

## **Travail de Fin d'Etudes : Caractérisation expérimentale du comportement en fatigue des matériaux rocheux**

**Auteur :** Linotte, Bastien

**Promoteur(s) :** Charlier, Robert

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

**Année académique :** 2019-2020

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/8835>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



Faculté des Sciences Appliquées  
Deuxième master en ingénieur civil des constructions  
Année académique 2019 - 2020

# Caractérisation expérimentale du comportement en fatigue des matériaux rocheux

---

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES

Auteur : BASTIEN LINOTTE

Promoteur : ROBERT CHARLIER

Jury : F. COLLIN  
B. MIHAYLOV  
B. CERFONTAINE  
G. CORMAN

## *Dédicace*

*A la mémoire de mon cher papa Jacques Linotte,  
qui aurait tant aimé être toujours là pour assister à l'aboutissement de mon parcours  
universitaire.*

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Robert Charlier, promoteur de ce mémoire, pour l'aide et le suivi qu'il m'a apportés tout au long de la réalisation de ce travail de fin d'études. Merci pour ses conseils et son soutien précieux.

Je voudrais aussi remercier Monsieur Pierre Illing qui m'a été d'un grande aide dans la préparation et l'exécution des différents essais effectués durant cette campagne expérimentale. Merci à lui pour son investissement dans la réalisation de ces essais durant cette période de confinement très particulière et sans qui cette campagne n'aurait pas pu arriver à son terme. Merci également pour son aide dans l'analyse et la compréhension des résultats.

Je tiens à remercier Monsieur Frédéric Michel et Monsieur Amaury Daras, membres du laboratoire LMC, pour m'avoir fourni les matériaux utilisés durant cette campagne.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Frédéric Collin, Monsieur Boyan Mihailov, Monsieur Gilles Corman et Monsieur Benjamin Cerfontaine, membres du jury, pour la lecture de ce travail.

Enfin, je remercie ma mère Claire Dejong pour ses encouragements et son soutien apportés durant cette période au contexte très particulier. Merci également pour la relecture de ce mémoire.

# Résumé

Dans de nombreux projets d'ingénierie, telle que la mise en place d'un système de production hydroélectrique souterrain, l'attention doit être portée sur le comportement des massifs rocheux soumis à des charges cycliques. Cependant, les propriétés mécaniques des matériaux rocheux sous un tel chargement restent peu connues. En effet, il apparaît que sous chargement cyclique, la rupture du matériau rocheux survient prématurément et ce sous un niveau de contrainte moins important que la contrainte maximale déterminée sous un chargement monotone. Il est donc intéressant d'étudier plus en détail le comportement en fatigue des matériaux rocheux afin d'éviter de telles ruptures difficilement prévisibles.

Depuis plusieurs années, de nombreuses études ont été menées afin de caractériser et de modéliser la réponse des matériaux rocheux soumis à chargement cyclique. Ces études ont pu mettre en évidence différents paramètres influençant le comportement en fatigue et la durée de vie des roches, tels que la valeur maximale et l'amplitude des contraintes appliquées, la forme de l'onde et la fréquence du chargement, etc. Cependant, plusieurs facteurs empêchent actuellement de déterminer un modèle du comportement en fatigue facilement applicable lors de projets d'ingénierie concrets. En effet, il est difficile de déterminer l'état de fatigue (de destruction) initial du matériau. Afin d'élaborer une théorie en fatigue des matériaux rocheux, deux points majeurs restent donc à être déterminés : la définition d'une variable fiable évaluant l'état d'endommagement de la roche et l'établissement d'un modèle de calcul des dommages cumulatifs.

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'étudier le phénomène d'endommagement sous conditions de chargement cyclique d'un matériau rocheux afin de caractériser la résistance et l'évolution du comportement de ce matériau soumis au phénomène de fatigue. Des tests expérimentaux ont ainsi été menés, dans le cadre de ce travail, afin de comparer les résultats obtenus aux modèles décrivant le comportement de la déformation des matériaux rocheux soumis à la fatigue ainsi qu'aux propositions de variables décrivant l'endommagement de la roche. L'objectif étant de valider ces modèles et variables ou d'en proposer un éventuel ajustement.

Pour ce faire, des tests de compression uni-axiale cyclique ont été exécutés au laboratoire de géotechnologie de l'université de Liège, sur des échantillons de béton (roche artificielle) dont le comportement mécanique présente de nombreuses similitudes avec celui des matériaux rocheux ordinaires. Lors de ces tests, les paramètres étudiés ont été la contrainte maximale appliquée durant les cycles ainsi que l'amplitude de contrainte.

Les observations et analyses réalisées sur les résultats des différents essais ont pu mettre en évidence le caractère très fluctuant de la durée de vie en fatigue du béton et la difficulté à isoler les différentes variables et caractéristiques (matériau, éprouvette, application de la charge,...) susceptibles d'influencer la durée de vie.

En outre, les résultats obtenus questionnent sur un possible effet de durcissement du béton après avoir été soumis à un chargement cyclique à basse contrainte.

# Abstract

In many engineering projects, such as the development of an underground hydroelectric generating system, attention must be paid to the behaviour of rock masses subjected to cyclic loads. However, the mechanical properties of rock materials under such loading remain poorly known. Indeed, it appears that under cyclic loading, rock material failure occurs prematurely and this under a stress level less important than the maximum stress determined under monotonous loading. It is therefore interesting to study in more detail the fatigue behaviour of rock materials in order to avoid such failures, which are difficult to predict.

For several years, numerous studies have been conducted to characterize and model the response of rock materials subjected to cyclic loading. These studies have been able to highlight various parameters influencing the fatigue behaviour and service life of the rocks, such as the maximum value and amplitude of the applied stresses, the waveform and frequency of loading, etc. However, several factors currently prevent the determination of a fatigue behaviour model that can be easily applied to concrete engineering projects. Indeed, it is difficult to determine the initial fatigue (destructive) state of the material. In order to develop a fatigue theory for rock materials, two major points remain to be determined : the definition of a reliable variable evaluating the state of damage of the rock and the establishment of a model for calculating cumulative damage.

The objective of this end-of-study work is to study the damage phenomenon under cyclic loading conditions of a rock material in order to characterize the resistance and the evolution of the behaviour of this material subjected to the fatigue phenomenon. Experimental tests have thus been carried out, within the framework of this work, in order to compare the results obtained with models describing the deformation behaviour of rock materials subjected to fatigue as well as with proposed variables describing rock damage. The objective is to validate these models and variables or to propose a possible adjustment.

To do this, cyclic uni-axial compression tests were carried out at the Geotechnology Laboratory of the University of Liège, on concrete samples (artificial rock) whose mechanical behaviour has many similarities with that of ordinary rock materials. During these tests, the parameters studied were the maximum stress applied during the cycles as well as the amplitude of the stress.

The observations and analyses carried out on the results of the various tests have highlighted the highly fluctuating nature of the fatigue life of concrete and the difficulty in isolating the various variables and characteristics (material, specimen, load application, etc.) likely to influence the service life.

In addition, the results obtained raise questions about a possible hardening effect of concrete after being subjected to cyclic loading at low stress.

## Table des matières

|            |                                                                           |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I</b>   | <b>Introduction générale</b>                                              | <b>1</b>  |
| 1          | Introduction                                                              | 1         |
| 2          | Définition du phénomène de fatigue                                        | 1         |
| 3          | Campagne expérimentale                                                    | 2         |
| <b>II</b>  | <b>État de l'art</b>                                                      | <b>3</b>  |
| 4          | Chargement variable et cyclique                                           | 3         |
| 5          | Tests cycliques                                                           | 4         |
| 6          | Résultats expérimentaux des tests uniaxiaux cycliques dans la littérature | 4         |
| 7          | Mécanisme de fatigue, compression uniaxiale                               | 6         |
| 8          | Concept de limite de fatigue et durée de vie                              | 7         |
| 9          | Indicateurs de fatigue                                                    | 9         |
| 10         | Relation fatigue et fluage                                                | 13        |
| 11         | Comportement mécanique du béton                                           | 14        |
| 11.1       | Compression uniaxiale . . . . .                                           | 14        |
| 11.2       | Compression cyclique uniaxiale . . . . .                                  | 15        |
| 11.3       | Résultats expérimentaux du béton en compression cyclique . . . . .        | 15        |
| <b>III</b> | <b>Tests expérimentaux</b>                                                | <b>16</b> |
| 12         | Matériau utilisé                                                          | 16        |
| 12.1       | Comparaison béton-roche . . . . .                                         | 16        |
| 12.2       | Caractéristiques du béton . . . . .                                       | 18        |
| 13         | Description des tests                                                     | 20        |
| 13.1       | Réalisation des échantillons . . . . .                                    | 20        |
| 13.2       | Mesure de la vitesse sonique . . . . .                                    | 22        |
| 13.3       | Essais de compression simple . . . . .                                    | 22        |
| 13.4       | Essais cycliques . . . . .                                                | 23        |
| 14         | Caractéristiques des échantillons                                         | 26        |

|                                                                                    |               |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>15 Analyse et interprétation des résultats des essais de compression simple</b> | <b>27</b>     |
| 15.1 Résultats . . . . .                                                           | 27            |
| 15.2 Analyse des échantillons post-mortem . . . . .                                | 30            |
| <b>16 Analyse et interprétation des résultats des essais cycliques</b>             | <b>32</b>     |
| 16.1 Présentation des différents chargements testés . . . . .                      | 32            |
| 16.2 Résultats types . . . . .                                                     | 34            |
| 16.3 Précision de la presse . . . . .                                              | 36            |
| 16.4 Comparaison des essais répétés . . . . .                                      | 39            |
| 16.4.1 Effet contrainte maximum . . . . .                                          | 40            |
| 16.4.2 Effet amplitude de chargement . . . . .                                     | 41            |
| 16.5 Relation contrainte-déformation . . . . .                                     | 42            |
| 16.6 Analyse des modules . . . . .                                                 | 44            |
| 16.7 Phénomène de durcissement . . . . .                                           | 46            |
| 16.8 Mode de rupture lors des essais cycliques . . . . .                           | 48            |
| 16.9 Variable de dommages . . . . .                                                | 49            |
| <br><b>IV Conclusion et recommandation</b>                                         | <br><b>51</b> |
| <b>17 Conclusion</b>                                                               | <b>51</b>     |
| <b>18 Perspectives de recherche</b>                                                | <b>52</b>     |
| <br><b>V Références</b>                                                            | <br><b>I</b>  |
| <br><b>VI Annexes</b>                                                              | <br><b>V</b>  |
| Annexe 1 : Caractéristiques des échantillons . . . . .                             | V             |
| Annexe 2 : Normes des ruptures en compression simple (NF EN 12390-3) . . . .       | VI            |
| Annexe 3 : Ruptures des échantillons soumis à compression simple . . . . .         | VII           |
| Annexe 4 : Ruptures des échantillons soumis à compression cyclique . . . . .       | VIII          |
| Annexe 5 : Évolution de la déformation . . . . .                                   | X             |
| Annexe 6 : Courbe $\sigma - \epsilon$ . . . . .                                    | XI            |

## Table des figures

|    |                                                                                                                                                                                                                   |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Différentes formes d'ondes de contrainte [1] . . . . .                                                                                                                                                            | 3  |
| 2  | Résultats types : Relation $\sigma - \epsilon$ [2] (UCS = compression simple) . . . . .                                                                                                                           | 5  |
| 3  | Cycle d'hystérésis . . . . .                                                                                                                                                                                      | 5  |
| 4  | Simple frictional model dilatant hysteresis [3] [4] . . . . .                                                                                                                                                     | 6  |
| 5  | S-N curves for different material and types of tests, constant amplitude [1] . . . . .                                                                                                                            | 7  |
| 6  | Development curve of axial irreversible deformation [5]. . . . .                                                                                                                                                  | 10 |
| 7  | Classification of development curves of axial irreversible deformation [5]. - a : déformation<br>reste stable - b : résultat type lors d'essai cyclique - c : durée de vie courte sous chargement élevé . . . . . | 10 |
| 8  | Illustrations types de différentes méthodes des variables d'endommagement [6] . . . . .                                                                                                                           | 12 |
| 9  | Comportement du béton en compression uniaxiale [7] [8] . . . . .                                                                                                                                                  | 14 |
| 10 | Comportement cyclique du béton en compression uniaxiale [9] [8] . . . . .                                                                                                                                         | 15 |
| 11 | Classification de Deere et Miller [10] . . . . .                                                                                                                                                                  | 17 |
| 12 | Évolution de la résistance du ciment [11] . . . . .                                                                                                                                                               | 18 |
| 13 | Distribution granulométrique pour béton de référence (limites maximales et minimales<br>pour les granulats 8mm/10mm) . . . . .                                                                                    | 19 |
| 14 | Cubes de béton et première série d'échantillons . . . . .                                                                                                                                                         | 20 |
| 15 | Réalisation de la 2ème série d'échantillons . . . . .                                                                                                                                                             | 20 |
| 16 | Réalisation de cylindres de béton à l'aide d'une carotteuse . . . . .                                                                                                                                             | 21 |
| 17 | Carotte obtenue après carottage . . . . .                                                                                                                                                                         | 21 |
| 18 | Retaille de l'échantillon . . . . .                                                                                                                                                                               | 21 |
| 19 | Surfaçage des échantillons . . . . .                                                                                                                                                                              | 21 |
| 20 | Mesure sonique . . . . .                                                                                                                                                                                          | 22 |
| 21 | Dispositif du test de compression simple . . . . .                                                                                                                                                                | 23 |
| 22 | Dispositif du test de compression cyclique . . . . .                                                                                                                                                              | 24 |
| 23 | Description du cycle de chargement en contraintes [12]. . . . .                                                                                                                                                   | 24 |
| 24 | Résultats des compressions simples . . . . .                                                                                                                                                                      | 28 |
| 25 | Relation Contrainte-Déformation . . . . .                                                                                                                                                                         | 29 |
| 26 | Tangentes à la courbe $\sigma - \epsilon$ . . . . .                                                                                                                                                               | 29 |
| 27 | Relation $\sigma - \epsilon$ . . . . .                                                                                                                                                                            | 29 |
| 28 | Ruptures des essais de compression simple . . . . .                                                                                                                                                               | 30 |
| 29 | Résultats des compressions cycliques . . . . .                                                                                                                                                                    | 34 |
| 30 | Zooms évolution des contraintes . . . . .                                                                                                                                                                         | 34 |
| 31 | Montage cyclique . . . . .                                                                                                                                                                                        | 36 |
| 32 | Effet couple moteur . . . . .                                                                                                                                                                                     | 37 |
| 33 | Zoom montage cyclique . . . . .                                                                                                                                                                                   | 38 |
| 34 | Courbe SN en fonction de la contrainte maximale . . . . .                                                                                                                                                         | 40 |
| 35 | Courbe SN en fonction de l'amplitude . . . . .                                                                                                                                                                    | 41 |
| 36 | Courbe $\sigma - \epsilon$ essais 30-40 MPa . . . . .                                                                                                                                                             | 43 |
| 37 | Détails des cycles $\sigma - \epsilon$ des essais 30-40 MPa . . . . .                                                                                                                                             | 43 |
| 38 | Évolution des modules (A4) . . . . .                                                                                                                                                                              | 45 |
| 39 | Résultats B3B2 en compression simple . . . . .                                                                                                                                                                    | 46 |
| 40 | Rupture type des essais cycliques . . . . .                                                                                                                                                                       | 48 |
| 41 | Domages : méthode des déformations . . . . .                                                                                                                                                                      | 50 |

## Liste des tableaux

|    |                                                                                |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Classes de résistance à la compression des matériaux rocheux [10] . . . . .    | 16 |
| 2  | Classes de déformabilité relative [10] . . . . .                               | 17 |
| 3  | Caractéristiques du béton utilisé . . . . .                                    | 19 |
| 4  | Caractéristiques des échantillons . . . . .                                    | 26 |
| 5  | Résultats des essais de compression simple . . . . .                           | 28 |
| 6  | Chargement appliqué durant chacun des essais de compression cyclique . . . . . | 32 |
| 7  | Durée de vie des essais répétés . . . . .                                      | 39 |
| 8  | Illustration du dépassement des bornes de chargement . . . . .                 | 39 |
| 9  | Influence de la contrainte maximum sur la durée de vie . . . . .               | 40 |
| 10 | Influence de l'amplitude de contrainte sur la durée de vie . . . . .           | 41 |
| 11 | Influence de l'amplitude de contrainte sur la durée de vie . . . . .           | 44 |

## Première partie

# Introduction générale

## 1 Introduction

Nombre de structures conçues par les ingénieurs sont soumises à des charges fluctuantes dans le temps. Ces charges peuvent être dues à des phénomènes environnementaux tels l'action du vent, des marées, des vagues, les tremblements de terre,..., ou être induites par l'activité humaine. De tels chargements amenés à se répéter dans le temps sont définis comme des chargements cycliques. De nombreuses recherches ont été consacrées à l'étude du comportement cyclique des roches dans le cadre de différentes applications : évaluation des effets des cycles gel-dégel sur des tunnels en régions froides [13] [14], exploitation de mines de sel dans le cadre du stockage de pétrole et de gaz [15] [16], utilisation d'anciennes mines comme réservoirs consacrés à la production hydroélectrique par pompage-turbinage [17] [18]. Ces études ont permis de mettre en évidence de nombreux résultats et interprétations parfois contradictoires [1] et soulignent la nécessité d'une meilleure compréhension du comportement des roches sous chargement cyclique et plus particulièrement du phénomène de fatigue.

## 2 Définition du phénomène de fatigue

Le phénomène de fatigue est un processus qui, sous l'action de contraintes ou de déformations variables dans le temps, modifie les propriétés locales d'un matériau en lui causant des dommages. Cela peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture du matériau. Cette rupture est caractérisée par un niveau de contrainte inférieur à la contrainte de résistance maximale déterminée sous un chargement monotone. L'enjeu de l'étude du phénomène de fatigue est donc de pouvoir déterminer quand cette rupture dite de fatigue apparaîtra. En effet, à partir d'un certain seuil de chargement, pourtant inférieure à la charge monotone, si ce chargement variable est répété un très grand nombre de fois, la rupture finira par apparaître. Afin donc de pouvoir dimensionner en toute sécurité des structures d'ouvrages géotechniques, il serait très intéressant de pouvoir déterminer combien de temps l'ouvrage résistera au chargement variable dont il est soumis.

Cette idée introduit donc la notion de durée de vie en fatigue d'un matériau. Mais avant de développer ce point, définissons plus précisément le concept de chargement variable. La très grande majorité des systèmes mécaniques et des structures est chargée par des efforts (forces ou résultantes, moments, déplacements) variables dans le temps. Ceux-ci créent dans les pièces des contraintes et des déformations elles-mêmes variables dans le temps de façon cyclique (et pas seulement strictement monotone comme lors d'un essai classique de traction ou compression quasi-statique). On parle alors de chargement de fatigue.

### 3 Campagne expérimentale

Ce travail consiste en une campagne expérimentale d'essais de compression uniaxiale cycliques sur des échantillons de béton à haute résistance. Les variables étudiées sont l'amplitude et la contrainte maximale de chargement. Le but de cette campagne est de mettre en évidence l'effet de différents chargements sur la durée de vie en fatigue du béton et d'observer les mécanismes de l'endommagement du béton en fatigue.

Ce rapport débute par une synthèse des connaissances développées dans la littérature sur le comportement des roches et du béton en fatigue. Ensuite le matériau utilisé choisi est détaillé ainsi que la procédure et la méthodologie des test effectués. Les résultats obtenus sont alors présentés et analysés. Enfin, sont proposées quelques perspectives de recherche et recommandations dans le cadre de nouvelles campagnes expérimentales.

## Deuxième partie

# État de l'art

### 4 Chargement variable et cyclique

Une structure ou un matériau est soumis à un chargement variable lorsqu'il est chargé par des efforts (forces, résultantes, moments, déplacements) fluctuant dans le temps, c'est-à-dire qui alternent entre des périodes d'augmentation ou de diminution. Lorsque cette fluctuation, pouvant aussi être appelée signal, présente une répétition dans le temps, alors le chargement est dit cyclique. Le signal d'un tel chargement peut être d'amplitude constante ou non et peut aussi adopter plusieurs formes : sinusoïdale, triangulaire, carrée, etc (FIGURE 1).

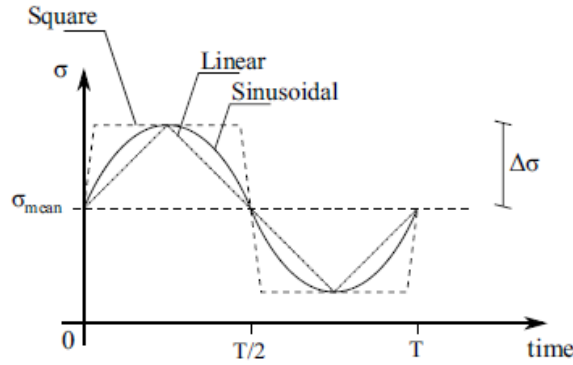


FIGURE 1 – Différentes formes d'ondes de contrainte [1]

Un chargement cyclique diffère donc d'un chargement monotone qui est caractérisé par une contrainte ou une déformation qui augmente ou baisse continuellement au cours du temps. C'est le cas, par exemple, du chargement utilisé lors de la réalisation d'un essai de compression simple où la contrainte augmente continuellement jusqu'à rupture du matériau.

Il est important aussi de rappeler que les termes chargement "cyclique et dynamique", et "statique et monotone" sont parfois utilisés à tort comme synonymes dans la littérature [1]. Un chargement est considéré comme dynamique si les forces d'inertie générées au sein du matériau sont significatives par rapport à la force de charge alors que si les forces d'inertie sont négligeables, le chargement est considéré comme quasi-statique [1].

Un test sous chargement cyclique est caractérisé par un signal de chargement ayant une contrainte moyenne  $\sigma_{mean}(t)$  et une amplitude cyclique  $\Delta\sigma(t, T)$ ,  $T$  étant la période du signal. On parlera d'expérience à cycle bas lorsque la rupture de l'échantillon se produit après quelques dizaines à quelques centaines de cycles, tandis qu'on parlera de cycle haut si la rupture a lieu après plusieurs milliers de cycles. Il convient d'être attentif à la période du signal ( $T$ ). En effet, les chargements à trop haute fréquence (période courte :  $T = 1/f$ ) induisent un effet d'inertie et mènent donc à un chargement dynamique.

Selon la forme du signal, l'énergie fournie à l'échantillon diffère malgré que la contrainte maximale, l'amplitude de contrainte et la période soient similaires. La forme du signal affecte donc les résultats [19] [20] [21]. Ainsi, le signal carré engendre le plus de dommages tandis que le signal linéaire (triangulaire) en engendre le moins. L'amplitude des contraintes et la contrainte moyenne peuvent être constantes ou variables.

Deux types de chargements seront utilisés dans ce travail, à savoir un chargement monotone lors des tests de compression simple et un chargement cyclique à amplitude constante et de forme triangulaire lors des tests cycliques.

## 5 Tests cycliques

Les études sous chargements cycliques présentées dans la littérature abordent plusieurs tests différents : flexion 3 points, brésilien, compression uniaxiale avec ou sans confinement, compression triaxiale, etc. Les tests cycliques effectués durant ce travail seront des tests de compression uniaxiale non confinés. Ce type de tests est le plus approprié au matériel disponible au laboratoire de géotechnologie de l'ULiège. Le protocole de ces tests cycliques ainsi que des tests de compression simple complémentaire sont décrits à la SECTION 13.

Les sections qui suivent se focaliseront principalement sur les résultats et les phénomènes observés dans la littérature traitant de tests de compression uniaxiale cyclique.

