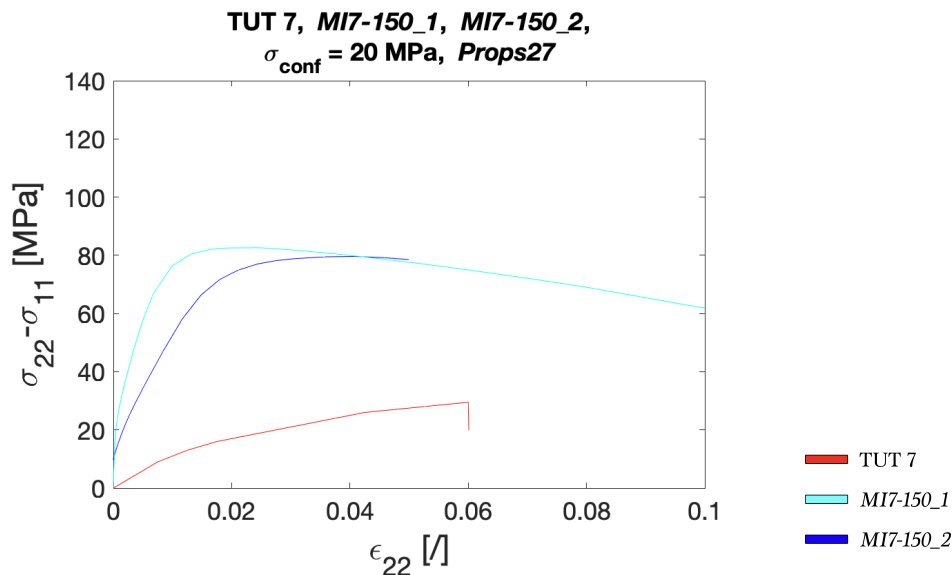


FIGURE 4.5 – En cyan et en bleu, les courbes contraintes-déformations données respectivement par les microstructures *MI7-150_1* et *MI7-150_2* sous un confinement de 20 MPa avec les paramètres *Props27*. En rouge, la courbe correspondant à l'essai triaxial réalisé en laboratoire sur l'échantillon TUT 7.

La variation induite par la modification des modules élastiques de grains est minimale. Pour essayer d'avoir une courbe similaire à la courbe expérimentale (représentée en rouge sur la figure 4.4), une recalibration des propriétés des lois d'interfaces pourrait aider. L'idée est alors de créer une corrélation entre altération et variation de propriétés d'interfaces. Malheureusement cette idée ne mène

à rien sur cette microstructure. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la porosité n'est pas prise en compte au sein du modèle numérique. Pour poursuivre les recherches, nous allons d'une part essayer de réaliser des analyses similaires à partir d'une microstructure ayant une porosité plus faible. Ceci est développé dans la section [4.3.2](#) à partir de l'échantillon TUT 54. D'autre part, nous allons simuler la présence de porosité au sein d'une microstructure en remplaçant une des phases par une phase ayant des propriétés de résistance mécanique très faible. Ceci est développé dans la section [4.5](#).

4.3.2 Comparaison avec l'échantillon altéré TUT 54

Comme expliqué dans la section [4.3.1](#), les analyses réalisées à partir des données de l'échantillon TUT 7 n'ont pas permis de tirer de conclusions satisfaisante quant au sujet de l'effet de l'altération ou de la variation des propriétés des phases minérales sur le comportement mécanique. Une des raisons de ces limitations est probablement la grande porosité mesurée au sein de cet échantillon, 41% (Detienne, 2016). Dans cette section, les analyses se font sur des microstructures basées sur les données de l'échantillon TUT 54. Cette microstructure, *MI54-150_5*, est représentée sur la figure [4.6](#).

Une calibration des propriétés d'interfaces est à nouveau réalisée. À partir de cette étape, le terme calibration n'est plus lié à la calibration du modèle numérique pour l'application de roches volcaniques, mais est propre à une microstructure qui correspond à un échantillon de roche volcanique. Cette calibration n'est plus un moyen pour parvenir à un résultat à l'aide du modèle numérique, mais plutôt le résultat d'une analyse. L'effet de l'altération est reflété au sein de la variation de ces propriétés.

Pour réaliser cette calibration, il a été décidé de conserver les pentes $E_{n/t}^{elast}$ et $E_{n/t}^{plast}$ du graphe représentant la définition des paramètres des lois d'interfaces. Seules l'abscisse et l'ordonnée du pic seront donc modifiées. Pour obtenir une calibration comparable à la calibration appliquée à la microstructure *MIRI-150_1*, un confinement de 10 MPa sera utilisé. Avec cette méthode, nous obtenons les propriétés des lois de contact illustrées sur la figure [4.7](#). La réponse généralisée de la microstructure *MI54-150_5* avec les paramètres de lois de contact calibrés est observable en figure [4.8](#).

4.3.3 Conclusion

Dans cette partie nous avons constaté qu'il n'est pas possible de mettre en évidence l'influence de l'altération sur base de la composition minérale d'une roche. Par contre, il est réaliste de lier l'altération avec une modification du comportement entre les inclusions minérales. La faible quantité d'échantillons analysés dans cette étude ne permettent pas de chiffrer cette réduction de résistance. Cela peut être une piste pour un travail ultérieur à celui-ci.

4.4 Analyses des déformations et des modes de ruptures microscopiques

Dans le but de comprendre le comportement des microstructures au fil de la mise en charge, l'état déformé des microstructures a été généré. Cette analyse est accompagnée des trois supports gra-

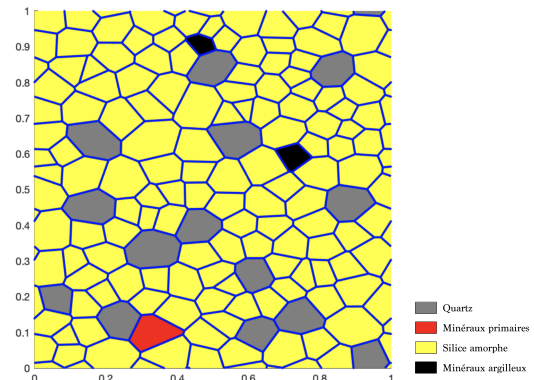


FIGURE 4.6 – *MI54-150_5* : microstructure de 150 grains représentant l'échantillon altéré TUT 54.

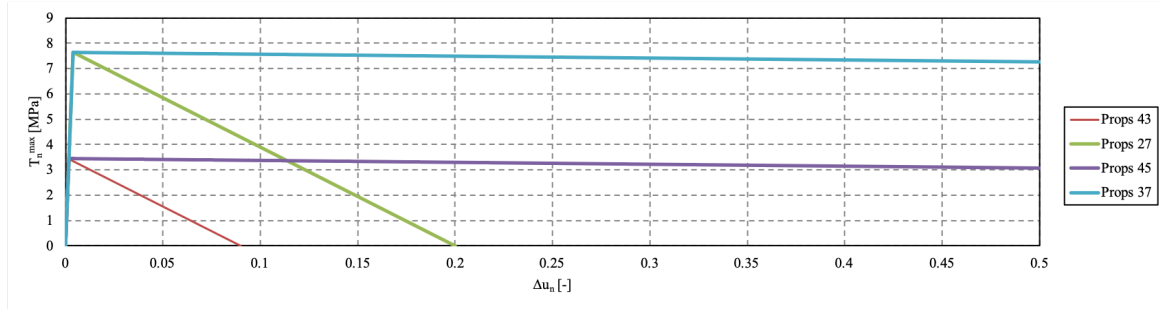


FIGURE 4.7 – Représentation graphique des lois de contacts avec les paramètres *Props27*, *Props37*, *Props43* et *Props45*. Les *Props27* et *Props37* correspondent à la calibration des paramètres de la microstructure *MIRI-150_1*. Les *Props43* et *Props45* correspondent à la calibration des paramètres de la microstructure *MI54-150_5*.

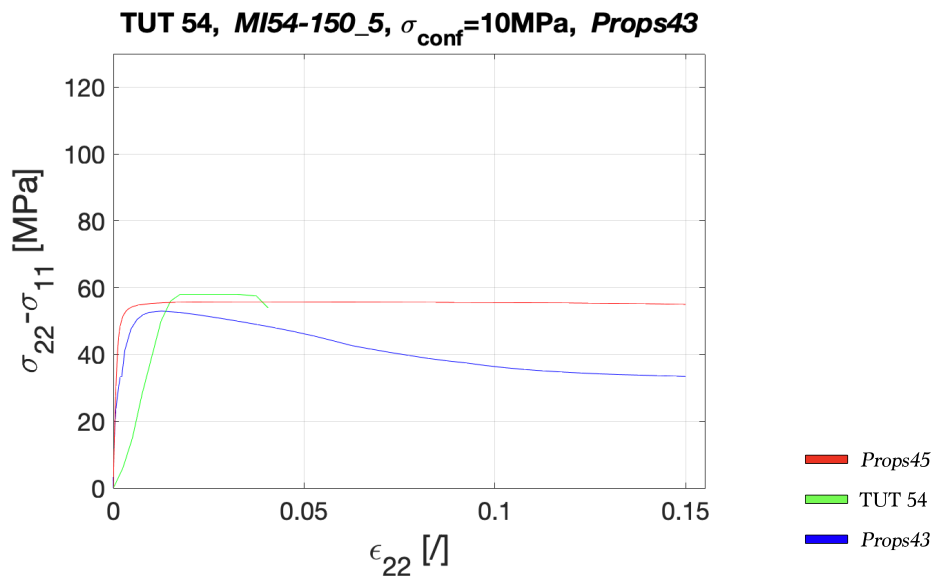


FIGURE 4.8 – En bleu et en rouge, les courbes contraintes-déformations données par la microstructure *MI54-150_5* sous un confinement de 10 MPa avec respectivement les paramètres *Props43* et *Props45*. En vert, la courbe correspondant à l'essai triaxial réalisé en laboratoire sur l'échantillon TUT 54.