## 6 Résultats expérimentaux des tests uniaxiaux cycliques dans la littérature

Les tests de compression cyclique uniaxiale permettent d'enregistrer en parallèle l'évolution de la contrainte appliquée et de la déformation axiale de l'échantillon. La relation entre la contrainte et la déformation, appelée courbe sigma-epsilon ( $\sigma - \epsilon$ ), peut alors être tracée, telle que illustrée à la FIGURE 2.

L'essai démarre par une première mise en charge de l'échantillon. Durant cette période, la contrainte augmente de zéro jusqu'à  $\sigma_{max}$ . Ensuite, la contrainte oscille entre cette valeur maximale  $\sigma_{max}$  et la valeur minimale  $\sigma_{min}$ . Un cycle est donc considéré comme débutant par une phase de déchargement depuis la contrainte  $\sigma_{max}$  jusqu'à  $\sigma_{min}$ , suivie d'une phase de chargement suite à laquelle la contrainte revient à sa valeur initiale, c'est-à-dire  $\sigma_{max}$ . Les cycles de contrainte se répètent donc jusqu'à ce que la rupture de l'échantillon apparaisse. Cette rupture apparaît donc pour un niveau de contrainte maximale inférieur à la résistance sous charge monotone estimée du matériau. Cela suggère donc que les cycles répétés affaiblissent la résistance du matériau.

La déformation, initialement nulle lorsque l'échantillon n'est pas chargé, augmente logiquement durant la première mise en charge. Lorsque le premier cycle débute, l'échantillon est déchargé, la déformation diminue. Le cycle de contrainte passe alors dans sa

## 6 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES TESTS UNIAXIAUX CYCLIQUES DANS LA LITTÉRATURE

phase de chargement et la déformation se remet à croître.

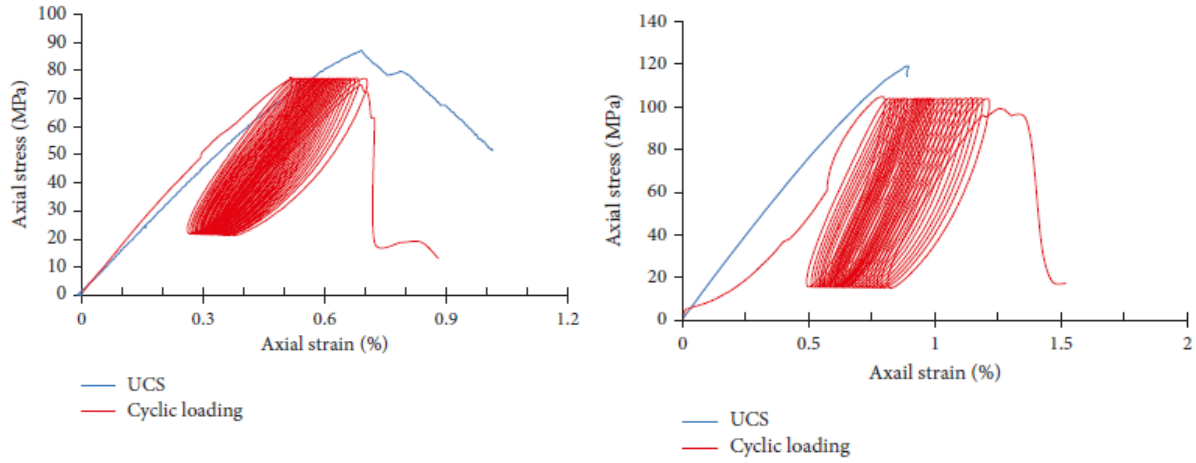


FIGURE 2 – Résultats types : Relation  $\sigma - \epsilon$  [2] (UCS = compression simple)

En observant les cycles charge-décharge tracés sur la courbe  $\sigma - \epsilon$ , on constate que la déformation ne suit pas le même chemin lors de la phase de chargement et de décharge-ment. Ce phénomène est appelé hystérésis.

La FIGURE 3, illustre un cycle d'hystérésis dont la déformation finale est égale à la déformation initiale. La déformation est donc totalement élastique sur toute la durée du cycle, ce qui diffère des cycles observés lors des résultats types des essais cycliques. En effet, sur ceux-ci, la déformation finale est en général supérieure à la déformation initiale. Chaque cycle provoque donc un gain de déformation résiduelle irréversible. La déformation subie suite à la première mise en charge est beaucoup plus conséquente que la déformation résiduelle de chaque cycle et peut même dépasser 50% de la déformation totale observée. Le taux de déformation des cycles suivants reste assez constant avant de s'accélérer en fin d'essai où l'on constate pour le dernier cycle à nouveau une importante déformation [22] [23] [24] [5] [6] [25] [26] [27].

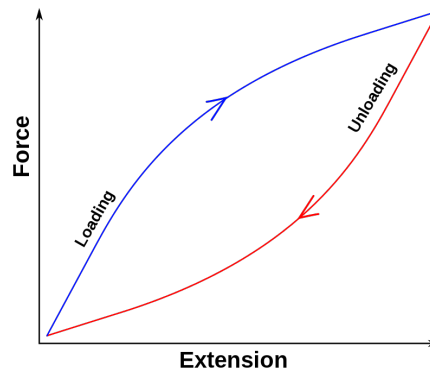


FIGURE 3 – Cycle d'hystérésis

Lors des campagnes expérimentales, il a été observé que plus la contrainte maximale, l'amplitude et la fréquence de chargement sont importants, plus la durée de vie en fatigue est courte [6] [28]. La durée de vie sous chargement d'ondes de forme sinusoïdale est plus longue que sous un chargement d'ondes de forme linéaire mais plus courte que sous chargement d'ondes de forme carrée [6] [28]. Le module dynamique élastique et le coefficient de Poisson du matériau augmentent avec la pression de confinement, et sous chargement cyclique, leurs valeurs durant la phase de déchargement sont légèrement supérieures à celles durant la phase de chargement.

## 7 Mécanisme de fatigue, compression uniaxiale

La FIGURE 4 présente un modèle de friction simple permettant d'expliquer l'hystérésis des boucles contrainte-déformation observées durant les essais cycliques [3] [4]. Ce modèle, détaillé pour deux types de fissures orientées axialement, met en évidence les comportements suivants [1] :

- De A à B, le comportement du solide est élastique, la déformation est réversible. Le comportement du matériau est dilatant.
- A partir du point B jusqu'au point C, les fissures s'ouvrent et glissent, entraînant ainsi un endommagement du solide. L'ouverture de ces fissures génère toujours de la dilatation mais celle-ci est moins forte.
- La phase déchargement du cyclique démarre en C. Du point C jusqu'au point D, le déchargement est élastique. Cette phase élastique s'arrête donc au point D, quand la contrainte de cisaillement maximale est mobilisée à l'intérieur de la fissure. Le comportement du matériau est alors contractant.
- De D à E, les fissures glissent dans le sens inverse mais sans obligatoirement revenir à leur position initiale. Ces fissures ne se referment pas complètement, le cycle a donc induit une déformation volumétrique résiduelle et irréversible.

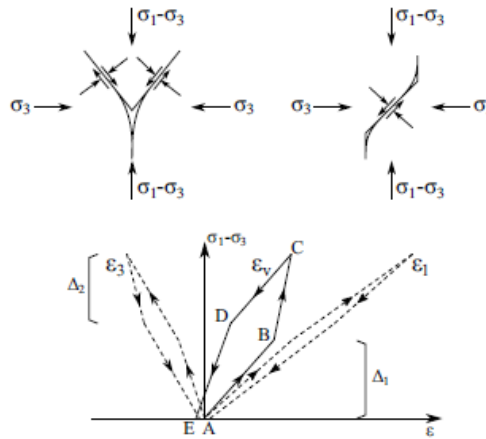


FIGURE 4 – Simple frictional model dilatant hysteresis [3] [4]

L'énergie est dissipée en partie dans le travail de friction et dans l'ouverture des fissures. Les premiers cycles des essais en compression uniaxiale présentaient des boucles

plus larges que durant la suite de l'essai. Cela s'explique par une forte croissance des fissures au début des essais. Ces cycles consomment donc beaucoup d'énergie dans l'ouverture des fissures. Cette croissance des fissures se stabilise ensuite après quelques cycles. Durant la phase intermédiaire de l'essai, les fissures s'ouvrent et se ferment en créant peu d'extensions, le taux de déformation résiduelle provoquée par ces cycles est faible. Durant cette phase, l'énergie est majoritairement consommée par le travail de friction au sein des fissures. Lors des derniers cycles avant la rupture, on observe une augmentation de l'hystérésis de la courbe contrainte-déformation, la croissance des fissures devient à nouveau dominante [29].

Ce modèle de friction simple pourrait être amélioré en intégrant le phénomène de fatigue entraînant l'usure progressive des grains de roche en contact durant les phases de glissement dans la fissure. Cette dégradation des grains serait prise en compte en considérant une diminution progressive du coefficient de friction le long des parois de la fissure [1]. Ce modèle ne prend pas en compte le phénomène de fluage du matériau (à charge constante).

## 8 Concept de limite de fatigue et durée de vie

Les axes principaux de l'étude du comportement en fatigue des roches sont donc de pouvoir estimer le degré d'endommagement du matériau et de pouvoir prédire quand la rupture apparaîtra lorsque le matériau est chargé cycliquement sous une contrainte inférieure à la limite monotone.

Une des premières méthodes utilisées afin de permettre de prédire quand apparaîtra la rupture de fatigue est la réalisation d'une courbe de Wöhler [30], appelée aussi courbe S-N (Stress vs Number of cycles, soit « contrainte en fonction du nombre de cycles »). Ce type de courbe donne de très bons résultats lors de l'étude du comportement en fatigue des métaux et est donc très utilisé dans le dimensionnement des éléments et structures en acier.

Pour tracer ces courbes, des essais simples sont réalisés, qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante, fluctuante autour d'une valeur moyenne fixée, puis à noter le nombre de cycles au bout duquel la rupture est observée. Ce processus est répété pour plusieurs valeurs de l'amplitude de chargement et de la charge moyenne.

La limite de fatigue, également nommée résistance en fatigue, peut alors être définie comme l'amplitude de contrainte pour laquelle il n'y a pas de rupture de l'échantillon. La durée de vie sous ce chargement devient alors infinie. [30].

Une façon de décrire l'effet de la fatigue sur la résistance du matériau est de relier la contrainte maximum appliquée au nombre de cycles nécessaires avant rupture. La

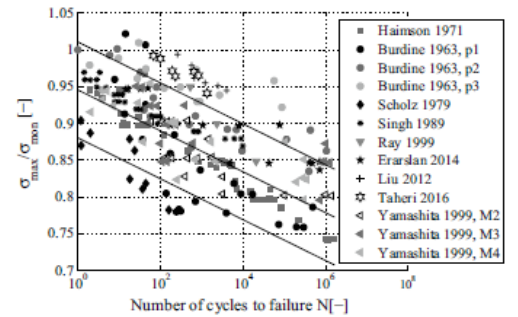


FIGURE 5 – S-N curves for different material and types of tests, constant amplitude [1]

5 résume les résultats des courbes S-N publiés dans la littérature. Ces résultats proviennent de différents types d'essais (uniaxial, triaxial, brésilien) pour différents matériaux mais toujours avec des fréquences de chargement faible [1]. Le nombre de cycles à la rupture  $N$  est relié au ratio normalisé de la contrainte maximale du cycle et de la résistance monotone. On constate que les résultats répertoriés sur la FIGURE 5 sont fort variables. Une régression linéaire peut toutefois être adoptée afin de décrire la courbe S-N dans une base logarithmique décimale [30] menant à :

$$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0.9455 \log_{10} N - 0.0278$$

Cette régression permet de mettre en évidence une tendance claire laissant supposer l'existence d'une limite en fatigue pour les matériaux rocheux. Cette limite varierait en fonction du matériau entre 0.75 et 0.9 pour une durée de vie d'un million de cycles. Sur base de cette littérature, Cerfontaine et al. [1] rapportent qu'une limite de fatigue de 0,7 fois la résistance monotone peut être utilisée si aucune donnée n'est disponible pour un matériau rocheux particulier. Cependant, cette limite doit être utilisée avec précaution. En effet, elle est définie comme devant apparaître après une durée de vie acceptable d'au moins un million de cycles. La valeur obtenue doit alors être redéfinie si l'utilisateur veut assurer une durée de vie plus longue. Si le matériau est chargé sous un niveau de contraintes inférieur à cette limite, la rupture pourra quand même se produire après un nombre de cycles plus important.

Les courbes S-N sont très synthétiques et la limite de fatigue déduite peut être directement utilisée au sein de méthodes de conception. Toutefois, ces résultats sont très dépendants des conditions expérimentales. Il est donc nécessaire d'élaborer une courbe S-N pour chaque situation. En effet, de nombreux facteurs autres que la contrainte maximale appliquée influencent la durée de vie du matériau. Il a été observé que le confinement augmente la limite de fatigue. D'autres paramètres comme la fréquence du chargement [31] appliqué ou la présence d'intervalles sans chargement entre les cycles [32] modifient les résultats.

Un autre facteur affectant les résultats est la variabilité des propriétés mécaniques au sein d'un même matériau rocheux. En effet, plusieurs échantillons issus d'un même massif rocheux peuvent présenter des propriétés différentes. Cependant, la définition de la limite en fatigue est basée sur la limite de résistance monotone, qui peut varier d'un échantillon à l'autre. Cette résistance n'est pas connue a priori et nécessite un test sur l'échantillon pour la déterminer. Malheureusement, ce test, tout comme les tests cycliques, ne peut être que destructif. Il est donc impossible d'effectuer les deux tests sur un même échantillon. La valeur de la résistance monotone ne peut qu'être estimée à partir de tests menés sur d'autres échantillons. Cette incertitude est marquée par une dispersion des résultats sur la courbe S-N.

## 9 Indicateurs de fatigue

Afin de pouvoir plus facilement analyser, interpréter et comparer les résultats expérimentaux, les chercheurs ont alors eu besoin d'élaborer des indicateurs de fatigue. Ceux-ci consistent en une variable exprimant l'évolution du processus de dégradation dû à la fatigue d'un échantillon depuis son état initial jusqu'à la rupture. Selon cette définition, l'indicateur peut donc prédire l'évolution d'un échantillon et donc renseigner du nombre de cycles d'amplitude constante pouvant être appliqué avant la rupture. Un indicateur de dommages adapté doit remplir les conditions suivantes [6] :

- présenter une signification physique claire et distincte
- présenter une coïncidence entre la loi d'évolution et la dégradation réelle du matériau
- prendre en compte l'état initial de dégradation du matériau due à de précédents chargements
- être facilement mesurable et applicable pour des cas pratiques
- augmenter de manière monotone entre l'état intact (valeur nulle) jusqu'à une valeur finale représentant l'état de rupture

Les résultats expérimentaux ont montré que la déformation axiale ultime reste constante pour un certain type de roches [5]. Un critère de rupture de fatigue pourrait donc être établi sur base des déformations du matériau.

La FIGURE 6 montre l'évolution de cycle en cycle de la déformation irréversible. Cette courbe adopte une forme de S renversé (Inverted S-shaped). On distingue 3 phases : la phase initiale et la phase finale où la déformation augmente rapidement et une phase intermédiaire où la déformation évolue à vitesse constante. La première phase correspond à l'initiation des microfissures, la deuxième phase à leur propagation stable et, durant la dernière phase, la propagation des microfissures est instable et mène à la rupture du matériau.

Cette courbe peut adopter 3 formes différentes comme illustré à la FIGURE 7. La forme de la courbe *c* apparaît sous un niveau de contrainte et d'amplitude élevé, la durée de vie en fatigue est alors très courte. Lorsque la contrainte maximale appliquée est inférieure à la limite d'endurance du matériau, la déformation irréversible reste stable durant une très longue période et ne possède pas de phase d'accélération comme sur la courbe *a*. La forme de la courbe *b* est celle généralement observée à l'issue des tests cycliques.

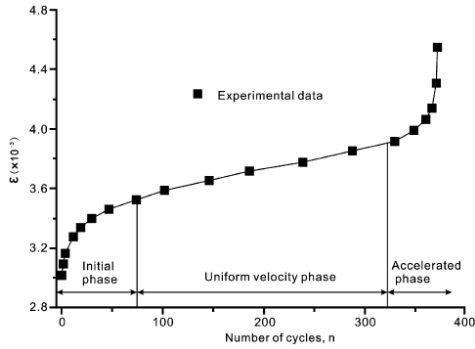


FIGURE 6 – Development curve of axial irreversible deformation [5].

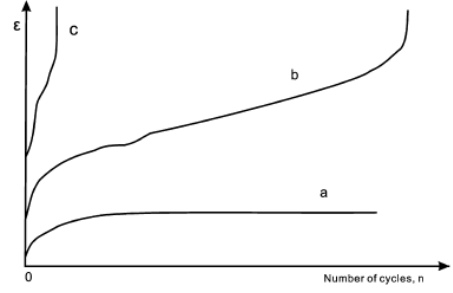


FIGURE 7 – Classification of development curves of axial irreversible deformation [5].  
 - a : déformation reste stable  
 - b : résultat type lors d'essai cyclique  
 - c : durée de vie courte sous chargement élevé

Plusieurs définitions de variables de dommage (D) disponibles dans la littérature sont présentées ci-après, ainsi que leurs différents avantages et inconvénients [6].

### Méthode du module élastique

Ce premier indicateur est basé sur la perte de rigidité du matériau :

$$D = 1 - \frac{E}{E_0}$$

Avec  $E_0$  le module de Young du matériau et  $E$  le module effectif. L'un des défauts de cet indicateur est la difficulté d'obtenir la valeur initiale du module. De plus, l'état initial du matériau n'est pas pris en compte. Cependant, cette méthode est utilisable pour son sens physique bien distinct.

### Méthode de l'énergie de dissipation

Le processus d'endommagement de fatigue est une succession irréversible de dissipations d'énergie (FIGURE 8C)

$$D = \frac{W}{W_{tot}}$$

Où  $W_{tot}$  est la capacité totale d'énergie de dissipation de l'échantillon, et  $W$  l'énergie de dissipation après  $n$  cycles.

L'endommagement avant chargement et celui provoqué par le premier chargement statique sont négligés. Cette méthode est utilisable uniquement afin de décrire le processus d'évolution relative.

### Méthode de la déformation maximale

Les variables basées sur l'utilisation des déformations présentent l'avantage d'être facilement mesurables (FIGURE 8A).

La variable suivante prend en compte l'évolution des déformations verticales maximales de l'échantillon :

$$D = \frac{\epsilon_{max}^n - \epsilon_{max}^0}{\epsilon_{max}^f - \epsilon_{max}^0}$$

Où  $\epsilon_{max}^0$ ,  $\epsilon_{max}^n$  et  $\epsilon_{max}^f$  sont respectivement la déformation maximale initiale (avant le premier cycle), la déformation (maximale sur le cycle) instantanée après n cycles et la déformation maximale finale à la rupture.

Cette méthode amplifie les dommages créés par le chargement cyclique et ne considère pas l'état initial des dommages.

### Méthode des vitesses d'ondes ultrasoniques

La variable de dommages peut aussi être définie en fonction des vitesses d'ondes ultrasoniques :

$$D = 1 - \frac{\hat{v}_{T_n}^2}{v_T^2}$$

Avec  $\hat{v}_{T_n}$  la vitesse instantanée des ondes ultrasoniques au sein du matériau après n cycles et  $v_T$  la vitesse des ondes ultrasoniques du matériau non endommagé.

Cette méthode est bonne pour évaluer les dommages de fatigue car elle représente efficacement la réponse du matériau à la dégradation de la constante élastique, de la densité et des micro fissures. Le premier défaut consiste en la difficulté à obtenir la valeur de la vitesse de l'onde ultrasonique  $v_T$ , elle-même déduite à partir de la vitesse d'ondes ultrasoniques avant le premier chargement  $\hat{v}_{T_0}$ . De plus, le dommage critique (à la rupture) devient une constante du matériau en fonction de la nature et de la lithologie de la roche car la valeur de la vitesse de l'onde ultrasonique au moment de la rupture n'est pas égale à zéro.

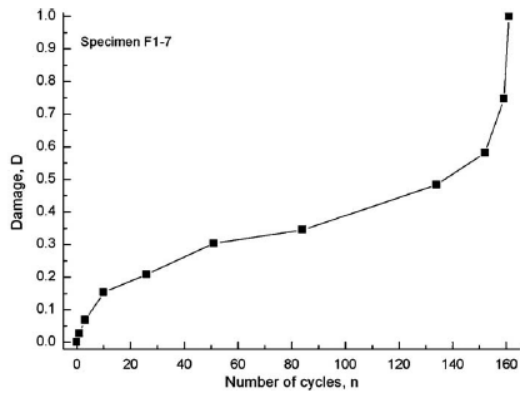
### Méthode des comptes cumulatifs d'émissions acoustiques

Un chargement mécanique peut provoquer des micro-fissures au sein d'un matériau. La formation de ces micro-fissures, ainsi que leur allongement, génèrent une source d'ondes élastiques dues à la rapide libération d'énergie dans le matériau. La variable de dommages est définie par le compte cumulatif des émissions acoustiques (FIGURE 8D) :

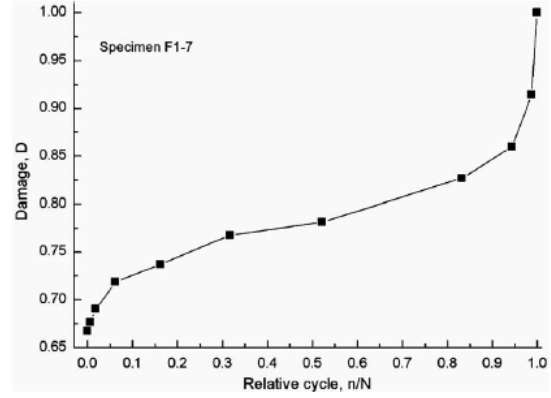
$$D = \frac{N}{N_m}$$

Où N est le compte cumulé des émissions acoustiques après n cycles et  $N_m$  le nombre cumulé d'émissions acoustiques à la rupture.

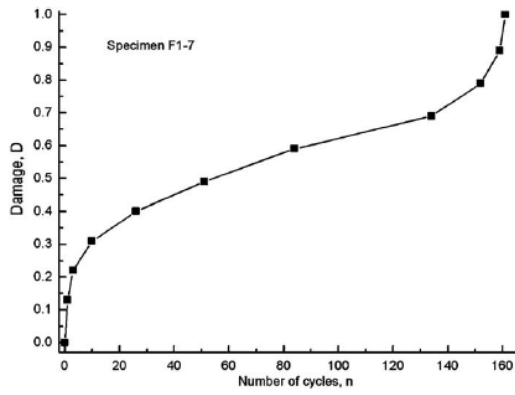
Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être monitorée en continu en laboratoire par des tests non destructifs.



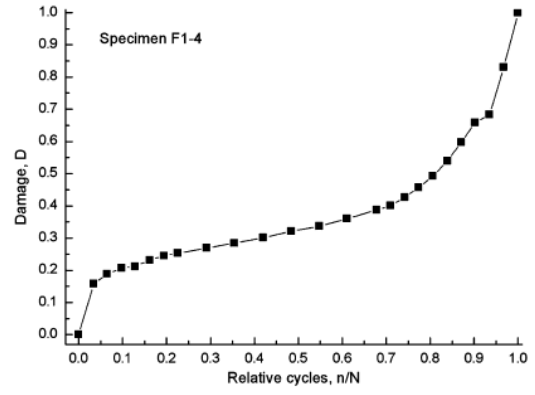
(a) Méthode des déformations maximales



(b) Méthode des déformations résiduelles



(c) Méthode de l'énergie de dissipation



(d) Méthode des émissions acoustiques cumulées

FIGURE 8 – Illustrations types de différentes méthodes des variables d'endommagement [6]

## 10 Relation fatigue et fluage

Le phénomène de fluage, tout comme le phénomène de fatigue, est dépendant du temps et montre qu'un matériau peut présenter des défaillances et rompre sous un chargement inférieur à sa résistance monotone par croissance des fissures [33]. Il est dès lors intéressant de comparer le mode de fonctionnement de ces deux phénomènes et leur interaction.

D'après certaines recherches, l'effet de fatigue pourrait être considéré comme un comportement de fluage pour une charge constante égale à la charge moyenne du signal cyclique [34] [1]. Cette idée suggère alors que la durée du test cyclique est plus pertinente que le nombre de cycles [31]. Il a été observé que lorsque l'on impose entre deux cycles des intervalles de temps à charge constante, la durée de vie en fatigue du matériau est réduite, ce qui laisse indiquer l'effet du phénomène de fluage [35].

Pour certains matériaux rocheux, les résultats de fluage et de fatigue sont sensiblement proches et permettent de déterminer une limite en fatigue et en fluage similaire [36]. Cette corrélation entre les deux phénomènes n'a cependant pas été observée pour d'autres matériaux rocheux et semble donc dépendre du type de matériau.

Le phénomène de fluage domine pour des chargements à haut niveau de contrainte moyenne, basse fréquence et faible amplitude, alors que le phénomène de fatigue domine pour des chargements à plus faible contrainte moyenne, à forte amplitude et à haute fréquence [37] [38]. Ces deux processus sont en général étudiés séparément mais semblent pourtant pouvoir se développer en interaction. Il n'y pas encore de critère permettant de distinguer les effets de chacun sur l'évolution des fissures.

## 11 Comportement mécanique du béton

Le matériau utilisé durant cette campagne est un béton. Le choix de ce matériau et ses caractéristiques seront détaillés à la SECTION 12.

### 11.1 Compression uniaxiale

La FIGURE 9 montre les résultats type d'un test expérimental de compression sur un échantillon de béton cubique. Le graphe de gauche représente la relation contrainte-déformation axiale et latérale tandis que le graphe de droite représente la relation contrainte-déformation volumétrique. On constate que 3 phases se dégagent :

- jusqu'à approximativement 30% de la contrainte maximum  $f_c$ , le comportement du béton est linéairement élastique. Le matériau subit une contraction volumétrique. Les déformations axiales  $\epsilon_1$  et latérales  $\epsilon_2$  augmentent en valeur absolue, mais le tassement vertical de l'échantillon est dominant, d'où la diminution de volume.
- au delà de 30 % jusqu'à environ 80 % de la contrainte maximum, le comportement est non linéaire. Le comportement volumétrique devient alors dilatant et l'échantillon revient à un taux de déformation volumique similaire à l'état initial.
- la contrainte atteint un pic, qui est la résistance maximum en compression du matériau  $f_c$ . Cette dernière, mesurée sur cylindre, est en général comprise entre 12 MPa et 90 MPa. Un béton présentant une résistance inférieure à 55 MPa sera décrit comme béton à résistance normale (NSC) et si sa résistance est supérieure à 55 MPa, il sera considéré comme béton à haute résistance (HSC) [39].

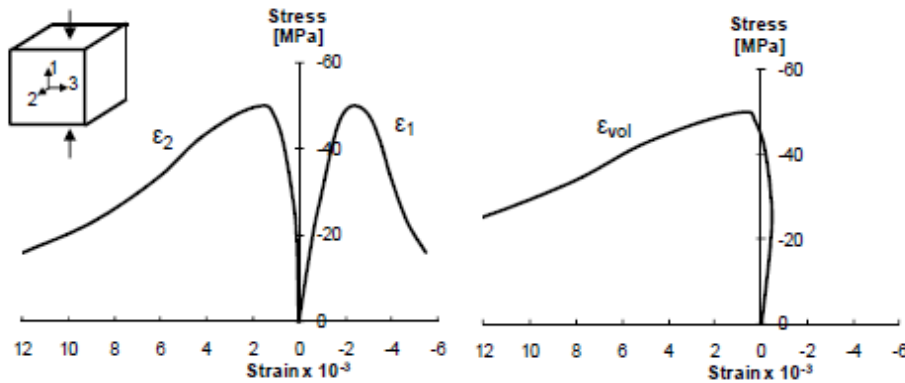


FIGURE 9 – Comportement du béton en compression uniaxiale [7] [8]

En général, à l'instant où la contrainte atteint le pic, la déformation volumétrique  $\epsilon_{vol}$  est positive. L'échantillon présente alors un comportement expansif dit de dilatance. La déformation axiale  $\epsilon_{c1}$  correspondant au pic de contrainte varie entre  $1.8$  et  $2.8 \times 10^{-3}$ . Après le pic de contrainte, la courbe contrainte-déformation est décroissante. Le comportement du béton passe du durcissement linéaire à de l'adoucissement non linéaire. Les déformations continuent de croître alors que la contrainte diminue. La rupture se produit finalement pour une déformation axiale ultime  $\epsilon_{c0}$  [8].

Le comportement non linéaire du béton consistant à durcir (hardening) puis à s'assouplir (softening) est dû à l'apparition et la croissance de microfissures dans la matrice cimentaire. Ces microfissures sont appelées fissures de fendage, elles se propagent majoritairement dans la direction parallèle à celle de l'application de la charge uniaxiale appliquée [40]. La dilatation est due au développement de fissures inélastiques.

## 11.2 Compression cyclique uniaxiale

La FIGURE 10 illustre des résultats expérimentaux pour un béton soumis à un chargement cyclique en compression uniaxiale. On y remarque premièrement la dégradation des propriétés élastiques du matériau, résultant directement de l'apparition successive de microfissures. On constate aussi le développement de déformations inélastiques, conséquence de l'ouverture irréversible des microfissures [8]. Les boucles de déchargement présentent un phénomène d'hystérésis.

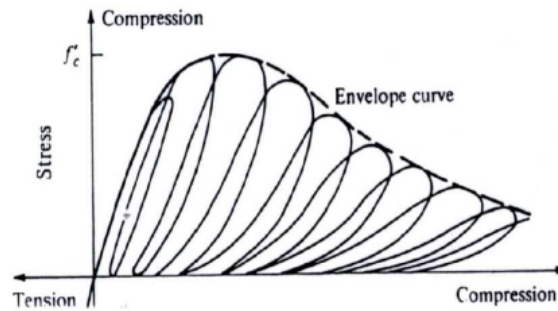


FIGURE 10 – Comportement cyclique du béton en compression uniaxiale [9] [8]

## 11.3 Résultats expérimentaux du béton en compression cyclique

Les résultats expérimentaux d'essais cycliques sur béton permettent de mettre en évidence un comportement du béton fort similaire à celui des matériaux rocheux (courbe des déformations en forme de "S-inversé", etc). Cette section énumère certains résultats supplémentaires constatés suite à des campagnes expérimentales sur des bétons :

- Pour les bétons à haute résistance, la rupture apparaît à partir d'un niveau de chargement à hauteur de 60% de la résistance ( $\sigma_{max}/\sigma_c$ ). Pour les chargements ayant un niveau de contrainte en deçà de ces 60%, aucune réduction de la rigidité du matériau n'est enregistrée [41].
- L'âge du béton au début du test cyclique (28 ou 56 jours) n'a pas d'effet sur la durée de vie en fatigue.
- La présence d'une fissure initiale (artificielle) au sein de l'échantillon de béton entraîne une diminution de la durée de vie. L'orientation de cette fissure influence aussi la durée de vie (une orientation de  $45^\circ$  étant le plus défavorable). Plus la longueur de cette fissure est importante, plus la durée de vie diminue. En deçà d'une certaine longueur de la fissure, sa présence n'a aucune influence sur la durée de vie de l'échantillon [42].

## Troisième partie

# Tests expérimentaux

## 12 Matériau utilisé

Obtenir des échantillons de roches de suffisamment bonne qualité prélevés sur le terrain n'est pas toujours aisé. Le choix du matériau à utiliser s'est donc porté sur des blocs de béton présents dans les laboratoires de l'université de Liège. Bien que le sujet de ce travail porte initialement sur l'étude des matériaux rocheux, la substitution d'échantillons rocheux par des échantillons de béton reste cohérente. En effet, le béton, composé majoritairement de matériaux de nature minérale (sable, ciment et granulats) peut être considéré comme une roche synthétique mais non cependant comme une roche sédimentaire, ignée ou métamorphique car la définition de ces trois catégories de roche est justement basée sur leur processus de formation. Le béton formé par un processus non naturel est ainsi repris dans la catégorie des roches anthropiques.

Tout comme les roches, le béton est sujet à l'altération et à l'érosion. Il a aussi la capacité de se transformer en un autre type de roche en fonction de l'environnement et des conditions climatiques auxquels il est exposé.

De plus, ce matériau présente une des caractéristiques fondamentales des matériaux rocheux, à savoir son hétérogénéité. Cette caractéristique contribue fortement à la complexité de l'étude du comportement en fatigue des roches.

### 12.1 Comparaison béton-roche

Les matériaux rocheux peuvent être classés selon leurs propriétés géo-mécaniques. La classe de résistance permet de distinguer les roches selon leur résistance à la compression simple  $\sigma_c$ . Ce classement est visible à la TABLE 1. La résistance du béton utilisé a été déterminée comme étant de l'ordre de 55 à 65 MPa. Ce qui, selon la classification des roches, correspond à la classe C, soit la classe des grès et calcaires de résistance moyenne, roches métamorphiques à texture schisteuse (d'après Bieniawski) [10].

| Classes | Description de la résistance | Résistance à la compression simple $\sigma_c$ (MPa) | Indice de compression ponctuelle (MPa) |
|---------|------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| A       | Très forte                   | > 200                                               | > 8                                    |
| B       | Forte                        | 100 – 200                                           | 4 – 8                                  |
| C       | Moyenne                      | 50 – 100                                            | 2 – 4                                  |
| D       | Faible                       | 25 – 50                                             | 1 – 2                                  |
| E       | Très faible                  | < 25                                                | < 1                                    |

TABLE 1 – Classes de résistance à la compression des matériaux rocheux [10]

Les matériaux rocheux sont aussi classés en fonction de leur déformabilité relative. Celle-ci est calculée à partir du module  $E_{50}$  qui est défini comme la pente de la courbe de compression simple à 50% de la charge de rupture [10]. La déformabilité relative  $E_{50}/\sigma_c$  du béton utilisé est de l'ordre de 250 ( $E_{50} \approx 15\text{GPa}$ ). Ce qui correspond selon la TABLE 2 2 à la classe M : module moyen.

| Classes | Description de la déformabilité relative | Déformabilité relative $E_{50}/\sigma_c$ |
|---------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| H       | Module élevé                             | $> 500$                                  |
| M       | Module moyen                             | $200 - 500$                              |
| L       | Module faible                            | $< 200$                                  |

TABLE 2 – Classes de déformabilité relative [10]

La classification proposée par Deere et Miller prend en compte ces deux classes de résistance et de déformabilité. La FIGURE 11 illustre l'utilisation de cette classification. Le point correspondant au béton utilisé ( $E_{50} \approx 15 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_c \approx 60 \text{ MPa}$ ) est inclus dans le nuage de points représentatifs des basaltes et des grès dont les contours sont visibles à la FIGURE 11. Ce béton peut donc être mis en parallèle avec un basalte ou un grès.

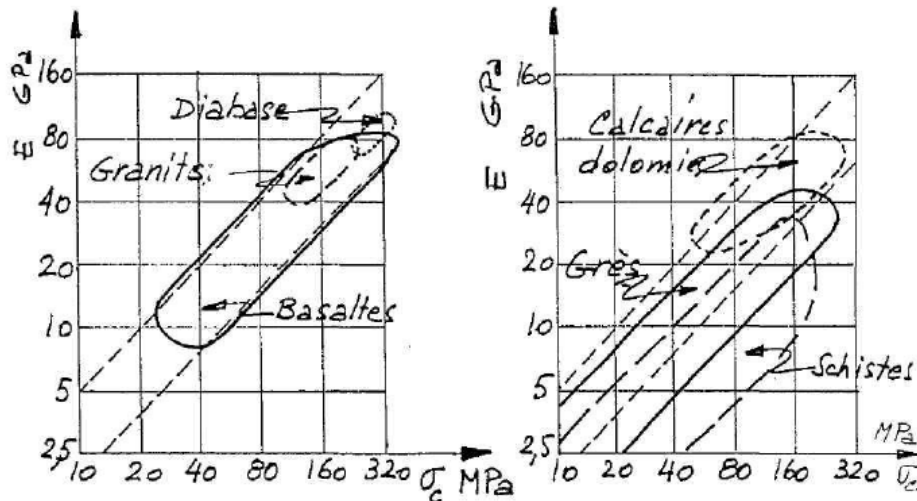


FIGURE 11 – Classification de Deere et Miller [10]

Notons que la comparaison effectuée ici n'est mentionnée qu'à titre indicatif et permet juste de mettre en évidence le type de roche présentant des caractéristiques de résistance similaires à celles du béton. En aucun cas le béton utilisé n'est considéré comme un substitut d'un grès ou d'un basalte et les résultats observés durant ce travail ne sont pas représentatifs du comportement de ces types de matériau.

## 12.2 Caractéristiques du béton

Une des caractéristiques essentielles à prendre en compte dans le choix du béton est son âge. En effet, la résistance du ciment et donc du béton, augmente avec son vieillissement. La campagne d'essais se déroulant sur 3 mois, il est préférable d'éviter que cette période de temps impacte la résistance de notre béton, de telle sorte qu'un échantillon testé en début de campagne puisse avoir une résistance proche d'un échantillon de fin de campagne. Le béton utilisé a été coulé en septembre 2019, son âge en début de campagne est donc d'environ 6 mois. Comme le montre la FIGURE 12 l'augmentation de la résistance du ciment devient presque négligeable après 6 mois de séchage. La résistance du béton utilisé peut donc être considérée comme stable tout du long de la campagne effectuée. Le vieillissement du béton pourra dès lors être un paramètre rejeté dans l'analyse de possibles différences de résistance entre les échantillons.

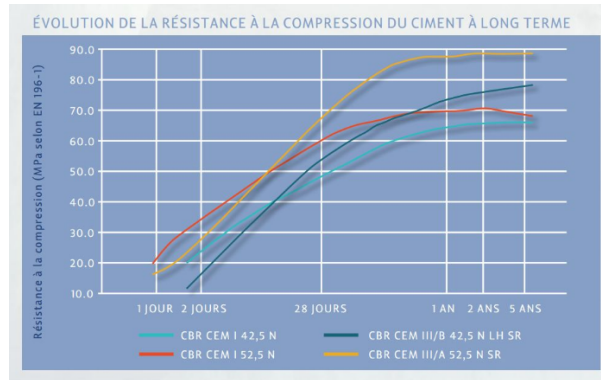


FIGURE 12 – Évolution de la résistance du ciment [11]

La TABLE 3 reprend les caractéristiques principales de la composition du béton. La FIGURE 13 montre les courbes de distribution granulométrique utilisées. Ces caractéristiques sont tirées du bon de commande reçu par l'équipe du laboratoire LMC de l'université de Liège. Les blocs récupérés sont des surplus qui n'ont subi aucun test au préalable.

|                                                                 |                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Type de béton                                                   | MC (0,40)                                                                                      |
| Taille maximale des granulats                                   | 10 mm                                                                                          |
| Type de granulat                                                | base de silice                                                                                 |
| Rapport eau/ciment                                              | 0,40                                                                                           |
| Teneur en ciment                                                | 455 $kg/m^3$                                                                                   |
| Type de ciment                                                  | Type Portland CEM 1 42,5 R<br>conformée à l'ENV 197-1                                          |
| Type de sable                                                   | Sable siliceux d'une granulométrie comprise<br>entre 0.05 mm et 0.1 mm, séché à poids constant |
| Eau de gâchage                                                  | conforme au prEN 1008                                                                          |
| Adjuvants                                                       | conforme à l'EN 934-2                                                                          |
| Valeur minimale de la résistance<br>superficielle à la traction | 3,0 $N/mm^2$                                                                                   |
| Résistance moyenne à la compression<br>à 28 jours en $N/mm^2$   | C60 pour les cubes,<br>C50 pour les cylindres conformément au prEn 206                         |

TABLE 3 – Caractéristiques du béton utilisé

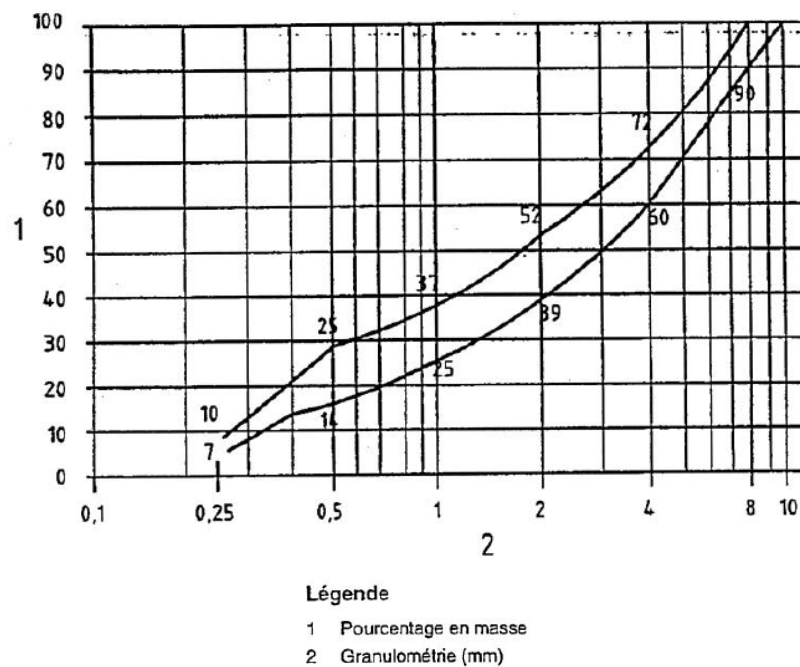


FIGURE 13 – Distribution granulométrique pour béton de référence (limites maximales et minimales pour les granulats 8mm/10mm)

## 13 Description des tests

Dans cette section sont décrites la réalisation des échantillons puis l'exécution des essais de compression simple et des essais cycliques.

### 13.1 Réalisation des échantillons

Les échantillons testés sont carottés à partir de cubes de béton FIGURES 14 et 15 dont les informations sur la composition sont reprises dans la TABLE 3. Les carottes sont taillées à l'aide d'une carotteuse (FIGURE 16). Les cylindres résultants du carottage mesurent 15 cm de hauteur et ont un diamètre de 4 cm (FIGURE 17). Ces cylindres présentant un élancement fort important, ils sont alors taillés et réduits à 8cm de haut (FIGURE 18). Ensuite, les bases des cylindres sont taillées et polies de façon à obtenir deux faces très lisses, parallèles l'une à l'autre et perpendiculaires par rapport à l'axe longitudinal du cylindre (FIGURE 19). Ce surfacage des échantillons permet de diminuer les frottements entre l'échantillon et les plateaux de la presse. L'objectif est ainsi d'appliquer une contrainte la plus homogène possible dans toute la section durant l'essai et de diminuer le risque d'apparition de concentration de contraintes pouvant causer une rupture prématurée de l'échantillon [43].

Toutes ces découpes s'opérant en présence d'eau, les échantillons doivent alors être séchés. La 1ère série d'échantillons a été placée au séchoir durant 3 heures à 60 °C. Les deux autres séries d'échantillons n'ont pas été placées au séchoir. Tous les échantillons sont ensuite stockés au laboratoire, à l'air libre, à température et humidité ambiantes. Ces deux derniers paramètres sont estimés comme suffisamment stables dans le laboratoire durant toute la campagne d'essais que pour avoir une influence négligeable sur les résultats. Avant chaque essai, l'échantillon utilisé est de nouveau mesuré et pesé précisément et soumis à un test de vitesse d'ondes soniques.



FIGURE 14 — Cubes de béton et première série d'échantillons



FIGURE 15 — Réalisation de la 2ème série d'échantillons



FIGURE 16 – Réalisation de cylindres de béton à l'aide d'une carotteuse



FIGURE 17 – Carotte obtenue après carottage



FIGURE 18 – Retaille de l'échantillon



FIGURE 19 – Surfaçage des échantillons

Un point critiquable sur la réalisation des échantillons est que les 8 échantillons issus du premier cube n'ont pas été différenciés par rapport à leur position au sein du cube. Ce dernier a été carotté dans l'optique de réaliser 9 échantillons disposés en 3 rangées de 3. Le dernier échantillon n'a pas pu être carotté par faute de place.

Cette disposition n'est pas idéale, en effet, certains échantillons sont placés fort proches des coins du cube de béton. Les effets de coin peuvent influencer la résistance de l'échantillon découpé dans cette zone. En effet, une concentration de granulat peut être observée dans les coins. De plus, comme la position n'a pas été distinguée au moment de la découpe, il est impossible de relier correctement les résultats des essais de cette série avec les possibles effets de coin.

Cette erreur sera corrigée par la suite lors de la découpe des échantillons des cubes 2 et 3, et le nombre d'échantillons carottés sera diminué à 7 et mieux disposés au sein du cube. Les échantillons issus du premier bloc sont symbolisés par la lettre A et un numéro (ex : A1), les échantillons des cubes 2 et 3 sont symbolisés par la lettre B suivi du numéro du bloc, puis la position au sein de ce bloc suivant la disposition visible à la FIGURE 15.

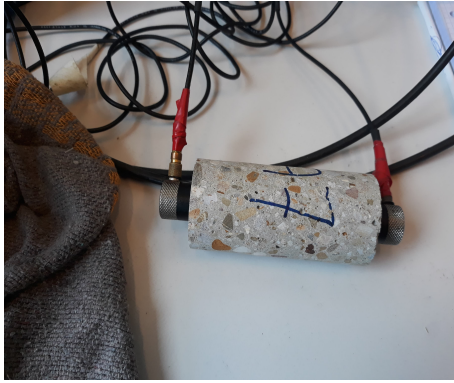
### 13.2 Mesure de la vitesse sonique

En plus de la mesure de la masse et des dimensions, une mesure de la vitesse sonique est réalisée avant de soumettre les échantillons aux essais destructifs. L'appareillage se compose d'un oscilloscope (FIGURE 20B), de deux capteurs piézoélectriques (FIGURE 20A) reliés à un générateur de fréquences. L'essai sonique consiste à mesurer le temps nécessaire à l'onde sonique pour traverser l'échantillon. Ce qui permet de déduire la vitesse sonique :

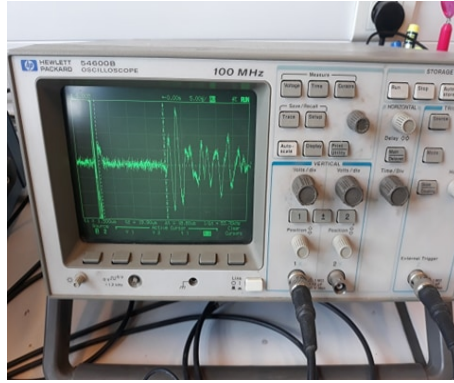
$$V = \frac{L}{dT} \cdot 10^{-6}$$

Avec V la vitesse sonique (m/s), L la longueur de l'échantillon (m) et dT le temps d'arrivée du pulse ( $\mu\text{sec}$ ).

Cette mesure permet de déterminer la présence de fissurations ou de pores dans le matériau, l'onde sonique se déplaçant plus vite dans le béton que dans le vide (ou l'air). Ainsi, la comparaison des vitesses obtenues pour chaque échantillon permettrait de déduire quels échantillons contiennent le plus de porosité de pores et de porosité de fissures.