phiques suivants :

1. Le graphe précédemment utilisé exprimant la contrainte q en fonction de la déformation axiale. Une courbe représente la réponse généralisée de la microstructure et une seconde représente la réponse macroscopique issue d'essais en laboratoire (Detienne, 2016). Ce graphe est observable en figure 4.9 pour le cas de la microstructure *MIRI150_1* sous un confinement de 10 MPa avec les propriétés d'interfaces *Props27*. À la différence des graphes rencontrés précédemment, celui-ci est accompagné de points d'observations sur la courbe générée par la simulation numérique. Ces points correspondent aux endroits de génération graphique des microstructures déformées.
2. L'évolution des indicateurs d'endommagement des interfaces *intSOFT* et *intDAM* tant dans la direction tangentielle que normale. Ces indicateurs sont décrits dans la section 3.6. Accompagnée du premier graphe, cette représentation permet de créer une corrélation entre un comportement généralisé d'une microstructure et le comportement de contact intergranulaire à l'échelle microscopique. Cette représentation est observable en figure 4.10. À défaut d'avoir des points d'observations, des droites verticales au lieu des déformations correspondantes aux points d'observations sont présentes sur cette représentation graphique.

- La génération de la microstructure et sa déformation aux endroits des points d'observations. En plus de fournir un apport très visuel à la déformée de la microstructure, de la présence de microfissurations et de leurs propagations, on retrouve des informations au sujet de l'état d'endommagement des interfaces. Ces indicateurs sont à nouveau décrits dans la section [3.6](#)

4.4.1 Pour un échantillon non altéré

Cette section se concentre sur le comportement microscopique de la microstructure *MIRI150_1* sous un confinement de 10 MPa avec les propriétés d'interfaces *Props27*. Le graphe de la figure [4.9](#) peut être divisé en trois parties. La première partie est la partie avant le pic de résistance, elle représente le comportement élastique de la microstructure. La seconde partie représente la partie de déformation élastique menant à la résistance résiduelle, celle-ci part du pic de résistance et s'interrompt au niveau du point d'inflexion de la courbe (légèrement avant 10% dans ce cas-ci). La dernière partie de la courbe est l'asymptote horizontale qui tend vers cette résistance résiduelle. Une analyse plus approfondie de ces parties peut être réalisée à l'aide des autres supports graphiques.

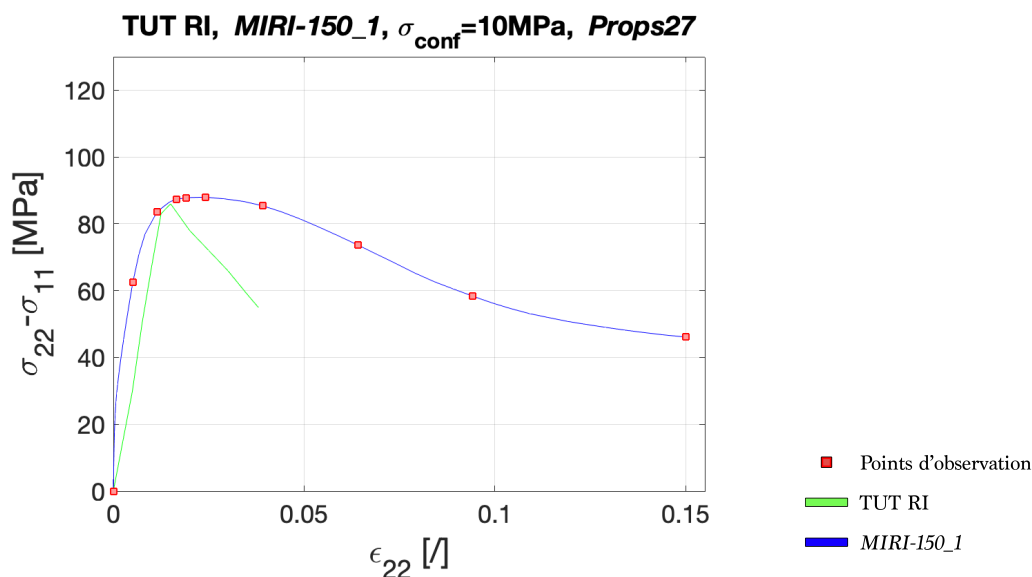


FIGURE 4.9 – Courbe contraintes-déformations de *MIRI-150_1* sous un confinement de 10 MPa avec les paramètres *Props27*. Les losanges rouges représentent des points d'observations qui correspondent aux déformées reproduites en figure [4.11](#).

Avant le pic de résistance on voit sur la figure [4.10](#) que la proportion d'interfaces intergranulaires en phase d'adoucissement croît de manière linéaire à partir de 0.5%. Cette partie est assimilée à la création d'une microfissuration au sein d'un nombre croissant d'interfaces. Ceci peut être justifié par l'observation sur la figure [4.11](#) d'un léger décalage entre les inclusions minérales à l'endroit de ce qui sera la microfissuration. Par contre, ce qui se passe sous une déformation inférieure à 0.5% est flou. Nous savons que les interfaces peuvent se déformer tout en restant dans la partie élastique de leur comportement. Pour une analyse plus poussée de ce contexte de faible déformation, il peut être intéressant d'ajouter au modèle numérique un indicateur qui décrit le comportement ou l'état de déformation des inclusions minérales. Les déformations préliminaires peuvent être soit reprises par des petites déformations des inclusions minérales, soit des déformations des interfaces intergranulaires dans un domaine élastiques soit une combinaison des deux.

Analysons maintenant le comportement microscopique au moment du pic de résistance. La croissance du nombre d'interfaces en adoucissement continue, mais à un moindre rythme. La microfissuration principale s'est frayé un chemin complet et n'évolue plus dans l'espace. La croissance du

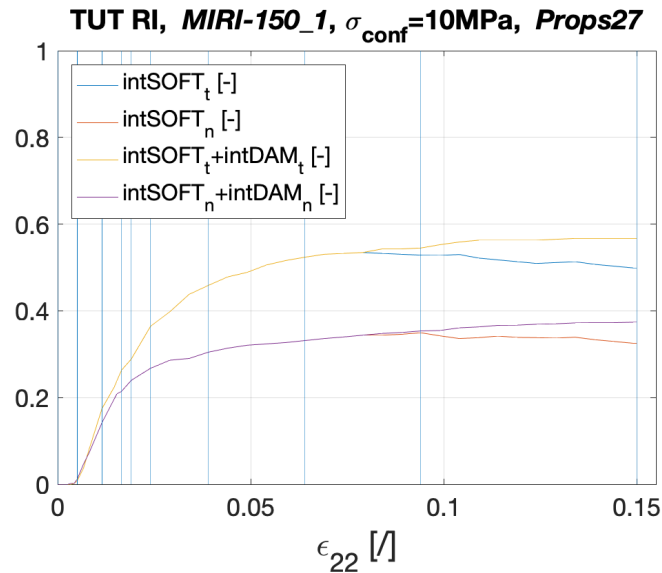


FIGURE 4.10 – Évolution des indicateurs d’endommagement des interfaces $intSOFT_t$, $intSOFT_n$, $intDAM_t$ et $intDAM_n$ de $MIRI-150_1$ en fonction des déformations.

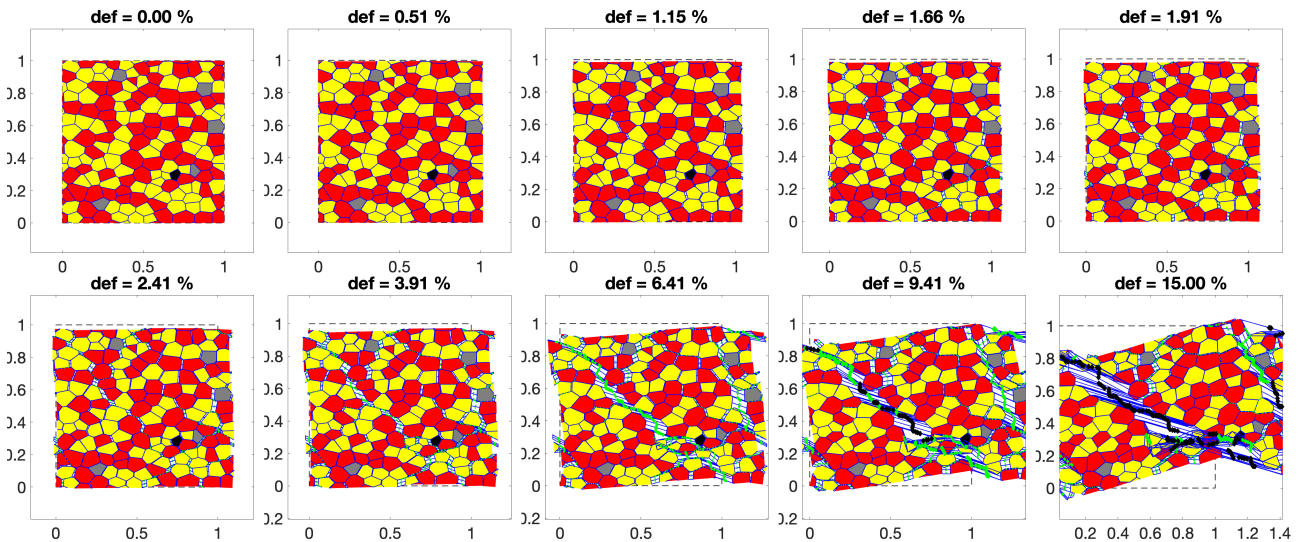


FIGURE 4.11 – Déformées de la microstructure aux différents points d’observation.

nombre d’interfaces qui entrent dans un état d’adoucissement est expliquée par l’apparition de microfissures secondaires. Ceci explique la présence d’une transition relativement lisse entre la phase de pré pic et de post-pic.

Après le pic, alors que la microfissure s’est créé un chemin au travers de la microstructure, elle ne peut que se développer. Son développement, qui peut être assimilé à un élargissement, est décrit par l’augmentation de l’état d’avancement de l’adoucissement des interfaces constituant cette microfissuration. Cet état d’avancement est observable sur les microstructures déformées de la figure 4.11 à l’aide de la taille des losanges. En guise de rappel, ceux-ci nous donnent deux informations au sujet de l’interface qu’ils décrivent. D’une part leur couleur indique l’état d’endommagement de l’interface dans sa direction la plus endommagée. Un losange vert signifie que le comportement de l’interface est dans la phase d’adoucissement et un losange noir indique qu’il est complètement endommagé. D’autre part, la taille du losange indique l’avancement de son état d’adoucissement.

Aux abords du point d’inflexion de la partie décroissante du graphe de la figure 4.9, on observe l’apparition des premières interfaces totalement endommagées sur la figure 4.10 tant en direction

normale que tangentielle. À l'aide des figures 3.3 et 3.4 de la section 3.5, on constate que les interfaces totalement endommagées se déforment sans l'application d'effort supplémentaire, dans la direction totalement endommagée. Avant d'être totalement endommagées, les interfaces ont une résistance qui diminue. La diminution de résistance est reflétée par la tendance asymptotique de la courbe de contrainte déformation de la figure 4.9.

En observant la figure 4.10 on constate que moins de la moitié des interfaces sont en adoucissement dans la direction normale et moins de 60% pour la direction tangentielle pour une déformation axiale généralisée de 15%. Ceci signifie que seule une petite portion des interfaces se déforme et non toute la microstructure. Cette constatation est confirmée en figure 4.11, hors de la microfissuration peu d'interfaces sont en adoucissement. De plus, nous constatons qu'il y a significativement plus d'interfaces endommagées dans la direction tangentielle que dans la direction normale. Cela n'est pas surprenant sachant que la microstructure est soumise à une mise en charge sous confinement. En effet ce type de conditions mènent à des contraintes de cisaillements au sein de l'échantillon testé comme illustré sur la figure 2.11 de la section 2.1.

4.4.2 Pour un échantillon altéré

Les résultats de cette analyse sur la microstructure *MI54150_5* avec les paramètres des lois d'interfaces *Props43* et un confinement de 10 MPa ont une allure similaire aux résultats de l'analyse de la section 4.4.1 tout en ayant certaines différences. Inévitablement, la résistance au pic de la réponse généralisée de la microstructure est plus élevée que pour la microstructure *MIRI150_1*. Ceci est lié à la définition des paramètres des lois de contacts intergranulaires explicitée en section 4.2. Celle-ci a pour objectif de calibrer ce pic par rapport au résultat de l'essai en laboratoire. La courbe de la figure 4.12 peut se découper en les mêmes trois parties que la précédente.

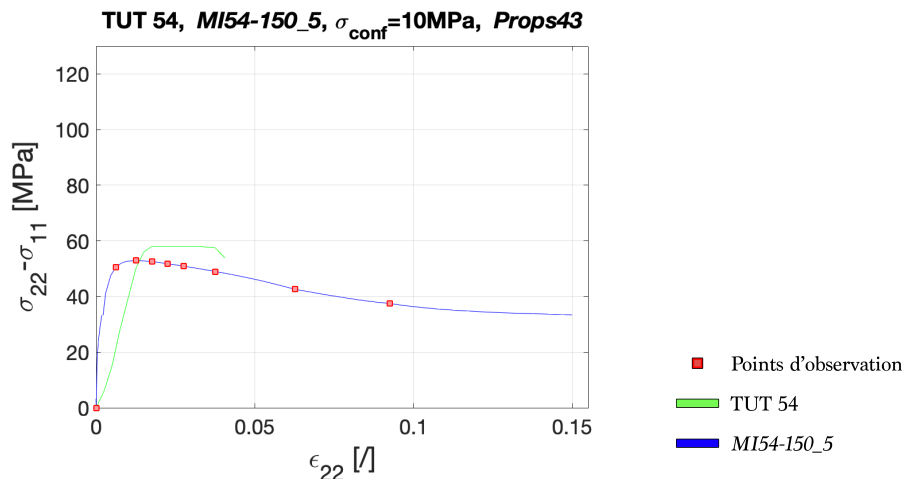


FIGURE 4.12 – Courbe contraintes-déformations de *MI54-150_5* sous un confinement de 10 MPa avec les paramètres *Props43*.

La partie assimilée à une déformation élastique est proche d'être linéaire. On observe sur les microstructures de la figure 4.14 une évolution croissante des déformations des interfaces. Cette évolution est homogène dans l'espace. Assez rapidement, les interfaces entrent en adoucissement, mais il n'y a pas de chemin distinct de microfissures.

À l'approche du pic de résistance, on observe sur la figure 4.13 une diminution de la pente dans chacune des directions. Le pic peut être assimilé à une phase de transition entre la résistance des interfaces qui atteint un maximum à l'approche de l'adoucissement et la diminution de cette résistance lors de l'avancement de l'adoucissement. Lors de cette transition, l'apport de résistance due

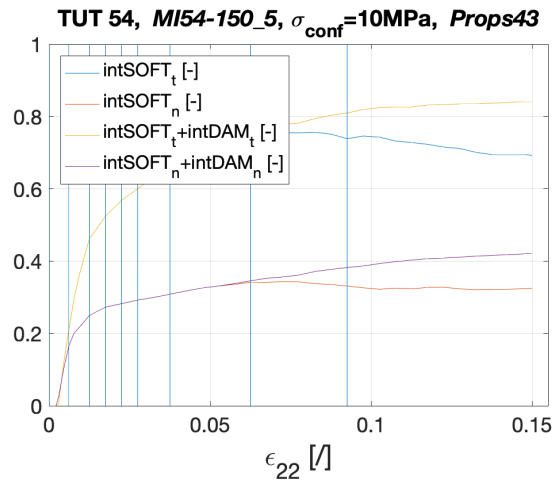


FIGURE 4.13 – Évolution des indicateurs d’endommagement des interfaces $intSOFT_t$, $intSOFT_n$, $intDAM_t$ et $intDAM_n$ de $MI54-150_5$ en fonction des déformations.

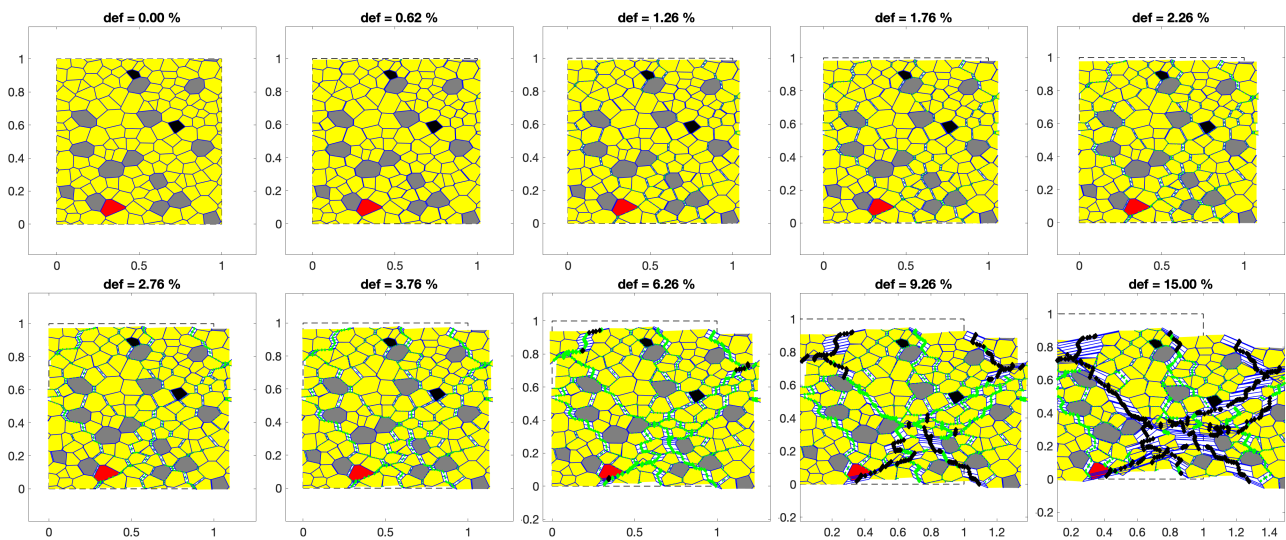


FIGURE 4.14 – Déformées de la microstructure aux différents points d’observation.