(a) Capteurs piézoélectriques



(b) Oscilloscope

FIGURE 20 – Mesure sonique

### 13.3 Essais de compression simple

Une première partie des échantillons est d'abord soumise à un test de compression simple afin de renseigner sur la résistance maximale à la compression  $f_c$ . Le montage de cet essai est visible à la FIGURE 21, où l'on peut remarquer deux capteurs latéraux servant à enregistrer la déformation, ainsi qu'un capteur de force. La seconde partie des échantillons sera utilisée pour les essais sous chargement cyclique.

L'application de la contrainte est réalisé à l'aide d'un vérin mécanique, actionné par un moteur pas à pas dont la vitesse de rotation est constante durant l'essai. Les données sont enregistré toutes les 3 secondes : 1 mesure par seconde, alternance entre les mesures des 3 capteurs (1 de force et 2 de déformation).

L'essai de compression simple permet une caractérisation rapide de la résistance à la compression simple des matériaux rocheux. Lors de ce type d'essai, les conditions d'appui perturbent inévitablement l'état de contrainte près des bases de l'échantillon en introduisant des contraintes radiales et circonférentielles. Ces dernières conduisent ainsi à une

compression multiaxiale aux extrémités de l'échantillon. Il faut donc façonner l'échantillon de telle manière à ce que sa zone médiane ne soit pas influencée par ses extrémités perturbées. Pour cela, on recommande que l'échantillon adopte un élancement de l'ordre de 2,5. Au-delà de cette valeur, des phénomènes d'instabilité peuvent se développer tandis qu'en deçà, la résistance obtenue aura tendance à être surestimée, de l'ordre de 20% pour un élancement unitaire [10].



FIGURE 21 – Dispositif du test de compression simple

### 13.4 Essais cycliques

Le montage du dispositif utilisé durant les essais cycliques est visible à la FIGURE 22. Ce montage est très similaire à celui de l'essai de compression simple, avec également un capteur de force, placé dans ce cas-ci sous l'échantillon. Ce capteur permet de mesurer l'évolution temporelle de la force appliquée à l'échantillon. Deux capteurs latéraux mesurent l'évolution de la déformation verticale de l'échantillon. L'essai de compression cyclique étant semblable à celui de compression simple mais avec un chargement cyclique, il faut une fois de plus veiller à un élancement de l'échantillon correct afin de limiter les effets d'extrémités. Les échantillons utilisés lors des deux tests présenteront donc un élancement similaire proche de 2,5.

Les essais effectués sont de type "cycles bas" (dizaines à centaines de cycles avant la rupture) et la forme de l'onde de chargement est linéaire. L'algorithme de chargement fonctionne comme suit :

- l'échantillon, sous contrainte initialement nulle, est chargé jusqu'à la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  .
- l'échantillon est alors déchargé jusqu'à la contrainte minimale  $\sigma_{min}$
- les cycles de chargement/déchargement entre les valeurs maximale  $\sigma_{max}$  et minimale  $\sigma_{min}$  sont ensuite répétés jusqu'à rupture de l'échantillon

Les paramètres qui varient au cours des différents essais sont donc les valeurs minimales et maximales des contraintes. Pour paramétrer les vitesses de chargement/déchargement, on impose une vitesse constante au cours de l'essai, de 0,040 mm/s de déplacement verticale du vérin (de la presse) appliquant la force. Ce vérin est commandé par un moteur pas à pas. La vitesse de déplacement verticale du vérin est "calculé à vide", c'est-à-dire lorsqu'aucun échantillons n'est placé sous la presse. L'ordinateur de contrôle associe donc une vitesse de rotation au moteur pas à pas (en °/s) en fonction de la valeur en mm/s qu'on lui impose. La vitesse de chargement/déchargement en contrainte est alors fonction du module du matériau testé.



FIGURE 22 – Dispositif du test de compression cyclique

L'échantillon est donc soumis à une force variable dans le temps, d'amplitude et de fréquences données. Les dispositifs disponibles en laboratoire ne permettent pas d'imposer une fréquence du chargement mais seulement la vitesse de rotation du moteur actionnant la presse. Ainsi, la montée ou la descente en contrainte se fera à vitesse linéaire. La FIGURE 23 représente l'évolution des contraintes appliquées durant les cycles.

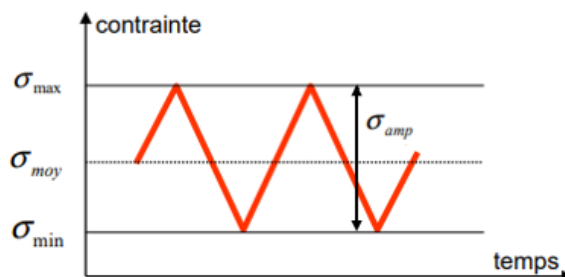


FIGURE 23 – Description du cycle de chargement en contraintes [12].

L'amplitude et la moyenne de contrainte du chargement sont données par :

$$\sigma_{amp} = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$\sigma_{moy} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

où  $\sigma_{max}$  et  $\sigma_{min}$  sont respectivement les contraintes maximale et minimale auxquelles l'échantillon est soumis durant un cycle.

La forme d'onde du chargement est donc triangulaire, les phases de charges et de décharges ont une vitesse constante et similaire (en  $MPa/s$ ). La forme d'onde triangulaire représentée ici est idéalisée. En effet, le moteur rotatif contrôlant la presse n'a pas la capacité de passer d'une vitesse positive (rotation dans un sens) à une vitesse négative (rotation dans l'autre sens) instantanément. De plus, l'algorithme de contrôle prend lui aussi un léger laps de temps pour passer d'une phase à l'autre. Ce qui conduit donc à une forme de l'onde de chargement triangulaire mais dont les crêtes sont lissées (cela peut être observé notamment à la FIGURE 30B de la SECTION RÉSULTATS).

Notons que, comme expliqué précédemment, le dispositif dispose d'un capteur de force et non de contrainte. Les dimensions de l'échantillon sont donc encodées au préalable et permettent ainsi au logiciel de calculer la contrainte comme suit :

$$\sigma = \frac{F}{\pi \times (D_0/2)^2}$$

où  $F$  est la force enregistrée par le capteur en  $N$  et  $D$  le diamètre initial de l'échantillon en  $mm$ .

De même, le capteur de déformation enregistre un déplacement vertical en  $mm$ . La déformation est alors calculée comme suit :

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$$

où  $\Delta h$  est la déformation enregistrée par le capteur en  $mm$  et  $h_0$  la hauteur initiale de l'échantillon en  $mm$ .

## 14 Caractéristiques des échantillons

Les mesures effectuées permettent de définir la masse volumique des échantillons et la vitesse ultrasonique. Les caractéristiques détaillées de chaque échantillon sont reprises dans l' ANNEXE 1.

L'analyse visuelle des échantillons permet d'observer la présence de bulles de vide sur les surfaces des échantillons. Ces bulles sont dues à la présence d'air emprisonné durant le séchage du béton. Ces bulles peuvent représenter des zones de faiblesse dans la matrice cimentaire des échantillons propices à l'apparition de fissures. Les plus importantes bulles visibles en surface peuvent atteindre des dimensions allant jusqu'à 5 mm de diamètre. Les échantillons issus des blocs 2 et 3 semblaient avoir plus de bulles de taille importante (1 à 5 mm) sur leur surface que ceux issus du bloc 1. Certaines de ces bulles (ou vides) de grande dimension semblent être dues à des granulats qui se seraient décollés de la matrice cimentaire pendant la découpe de l'échantillon.

Toutefois, on constate que la densité apparente des échantillons ne varie presque pas d'un bloc à l'autre comme le montre la TABLE 4. L'écart-type de la densité apparente observé pour tous les échantillons est d'environ  $13\text{kg}/\text{m}^3$ , soit moins de 0,5% de la densité apparente moyenne des échantillons.

La mesure sonique permet de calculer la vitesse ultrasonique au sein du matériau. Plus celle-ci sera faible, plus l'échantillon présentera des zones de vide et/ou des fissures internes. Les résultats obtenus pour ces vitesses sont tous très proches. La variation de ces vitesses au sein d'un même bloc est elle aussi très faible. L'écart-type calculé pour l'ensemble des échantillons est de  $87\text{ m/s}$ , soit 2% de la valeur moyenne.

Ces résultats permettent de conclure que les échantillons présentent tous une proportion de vide similaire. Malgré un séchage des échantillons du cube A effectué au séchoir, au contraire des cubes B2 et B3, leur densité apparente reste semblable à celle des échantillons des autres cubes. On peut dès lors en déduire que leur teneur en eau est semblable.

|                       | Moyenne                              |                            | Ecart-type                           |                            |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
|                       | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Vitesse ultrasonique (m/s) | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Vitesse ultrasonique (m/s) |
| Bloc 1                | 2215.42                              | 4383.16                    | 9.75                                 | 54.15                      |
| Bloc 2                | 2205.62                              | 4488.32                    | 5.33                                 | 32.73                      |
| Bloc 3                | 2226.27                              | 4545.45                    | 4.92                                 | 69.23                      |
| Tous les échantillons | 2215.76                              | 4468.26                    | 11.26                                | 87.12                      |

TABLE 4 – Caractéristiques des échantillons

## 15 Analyse et interprétation des résultats des essais de compression simple

### Élancement des échantillons

Comme discuté à la SECTION 13.3, il est nécessaire de veiller à ce que l'élancement des échantillons soumis à un essai de compression simple soit proche de 2,5. L'élancement des échantillons utilisés est le suivant :

$$\text{élancement} = \frac{\text{hauteur}}{\text{diamètre}} = \frac{86}{40.5} = 2.12$$

Bien que cet élancement ne soit pas égal à 2.5, il en est suffisamment proche que pour considérer que les perturbations des extrémités n'affectent pas la zone médiane des échantillons et que la résistance obtenue n'est pas significativement surestimée.

### 15.1 Résultats

Une seule compression simple a été effectuée sur les échantillons du premier bloc. Pour les 2 autres blocs, 2 essais de compression simple ont été menés.

La résistance après l'essai A1, (1er essai effectué) a donc servi de calibrage pour les essais cycliques. En effet, en connaissant une bonne estimation de la résistance en compression des échantillons réservés à l'essai cyclique, on peut ainsi prévoir quel niveau de charge appliquer pour obtenir des résultats intéressants.

La TABLE 5 résume les résultats des différents essais de compression simple. L'essai B3B2 a été mené dans un contexte différent des autres et est détaillé à la SECTION 39.

La résistance moyenne obtenue pour les 5 essais est de 62,58 MPa. La fiche technique du béton fournie renseignait la résistance à 28 jours comme étant C50/C60. L'âge du béton testé étant de 6 mois (supérieur à 28 jours), la résistance moyenne obtenue semble cohérente.

Cependant, on constate une assez large dispersion des résultats (écart-type de 5 MPa) ainsi qu'une différence en fonction du bloc dont provient l'échantillon. Comme mentionné précédemment, l'âge du béton supérieur à 6 mois, ne devrait pas être le paramètre à l'origine d'une telle dispersion entre les échantillons. Les hypothèses d'une telle dispersion des résultats sont présentées plus loin dans cette section.

15 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES ESSAIS  
DE COMPRESSION SIMPLE

| Compression simple |              |          |                                    |       |                                       |      |       |  |      |
|--------------------|--------------|----------|------------------------------------|-------|---------------------------------------|------|-------|--|------|
| Dénomination       | S1 max (Mpa) | Ed (Gpa) | Moyenne de la contrainte max (Mpa) |       | Ecart-type de la contrainte max (Mpa) |      |       |  |      |
| A1                 | 56.30        | 14.72    | 56.30                              | 62.58 | /                                     | 5.03 |       |  |      |
| B2H1               | 63.43        | 16.38    | 60.39                              |       | 3.04                                  |      |       |  |      |
| B2B1               | 57.36        | 16.07    |                                    |       | 67.89                                 |      | 1.11  |  |      |
| B3H1               | 69.00        | 15.06    | 67.89                              |       |                                       |      | 1.11  |  |      |
| B3B1               | 66.78        | 16.89    |                                    |       |                                       |      | 67.89 |  | 1.11 |
| B3B2               | 75.00        | 16.9     |                                    |       |                                       |      |       |  |      |

TABLE 5 – Résultats des essais de compression simple

La FIGURE 24A montre l'évolution temporelle de la contrainte de compression et la FIGURE 39B montre l'évolution temporelle de la déformation axiale de l'échantillon. A partir de ces deux séries de données, la relation "contrainte-déformation" peut être tracée (FIGURE 25). On constate que ces données brutes doivent être en partie "nettoyées". En effet, l'augmentation de la contrainte ne démarre pas au même moment pour les différents essais, le capteur de déformation est parfois réinitialisé à zéro après un léger laps de temps.

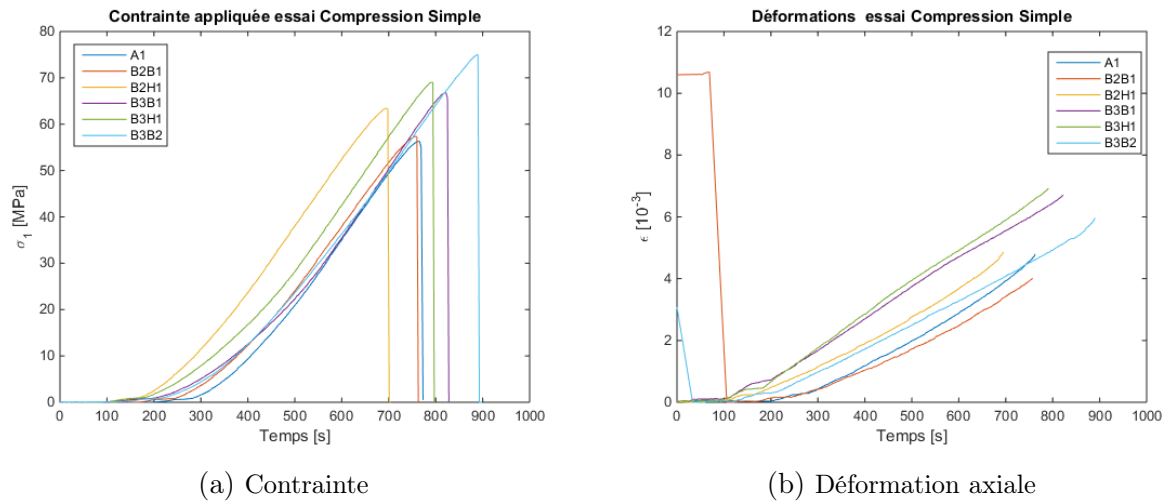


FIGURE 24 – Résultats des compressions simples

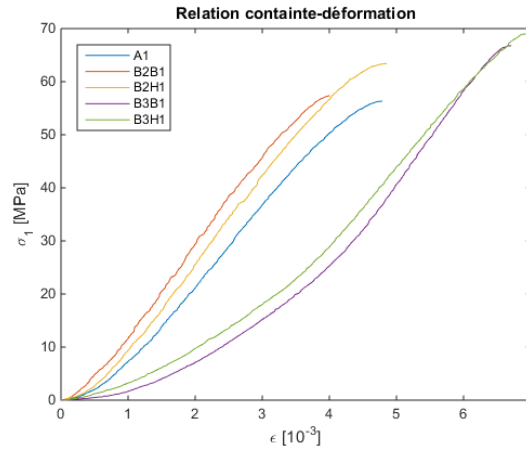


FIGURE 25 – Relation Contrainte-Déformation

Les tangentes à la partie quasi-linéaire de la courbe  $\sigma - \epsilon$  ont été tracées à la FIGURE 26. Le module de Young  $E_d$  de chaque échantillon peut alors être calculé en mesurant la pente de ces tangentes. La moyenne de ces modules ainsi obtenue est de 15,8 GPa (écart-type = 0.82 GPa).

La première partie de l'essai de compression simple (sur l'intervalle de contrainte  $< 20$  MPa) semble être influencée par des déplacements parasites dus à des mouvements du montage. Afin de remédier à cela durant l'analyse des résultats, les manipulations suivantes ont été effectuées : la tangente à la courbe sur le graphe a été prolongée jusqu'à l'abscisse ; la partie inférieure de la courbe  $\sigma - \epsilon$  a été substituée par cette tangente ; le pied de la tangente est alors considéré comme l'origine de la courbe avec une déformation valant zéro. Cette manipulation a été exécutée pour chacun des essais et le résultat est présenté à la FIGURE 27.

On observe une dispersion moins large des valeurs de la déformation à la rupture et plus sensée. Les valeurs de ces déformations sont reprises à la TABLE ??.

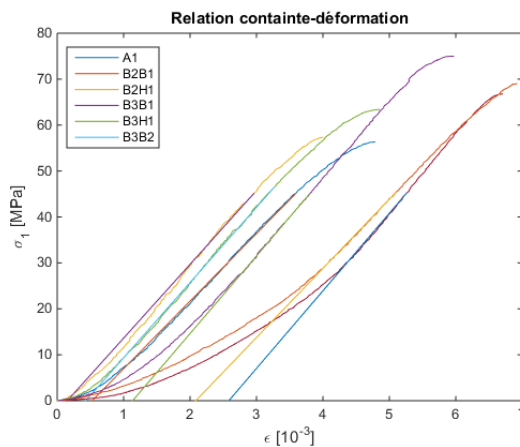


FIGURE 26 – Tangentes à la courbe  $\sigma - \epsilon$

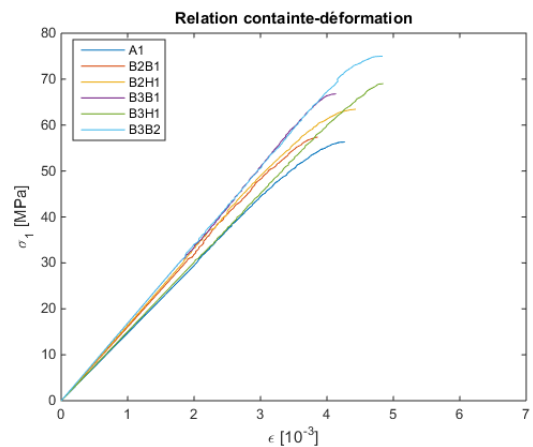


FIGURE 27 – Relation  $\sigma - \epsilon$

## 15.2 Analyse des échantillons post-mortem

Les échantillons soumis à compression simple ont présenté deux types de ruptures différents. Ces deux cas sont illustrés à la FIGURE 28 pour deux échantillons, l'ANNEXE 3 présente les ruptures de l'ensemble des échantillons.

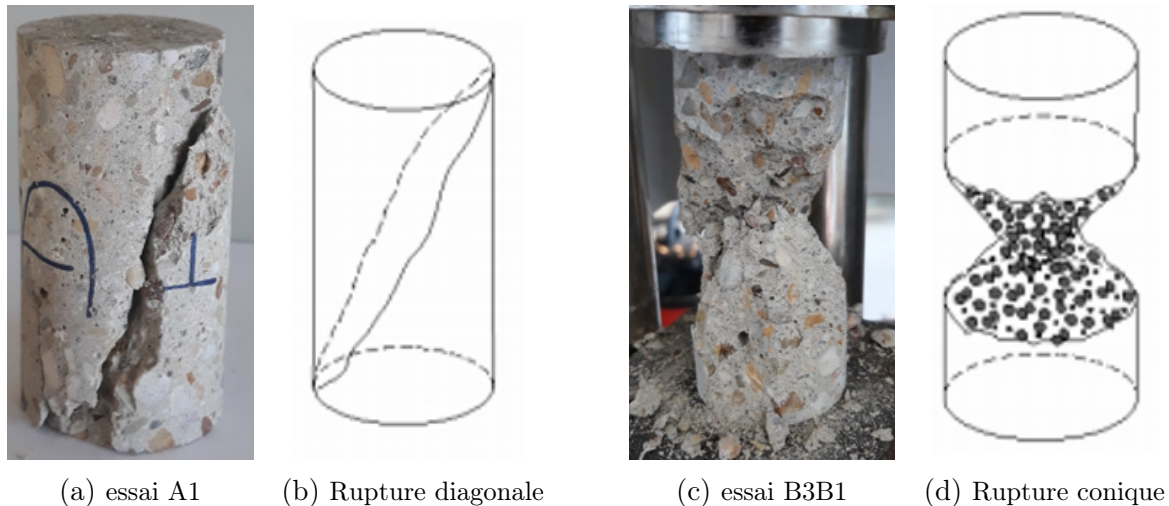


FIGURE 28 – Ruptures des essais de compression simple

Pour les échantillons B2H1, B3H1 et B3B1, la rupture est de forme conique, leur résistance moyenne est de 66 MPa. Les échantillons A1 et B2B1 présentent un plan de rupture oblique, leur résistance moyenne est de 56.5 MPa.

Selon la norme NF EN 12390-3, lors d'essais de compression simple sur éprouvette cylindrique, l'analyse du type de rupture obtenue donne une information sur le déroulement de l'essai. Les ruptures dites correctes sont de forme conique, tandis que celles dites incorrectes sont de forme diagonale (l'ANNEXE 2 présente les différents types de ruptures correctes et incorrectes). Une rupture incorrecte peut être l'indice d'un mauvais positionnement de l'éprouvette sur la machine (problème de centrage), d'une application incorrecte de l'effort (fonctionnement de la rotule) ou d'une autre anomalie dans l'application du mode opératoire.

Lors d'expérimentations sur des bétons, il a été observé qu'à partir d'un certain niveau d'excentrement de l'application de la charge, apparaissent des ruptures incorrectes de l'échantillon (diagonales), accompagnées d'une mesure de la résistance sous-estimée de l'ordre de 10%. Ce niveau d'excentrement devient encore plus critique pour les bétons à haute résistance (12,5 mm pour béton 30 MPa, 6 mm pour béton 115 MPa) [44]. Le mode de rupture n'est donc plus causé par excès de compression mais par une combinaison de compression et de flexion.

Les échantillons A1 et B2B1 présentant une rupture diagonale, ont enregistré une résistance inférieure de l'ordre de 15% par rapport aux échantillons dont la rupture est correcte. On peut donc supposer que les échantillons A1 et B2B1 ont subi un excentrement de l'application de la charge trop important menant à une sous-estimation de leur résistance.

Une importante dispersion des résultats des essais de compression simple peut être due à divers paramètres. Outre une anomalie de l'effort appliqué, la qualité des éprouvettes peut aussi être remise en cause. Le diamètre des échantillons utilisés semble être en partie responsable de cette forte dispersion des résultats. En effet, il est conseillé, pour des éprouvettes carottées sur cube, d'utiliser un diamètre minimum de 50 mm. Or les échantillons utilisés ont été carottés avec un diamètre de 40 mm, et ce pour deux raisons :

- produire un nombre d'échantillons suffisant à partir des 3 cubes de béton disponibles.
- permettre d'appliquer une contrainte suffisante lors de l'essai cyclique. Le matériel utilisé ne peut pas appliquer une charge supérieure à 17 tonnes ( $\approx 170$  kN).

D'autre part, le diamètre maximal des granulats du béton est de 10 mm, ce qui représente  $1/4$  du diamètre de l'échantillon. La proportion ciment/granulats sur la section transversale peut donc varier. Ces granulats peuvent présenter des points de faiblesse au sein de l'échantillon ou des zones de concentration de contraintes.

Les résultats des essais cycliques sont donc à analyser en gardant à l'esprit les effets probables d'une mauvaise application de la charge et de défauts liés aux dimensions de l'échantillon.

## 16 Analyse et interprétation des résultats des essais cycliques

### 16.1 Présentation des différents chargements testés

Durant la première partie de la campagne, quatre chargements différents ont été exécutés sur les échantillons des blocs A et B2. Ces chargements ont été répétés deux à quatre fois chacun.