à l’augmentation du nombre d’interfaces qui sont au pic de leur résistance (en fin de déformations élastiques ou en début d’adoucissement) est compensé par la diminution de résistance des interfaces liée à l’évolution de l’état d’avancement de l’adoucissement des interfaces. Cette transition est visible dans ce cas-ci au sein de la figure 4.14 sur les microstructures correspondant à une déformation généralisée de 0.62% et 1.26%. Le pic de résistance se trouve aux alentours de 1.26%. Avant le pic, à 0.62% de déformation généralisée, on observe que très peu d’interfaces sont en phase d’adoucissement et leurs états de déformation sont encore faibles comparé à l’état des déformations intergranulaires au moment du pic. Sur la microstructure correspondant à une déformation généralisée de 1.26% on constate que l’état d’adoucissement des interfaces s’est fort développé alors que la croissance du nombre d’interfaces en phase d’adoucissement régresse.

Après le pic de résistance, on observe une fois de plus une pente plus faible dans la représentation graphique des indicateurs $intSOFT$ en figure 4.13. Par contre on observe que la répartition spatiale des interfaces en adoucissement est relativement homogène. Il n’y a pas d’apparition claire de microfissuration avant d’atteindre une déformation généralisée de la microstructure conséquente. A 15% de déformation généralisée, on observe une multitude de microfissurations.

4.4.3 Pour des paramètres d'interfaces à faible adoucissement

Les paramètres de lois d'interfaces utilisés dans les deux cas précédents (*Props27* et *Props43*) sont des paramètres avec une pente $E_{n/t}^{plast}$ élevée. Nous allons ici réaliser les mêmes analyses que précédemment, mais avec un comportement post-pic moins prononcé (c.-à-d. une pente $E_{n/t}^{plast}$ plus faible). La microstructure *MIRI-150_1* est analysée avec des paramètres *Props37* et la microstructure *MI54-150_5* est analysée avec des paramètres *Props45*. La représentation graphique des différents paramètres d'interfaces est visible en figure [4.7](#)

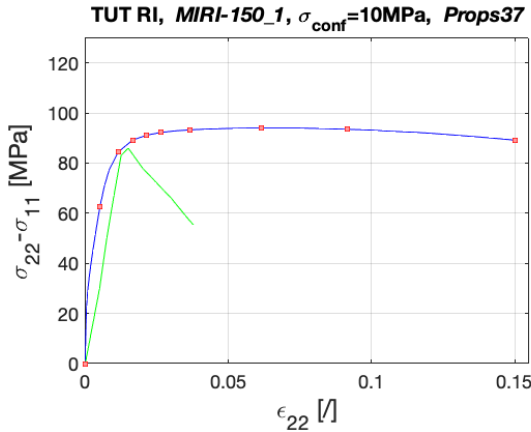


FIGURE 4.15 – Courbe contraintes-déformations de *MIRI-150_1* sous un confinement de 10 MPa avec les paramètres *Props37*.

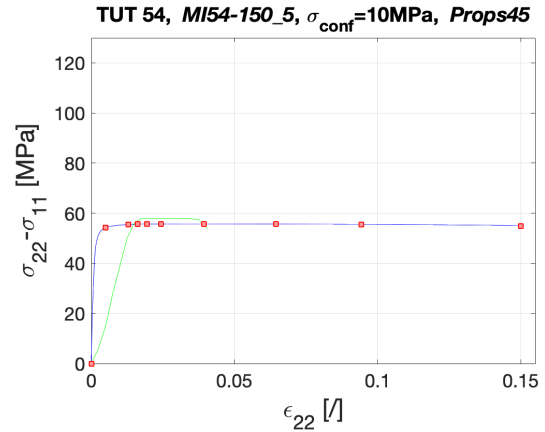


FIGURE 4.16 – Courbe contraintes-déformations de *MI54-150_5* sous un confinement de 10 MPa avec les paramètres *Props45*.

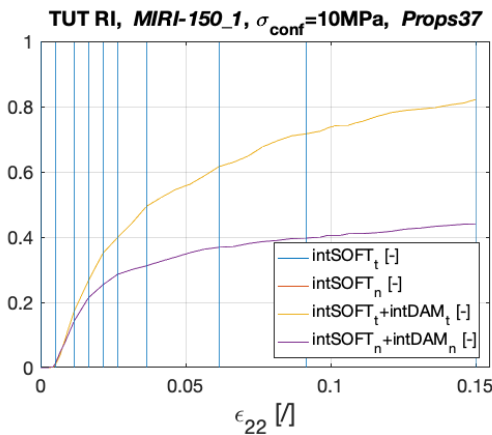


FIGURE 4.17 – Évolution des indicateurs d'endommagement des interfaces de *MIRI-150_1* en fonction des déformations.

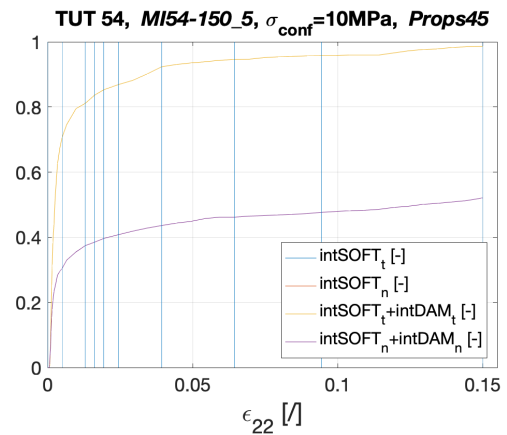


FIGURE 4.18 – Évolution des indicateurs d'endommagement des interfaces de *MI54-150_5* en fonction des déformations.

Comme on pouvait s'y attendre, dans la réponse généralisée nous ne retrouvons plus de comportement d'adoucissement en post-pic. Le graphe contrainte-déformation ne se sépare plus en trois phases distinctes, mais plutôt en deux phases. Ces deux graphes (figure [4.15](#) et [4.16](#)) sont très proches de ceux décrivant un comportement parfaitement élastique plastique en figure [2.10](#)

En restant dans le domaine des choses qui ne surprennent pas, nous observons que la résistance au pic correspond toujours aux résultats des essais de laboratoire. Par contre, on constate que pour la microstructure *MI54-150_5* le pic arrive tôt dans la déformation. Avec les paramètres *Props43* le pic était aux alentours de 1.2% alors qu'ici, avec les paramètres *Props45*, le pic est plus proche de

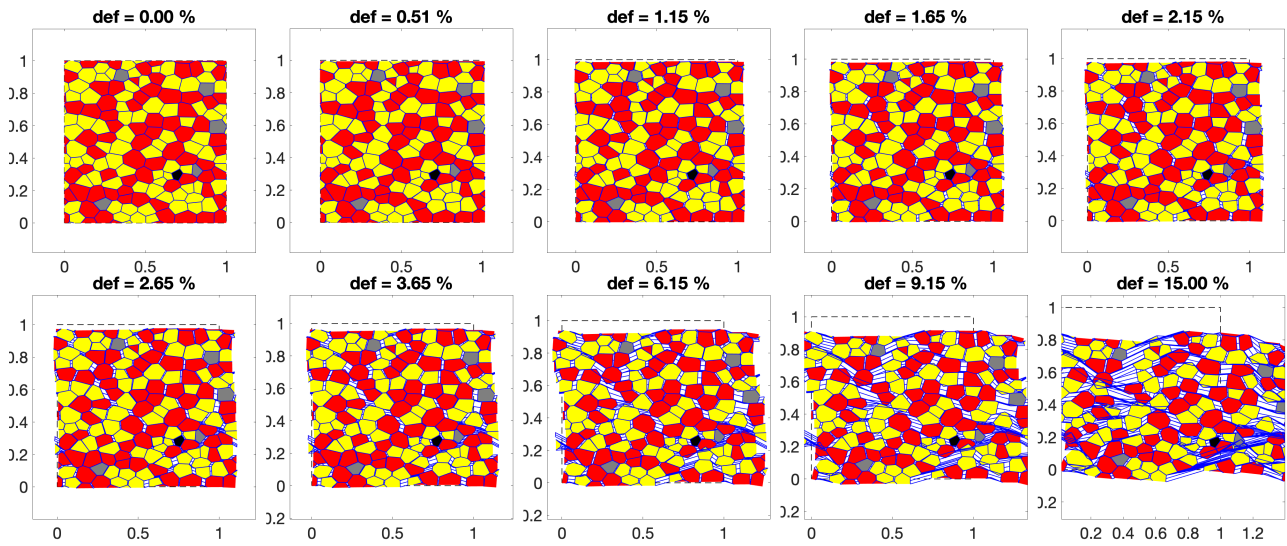


FIGURE 4.19 – Déformées de *MIRI-150_1* aux différents points d'observation.

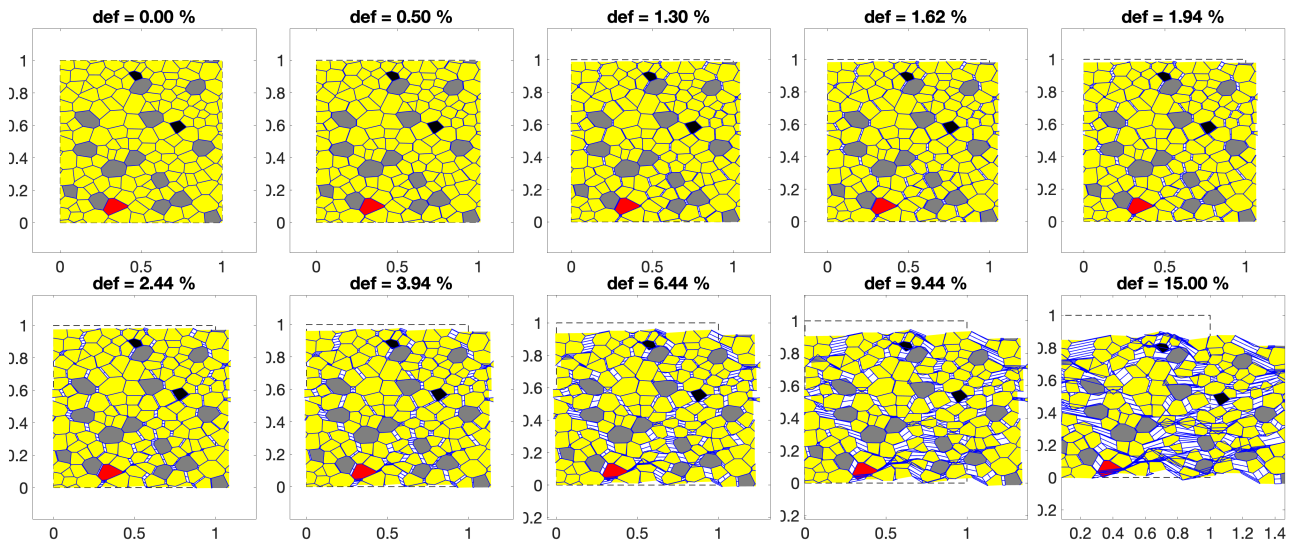


FIGURE 4.20 – Déformées de *MI54-150_5* aux différents points d'observation.

0.5%. Ceci peut être expliqué par le comportement fort homogène de la microstructure avec les paramètres *Props45*. En observant d'une part l'évolution des indicateurs d'adoucissement en figure 4.18 et d'autre part les déformées des microstructures en figure 4.20, on constate que la majorité des interfaces entrent en adoucissement presque instantanément dans la direction tangentielle. Alors qu'avec les paramètres *Props45* et avec la microstructure *MIRI-150_1* nous observons une certaine latence avant l'adoucissement des interfaces.

Ce comportement de déformations rapide et homogène sur la microstructure *MI54-150_5* peut être justifié par deux éléments. Premièrement par la faible valeur du paramètre $c_{n/t}^{max}$ qui est due à la calibration des paramètres sur les résultats du laboratoire. En effet, une interface avec les paramètres *Props45* nécessite une déformation deux fois plus faible qu'une interface avec les paramètres *Props37* pour entrer dans la phase d'adoucissement. Deuxièmement, la valeur extrême de la pente $E_{n/t}^{plast}$ participe à ce phénomène. Cette propriété des paramètres d'interfaces rend l'apparition d'une microfissure totalement endommagée probablement impossible pour des déformations généralisées de l'ordre des 15% analysés. Et sans microfissure totalement endommagée qui peut se déformer sans reprendre d'efforts supplémentaires, il est inévitable d'observer une répartition des déformations au sein d'un grand nombre des interfaces.

On peut maintenant se poser la question de ce qu'il advient pour la microstructure *MIRI-150_1* avec les paramètres *Props37*. Ce cas n'est pas explicable par les deux éléments qui expliquent le comportement de déformations rapide et homogène développés au paragraphe précédent. En effet, ici la valeur du paramètre $c_{n/t}^{max}$ est plus élevée. Ce paramètre retarde donc le début du comportement d'adoucissement des interfaces. Par contre, la pente $E_{n/t}^{plast}$ est la même et va donc avoir un effet similaire. On observe à l'aide des microstructures déformées en figure [4.19](#) que nous avons également un comportement de déformations homogène.

4.5 Effet de la porosité

Suite aux questions posées par l'analyse du comportement d'une microstructure représentant un échantillon avec une porosité élevée, nous avons voulu simuler l'effet de cette porosité au sein d'une microstructure. La section [4.3.1](#) exprime que le modèle numérique utilisé dans le cadre de ce travail ne considère pas de porosité au sein des microstructures et l'analyse de la microstructure *MI7150_1*. Cette analyse met en évidence que les propriétés mécaniques des inclusions minérales n'ont qu'une faible influence sur la réponse généralisée d'une microstructure. C'est suite à ce constat qu'est venu l'idée d'analyser plus en profondeur l'effet de la porosité sur un échantillon via son intégration au sein du modèle numérique.

4.5.1 Intégration de la porosité au sein du modèle numérique

Jusqu'à présent, l'utilisation du modèle numérique ne prend pas en compte la porosité lors de la génération des microstructures. Il faut donc avant toute simulation trouver un moyen d'intégrer une certaine proportion de porosité au sein des microstructures. La méthode qui sera retenue pour les analyses de ce travail consiste à remplacer des inclusions minérales par des inclusions ayant des propriétés mécaniques se rapprochant des propriétés mécaniques de pores.

Pour des raisons de temps de calcul, ces essais ont été réalisés sur une microstructure de 50 inclusions minérales. La microstructure utilisée (*MIRI50_1*) a des proportions de phases similaires à l'échantillon TUT RI et est utilisée avec des paramètres de lois d'interfaces *Props27*. Dans le but de définir les propriétés qui vont être utilisées pour simuler un pore, plusieurs variantes de cette microstructure ont été générées en modifiant la valeur de μ et λ de la phase de quartz (phase 1, 3%). Ces valeurs ont été définies à l'aide d'un grand nombre de valeurs de module et d'un coefficient de poisson $\nu = 0.25$ à l'aide des équations [4.1](#) et [4.2](#)

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4.1)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.2)$$

Ces valeurs de modules diffèrent chacun d'un facteur 10 dans le but d'observer dans un premier temps l'influence d'une modification radicale des modules d'une inclusion. De plus, ces essais permettent d'observer certaines limites de la méthode de calcul. En effet, il est indispensable de réaliser nos analyses à l'aide de propriétés mécaniques qui permettent à l'outil numérique de nous fournir suffisamment d'informations. A partir d'une certaine déformation axiale le calcul numérique rencontre certaines difficultés à converger vers une solution. C'est la raison de la présence de la 4^{me} colonne du tableau [4.4](#). Le point d'intérêt qu'est le pic de résistance est rarement au-delà de 2% de déformations.

Variante	E_{pore} [MPa]	$\mu = \lambda$ [MPa]	ε en fin de calcul numérique
E1	10	4	9 %
E2	1	0.4	7 %
E3	0.1	0.04	6.5 %
E4	0.01	0.004	6.5 %
E5	0.001	0.0004	6.5 %

Tableau 4.4 – Valeurs de μ et λ en fonction des différents modules et la une borne inférieure caractérisant la déformation axiale en fin de calcul numérique.

Étant donné que la variante avec la plus faible rigidité ($E = 0.001 \text{ MPa}$) calcule jusqu'à une déformation suffisamment plus élevée que la déformation au pic, ces propriétés vont être conservées pour la suite des analyses.

4.5.2 Effet de la porosité

Il faut maintenant tenter d'observer une variation de la réponse généralisée en fonction de la porosité au sein d'une microstructure. Des essais ont été réalisés dans un premier temps sur des microstructures de 150 grains, mais ceux-ci s'arrêtent relativement tôt dans le processus de calcul. Comme on peut l'observer dans l'exemple de la figure 4.21, le calcul s'arrête avant le pic de résistance. Ceci ne nous permet pas de comparer la variation de la résistance en fonction de la porosité d'une microstructure. Pour cette raison, nous continuons nos analyses sur des microstructures de 50 grains.

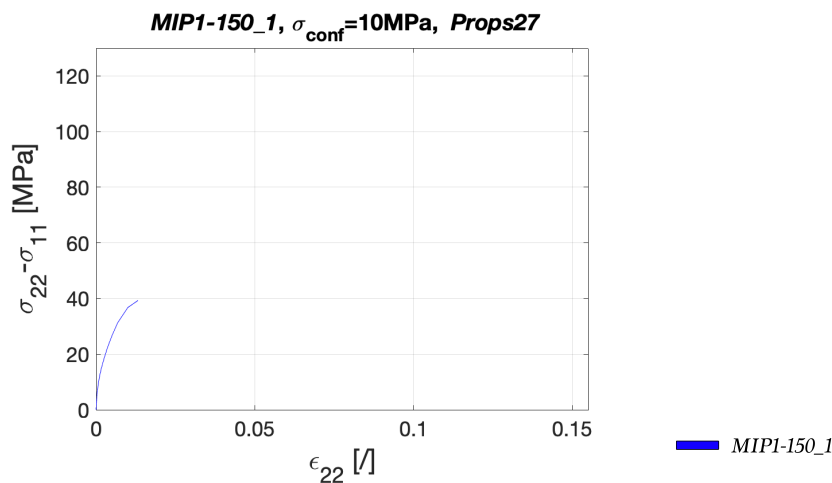


FIGURE 4.21 – Courbe contraintes-déformations de la réponse généralisée d'une microstructure de 150 grains ayant une porosité de 5%. Le calcul s'interrompt aux alentours de 1% pour des raisons numériques.

Avec l'aide de M. Pardoën, une batterie de microstructures basées sur les proportions de l'échantillon TUT RI ont été générées avec une porosité variable. Ces microstructures et leur porosité sont observables en figure 4.22. Les inclusions qui ont des propriétés mécaniques de pores sont en blanc. La réponse généralisée de ces microstructures à un essai triaxial de confinement de 20 MPa est observable en figure 4.23.