Sachant que la presse n'était pas prévue initialement pour des essais cycliques et ayant des craintes sur un possible "bug" dans l'enregistrement des données au cours de l'essai, nous avons opté pour des chargements avec comme objectif la réalisation d'essais relativement courts dans le temps. Cela explique aussi le choix de "cycler" à haut niveau de contrainte. Suite à la première compression simple effectuée sur l'échantillon A1 de résistance de 56 MPa, les bornes maximales 40 et 45 MPa ont été désignées. Celles-ci représentent un niveau de chargement de 70% et 80% par rapport à la résistance. Cycler à un niveau inférieur aurait eu pour conséquence des essais de trop longue durée. En effet, laisser tourner la presse longtemps sans surveillance, surtout dans ce contexte où le bâtiment était peu occupé, n'aurait pas été prudent. A l'inverse, l'utilisation d'une contrainte maximale trop proche de la résistance de l'échantillon ne semblait pas idéale non plus et aurait donné lieu à des essais trop courts et peut être plus affectés par de possibles défauts de l'échantillon ou de l'application de la charge.

Au final, les bornes de ces chargements choisies sont les suivantes : "30-40" MPa, "35-40" MPa, "35-45" MPa et "40-45" MPa. Le choix de ce chargement permet une comparaison de l'effet de la contrainte maximale à amplitude constante et une comparaison de l'effet de l'amplitude à contrainte maximaux constante.

Dans la seconde partie de la campagne (bloc 3), des chargements différents ont été testés.

| Contrainte appliquée (Mpa) | Echantillon | N° cycles à la rupture (.) |
|----------------------------|-------------|----------------------------|
| 35/40                      | A6          | 171                        |
|                            | B2C1        | 762                        |
| 30/40                      | A4          | 71                         |
|                            | A5          | 7                          |
|                            | B2B2        | 78                         |
| 40/45                      | A2          | 399                        |
|                            | A7          | 9                          |
|                            | B2C3        | 106                        |
| 35/45                      | A3          | 48                         |
|                            | A8          | 2                          |
|                            | B2C2        | 189                        |
|                            | B2H2        | 99                         |
| 10/20                      | B3B2        | / (>8400)                  |

TABLE 6 – Chargement appliqué durant chacun des essais de compression cyclique

La TABLE 6 synthétise les différents chargements et le nombre de cycles réalisés avant la rupture de l'échantillon. Les valeurs de contraintes indiquées ici sont celles déterminant les bornes de l'algorithme de chargement utilisé par la machine. La durée de vie des échantillons sera définie comme étant le nombre de cycles réalisés avant la rupture de l'échantillon.

On peut constater que la durée de vie (nombre de cycles avant la rupture) diffère d'après le chargement appliqué, le niveau de contrainte maximum et l'amplitude de contrainte.

Cette durée de vie varie aussi (et parfois très fortement) d'un échantillon à l'autre pourtant soumis à des conditions de chargement semblables. Les caractéristiques physiques des échantillons illustrés à la SECTION 14 (dimension, densité apparente, vitesse ultrasonique) sont presque constantes pour tous les échantillons et ne semblent pas être les paramètres pouvant mener à de tels écarts de durée de vie.

Les sections suivantes ont donc pour but d'analyser les résultats de ces essais en détail afin de dégager des hypothèses qui expliquent les raisons d'une telle dispersion des résultats de la durée de vie des échantillons.

## 16.2 Résultats types

La FIGURE 29 présente les résultats types collectés à l'issue des essais cycliques. L'essai détaillé ici est l'essai A4 dont le chargement oscillait entre 30 et 40 MPa.

Comme on peut le constater sur la FIGURE 30A, la contrainte n'a pas été strictement bornée entre 30 et 40 MPa, mais ces valeurs ont été légèrement dépassées au cours des cycles. Cela est dû à l'imprécision de contrôle de la machine et à son mode de fonctionnement, détaillé à la SECTION 16.3.

On notera aussi que la forme de l'onde de chargement est bien linéaire durant les phases de charge et de décharge mais que la transition entre celles-ci n'est pas instantanée et provoque donc un aplatissement des crêtes, visible à la FIGURE 30.

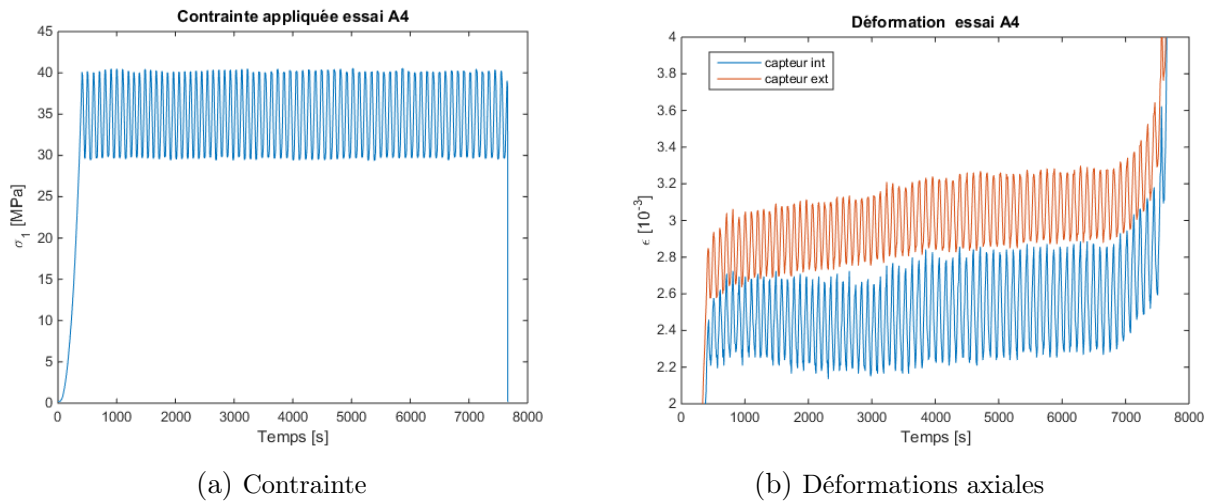


FIGURE 29 – Résultats des compressions cycliques

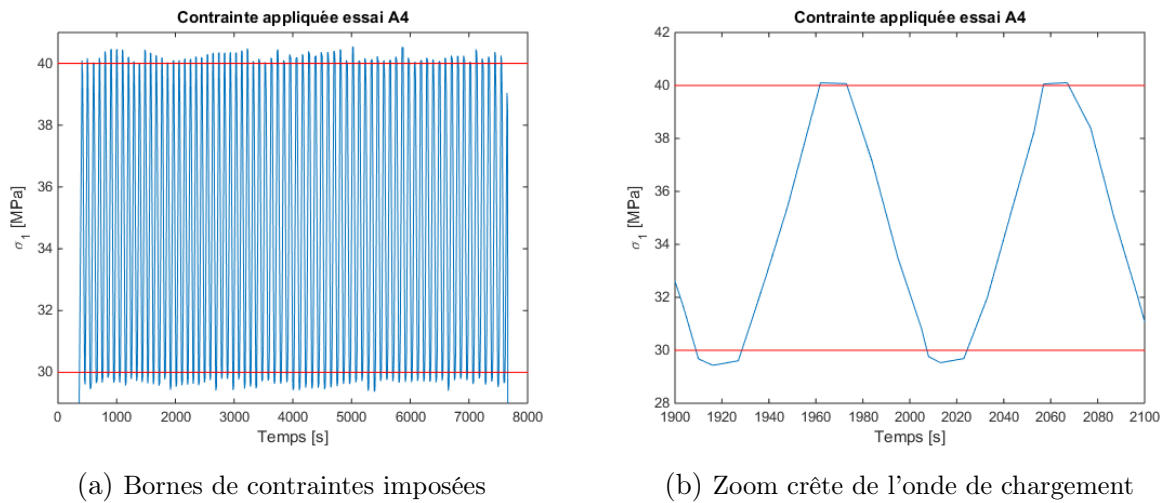


FIGURE 30 – Zooms évolution des contraintes

En ce qui concerne l'évolution de la déformation axiale, celle-ci est mesurée grâce à deux capteurs placés de part et d'autre de l'échantillon. Ces capteurs sont nommés dans le fichier résultats, capteurs "ext" et "int". Les courbes obtenues à l'aide des deux capteurs sont visibles à la FIGURE 29B. Comme on le constate, la forme générale de l'évolution de la déformation suit bien une forme de "S-inversé" comme attendu. On constate, pour cet essai A4, que les deux capteurs fournissent une allure de la déformation semblable mais avec néanmoins un écart entre les valeurs enregistrées. Après l'analyse des résultats des différents essais, il ressort que le capteur "ext" présente à chaque fois une allure en "S-inversé" avec des valeurs cohérentes, ce qui n'est en revanche pas le cas du capteur "int". Suite à une analyse en profondeur des données de ce capteur, il ressort qu'il est fort probable que celui-ci présente un dysfonctionnement ayant tendance à fausser les résultats. Par exemple, lorsqu'on étudie la courbe  $\sigma - \epsilon$ , tracée à partir de ce capteur, la pente de la première mise en charge apparaît presque verticale, laissant supposer des valeurs du module excessivement élevées. Il a donc été décidé de ne pas utiliser la déformation moyenne des deux capteurs mais uniquement les déformations enregistrées par le capteur "ext" et de rejeter celles du capteur "int".

### 16.3 Précision de la presse

La presse utilisée est à la base conçue pour accueillir une cellule triaxiale. Celle-ci n'étant pas adaptée aux essais cycliques, il a été décidé d'utiliser la presse en compression axiale uniquement. Un montage a dû être réalisé, car l'espace sous la presse supposé accueillir la cellule triaxiale étant d'une hauteur importante, il a fallu placé plusieurs éléments les uns au-dessus des autres. Ce montage du support est visible à la FIGURE 31. Bien qu'un soin particulier ai été apporté à la réalisation de ce montage, il n'est pas exclu que celui-ci puisse subir de légers mouvements parasites.

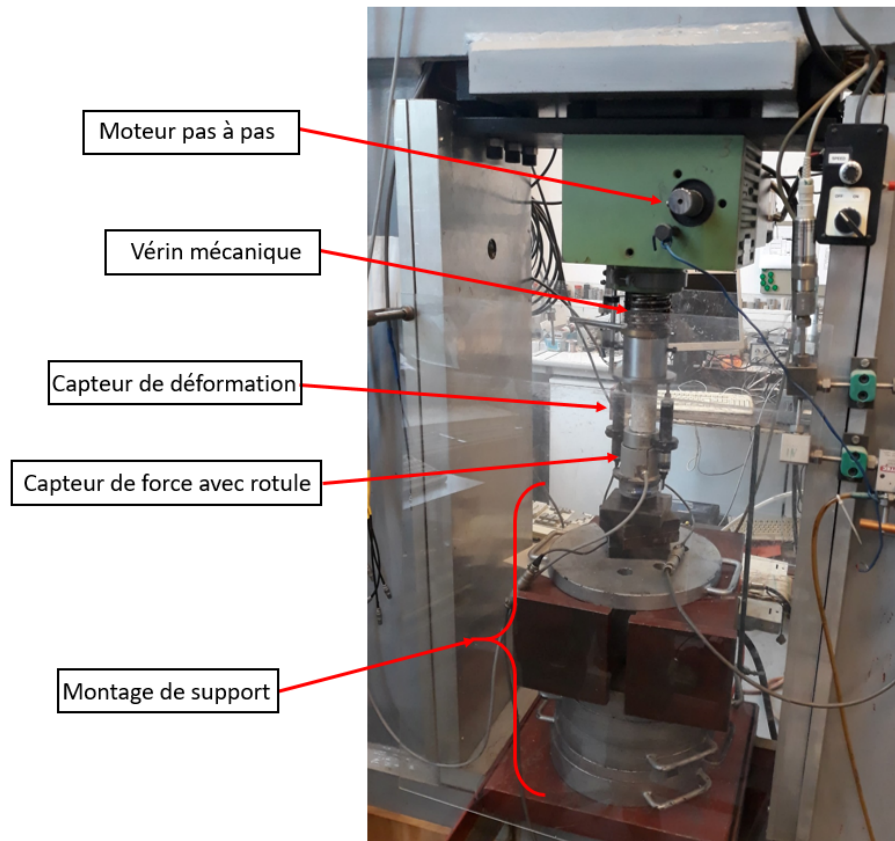


FIGURE 31 – Montage cyclique

La presse peut monter jusqu'à une charge  $F$  de 17 tonnes. En connaissant la contrainte cible à appliquer  $P$ , le diamètre maximal de l'échantillon ( et donc sa section  $S$ ) peut alors être calculé par la relation suivante :

$$P = \frac{F}{S}$$

Cependant, la presse est prévue pour un chargement statique. Lorsqu'elle est utilisée en dynamique (cyclique), le couple moteur ne permet plus d'atteindre les 17 tonnes. La charge maximale applicable diminue alors avec la vitesse de chargement comme le montre la FIGURE 32.

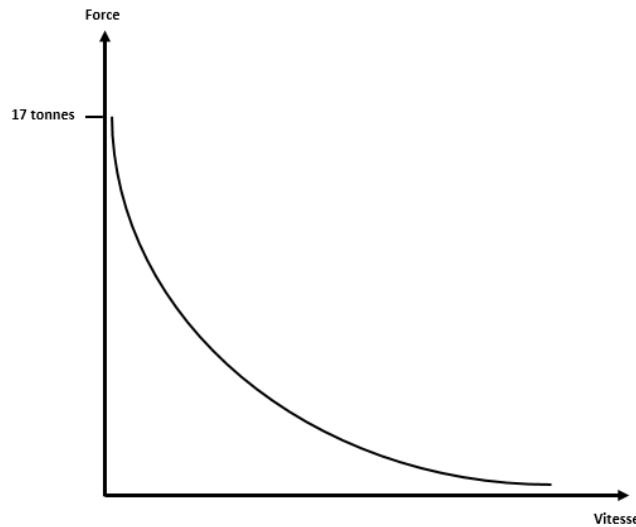


FIGURE 32 – Effet couple moteur

Les capteurs utilisés (déformation et force) sont du type capteur à pont complet. La précision des capteurs de déformation est de 0,1% et le capteur de force permet d'obtenir une précision de l'ordre de 0.1 à 0.2 MPa.

Comme le montre la FIGURE 33, les capteurs de déformation sont positionnés de part et d'autre de l'échantillon, ils sont attachés en base au capteur de contrainte qui est positionné sur une rotule. La tête des capteurs (piston) est en contact avec un disque métallique qui est lui-même en contact avec l'échantillon et permet de lui transmettre la contrainte. Lors de l'essai, des déplacements "intempestifs" de la rotule et du disque peuvent survenir et donc impacter les mesures, surtout en début de test.

Les mesures sont enregistrées toutes les 10 secondes. La puissance de l'ordinateur associé à la presse étant limitée, il ne peut pas stocker et gérer un nombre trop important de données.

Comme constaté à la section 16.2, les crêtes sont aplaties et les bornes de contraintes sont souvent dépassées. L'ordinateur enregistre une mesure de la force (et déduit la contrainte en fonction de la valeur de la section implémentée au préalable) toutes les dix secondes. La phase en cours (chargement ou déchargement) s'arrête lorsque l'ordinateur enregistre une valeur supérieure à la borne  $\sigma_{max}$  ou inférieure à la borne  $\sigma_{min}$ . Donc si la borne supérieure est limitée à 40 MPa et que l'ordinateur enregistre une valeur de 39.9 MPa, la phase de chargement va se poursuivre or, à la prochaine mesure, soit dix secondes plus tard, la contrainte peut avoir dépassé la valeur de 40 MPa, par exemple 40.8 MPa (ou autre valeur supérieure à 40 MPa). Ainsi, l'enregistrement des données toutes les 10 secondes et non en continu explique pourquoi la contrainte dépasse les bornes imposées et que ce dépassement n'est pas constant.

Après l'enregistrement de la mesure par le capteur puis le traitement de la donnée pour constater si la borne est dépassée ou non, ce qui prend déjà un léger laps de temps, l'algorithme doit changer de fichier afin de lire celui qui contient les informations de la nouvelle phase de chargement à exécuter, puis le moteur doit ralentir pour s'arrêter et redémarrer sa rotation dans l'autre sens. L'ensemble de ces actions prend plusieurs secondes et explique pourquoi les crêtes sont aplaties.

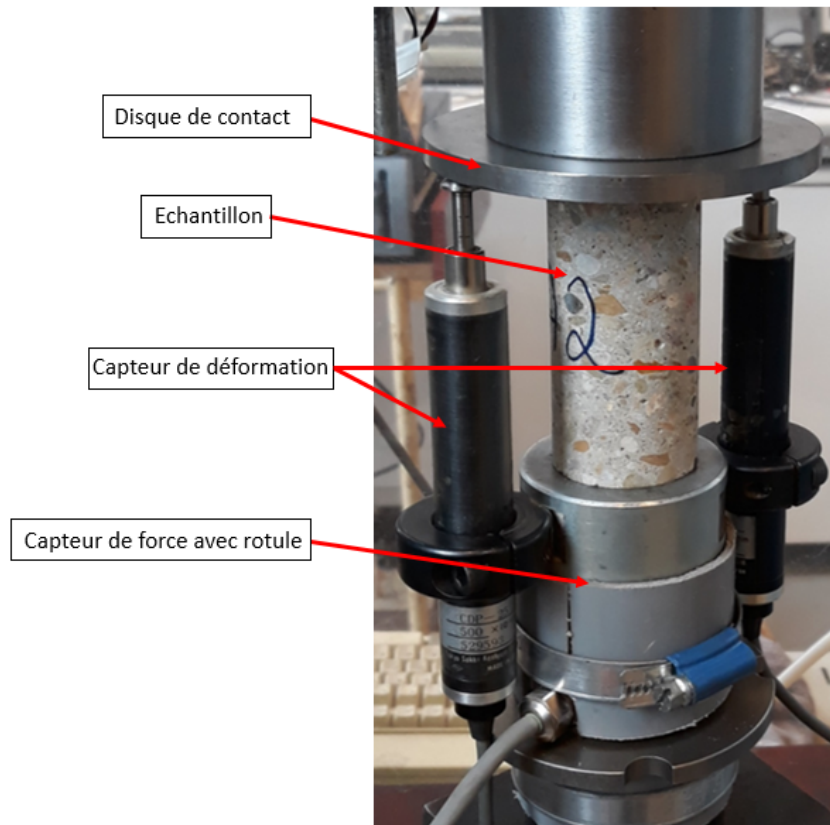


FIGURE 33 – Zoom montage cyclique

## 16.4 Comparaison des essais répétés

Les résultats des essais des quatre premiers chargements montrent des durées de vie fluctuant très fortement. En effet, l'écart-type de la durée de vie (TABLE 7) sous un même chargement varie entre 32 et 295 cycles. Les résultats de ces essais (évolution de la déformation et courbe  $\sigma - \epsilon$ ) sont illustrés aux ANNEXES 5 et 6.

| Contrainte appliquée (Mpa) | Echantillon | N° cycles à la rupture (.) | Ratio durée de vie (max/min) (.) | Durée de vie moyenne (nbr de cycles) | Ecart-type (.) |
|----------------------------|-------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| 35/40                      | A6          | 171                        | 4.5                              | 466.5                                | 295.5          |
|                            | B2C1        | 762                        |                                  |                                      |                |
| 30/40                      | A4          | 71                         | 11.1                             | 52.0                                 | 31.9           |
|                            | A5          | 7                          |                                  |                                      |                |
|                            | B2B2        | 78                         |                                  |                                      |                |
| 40/45                      | A2          | 399                        | 44.3                             | 171.3                                | 165.8          |
|                            | A7          | 9                          |                                  |                                      |                |
|                            | B2C3        | 106                        |                                  |                                      |                |
| 35/45                      | A3          | 48                         | 94.5                             | 84.5                                 | 69.4           |
|                            | A8          | 2                          |                                  |                                      |                |
|                            | B2C2        | 189                        |                                  |                                      |                |
|                            | B2H2        | 99                         |                                  |                                      |                |

TABLE 7 – Durée de vie des essais répétés

Comme expliqué à la SECTION 16.3, les bornes de contraintes sont dépassées pendant l'essai. Il peut être intéressant de vérifier si les dépassements observés sont homogènes entre les essais et quelle est la contrainte maximale réellement atteinte. La TABLE 8 renseigne ces valeurs. On constate que l'amplitude moyenne réelle du chargement diffère peu d'un essai à l'autre, de même pour la contrainte maximum appliquée. D'autre part, on ne peut pas dresser de relation entre ces valeurs et la durée de vie enregistrée. La différence de chargement ne semble donc pas être le facteur responsable d'une telle distribution de la durée de vie.

| Caractéristiques de l'essai |      |                      |                      |                  |                      |                      |                     |                            |
|-----------------------------|------|----------------------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|
|                             |      | Min Borne Inf. (Mpa) | Max Borne Sup. (Mpa) | Max Ampli. (Mpa) | Moy Borne Inf. (Mpa) | Moy Borne Sup. (Mpa) | Amplitude Moy (Mpa) | N° cycles à la rupture (.) |
| 35/40                       | A6   | 33.71                | 40.847               | 7.02             | 34.25                | 40.52                | 6.27                | 171                        |
|                             | B2C1 | 33.75                | 40.842               | 6.89             | 34.4                 | 40.45                | 6.05                | 762                        |
| 30/40                       | A4   | 29.37                | 40.53                | 11               | 29.63                | 40.3                 | 10.67               | 71                         |
|                             | A5   | 29.25                | 41.01                | 11.63            | 29.23                | 40.61                | 11.18               | 7                          |
|                             | B2B2 | 29.5                 | 40.42                | 10.79            | 29.74                | 40.28                | 10.54               | 78                         |
| 40/45                       | A2   | 38.88                | 46                   | 7.05             | 39.21                | 45.64                | 6.43                | 399                        |
|                             | A7   | 38.56                | 45.9                 | 7.33             | 39.03                | 45.6                 | 6.58                | 9                          |
|                             | B2C3 | 39.25                | 45.5                 | 6.22             | 39.48                | 45.3                 | 5.81                | 106                        |
| 35/45                       | A3   | 33.79                | 46.18                | 11.86            | 34.31                | 45.66                | 11.35               | 48                         |
|                             | A8   | 33.72                | 45.37                | 11.65            | 33.9                 | 45.67                | 11.46               | 2                          |
|                             | B2C2 | 34.18                | 45.99                | 11.58            | 34.45                | 45.45                | 11                  | 189                        |
|                             | B2H2 | 34.2                 | 47.12                | 12.5             | 34.48                | 45.63                | 11.16               | 99                         |

TABLE 8 – Illustration du dépassement des bornes de chargement

### 16.4.1 Effet contrainte maximum

La TABLE 9 et la FIGURE 34 compare les résultats de la durée de vie par rapport à la contrainte maximale appliquée à amplitude constante. En comparant les essais entre 30-40 MPa et 35-45 MPa, on constate que la durée de vie a augmenté alors que la contrainte augmente elle aussi. Pour les essais entre 35-40 MPa et 40-45 MPa, à l'inverse, la durée de vie diminue lorsque la contrainte augmente ce qui semble avoir plus de sens physique.