L'impact de cette variation de la porosité est très clair sur la figure 4.23, les variables impactées sont d'une part les réponses mécaniques des microstructures et d'autre part la déformation généralisée en fin de calcul. Dans les cas d'inclusions de porosité, nous observons très clairement sur

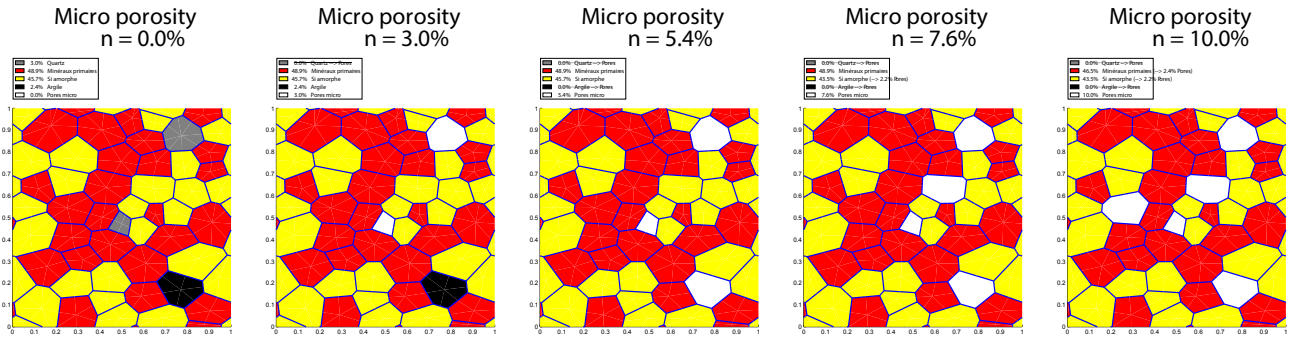


FIGURE 4.22 – %
deporosit]Microstructuresde50grainsavecdiffrentesporosits.n = [0.0, 3.0, 5.4, 7.6, 10.0] %.

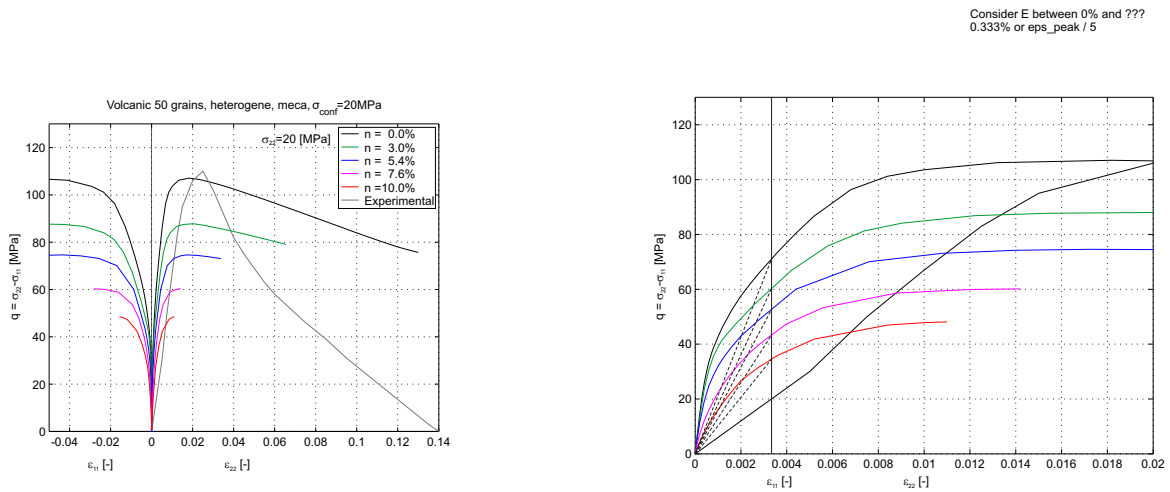


FIGURE 4.23 – Réponse généralisée des microstructures représentées en figure 4.22. Le graphe de droite est une vue rapprochée du comportement des microstructures avant 2% de déformation généralisée.

les microstructures déformées en fin de calcul ce qui peut être la source de mauvaise convergence numérique. En effet, comme on l’observe dans l’exemple de la figure 4.24, une des inclusions adopte une forme convexe. En l’occurrence, l’inclusion jaune dans cette figure est une inclusion simulant un pore. Cette caractéristique est rencontrée pour la majorité des essais réalisés avec une simulation de la porosité, tant avec des microstructures de 50 que de 150 grains. La raison exacte pour laquelle cette caractéristique pose problème à la convergence du calcul numérique est hors de ma portée. Ceci explique néanmoins la raison pour laquelle le calcul s’arrête de plus en plus tôt dans la déformation généralisée lorsque la porosité d’une microstructure est augmentée. En effet, plus le nombre d’inclusion ayant les caractéristiques d’un pore augmente, plus la chance d’avoir une inclusion qui prend une forme convexe augmente pour une même déformation généralisée.

L’impact de la porosité sur les réponses généralisées des microstructures s’observe tant sur la résistance au pic que sur le module initial. Nous pouvons chercher à chiffrer ces influences. Sur la représentation graphique de l’évolution du pic de résistance q_{max} en fonction de la porosité n , on observe que la tendance est très proche d’être linéaire. Cette corrélation entre la résistance et la porosité est définie par la formule 4.3, qui est associée à un $R^2=0.99$. L’analyse de l’impact de la porosité sur le module élastique généralisé E révèle que celui-ci suit également une tendance linéaire comme nous montre la figure 4.26. Ces modules sont calculés entre $\epsilon_{22} = 0\%$ et $\epsilon_{22} = 0,33\%$ et sont visualisables sur la figure 4.23 dans le graphe de droite.

$$q_{max} = -576.76 * n + 105.94 \quad (4.3)$$

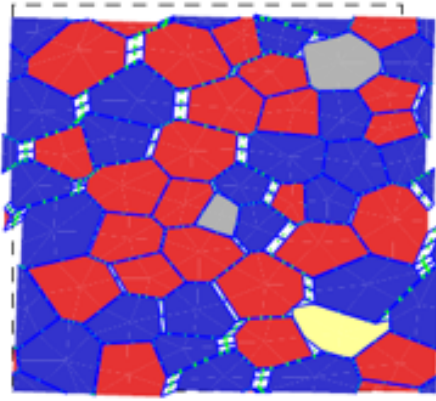


FIGURE 4.24 – Déformée d’une microstructure de 50 grains en fin de calcul numérique. Les inclusions jaunes et grises sont des inclusions ayant des propriétés physiques de pores.

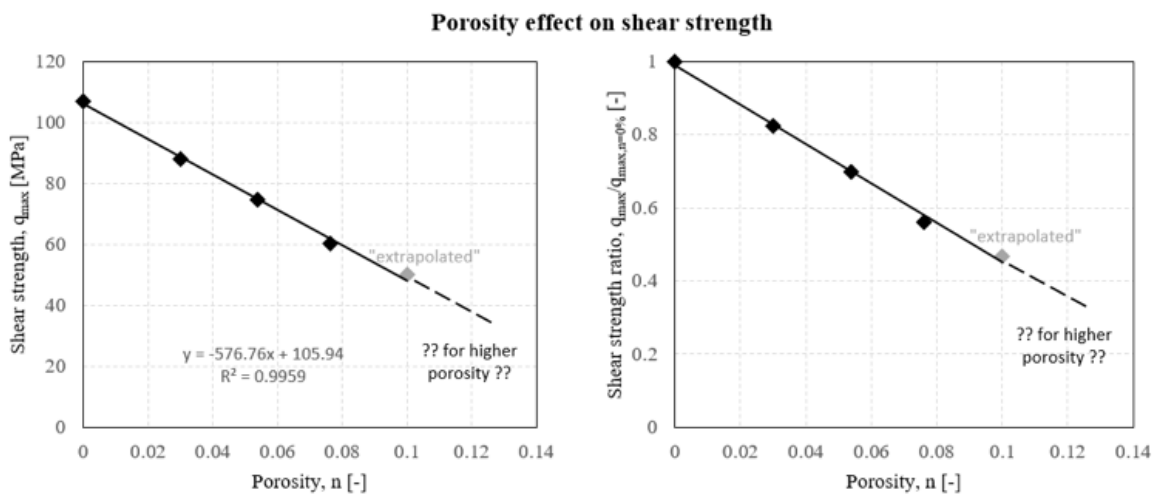


FIGURE 4.25 – Représentation graphique de l’évolution du pic de résistance q_{max} en fonction de la porosité n .

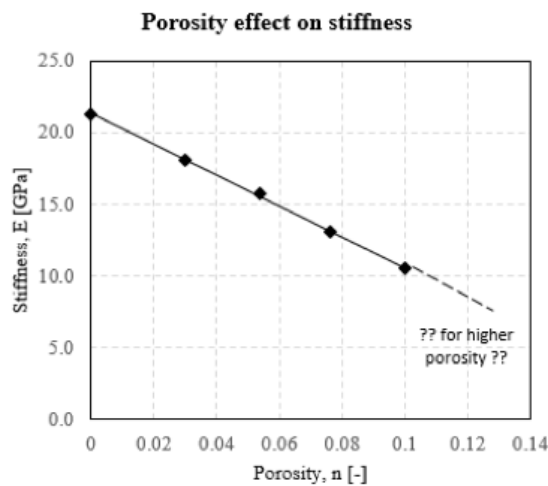


FIGURE 4.26 – Représentation graphique de l’évolution du module élastique E en fonction de la porosité n . Les modules sont calculés de $\varepsilon_{22} = 0\%$ à $\varepsilon_{22} = 0,33\%$.

4.5.3 Discussion

Les résultats confirment en partie notre hypothèse de la section 4.3.1 lors de calculs sur la microstructure *MI7150_1* qui correspond à un échantillon avec une porosité $n = 41\%$. Dans le cas analysé ci-dessus, nous observons une diminution du pic de résistance de l'ordre de 50 % pour une porosité de 10 %. En observant la figure 4.4, on constate que cette réduction de q_{max} est du même ordre que celle qui est nécessaire pour que le résultat numérique corresponde au résultat réalisé en laboratoire. Par contre l'application de la formule 4.3 est une aberration pour plusieurs raisons. Premièrement le résultat généré par celle-ci mène à une résistance négative. Ensuite, en appliquant un raisonnement plus approfondi, il n'est pas fiable d'appliquer une analyse réalisée sur des microstructures ayant des porosités de maximum 10 % à une microstructure correspondant à un échantillon ayant une porosité de 41 %. De plus, la formule 4.3 est propre à la microstructure analysée et devrait être adaptée à la microstructure sur laquelle elle est utilisée, soit en redéfinissant cette formule à l'aide des données normalisées représentées sur la partie droite de la figure 4.25, soit en réalisant une nouvelle analyse sur une microstructure ayant des proportions de phases similaires au cas analysé.

Lorsque ces résultats sont comparés avec les résultats d'une étude de Baud et al. (2017) qui porte sur du calcaire à haute porosité, nos résultats sont interpellants. En effet, nous n'obtenons pas les mêmes résultats. Ils n'observent pas de tendance linéaire, mais une relation de type $1/n^a$. Les analyses de Baud et al. sont réalisées sur des compressions uniaxiales alors que nous analysons les résistances sous confinement. Les échantillons de Baud et al. présentant des porosités légèrement inférieures à 40 % ont été comparés à des échantillons issus d'une autre étude (Zhu et al. 2010) qui eux présentent des porosités allant de 2 à 40 %. Notre analyse ne concerne pas de microstructure avec une porosité supérieure à 10 %, or sur la figure 4.27 nous observons que la tendance de type $1/n^a$ n'est pas si évidente pour des porosités inférieures à 10%. Dans ce graphe se trouve aussi la courbe définie par l'équation 4.4 (Sammis et Ashby's, 1986).

$$UCS = \frac{\beta}{n^{0.414}} \quad (4.4)$$

où :

UCS est la résistance à la compression uniaxiale.

n est la porosité.

β est un coefficient qui ne varie ni dans le cas de notre analyse ni dans la représentation graphique de la figure 4.27.

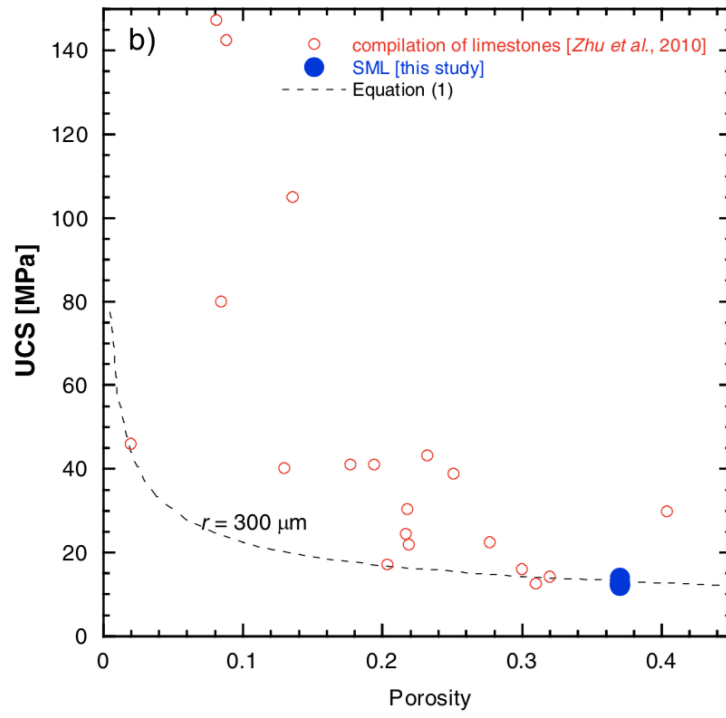


FIGURE 4.27 – Résultats d’essais uniaxiaux en fonction de la porosité des échantillons issus des recherches de Zhu et al. et de Baud et al. comparés à l’expression 4.4

5 Perspectives

La section précédente est loin d’avoir atteint ses limites. Il existe un grand nombre de sujets sur lesquels des analyses peuvent être réalisées et qui sont pertinentes pour l’avancement de cette recherche. Je mentionne ci-dessous quelques sujets d’analyses qui pourraient mener à une meilleure connaissance et compréhension de l’effet de l’altération hydrothermale des roches volcaniques sur leur comportement micromécanique.

5.1 Analyses complémentaires

5.1.1 Quantifier l’influence de l’altération

Nous avons vu dans la section [4.3](#) que l’altération pouvait être liée à une réduction de cohésion entre les interfaces inter granulaires. Malheureusement il n’est pas aisé et surtout pas réaliste de tirer des conclusions à partir d’un nombre réduit d’échantillons et d’essais. Une piste d’amélioration de cette recherche est de réaliser des analyses similaires à celles réalisées dans ce travail, avec des données expérimentales sur un plus grand nombre d’échantillons.

5.1.2 Analyse plus poussée de l’effet de la porosité

Dans le modèle numérique utilisé, les inclusions minérales ont un comportement purement élastique. Toutes ces analyses ont donc été réalisées en assumant qu’une rupture inter granulaire intervient avant toute rupture de grains. Cette hypothèse pose problème dès que des grains sont utilisés pour simuler de la porosité. En effet, lors des calculs sur des microstructures avec une certaine porosité nous observons de grandes déformations sur les grains de porosité.

Nous pensons que l’intégration de la porosité dans le modèle numérique peut apporter des résultats pertinents au sujet de recherche. Les résultats obtenus dans ce travail ne concordent pas parfaitement avec ce qui se trouve dans la littérature. Mais, comme il est développé en section [4.5](#) les analyses sont réalisées sur des microstructures avec peu de porosité. Ceci est lié aux problèmes rencontrés lors des calculs sur des microstructures avec des porosités plus élevées. Nous avons aussi vu que nos résultats n’étaient pas aberrants non plus, ce qui laisse place à un certain optimisme.

5.1.3 Autre représentation d’indicateurs

La section [3.6](#) introduit l’existence de certains indicateurs et certaines représentations de ceux-ci. Lors des analyses que j’ai réalisées à l’aide de la représentation de l’évolution des indicateurs $intSOFT_{t/n}$ et $intDAM_{t/n}$ en fonction de la déformation généralisée, j’ai pensé à une manière alternative pour caractériser graphiquement l’état d’adoucissement d’une microstructure déformée. Avec les représentations utilisées actuellement, il est difficile de différencier une interface qui est en début d’adoucissement d’une interface qui est presque totalement endommagée. Il n’est pas non plus aisé de savoir si les interfaces sont intactes ou si elles sont très proches du début de leur adoucissement respectif avant qu’elles soient en phase d’adoucissement. Ces informations peuvent être intéressantes pour décrire un comportement microscopique correspondant à de faibles déformations généralisées.

Une représentation sous forme d’histogramme nous permettrait d’avoir ces informations manquantes. Cet histogramme aurait en abscisse la valeur $\Delta u_{t/n}/\delta_{t/n}^c$ et en ordonnée le nombre d’occurrences de l’état défini en abscisse. Pour avoir une représentation pertinente, il faut discrétiser l’abscisse. Une idée est de séparer chacun des intervalles $[0 : D_{n/t}]$ et $[D_{n/t} : 1]$ en trois parties. À partir de là, il serait

possible de déterminer rapidement si la majorité des interfaces qui sont en phase d'adoucissement sont en début de leur adoucissement ou s'ils sont presque totalement endommagés.

Cette représentation n'a pas d'informations au sujet de la répartition des interfaces contrairement à la représentation des déformées. Elle n'intègre pas non plus la dimension temporelle comme le fait la représentation graphique de l'évolution des indicateurs $intSOFT_{t/n}$ et $intDAM_{t/n}$. Mais elle apporte des informations qui pourraient être intéressantes.

5.2 Applications

5.2.1 Application à double échelle

Le comportement d'une roche à l'échelle microscopique ne permet pas de définir directement le comportement d'un édifice volcanique. C'est pour cela que le modèle microscopique utilisé ici peut être introduit dans un modèle multi échelle pour décrire un élément macroscopique. Un calcul multi échelle consiste à réaliser un maillage d'éléments d'une échelle inférieure. En m'aidant de la figure [5.1](#) je vais décrire un exemple de calcul à double échelle. Cette image est issue d'un travail en cours de réalisation par Pardo B. (2019). Elle ne représente pas le même type de roche que celles exploitées dans mon travail, les phases minérales ne sont donc pas les mêmes que celles exploitées dans mon travail.