|                                                                                            |                                                                                   |                  |         |                                                                                     |                  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--|
|                                                                                            | Contrainte maximale constante                                                     |                  |         |                                                                                     |                  |  |
| A<br>m<br>p<br>l<br>i<br>t<br>u<br>d<br>e<br><br>c<br>o<br>n<br>s<br>t<br>a<br>n<br>t<br>e | 30/40 Mpa                                                                         |                  |         | 35/40 Mpa                                                                           |                  |  |
|                                                                                            | Echantillon                                                                       | Nombre de cycles |         | Echantillon                                                                         | Nombre de cycles |  |
|                                                                                            | A4                                                                                | 71               |         | A6                                                                                  | 171              |  |
|                                                                                            | A5                                                                                | 7                |         | B2C1                                                                                | 762              |  |
|                                                                                            | B2B2                                                                              | 78               |         |                                                                                     |                  |  |
|                                                                                            |                                                                                   |                  |         |                                                                                     |                  |  |
|                                                                                            | Moyenne                                                                           | 52               | Moyenne | 466.5                                                                               |                  |  |
|                                                                                            |  |                  |         |  |                  |  |
|                                                                                            | 35/45 Mpa                                                                         |                  |         | 40/45 Mpa                                                                           |                  |  |
|                                                                                            | Echantillon                                                                       | Nombre de cycles |         | Echantillon                                                                         | Nombre de cycles |  |
|                                                                                            | A3                                                                                | 48               |         | A2                                                                                  | 399              |  |
|                                                                                            | A8                                                                                | 2                |         | A7                                                                                  | 9                |  |
|                                                                                            | B2H2                                                                              | 99               |         | B2C3                                                                                | 106              |  |
|                                                                                            | B2C2                                                                              | 189              |         |                                                                                     |                  |  |
|                                                                                            | Moyenne                                                                           | 84.5             | Moyenne | 171.3                                                                               |                  |  |

TABLE 9 – Influence de la contrainte maximum sur la durée de vie

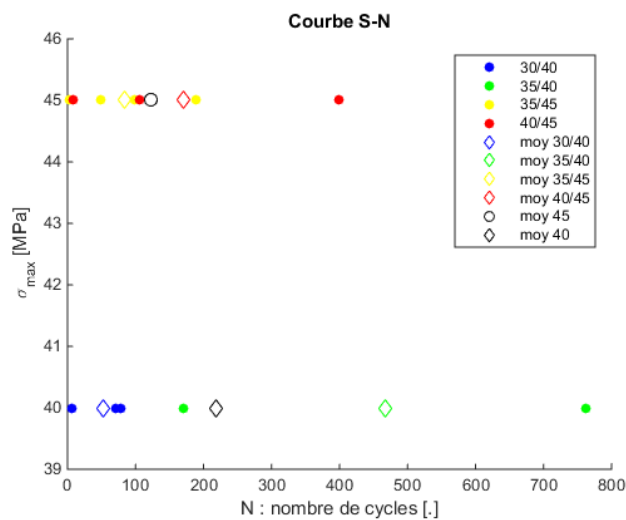


FIGURE 34 – Courbe SN en fonction de la contrainte maximale

### 16.4.2 Effet amplitude de chargement

La TABLE 10 et la FIGURE 35 illustrent la relation entre la durée de vie et l'amplitude de contrainte à contrainte maximale constante. On remarque que lorsque l'amplitude augmente, la durée de vie diminue. Un chargement oscillant entre 30 et 40 MPa, soit avec une contrainte moyenne de 35 MPa, est plus endommageant qu'un chargement 35-40 MPa dont la valeur moyenne est de 37.5 MPa. Notons toutefois que la vitesse de charge et décharge est constante et fixée à 0.4 mm/s du déplacement du vérin (voir SECTION 16.3). Ainsi lorsque l'amplitude de chargement est plus grande, 10 MPa au lieu de 5 MPa, les phases de charge et de décharge sont toutes deux plus longues dans le temps. La durée d'un cycle en chargement 30-40 MPa est donc de l'ordre de 2 fois celle du chargement 35-40 MPa.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                               |  |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--|--|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Contrainte maximale constante |  |  |  |
| Amplitude<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br> |                               |  |  |  |

TABLE 10 – Influence de l'amplitude de contrainte sur la durée de vie

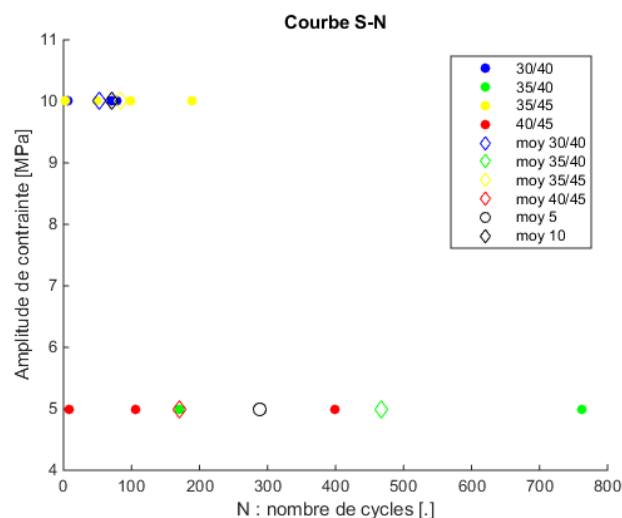


FIGURE 35 – Courbe SN en fonction de l'amplitude

## 16.5 Relation contrainte-déformation

La FIGURE 36 présente la relation contrainte-déformation des essais sous chargement 30-40 MPa. Le comportement de la courbe  $\sigma - \epsilon$  étant très similaire pour les chargements 35-40, 35-45 et 40-45 MPa, ceux-ci ne sont pas représentés ici mais sont disponibles aux ANNEXES 6 et 7.

La FIGURE 37 illustre et détaille trois cycles en particulier : le premier, le dernier et le cycle du milieu (situé à la moitié de la durée de vie).

Tout d'abord, on constate que la pente de la première mise en charge est très similaire pour les trois échantillons. Le module considéré comme étant la pente de la partie linéaire de cette courbe est donc très similaire ( $E_{A4} = 20.74$  GPa,  $E_{A5} = 20.29$  GPa,  $E_{B2B2} = 19.96$  GPa). L'essai A5 ayant rompu après uniquement 7 cycles, alors que A4 et B2B2 ont rompu après respectivement 71 et 78 cycles, a donc un module initial similaire aux deux autres et ne devrait de fait pas avoir une résistance inférieure. La rupture prématurée de l'échantillon semble dès lors relever d'un défaut local ayant entraîné un accroissement plus rapide d'une ou de plusieurs micro-fissures (effet de la dispersion des granulats et des pores).

L'écart de déformation obtenu à la fin de la première mise en charge entre l'échantillon A5 et A4 est  $\approx 0,1 \times 10^{-3}$  (A5 :  $2.666 \times 10^{-3}$ , B2B2  $2.798 \times 10^{-3}$ ). Cet écart est donc très faible et permet de considérer que les trois échantillons ont été déformés pareillement durant la première mise en charge.

Par contre, la déformation à la rupture de l'échantillon A5 est bien inférieure à celle des autres échantillons (A5 :  $3.915 \times 10^{-3}$ , A4 :  $4.344 \times 10^{-3}$ , B2B2 :  $4.235 \times 10^{-3}$ ). La rupture de A5 est donc atteinte plus tôt en terme de déformation.

Concernant les cycles, on constate qu'ils ont une légère tendance à s'élargir durant le test, puis que cette élargissement augmente fortement sur les derniers cycles. Les cycles ont aussi tendance à s'aplatir (diminution de la pente et donc du module), mais cette aplatissement est très faible. Cette évolution du module est analysée plus en détail à la SECTION 16.6.

Comme indiqué précédemment, le signal de chargement possède des crêtes "aplaties" formant presque de courts "plateaux" de contrainte entre les changements de phases du chargement. Sur les plateaux supérieurs (transition charge vers décharge) la déformation a tendance à augmenter tandis que sur les plateaux inférieurs (transition décharge vers charge) la déformation a tendance à diminuer. La déformation augmente donc d'abord sur le plateau supérieur, puis diminue durant la phase de décharge et durant le "plateau" de contrainte inférieur. La déformation obtenue alors à cet instant, juste à l'initiation de la passe de chargement, est en général inférieure à la déformation en début de cycle. La pente de la phase de chargement est plus aplatie que celle de la phase de déchargement et entraîne donc un gain de déformation plus important. Le bilan final sur le cycle est une augmentation de la déformation. Certains cycles ont un bilan de déformation négatif mais ces cycles représentent seulement une petite minorité.

Lors des derniers cycles de l'essai, l'évolution de la déformation peut parfois différer. Durant la première partie de la phase de décharge tout comme durant le plateau inférieur, la déformation a, cette fois, tendance à augmenter.

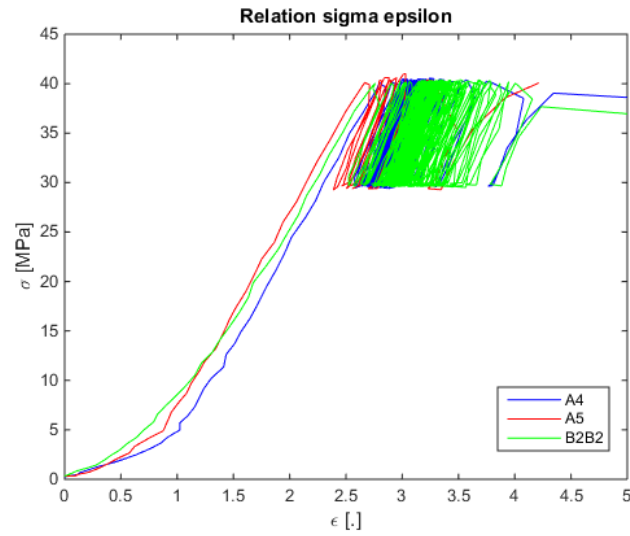


FIGURE 36 – Courbe  $\sigma - \epsilon$  essais 30-40 MPa

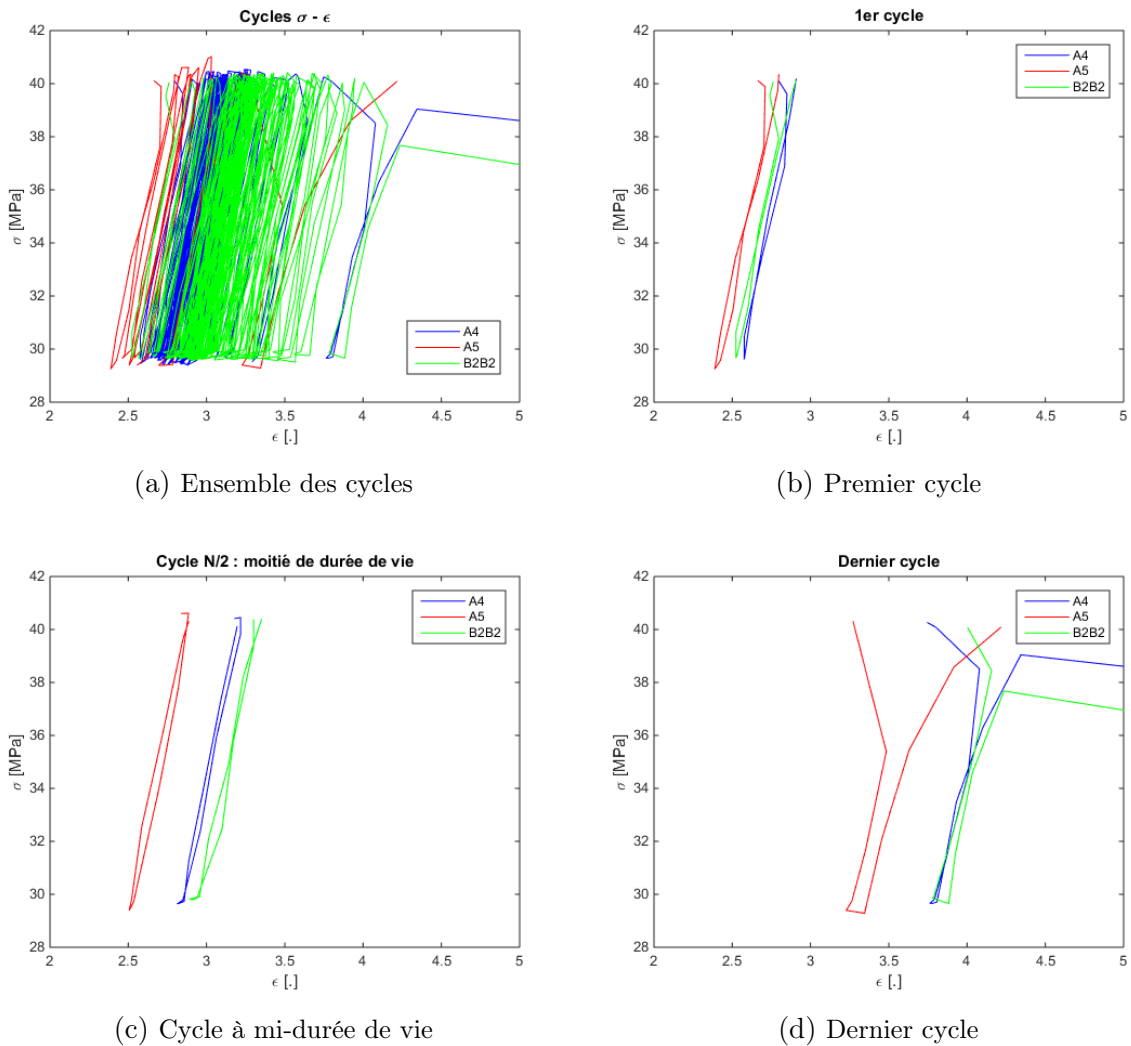


FIGURE 37 – Détails des cycles  $\sigma - \epsilon$  des essais 30-40 MPa

## 16.6 Analyse des modules

La TABLE 11 illustre les valeurs des modules des différents essais calculées sur la pente de la première mise en charge de la courbe  $\sigma - \epsilon$  (4<sup>ème</sup> colonne). On constate que ces modules varient entre environ 17 et 22 GPa, ce qui est un peu supérieur aux modules mesurés lors des compressions simples variant entre 15 et 16 GPa. On notera que l'échantillon A2 se dégage des autres avec une valeur de 30 GPa pour ce module car il a été chargé à basse contrainte sur plusieurs cycles avant la réalisation de son essai à 40-45 MPa rapporté ici. La pente sur laquelle le module est calculé n'est donc pas vraiment sa toute première mise en charge. Par contre, le module sur cette première montée en charge du pré-test vaut 18 GPa, ce qui est compris dans le même intervalle que pour les autres essais.

| Contrainte appliquée (Mpa) | Echantillon | N° cycles à la rupture (.) | Module 1ere mise en charge (Mpa) | Module Décharge cycle 1 (Mpa) | Module Charge cycle 1 (Mpa) |
|----------------------------|-------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 35/40                      | A6          | 171                        | 21.90                            | 43.45                         | 30.20                       |
|                            | B2C1        | 762                        | 21.86                            | 32.14                         | 26.23                       |
| 30/40                      | A4          | 71                         | 20.44                            | 33.60                         | 31.90                       |
|                            | A5          | 7                          | 17.22                            | 36.21                         | 27.11                       |
|                            | B2B2        | 78                         | 19.00                            | 30.26                         | 24.75                       |
| 40/45                      | A2          | 399                        | 34.08                            | 30.25                         | 90.00                       |
|                            | A7          | 9                          | 16.81                            | 50.51                         | 32.16                       |
|                            | B2C3        | 106                        | 20.98                            | 71.23                         | 31.37                       |
| 35/45                      | A3          | 48                         | 16.88                            | 36.11                         | 26.05                       |
|                            | A8          | 2                          | 17.78                            | 27.82                         | 16.28                       |
|                            | B2C2        | 189                        | 19.12                            | 35.85                         | 26.27                       |
|                            | B2H2        | 99                         | 20.60                            | 29.42                         | 28.98                       |

TABLE 11 – Influence de l'amplitude de contrainte sur la durée de vie

Les deux dernières colonnes de la TABLE 11 indiquent les valeurs des modules calculées sur la phase de déchargement puis de chargement du 1<sup>er</sup> cycle de l'essai et permettent de dresser deux constats :

- Tout d'abord, les valeurs de ces modules sont cette fois beaucoup plus dispersées, de plus certaines valeurs paraissent invraisemblables et peu sensées (71 GPa, 90GPa,..). Cela pourrait être dû au manque de précision dans le relevé des données, notamment le nombre trop faible de points par cycle, les données étant enregistrées seulement toutes les 10 secondes. La durée des cycles est en moyenne de 60 secondes pour les chargements d'amplitude de 5 MPa et 100 secondes pour ceux d'amplitude de 10 MPa.
- En excluant les valeurs trop importantes, on remarque que la majorité des autres valeurs est comprise dans l'intervalle 28 - 35 GPa pour la phase de décharge et dans l'intervalle 26 - 32 GPa pour la phase de charge.

On a alors un module de décharge qui a tendance à être supérieur au module de chargement. Ce qui signifie que sur un même intervalle de contrainte parcouru, la récupération de déformation de la phase de décharge est inférieure au gain de déformation de la phase de charge, expliquant ainsi le bilan d'accroissement de la déformation sur le cycle.

L'analyse de l'évolution des modules au cours des cycles ne permet pas de mettre en évidence une tendance nette. Le résultat attendu de diminution du module au cours de l'essai et donc au fil de l'endommagement n'a donc pas pu être observé clairement durant cette campagne expérimentale. La FIGURE 38 illustre l'évolution des modules de l'essai A4.

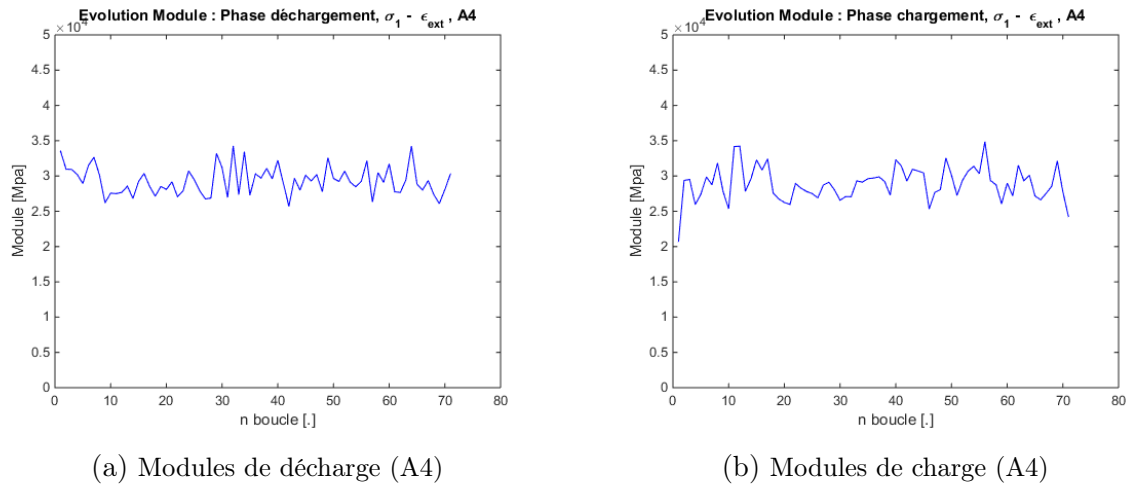


FIGURE 38 – Évolution des modules (A4)

## 16.7 Phénomène de durcissement

L'essai B3B2 a été soumis à un test cyclique entre 10 et 20 MPa. L'augmentation de la déformation résiduelle de cycle en cycle étant très faible, l'essai a été stoppé après 8400 cycles. L'échantillon a ensuite été soumis à un test de compression simple. La résistance obtenue est de 75 MPa, or celles enregistrées pour les deux autres échantillons du même bloc étaient de 66,8 et 69 MPa. Le chargement cyclique à faible niveau de contrainte subi par l'échantillon semble donc l'avoir renforcé (durcissement) plutôt que de l'avoir endommagé.

La FIGURE 39 montre la rupture de l'échantillon B3B2 après le test de compression simple. On constate une rupture conique, synonyme d'un déroulement normal de l'essai.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées afin d'expliquer qu'une telle résistance ait été observée :

- L'échantillon a subi un réarrangement de sa structure provoquant ainsi un durcissement du matériau. Ce phénomène a été constaté sur des roches salines qui après avoir subi une période de compression cyclique à un niveau de charge faible ( $< 40\%$  de la résistance) ont présenté une augmentation allant jusqu'à  $170\%$  de leur résistance. Cependant, le béton, contrairement aux roches salines, ne présente pas une structure cristalline et semble donc moins sujet à un durcissement par réarrangement de sa structure, du moins pas aussi conséquent.
- Malgré que l'échantillon ait été surfacé, il ne présente pas pour autant des bases parfaitement planes. L'essai cyclique pourrait avoir comme effet de "gommer" les aspérités des surfaces de l'échantillon, entraînant ensuite une meilleure répartition de la contrainte sur la surface et par conséquent au travers de l'échantillon.
- La répartition aléatoire des granulats et des pores au sein du béton s'est avérée très favorable au sein de cet échantillon lui conférant une meilleure résistance.



(a) essai B3B2



(b) Rupture

FIGURE 39 – Résultats B3B2 en compression simple

Ce phénomène de durcissement a pu également être observé pour l'échantillon A2. En effet, celui-ci a été testé entre 40 et 45 MPa et a présenté une durée de vie de 399 cycles. Les deux autres échantillons qui ont subi le même chargement ont rompu après 9 et 106 cycles. L'échantillon A2 a ainsi la plus longue durée de vie alors qu'il a subi un pré-test entre 10 et 25 MPa d'une trentaine de cycles. La durée de vie de cet échantillon bien supérieure à celle des deux autres est certainement due en majeure partie aux défauts des échantillons d'une part et de l'application de la charge d'autre part. Cependant un léger effet de durcissement n'est pas à exclure.

La suite des essais sur les échantillons du bloc 3 auront en partie pour objectif de mieux observer ce possible effet de durcissement. Ces essais n'étant pas encore achevés au moment de la rédaction de ce travail, les résultats obtenus ne sont pas présentés dans ce rapport mais seront évoqués lors de la défense orale.

## 16.8 Mode de rupture lors des essais cycliques

Comme pour les essais de compression simple, l'analyse des échantillons post-mortem après l'essai cyclique peut renseigner sur le déroulement de l'essai. Une fois de plus, deux types de ruptures ont pu être observés à l'issue des tests. La FIGURE 40 illustre un exemple de rupture conique et diagonale pour deux des échantillons. L'ANNEXE 4 présente les ruptures de l'ensemble des échantillons.

La majorité des essais présente une rupture de type diagonale, tandis que les trois essais ayant rompu après un nombre de cycles très faible ( $<10$ ), présentent une rupture conique.

On pourrait en conclure que, contrairement à l'essai de compression simple, une rupture de type diagonale semble donc être un résultat acceptable et renseignant du bon déroulé de l'essai de compression cyclique. Cependant au vu des défauts des échantillons (taille importante des granulats par rapport à la section) et de l'application de la charge (possible excentrement), cette hypothèse n'est pas forcément correcte.

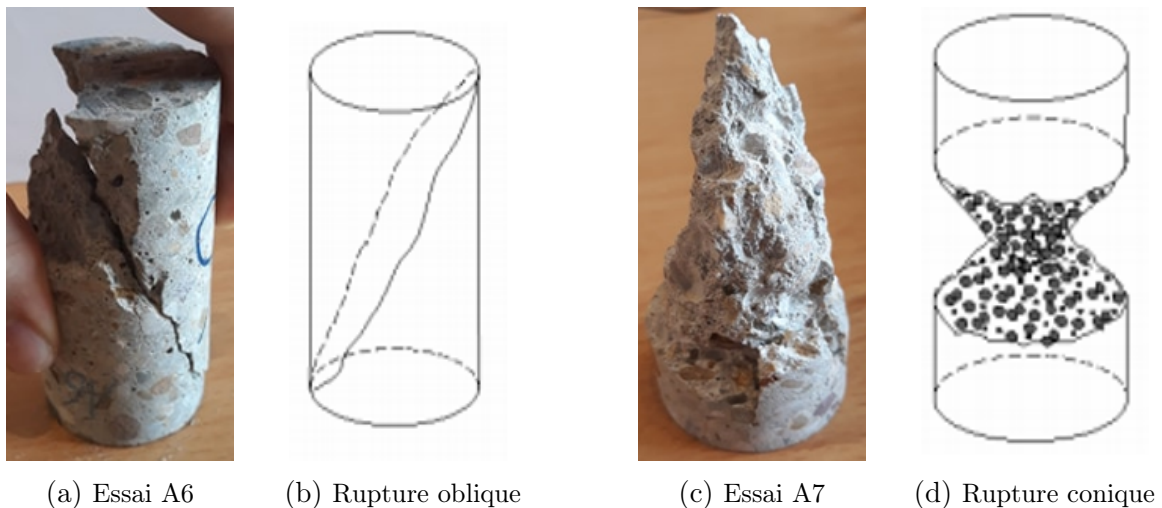


FIGURE 40 – Rupture type des essais cycliques

## 16.9 Variable de dommages

La SECTION 9 explique différentes méthodes présentées dans la littérature permettant d'évaluer l'endommagement du matériau au cours de sa durée de vie. Au vu des données qui ont pu être mesurées durant les essais, les variables de dommages pouvant être étudiées sont celles basées sur les déformations verticales.

Pour rappel, la méthode de la déformation maximale se calcule comme suit :

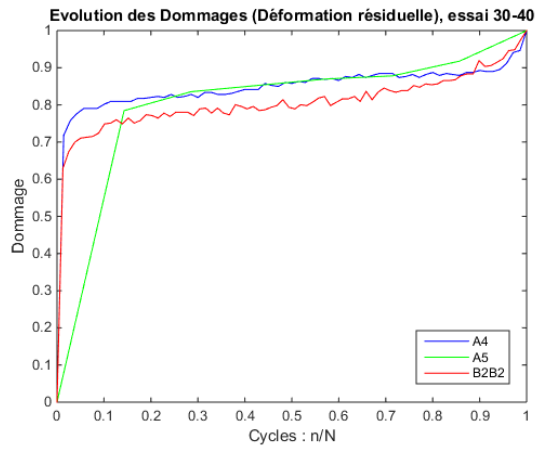
$$D = \frac{\epsilon_{max}^n - \epsilon_{max}^0}{\epsilon_{max}^f - \epsilon_{max}^0}$$

La déformation initiale  $\epsilon_{max}^0$  est calculée en traçant la tangente à la première mise charge sur la courbe  $\sigma - \epsilon$  et en la prolongeant jusqu'à l'abscisse. La déformation finale est considérée comme étant celle de l'avant dernier cycle. La déformation finale du dernier cycle, à l'instant de la rupture donc, est difficile à mesurer précisément avec le matériel utilisé dont l'enregistrement n'est pas réalisé en continu. La sauvegarde de la déformation est réalisée après un très léger laps de temps ce qui entraîne une mesure de la déformation finale parfois fort surestimée.

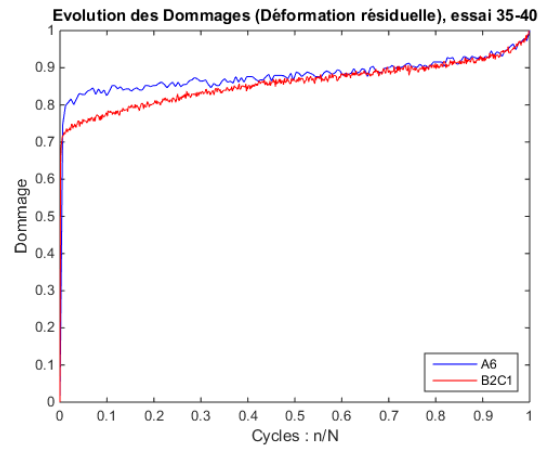
On constate que la déformation de la première mise en charge est très importante et peut représenter entre 70 et 90 % de la déformation finale. L'endommagement progresse très lentement durant la majeure partie de l'essai et s'accélère en fin d'essai.

L'essai A2 se différencie par un taux de dommage suite à la première mise en charge très faible : cela est dû au fait que cet échantillon a d'abord subi un "pré-test" entre 10 et 25 MPa durant un trentaine de cycles. Cet essai à basse contrainte a été le premier réalisé et avait pour but de paramétrer l'algorithme et la presse. Lors de ce pré-test, la déformation a oscillé entre  $1,75 \times 10^{-3}$  et  $1,10 \times 10^{-3}$ . Après ce pré-test, l'essai A2 a été complètement déchargé avant la réalisation de l'essai à 40 - 45 MPa. La valeur moyenne de la déformation, suite à la première mise en charge des essais montant jusqu'à 45 MPa, est de  $\approx 3 \times 10^{-3}$ , or celle mesurée pour l'essai A2 40-45 MPa n'est que de  $1,7 \times 10^{-3}$ . La déformation subie lors du pré-test est donc en partie inélastique. Ce qui explique pourquoi cet échantillon semble être moins endommagé en début de test comparé aux autres échantillons. La déformation irréversible subie lors du pré-test n'est pas reprise en compte dans le calcul du dommage.

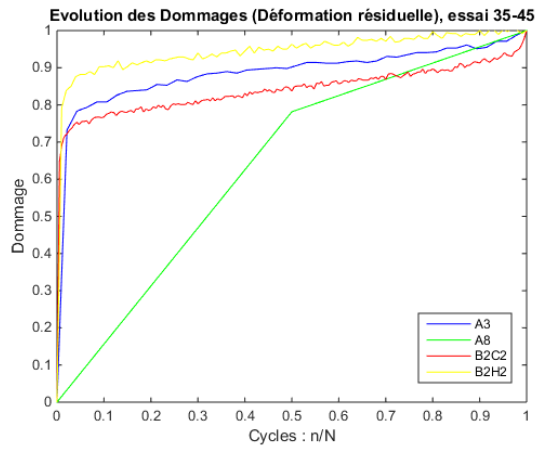
## 16 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES ESSAIS CYCLIQUES



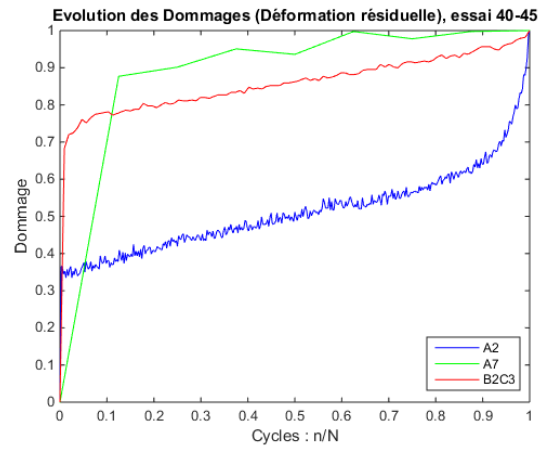
(a) essais 30-40 MPa



(b) essais 35-40 MPa



(c) essais 35-45 MPa



(d) essais 40-45 MPa

FIGURE 41 – Dommages : méthode des déformations

## Quatrième partie

# Conclusion et recommandation

## 17 Conclusion

L'objectif de ce travail de fin d'études est de mesurer la résistance de matériau tel le béton soumis à un niveau de contraintes répétées. Les résultats observés confirment, à quelques exceptions près, les observations développées dans la littérature.

En effet, après cette campagne expérimentale, nous pouvons conclure que l'endommagement du béton utilisé apparaît à partir d'un niveau de contrainte supérieur à 60% de la résistance monotone du matériau :

- lorsque l'amplitude augmente, à charge constante, la durée de vie du matériau diminue : à haut niveau de contrainte ( $>60\%$ ), une amplitude de 10 MPa entraîne une durée de vie de plusieurs dizaines de cycles tandis qu'une amplitude de 5 MPa entraîne une durée de vie de quelques centaines de cycles ;
- lorsque la charge maximale augmente, à amplitude constante, la durée de vie diminue aussi ;
- les chargements à bas niveau de contrainte provoquent une déformation initiale, puis la déformation cesse de croître ;
- le pré-chargement du matériau à basse contrainte semble provoquer un léger effet de durcissement du matériau ainsi qu'un "effet galette" local aux bases, ce qui aurait pour conséquence de mieux répartir la contrainte au sein du matériau et d'en augmenter la durée de vie.

Cette campagne expérimentale a aussi permis de mettre en évidence l'importance de bien préparer les essais en amont. Il est essentiel de connaître les caractéristiques propres au matériel utilisé et d'en déceler les éventuelles failles. La nature intrinsèque des échantillons de béton n'est pas totalement connue du fait que la fabrication de ce béton a été élaborée par une autre équipe. En effet, tous les aspects de la mise en oeuvre n'ont pu être complètement transmis (ouvrabilité, période de séchage, étuvage,...). Sans cette mise au point de départ, la fiabilité des résultats obtenus n'est pas garantie.

J'ai pu constater, au fur et à mesure des essais, quelques résultats "anormaux" qui peuvent s'expliquer notamment par une mise en oeuvre de l'essai dans des conditions non idéales.

Ajoutons que les résultats fluctuants peuvent aussi se justifier par le fait que de très nombreux paramètres parasites entrent en compte et qu'il n'est pas aisé de les isoler et de les évaluer de manière optimale.

## 18 Perspectives de recherche

Dans cette section, je présente des pistes d'amélioration à apporter à la méthodologie expérimentale présentée dans ce rapport, dans l'optique d'une éventuelle nouvelle campagne, afin de réduire l'influence de certains paramètres autres que ceux étudiés.

### Presse et appareillage de mesure

Un première piste d'amélioration serait l'utilisation d'une presse plus adaptée à une mise en charge cyclique associée à une acquisition et un traitement des données plus rapide.

Dans le cas où la même presse est utilisée, je conseillerai l'usage d'extensomètres, pour palier au problème des mesures parfois peu fiables des capteurs de déformation rencontré dans ce travail. Ce type de capteur, mesurant la déformation axiale est directement déposé au contact de l'échantillon et devrait donc être moins affecté par d'éventuels déplacements intempestifs du montage. Cet extensomètre axial peut être combiné à un extensomètre circonferentiel. Ce type d'extensomètre est parfaitement adapté à la mesure des déformations circonferentielles d'échantillons rocheux ou en béton cylindriques. L'utilisation combinée de ces deux capteurs permettrait d'obtenir des résultats plus fiables et plus riches. En effet, durant ce travail, il n'a pas été possible d'observer les déformations radiales. Celles-ci peuvent aider à mieux comprendre le phénomène d'agrandissement (élargissement) des fissures et donc de l'endommagement du matériau.

### Matériau et taille d'échantillon

Afin d'avoir des résultats plus fiables, il est conseillé d'utiliser en compression simple, des diamètres d'échantillons d'au moins 50 mm. Le chargement applicable par la presse du laboratoire étant limité, il faudrait alors utiliser un matériau de résistance inférieure à celle du béton de ce travail (max béton C40/C50).

En ce qui concerne la granulométrie, il est conseillé d'utiliser au moins un diamètre de granulat maximum inférieur à 1/10 du diamètre de l'échantillon, et de préférence un diamètre de 1/20. Il serait souhaitable d'utiliser un diamètre de granulat maximum inférieur à 2,5 mm. L'utilisation d'un mortier serait alors plus appropriée ( toujours en substitution d'échantillons de matériau rocheux).

## Cinquième partie

# Références

## Références

- [1] B. Cerfontaine and F. Collin. *Cyclic and fatigue behavoiur of rock materials : review, interpretation and research perspectives*, rock mechanics and rock engineering, volume 51, issue 2, pp.391-414, 2018.
- [2] Y. Guo, C Yang, L. Wang, and F. Xu. *Effects of Cyclic Loading on the Mechanical Properties of Mature Bedding Shale*, advances in civil engineering, 2018.
- [3] C. Scholz and R. Kranz. *Notes on dilatancy recovery*. j geophys res 79(14) :2132–2135, 1974.
- [4] M. Zoback and J. Byerlee. *The effect of cyclic differential stress on dilatancy in westerly reduced repeated plied the is sub- on dilatancy in westerly granite*. j geophys res 80(11) :1526–1530, 1975.
- [5] J. Xiao, D. Ding, G. Xu, and F. Jiang. *Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock*. int j rock mech min sci 46(3) :643–648., 2009.
- [6] J. Xiao, D. Ding, F. Jiang, and G. Xu. *Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading.*, int j rock mech min sci 47(3) :461–468., 2010.
- [7] J.G.M van Mier. *Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions.*, ph. d. thesis technical university of Eindhoven., 1984.
- [8] Gernay T. *A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation including transient creep and cooling down phases*, thèse de doctorat, université de Liège, 2012.
- [9] I.D. Karsan and J.O. Jirsa. *Behavior of concrete under compressive loadings*, j. struct. div. asce., 95(12), pp. 2535-2563., 1969.
- [10] R. Charlier, F. Collin, and A. Bolle. *Mécanique des roches et des massifs rocheux*, notes de cours, 2015.
- [11] CBR. *Évolution de la résistance à la compression*, <https://www.cbr.be/fr/evolution-de-la-resistance-a-la-compression>, (consulté 24.05.2020).
- [12] B. Abdelmoutalib. *Comportement cyclique et tenue en fatigue sous chargement multiaxial d'un polyéthylène : expériences et critère d'endurance*. sciences de l'ingénieur [physics]. isae-ensma ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique - Poitiers, 2010.
- [13] S. Zhang, Y. Lai, X. Zhang, Y. Pu, and W. Yu. *Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition*. tunn undergr space technol 19(3) :295–302., 2004.
- [14] Q. Liu, S. Huang, Y. Kang, and X. Liu. *Cold regions science and technology a prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze thaw*. cold reg sci technol 120 :96–107., 2015.
- [15] Z. Wang, S. Li, L. Qiao, and Q. Zhang. *Finite element analysis of the hydro-mechanical behavior of an underground crude oil storage facility in granite subject to cyclic loading during operation*.int j rock mech min sci 73 :70–81., 2015.

## RÉFÉRENCES

- [16] A. Voznesenskii, M. Krasilov, Y. Kutkin, M. Tavostin, and Y. Osipov. *Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings*. int j fatigue 97 :70–78., 2017.
- [17] B. Steffen. *Prospects for pumped-hydro storage in Germany*. energy policy 45 :420–429., 2012.
- [18] E. Pujades, T. Willems, S. Bodeux, P. Orban, and A. Dassargues. *Underground pumped storage hydroelectricity using abandoned works (deep mines or open pits) and the impact on groundwater flow*. hydrogeol j., 2016.
- [19] M. Gong and I. Smith. *Effect of waveform and loading sequence on low-cycle compressive fatigue life of spruce.*, j mater civ eng 15(february) :93–99, 2003.
- [20] MN. Bagde and V. Petroš. *Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading.*, rock mech rock eng 38(3) :169–196., 2005.
- [21] N. Erarslan, H. Alehossein, and DJ. Williams. *Tensile fracture strength of Brisbane tuff by static and cyclic loading tests.*, rock mech rock eng 47(4) :1135–1151., 2014.
- [22] E. Liu and S. He. *Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions*. eng geol 125 :81–91., 2012.
- [23] Y. Guo, C. Yang, and H. Mao. *Mechanical properties of Jintan mine rock salt under complex stress paths*. j rock mech min sci 56 :54–61., 2012.
- [24] J. Le, J. Manning, and J. Labuz. *Scaling of fatigue crack growth in rock*. int j rock mech min sci 72 :71–79., 2014.
- [25] K. Fuenkajorn and D. Phueakphum. *Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt*. eng geol 112(1– 4) :43–52., 2010.
- [26] Z. Wang, S. Li, L. Qiao, and J. Zhao. *Fatigue behavior of granite subjected to cyclic loading under triaxial compression condition.*, 2013.
- [27] L. Ma, X. Liu, M. Wang, H. Xu, R. Hua, P. Fan, S. Jiang, G. Wang, and Q. Yi. *Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading*. int j rock mech min sci 62 :34–41., 2013.
- [28] X. Jiang, L. Shu-chun, T. Yun-qi, T. Xiao-jun, and W. Xin. *Acoustic emission characteristic during rock fatigue damage and failure*. proc earth planet sci 1(1) :556–559., 2009.
- [29] E. David, N. Brantut, A. Schubnel, and R. Zimmerman. *Sliding crack model for nonlinearity and hysteresis in the uniaxial stress strain curve of rock*. int j rock mech min sci 52 :9–17., 2012.
- [30] J. Schijve. *Fatigue of structures and materials*. fatigue struct mater 25 :679–702., 2003.
- [31] P. Attewell and W. Farmer. *Fatigue behaviour of rock*. int j rock mech min sci 10 :1–9, 1973.
- [32] J. Fan, J. Chen, D. Jiang, S. Ren, and J. Wu. *Fatigue properties of rock salt subjected to interval cyclic pressure*. int j fatigue 90 :109– 115., 2016.
- [33] B. Atkinson. *Subcritical crack growth in geological materials*. geophys res 89(b6) :4077., 1984.
- [34] A. Evans and R. Fuller. *Crack propagation in ceramic materials under cyclic loading conditions*. metall trans 5 :27–33, 1974.

## RÉFÉRENCES

- [35] J. Fan, J. Chen, D. Jiang, A. Chemenda, J. Chen, and J. Ambre. *Discontinuous cyclic loading tests of salt with acoustic emission monitoring*. int j fatigue 94 :140–144., 2017.
- [36] S. Yamashita, F. Sugimoto, T. Imai, D. Namsrai, M. Yamauchi, and N. Kamoshida. *The relationship between the failure process of the creep or fatigue test and of the conventional compression test on rock*. in : 9th isrm congress, international society for rock mechanics, 1999.
- [37] CH. Scholz and TA. Koczynski. *Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads*. j geophys res 84(b10) :5525., 1979.
- [38] LS. Costin and DJ Holcomb. *Time-dependent failure of rock under cyclic loading*. tectonophysics 79(3–4) :279–296., 1981.
- [39] European Committee for Standardization. *CEN Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings* , Brussels, 2004b.
- [40] M. Jirasek and Z.P. Brazant. *Inelastic analysis of structures*, Chichester : Wiley, 2002.
- [41] B. Bun, P.AND Espion. *Fatigue behavior of high performance concrete in compression*, université libre de bruxelles, brussels, Belgium, 2008.
- [42] W. Cui, M-m. Liu, H-f. Song, W. Guan, and H-m. Yan. *nfluence of initial defectsondeformation and failure of concrete under uniaxial compression*, engineering fracturemechanics, 2020.
- [43] P. Berest, J. Bergues, and Nguyen M. *Comportement des roches au cours de la rupture : applications à l’interprétation d’essais sur des tubes épais* , revue française de géotechnique numéro 9, 1985.
- [44] G. Bavelard and H. Beinish. *Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes*, CERIB, 2006.
- [45] G. Royer-Carfagni and W. Salvatore. *The characterization of marble by cyclic compression loading : experimental results*. mech cohes frict mater 5(7) :535–563., 2000.
- [46] BC. Haimson and CM. Kim. *Mechanical behaviour of rock under cyclic fatigue*. In : *Cording EJ (ed) Stability of rock slopes. Proceedings of the 13th symposium on rock mechanics*. asce, new york, pp 845–863, 1971.
- [47] S. Cattaneo and J. Labuz. *Damage of marble from cyclic loading*. j mater civ eng 13(december) :459–465, 2001.
- [48] Q. Zhu, D. Kondo, J. Shao, and V. Pensee. *Micromechanical modelling of anisotropic damage in brittle rocks and application*. int j rock mech min sci 45(4) :467–477., 2008.
- [49] A. Pouya, C. Zhu, and C. Arson. *Micro-macro approach of salt viscous fatigue under cyclic loading*. mech mater 93 :13–31., 2016.
- [50] T. Bastian, B. Connelly, C. Lazo Olivares, N. Yfantidis, and A. Taheri. *Progressive damage of hawkesbury sandstone subjected to systematic cyclic loading*. min educ aust j res proj rev 3 :7–14, 2014.
- [51] A. Taheri, A. Royle, Z. Yang, and Y. Zhao. *Study on variations of peak strength of a sandstone during cyclic loading*. geomech geophys geo-energy geo-resour 2(1) :1–10., 2016.
- [52] M. Ortiz. *A constitutive theory for the inelastic behavior of concrete.*, mechanics of materials, 4, pp. 67-93., 1985.

## RÉFÉRENCES

- [53] D. Jiang, J. Fan, J. Chen, L. Li, and Y. Cui. *A mechanism of fatigue in salt under discontinuous cycle loading*. int j rock mech min sci 86 :255–260., 2016.

## Sixième partie

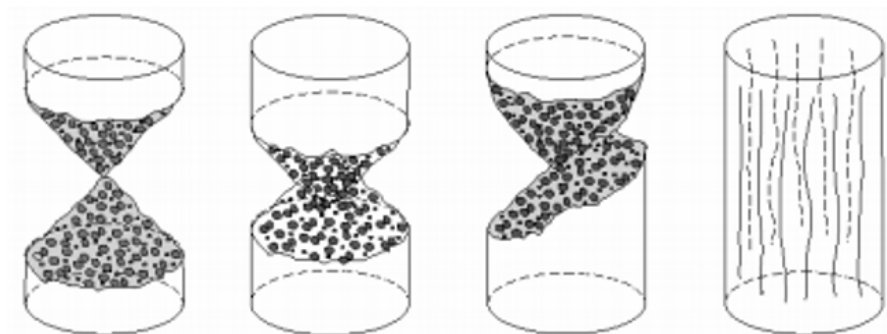
# Annexes

### Annexe 1 : Caractéristiques des échantillons

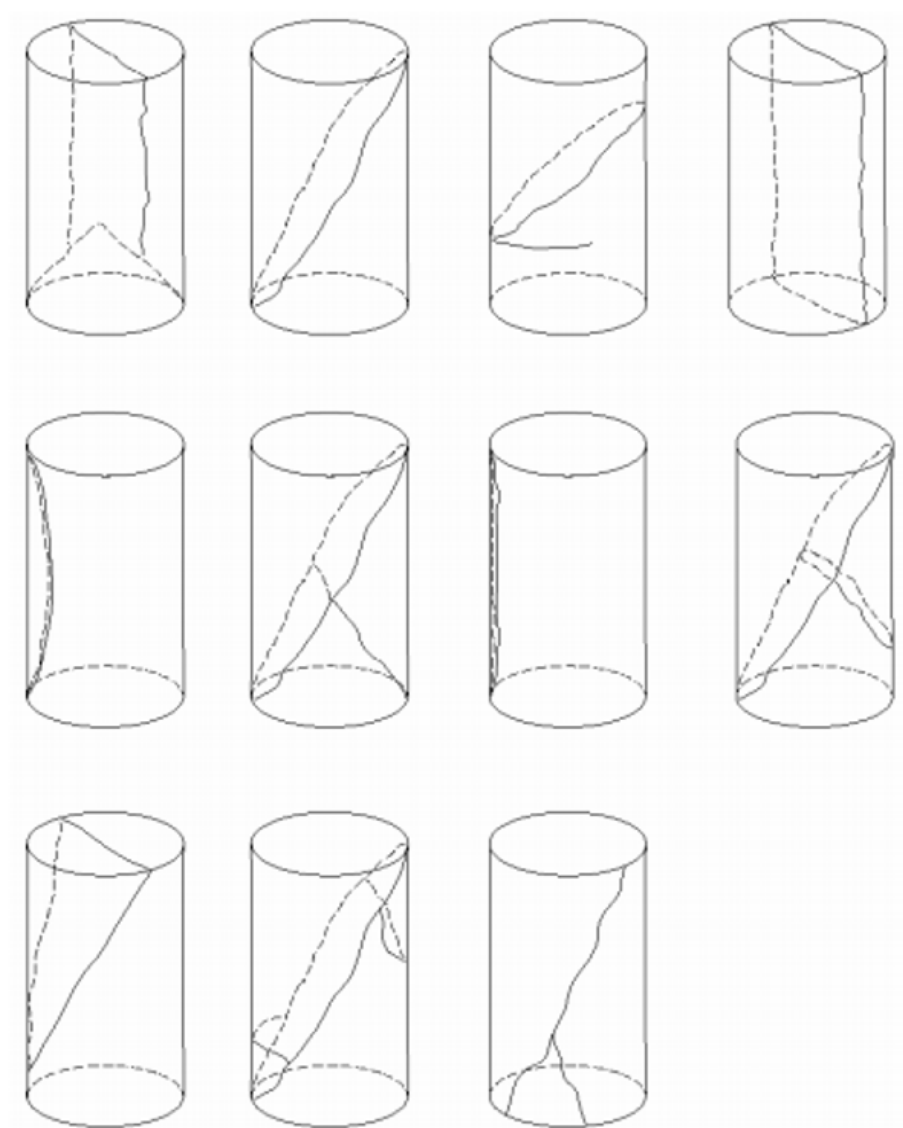
| Dénomination          |    | Caractéristiques de l'échantillon |        |           |         |                         |                               |                            |
|-----------------------|----|-----------------------------------|--------|-----------|---------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|
|                       |    | Diam (mm)                         | H (mm) | poids (g) | V (cm3) | Masse volumique (kg/m3) | Mesure ultrasonique (micro s) | Vitesse ultrasonique (m/s) |
| B<br>l<br>o<br>c<br>1 | A1 | 40.55                             | 84.48  | 241.22    | 109.100 | 2211.00                 | 19.4                          | 4354.64                    |
|                       | A2 | 40.45                             | 86.84  | 246.15    | 111.596 | 2205.73                 | 19.9                          | 4363.82                    |
|                       | A3 | 40.42                             | 86.6   | 244.61    | 111.122 | 2201.27                 | 19.8                          | 4373.74                    |
|                       | A4 | 40.45                             | 84.89  | 242.03    | 109.090 | 2218.63                 | 19.8                          | 4287.37                    |
|                       | A5 | 40.42                             | 85.57  | 244.3     | 109.800 | 2224.95                 | 19.3                          | 4433.68                    |
|                       | A6 | 40.44                             | 83.96  | 238.04    | 107.841 | 2207.32                 | 19.2                          | 4372.92                    |
|                       | A7 | 40.43                             | 85.2   | 243.55    | 109.380 | 2226.65                 | 19                            | 4484.21                    |
|                       | A8 | 40.41                             | 86.58  | 247.38    | 111.041 | 2227.82                 | 19.7                          | 4394.92                    |
|                       |    |                                   |        |           |         |                         |                               |                            |
| B<br>l<br>o<br>c<br>2 | H1 | 40.48                             | 86.89  | 247.73    | 111.825 | 2215.33                 | 19.32                         | 4497.41                    |
|                       | H2 | 40.49                             | 86.01  | 243.99    | 110.748 | 2203.12                 | 19.28                         | 4461.10                    |
|                       | C1 | 40.42                             | 86.68  | 244.38    | 111.225 | 2197.17                 | 19.52                         | 4440.57                    |
|                       | C2 | 40.45                             | 87.93  | 249.5     | 112.996 | 2208.04                 | 19.56                         | 4495.40                    |
|                       | C3 | 40.46                             | 85.65  | 243.04    | 110.121 | 2207.03                 | 18.92                         | 4526.96                    |
|                       | B1 | 40.46                             | 85.98  | 243.99    | 110.545 | 2207.16                 | 18.96                         | 4534.81                    |
|                       | B2 | 40.48                             | 86.92  | 246.27    | 111.864 | 2201.51                 | 19.48                         | 4462.01                    |
|                       |    |                                   |        |           |         |                         |                               |                            |
| B<br>l<br>o<br>c<br>3 | H1 | 40.5                              | 87.26  | 249.44    | 112.413 | 2218.97                 | 19.3                          | 4521.24                    |
|                       | H2 | 40.48                             | 84.73  | 243.94    | 109.046 | 2237.05                 | 18.48                         | 4584.96                    |
|                       | C1 | 40.47                             | 85.30  | 243.57    | 109.722 | 2219.84                 | 18.93                         | 4505.94                    |
|                       | C2 | 40.48                             | 86.00  | 245.69    | 110.674 | 2219.95                 | 18.83                         | 4566.91                    |
|                       | C3 | 40.49                             | 85.87  | 247.15    | 110.561 | 2235.42                 | 19.02                         | 4515.65                    |
|                       | B1 | 40.48                             | 86.86  | 248.86    | 111.787 | 2226.20                 | 18.56                         | 4679.96                    |
|                       | B2 | 40.48                             | 84.87  | 243.19    | 109.226 | 2226.49                 | 19.1                          | 4443.46                    |
|                       |    |                                   |        |           |         |                         |                               |                            |

**Annexe 2 :** Normes des ruptures en compression simple (NF EN 12390-3)

Ruptures correctes d'éprouvettes cylindriques [44] :



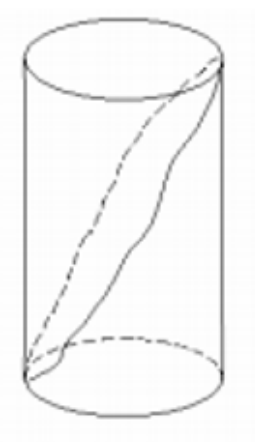
Ruptures incorrectes d'éprouvettes cylindriques [44] :



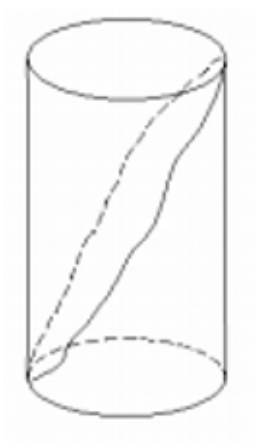
### Annexe 3 : Ruptures des échantillons soumis à compression simple



(a) essai A1



(b) essai B2B1



(a) essai B2H1



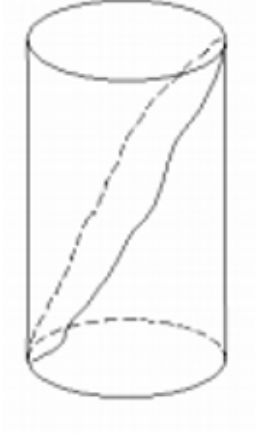
(b) essai B3B1



(a) essai B3H1



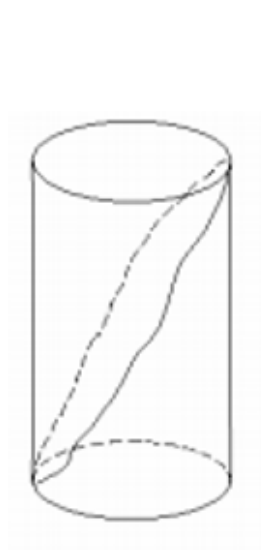
(b) essai B3B2



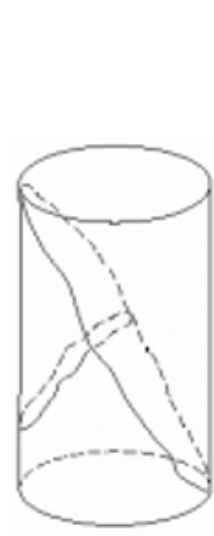
#### Annexe 4 : Ruptures des échantillons soumis à compression cyclique



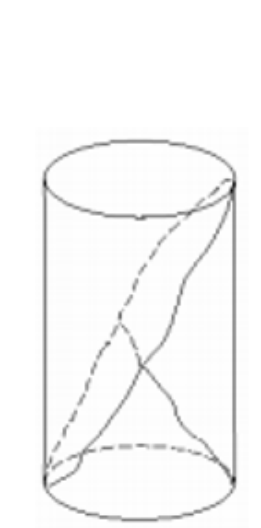
(a) essai A2



(b) essai A3



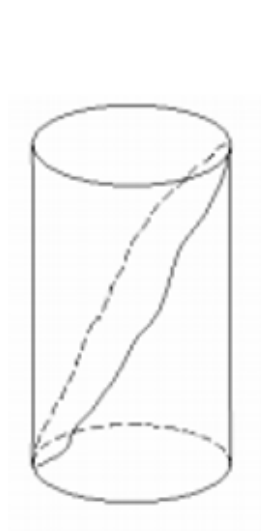
(a) essai A4



(b) essai A5



(a) essai A6



(b) essai A7

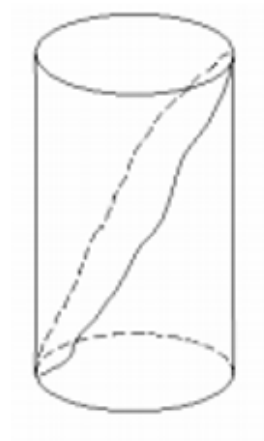




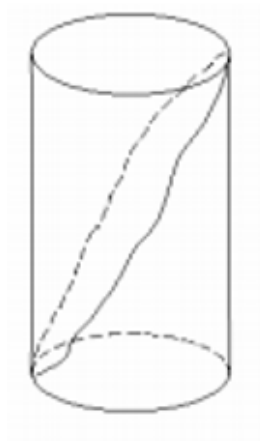
(a) essai A8



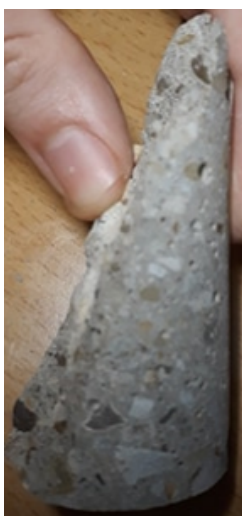
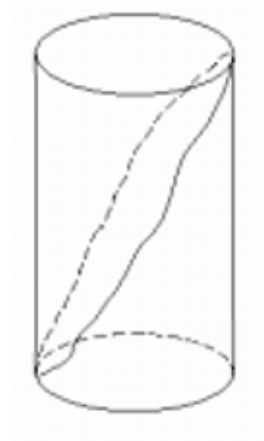
(b) essai B2H2



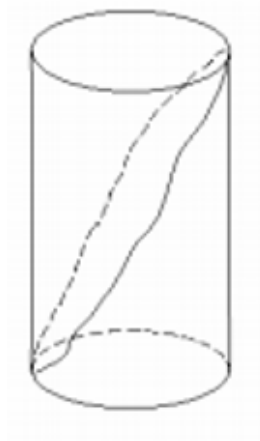
(a) essai B2C1



(b) essai B2C2



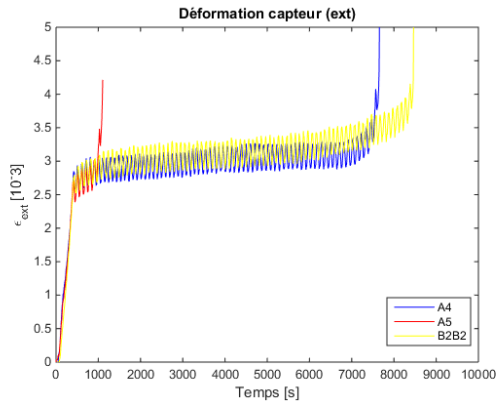
(a) essai B2C3



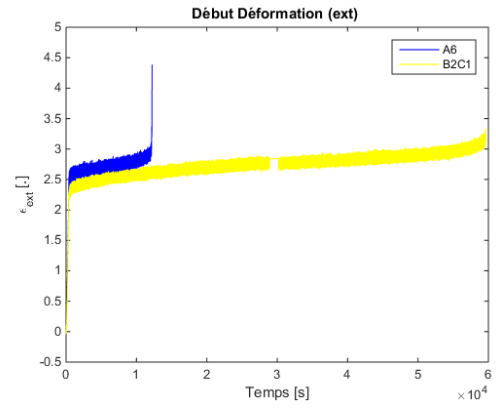
(b) essai B2B2



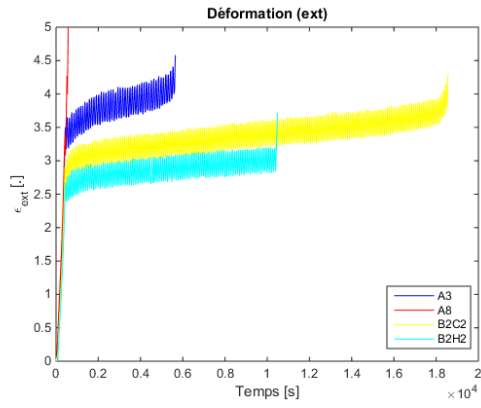
## Annexe 5 : Évolution de la déformation



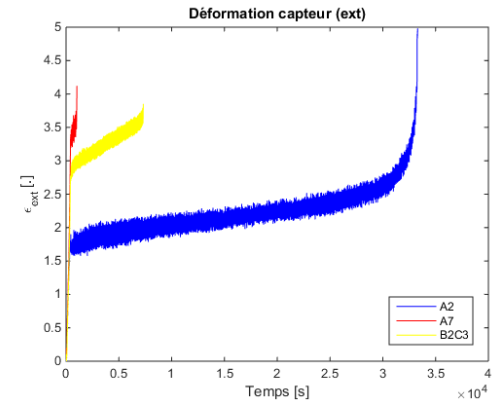
(a) essais 30-40



(b) essais 35-40



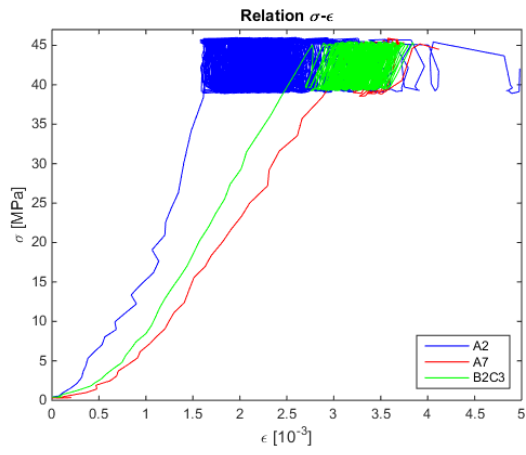
(c) essais 35-45



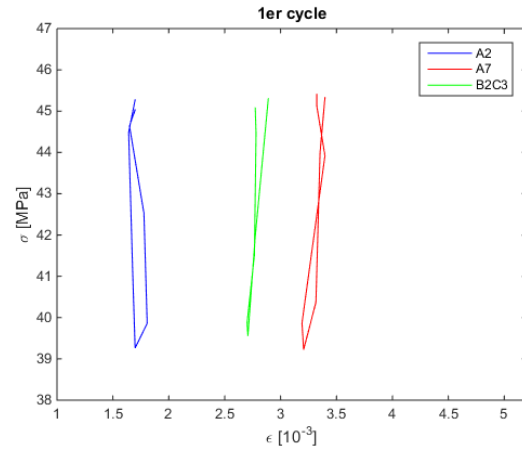
(d) essais 40-45

## Annexe 6 : Courbe $\sigma - \epsilon$

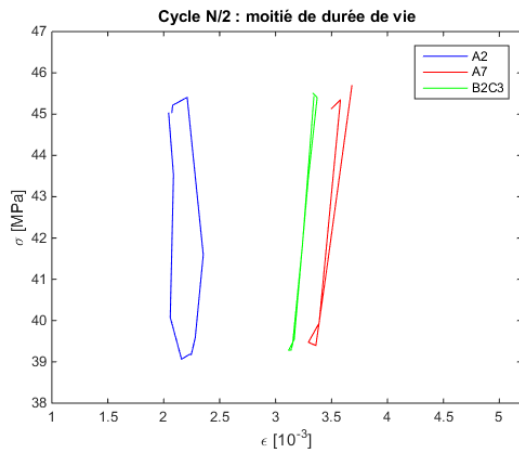
Chargement 40 - 45 MPa



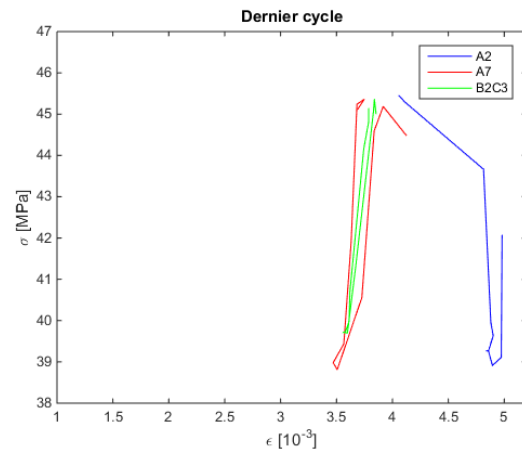
(a) essais 40 - 45 : relation  $\sigma - \epsilon$



(b) essais 40-45 : premier cycle

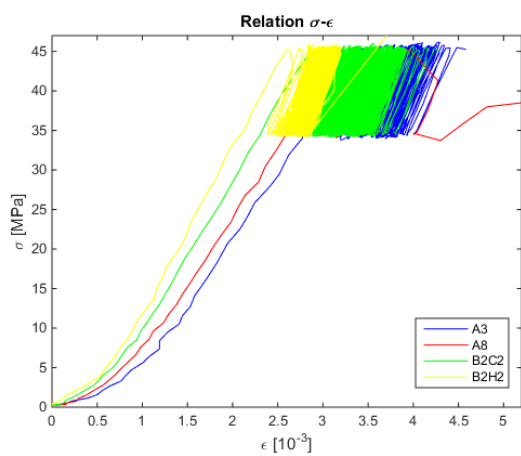


(c) essais 40-45 : cycle N/2

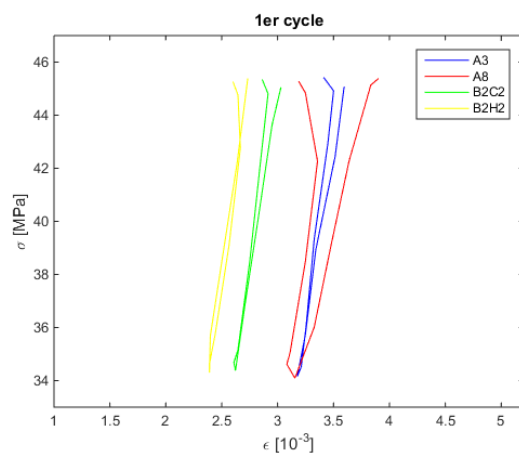


(d) essais 40-45 : dernier cycle

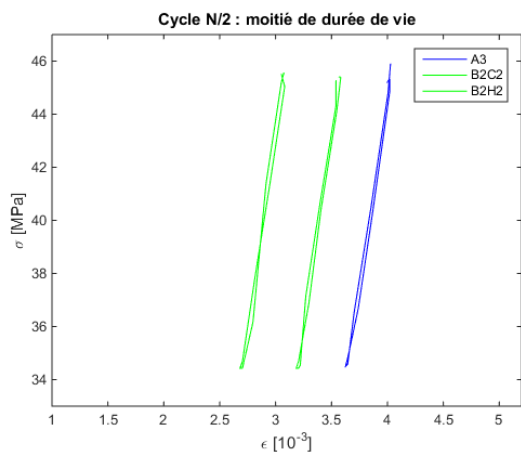
## Chargement 35 - 45 MPa



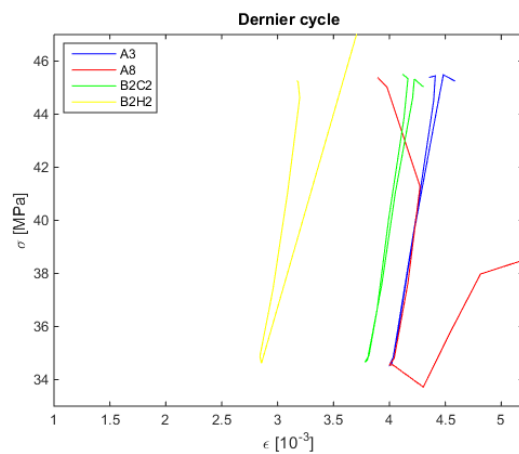
(a) essais 35 - 45 : relation  $\sigma - \epsilon$



(b) essais 35 - 45 : premier cycle

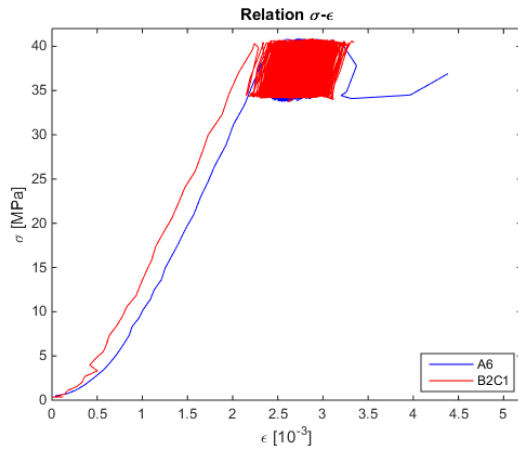


(c) essais 35 - 45 : cycle N/2

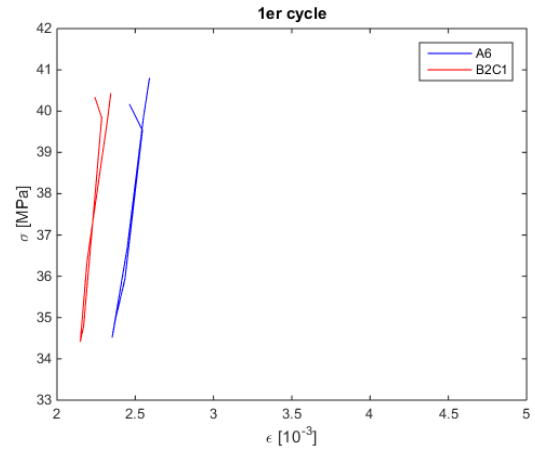


(d) essais 35 - 45 : dernier cycle

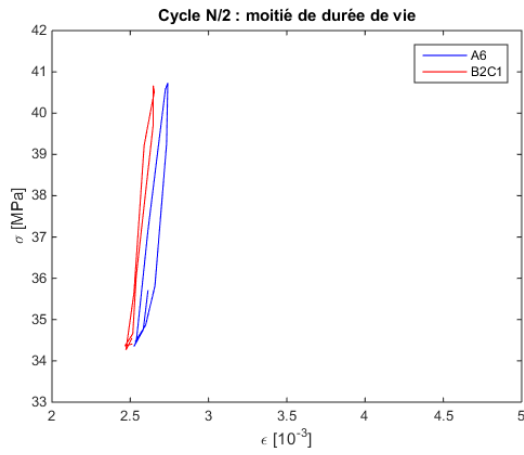
## Chargement 35 - 40 MPa



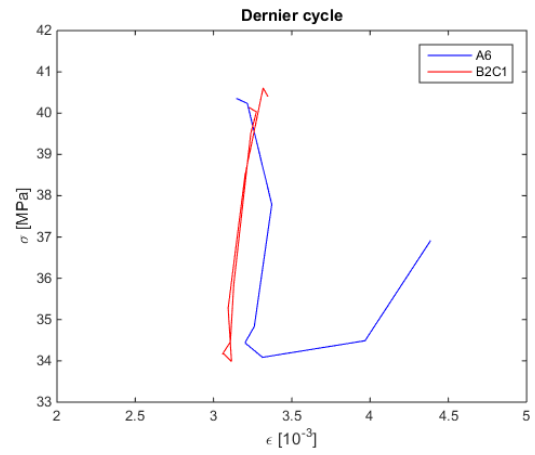
(a) essais 35 - 40 : relation  $\sigma - \epsilon$



(b) essais 35 - 40 : premier cycle



(c) essais 35 - 40 : cycle N/2



(d) essais 35 - 40 : dernier cycle