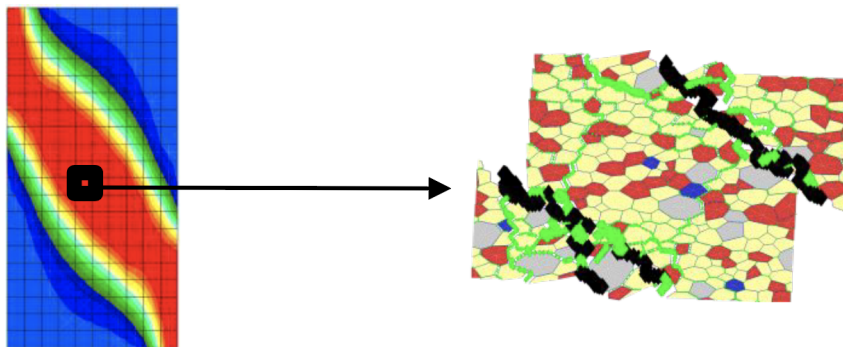


FIGURE 5.1 – Illustration d'une méthode multi échelle à l'aide d'un calcul réalisé sur un élément de la taille d'un échantillon de laboratoire.

L'élément macroscopique représente un échantillon de sol de taille comparable à ceux utilisés en laboratoire. Dans le cas représenté sur la figure [5.1](#) il est constitué de 200 éléments qui sont des microstructures similaires à celles de ce travail. La réponse mécanique de chacun de ses 200 éléments est déterminée par le comportement des microstructures. Soit la réponse généralisée d'une microstructure définit le comportement de chaque élément de l'échantillon macroscopique. Soit pour chaque étape itérative du calcul à éléments finis macroscopiques, la réponse généralisée de chacune des 200 microstructures est calculée. La seconde méthode est plus lente, mais plus exacte.

En suivant le même principe qui consiste à substituer des éléments d'un maillage par un maillage d'une autre échelle, nous pouvons envisager de calculer la stabilité d'un édifice tel qu'un volcan à partir du comportement microscopique de la roche.

5.2.2 Modèle de prévision

Modéliser le comportement mécanique microscopique d'une roche et quantifier l'influence de l'altération sur ce comportement est un objectif. Interpréter ce comportement et le transcrire à un comportement à l'échelle macroscopique à l'aide du calcul multi échelle en est un autre. Une fois

ces objectifs atteints, nous pourrions nous pencher sur un modèle plus complexe et complet. Nous pouvons imaginer un modèle qui prévoit l'évolution de l'altération d'une roche en fonction de sa localisation sur un édifice volcanique, des conditions météorologiques et/ou d'autres facteurs. En restant optimiste, il serait théoriquement possible, à partir d'un modèle complet et intégré, de prévoir l'évolution de la résistance des roches volcaniques et donc d'anticiper tout effondrement de flancs tel que celui du Tutupaca.

Références

- ASTMD2664-04, 2004, *Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements (Withdrawn 2005)*. American Society for Testing Materials International.
- BARDINTZEFF J.-M., 2018, *Krakatoa et tsunami*. En ligne : https://blogs.futura-sciences.com/bardintzeff/2018/12/26/krakatoa-et-tsunami/?fbclid=IwAR32vrUEL5A_kRPzDOtpjVMQUm6KInUC3DSm7TIRc_G8Mca7-enLf1fcAs#more-4077, consulté le 5 août 2019.
- BAUD P., SCHUBNEL A., HEAP M. et ROLLAND A., 2017, *Inelastic Compaction in High-Porosity Limestone Monitored Using Acoustic Emissions*. Journal of Geophysical Research, 10.1002/2017JB014627.
- BASS J. D., 1995, *Elasticity of Minerals, Glasses, and Melts*. American Geophysical Union.
- BENGHAZI Z., 2013, *Chapitre I : Généralités*. Cours : Exploitation Minière. En ligne : http://zied-benghazi.weebly.com/uploads/2/4/5/8/24585230/chapitre_i_-_gnralit.pdf, consulté le 6 août 2019.
- BOLLY P.-Y. et GHARSALLAOUI H., 2017, *Les roches et sols. Les principales caractéristiques physiques et techniques : une introduction*. Cours : LGCIV1071 — Géomatériaux.
- BOLLY P.-Y., 2017, *Les roches et les sols*. Cours : LGCIV1071 — Géomatériaux.
- CAP J.-F., 2013, *Séance 2 Aciers pour béton armé*. Cours : LAUCE2031 — Calcul organique du béton armé. En ligne : <https://sites.google.com/site/epljfc/auce-2031-calcul-organique-du-bton-arm>, consulté le 7 août 2019.
- CHANG A. T., 2003, *Hot Springs Within Yangmingshan National Park Taiwan*. En ligne : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12714>, consulté le 25 juin 2019.
- CIGALA V., 2019, *The collapse of Anak Krakatau volcano : a scenario envisaged*. En ligne : <https://blogs.egu.eu/divisions/nh/2019/02/04/anak-krakatau/>, consulté le 5 août 2019.
- DETIENNE M., 2016, *Unravelling the role of hydrothermal alteration in volcanic flank and sector collapses using combined mineralogical, experimental, and numerical modelling studies*.
- DUFFAUT P., WOJTKOWIAK F., JOSIEN JP. et PINEAU I.L., 1979, *Les vides, principal facteur du comportement mécanique des roches*. Comptes rendus du 4^e Congrès International de Mécanique des Roches, 1.
- JAOUEN L., 2019, *Acoustical Porous Material Recipes*. En ligne : <https://apmr.matelys.com/Parameters/OpenPorosity.html>, consulté le 7 août 2019.
- JAUZEIN A., 2001, *ROCHES (Classification) Roches sédimentaires*. En ligne : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/roches-classification-roches-sedimentaires/>, consulté le 6 août 2019.
- MARINELLI F., VAN DEN EIJNDEN A., SIEFFERT Y., CHAMBON R. et COLLIN F., 2016, *Modeling of granular solids with computational homogenization : Comparison with biot's theory*. Finite Elem Anal Des 119.
- MINING MATTERS, 2013, *The Rock Cycle*. En ligne : <https://www.slideshare.net/MiningMatters/the-rock-cycle-21970712>, consulté le 6 août 2019.
- OBSERVATORIO VULCANOLOGICO DEL INGEMMET, 2019, *Geología del volcán tutupaca*. En ligne : http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=1007, consulté le 16 juillet 2019.
- PARDOEN B., 2018, *Chapter 9—Introduction to rock mechanics*. Cours : LGCIV2071—Geotechnics.
- PARDOEN B., BESUELLE P., DESRUES J., DAL PONT S., COSENZA P., 2019, *Accounting for small-scale heterogeneity and variability of argillaceous rock on homogenised micromechanical response*. Non publié.

- PATERSON M. S., 1958, *Experimental deformation and faulting in wombeyan marble*. Bulletin of the geological society of america, 69 (4).
- PABST W. et GREGOROVA E., 2013, *Elastic properties of silica polymorphs – a review*. ICT Prague.
- PABST W., GREGOROVA E., RAMBALDI E., BIGNOZZI M. C., 2015, *Effective elastic constants of plagioclase feldspar aggregates in dependence of the anorthite content—a concise review*. UCT Prague.
- QUIRION M., 1995, *Étude de la structure des granulats concassés par analyse d'images et stéréologie*. En ligne : <http://www.nlc-bnc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp04/mq21820.pdf>, consulté le 6 août 2019.
- RÉDACTION SIMPLYSCIENCE.CH, 2015, *Le cycle des roches*. En ligne : https://m.simplyscience.ch/enfants-terre-et-environnement/articles/le-cycle-des-roches.html?_locale=fr, consulté le 6 août 2019.
- REYNOLDS J., 2019, *I'll round off this thread with a final before and after comparison. First image shot back in August 2018, typical explosive activity. And now... #Krakatau #volcano*. En ligne : <https://twitter.com/EarthUncutTV/status/1083316433847644160>, consulté le 7 août 2019.
- SAMANIEGO P., VALDERRAMA P., MARINO J., DE VRIES B. V. W., ROCHE O., MANRIQUE N., CHÉDEVILLE C., LIORZOU C., FIDEL L. et MALNATI J., 2016, *The historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru)*. Bulletin of Volcanology, 77.
- SAMMIS C. G., et ASHBY M. F., 1986, *The failure of brittle porous solids under compressive stress states*. Acta Metallurgica, 34(5).
- VAN DEN EIJNDEN A., BESUELLE P., CHAMBON R. et COLLIN F., 2016, *A FE2 modelling approach to hydromechanical coupling in cracking-induced localization problems*. Int J Solids Struct 97–98.
- VAN DEN EIJNDEN A., BESUELLE P., CHAMBON R., COLLIN F. et DESRUES J., 2017, *Modeling the strain localization around an underground gallery with a hydro-mechanical double scale model; effect of anisotropy*. Comput Geotech, 85.
- WATTERS R. J., ZIMBELMAN D. R., BOWMAN S. D. et CROWLEY J. K., 2000, *Rock Mass Strength Assessment and Significance to Edifice Stability, Mount Rainier and Mount Hood, Cascade Range Volcanoes*. Boulder, CO : Geological Society of America.
- ZHU W., BAUD P., et WONG T.-F., 2010, *Micromechanics of cataclastic pore collapse in limestone*. Journal of Geophysical Research, 115, B04405.
- ZIMBELMAN D., WATTERS R. J., BOWMAN S. et FIRTH I., 2003, *Quantifying hazard and risk assessments at active volcanoes*. Eos, 84.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl